

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

ANAKELY ALVES REZENDE RODRIGUES

Silício e herbivoria no metabolismo e resistência induzida em milho e sorgo

Uberlândia/MG

2020

ANAKELY ALVES REZENDE RODRIGUES

Silício e herbivoria no metabolismo e resistência induzida em milho e sorgo

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em  
Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia,  
como requisito parcial para obtenção do título de  
doutor em

Área de concentração: Fitotecnia

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Sampaio

Uberlândia/MG

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

R696s      Rodrigues, Anakely Alves Rezende, 1984-  
2020      Silício e herbivoria no metabolismo e resistência induzida em milho  
e sorgo [recurso eletrônico] / Anakely Alves Rezende Rodrigues. - 2020.

Orientador: Marcus Vinicius Sampaio.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.6009>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Sampaio, Marcus Vinicius, 1971-, (Orient.). II.  
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em  
Agronomia. III. Título.

---

CDU: 631

Rejâne Maria da Silva (Bibliotecária) – CRB6/1925

ANAKELY ALVES REZENDE RODRIGUES

Silício e herbivoria no metabolismo e resistência induzida em milho e sorgo

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em  
Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia,  
como requisito parcial para obtenção do título de  
doutor em

Área de concentração: Fitotecnia

Uberlândia/MG, 21 de dezembro de 2020.

Banca Examinadora:

---

Fernando Juari Célotto – Doutor (UFU)

---

Vanessa Andaló Mendes de Carvalho – Doutora (UFU)

---

Reinaldo Silva Oliveira Canuto – Doutor (IFTM)

---

Diego Tolentino de Lima – Doutor (COMIGO)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Secretaria da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia  
 Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppga.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Tese, 015/2020 PPGAGRO				
Data:	Vinte e um de dezembro de dois mil e vinte	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	11513AGR001				
Nome do Discente:	Anakely Alves Rezende Rodrigues				
Título do Trabalho:	Silício e herbivoria no metabolismo e resistência induzida em milho e sorgo.				
Área de concentração:	Fitotecnia				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Fernando Juari Celoto - UFU; Vanessa Andaló Mendes de Carvalho - UFU; Reinaldo Silva Oliveira Canuto - IFTM; Diego Tolentino de Lima - Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano, Marcus Vinicius Sampaio - UFU orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Marcus Vinicius Sampaio, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Vinicius Sampaio, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/12/2020, às 12:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Vanessa Andalo Mendes de Carvalho, Professor(a) do**



**Magistério Superior**, em 21/12/2020, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Juari Celoto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/12/2020, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Reinaldo Silva Oliveria Canuto, Usuário Externo**, em 21/12/2020, às 12:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diego Tolentino de Lima, Usuário Externo**, em 21/12/2020, às 12:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2396155** e o código CRC **A403C5A2**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, por me conceder saúde e sabedoria para seguir sempre em frente. Obrigada por ser a minha força e o meu guia.

Aos meus pais, Odilon (†) e Elizabeth, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida, inclusive minha mãe na condução dos meus experimentos. Por acreditarem em mim, e não medirem esforços para a concretização dos meus sonhos. Sem vocês, nada seria possível. Amo vocês além da vida!

Aos meus irmãos, avós, sogros, cunhadas, minha comadre Adriana e toda minha família e amigos, pelas orações e torcida para meu sucesso. Meu amor por vocês é infinito!

Ao meu esposo Rodrigo e meus filhos Joaquim e Alice por estarem comigo nessa jornada, tudo foi para vocês e por vocês. Vocês são minha razão de viver, meu alicerce. Amo vocês incondicionalmente.

Ao professor e orientador Marcus Vinicius Sampaio, por acreditar no meu trabalho, dando-me a liberdade necessária, dividindo comigo as expectativas e entendendo minhas crises. Minha especial admiração e gratidão.

Aos colegas do LACOB e Laboratório de Entomologia, Diego, Gabriel, David, Bruna, André, Thiago, Diana e tantos outros. E também aos colegas Adílio, Fernanda, Maria Luiza, e ao professor Fernando Celoto que todas as vezes que precisei se dispuseram a me ajudar.

Deixo meu muito obrigada ao pessoal da Fazenda Capim Branco, Frederico e Ramon, o pessoal do refeitório, os prestadores de serviço a campo e tratoristas, em especial o Baianinho, que foi um braço direito.

Agradeço à Ercal e à Agronelli pela doação do Calcário e AgroSilício para condução dos experimentos.

Agradeço aos laboratórios LAFER, LABAS, LABIBI e IBTEC por cederem seus préstimos, funcionários e espaço físico.

Agradeço de forma geral ao ICIAG, por ter possibilitado esta experiência incrível que foi o doutorado.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante os anos do curso.

**Muito obrigada!**

## RESUMO

REZENDE-RODRIGUES, A.A. **Silício e herbivoria no metabolismo e resistência induzida em milho e sorgo**. 2020. 96 p. Tese (Doutorado em Agronomia / Fitotecnia) – Universidade Federal de Uberlândia/UFU, Uberlândia<sup>1</sup>.

A utilização de adubação silicatada é uma ferramenta promissora para o manejo de pragas, pois o silício (Si) atua como indutor de resistência seja pela mudança estrutural da planta ou pela produção de compostos de defesa, que podem variar de acordo com o tipo de herbivoria. Os objetivos deste trabalho foram avaliar a influência do silício e da herbivoria no metabolismo e indução de resistência em milho e sorgo. Para tanto foram propostos dois experimentos, sendo o primeiro com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de Si via solo, na indução de resistência a *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), acumulação de Si pela planta, trocas gasosas, eficiência fotossintética e metabolismo da planta e influência sobre o rendimento da cultura do milho cultivado a campo com doses superiores a 600 kg ha<sup>-1</sup> de Si. O segundo experimento com o objetivo de avaliar os compostos químicos produzidos pela planta de sorgo relacionados a indução de resistência por Si e pela herbivoria provocada por insetos mastigadores e sugadores. O primeiro experimento foi realizado na fazenda experimental da UFU, com cinco doses de silício (0; 600; 800; 1.000; 1.200 kg ha<sup>-1</sup>) x 2 tipos de infestação de *S. frugiperda* (natural; manual). No segundo experimento plantas de sorgo cultivadas em vasos foram expostas aos estímulos de adubação com Si e/ou herbivoria por lagartas de *S. frugiperda*. O crescimento populacional de *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera: Aphididae) foi verificado nessas plantas e considerado como um terceiro estímulo. Foi avaliado o teor de silício foliar, a produção de polifenóis e FRAP e realizada a análise de metabolômica. As plantas analisadas foram comparadas com plantas controle sem os estímulos. A aplicação de silício induziu a resistência em plantas de milho a *S. frugiperda* em condições de campo, reduzindo a desfolha e aumentando o teor desse elemento na folha. Em plantas de sorgo, a herbivoria prévia por lagarta em plantas sem Si induziu resistência por antibiose à *R. maidis*, provavelmente relacionada a redução na concentração dos compostos 236,1388 e 474,3718. Indução de resistência por antibiose também foi observada em plantas com herbivoria e Si, relacionada à alteração na composição dos compostos 186,0715; 236,1388; 294,1832; 304,2408; 311,2479; 474,3718 e 571,4608. O teor de Si foliar e a atividade metabólica foram maiores nas plantas de sorgo que receberam, em conjunto, aplicação de Si via solo e ambas as herbivorias. O Si apresentou importante papel na indução de resistência em plantas de milho e sorgo, reduzindo a desfolha por *S. frugiperda* em condições de campo em plantas de milho, sem interferir na produtividade, e reduzindo a população de *R. maidis* em plantas de sorgo, promovendo o aumento da atividade metabólica.

**Palavras-chave:** Adubação silicatada. Lagarta-do-cartucho. Metabolômica. Pulgão do milho. *Zea mays*. *Sorghum bicolor*.

<sup>1</sup> Orientador: Marcus Vinicius Sampaio – UFU

## ABSTRACT

REZENDE-RODRIGUES, A.A. **Silicon and herbivory in metabolism and resistance induced in corn and sorghum.** 2020. 96 p. Thesis (PhD in Agronomy / Phytotechnology) - Federal University of Uberlândia/UFU, Uberlândia<sup>1</sup>.

The use of silicate fertilization is a promising tool for pest management because silicon (Si) acts as a resistance inducer, either by structural change of the plant or by the production of defense compounds, which may vary according to the type of herbivory. The objectives of this work were to evaluate the influence of silicon and herbivory on metabolism and induction of resistance in corn and sorghum. Two experiments were proposed, the first one with the objective of evaluating the effect of Si application via soil on the induction of resistance to *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), on the accumulation of Si by the plant, the gas exchange, photosynthetic efficiency and plant metabolism and influence of Si on the yield of corn crop cultivated in the field with doses higher than 600 kg ha<sup>-1</sup> of Si. The second experiment aimed to evaluate the chemical compounds produced by the sorghum plant related to resistance induction by Si and herbivory caused by chewing and sucking insects. The first experiment was carried out at the experimental farm of the UFU, with five doses of silicon (0; 600; 800; 1,000; 1,200 kg ha<sup>-1</sup>) x 2 types of infestation of *S. frugiperda* (natural; manual). In the second experiment, sorghum plants grown in pots were exposed to Si fertilization stimuli and/or herbivory by *S. frugiperda* caterpillars. Population growth of *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera: Aphididae) was verified in these plants and considered as a third stimulus. Leaf silicon content, polyphenol and FRAP were evaluated and metabolomics analysis was performed. The plants analyzed were compared with control plants, without stimuli. The application of silicon induced the resistance in corn plants to *S. frugiperda* under field conditions, reducing defoliation and increasing the content of this element in the leaf. In sorghum plants, previous herbivory by caterpillar in plants without Si induced resistance by antibiosis to *R. maidis*, probably related to the reduction in the concentration of compounds 236.1388 and 474.3718. Induction of resistance by antibiosis was also observed in plants with herbivory and Si, related to the change in the composition of compounds 186.0715; 236.1388; 294.1832; 304.2408; 311.2479; 474.3718 and 571.4608. The leaf Si content and metabolic activity were higher in sorghum plants that received, together, application of Si via soil and both herbivores. Si played an important role in inducing resistance in corn and sorghum plants, reducing defoliation by *S. frugiperda* under field conditions in corn plants, without interfering with productivity, and reducing the population of *R. maidis* in sorghum plants, promoting increased metabolic activity.

**Keywords:** Silicate fertilization. Fall armyworm. Metabolomics. Corn aphid. *Zea mays*. *Sorghum bicolor*.

<sup>1</sup> Advisor: Marcus Vinicius Sampaio – UFU

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>11</b>
1. <b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
2. <b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 2. Efeito do silício na desfolha causada por <i>Spodoptera frugiperda</i> (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) e no metabolismo e produtividade de plantas de milho</b>	<b>25</b>
<b>RESUMO</b>	<b>25</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>26</b>
1. <b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
2. <b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
2.1 <b>Local do experimento</b>	<b>29</b>
2.2 <b>Características, preparo e adubação do solo</b>	<b>29</b>
2.3 <b>Semeadura e condução do experimento</b>	<b>30</b>
2.4 <b>Avaliação metabólica</b>	<b>33</b>
2.4.1 <i>Trocas gasosas e eficiência fotossintética</i>	<b>33</b>
2.4.2 <i>Análise de polifenóis e poder de redução do ferro (FRAP)</i>	<b>33</b>
2.5 <b>Análise dos dados</b>	<b>34</b>
3. <b>RESULTADOS</b>	<b>35</b>
3.1 <b>Desfolha</b>	<b>35</b>
3.2 <b>Aspectos produtivos do milho e teor de silício foliar</b>	<b>37</b>
3.3 <b>Avaliação metabólica</b>	<b>40</b>
4. <b>DISCUSSÃO</b>	<b>42</b>
5. <b>CONCLUSÕES</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>46</b>
<b>CAPÍTULO 3. Silício e herbivoria por <i>Spodoptera frugiperda</i> (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) na indução de resistência a <i>Rhopalosiphum maidis</i> (Fitch) (Hemiptera: Aphididae) e no metabolismo de plantas de sorgo</b>	<b>52</b>
<b>RESUMO</b>	<b>52</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>53</b>
1. <b>INTRODUÇÃO</b>	<b>54</b>
2. <b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>56</b>

<b>2.1</b>	<b>Produção de plantas de sorgo</b>	<b>56</b>
<b>2.1.1</b>	<b><i>Produção de plantas de sorgo para criação de pulgões</i></b>	<b>56</b>
<b>2.1.2</b>	<b><i>Produção de plantas de sorgo para o experimento</i></b>	<b>56</b>
<b>2.2</b>	<b>Criação dos pulgões</b>	<b>57</b>
<b>2.3</b>	<b>Criação das lagartas</b>	<b>57</b>
<b>2.4</b>	<b>Instalação e condução do experimento</b>	<b>58</b>
<b>2.4.1</b>	<b><i>Metabolômica</i></b>	<b>59</b>
<b>2.4.2</b>	<b><i>Análise de polifenóis e poder de redução do ferro (FRAP)</i></b>	<b>59</b>
<b>2.4.3</b>	<b><i>Crescimento populacional de <i>R. maidis</i> e teor de silício foliar</i></b>	<b>60</b>
<b>2.5</b>	<b>Análises dos dados</b>	<b>60</b>
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>62</b>
<b>3.1</b>	<b>Teor de silício foliar</b>	<b>62</b>
<b>3.2</b>	<b>Crescimento populacional de <i>R. maidis</i></b>	<b>62</b>
<b>3.3</b>	<b>Metabolômica</b>	<b>63</b>
<b>3.4</b>	<b>Análise de polifenóis e poder de redução do ferro (FRAP)</b>	<b>77</b>
<b>4.</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>79</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXO A - METABÓLITOS EXPRESSOS EM PLANTAS DE SORGO COM OU SEM SI, SUBMETIDAS A DIFERENTES HERBIVORIAS</b>	<b>92</b>

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

A resistência de plantas a insetos é uma importante prática de manejo de pragas que se deve a efeitos diretos e indiretos que podem ser causados por fatores constitutivos, presentes antes do ataque do inseto, ou por fatores induzidos pela alimentação de herbívoros (BRUCE, 2015; HEIDEL-FISCHER et al., 2014; WAR et al., 2012). As barreiras mecânicas e os metabólitos secundários tóxicos são dois tipos principais de defesa constitutiva das plantas (TAIZ et al., 2017). Como sistema multigênico, a resistência se manifesta por meio de respostas de hipersensibilidade, podendo incluir alterações estruturais, acúmulo de espécies reativas de oxigênio, síntese de metabólitos secundários e a produção de uma ampla variedade de moléculas de defesa. Entretanto, o estado de resistência em plantas suscetíveis pode ser induzido pela utilização de agentes externos/indutores bióticos ou abióticos (NAIME, 2019). Estudos têm apontado que a adição de silício (Si) ao solo pode interagir com fatores de resistência constituintes ou induzidos (HARTLEY; DEGABRIEL, 2016; LIANG et al., 2015; REYNOLDS et al., 2016) estimulando defesas diretas das plantas que reduzem os danos da herbivoria causada por insetos (BAKHAT et al., 2018; LUYCKX et al., 2017; REYNOLDS et al., 2016).

O Si apresenta-se de forma abundante na crosta terrestre, no entanto, o cultivo intensivo e consecutivo leva à diminuição da concentração do elemento no solo, sua escassez reflete de forma significativa a produtividade final de algumas culturas, especialmente de gramíneas acumuladoras. A absorção do ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) da solução externa pelas células epidérmicas e corticais ocorre através de canais específicos tipo aquaporina (DESHMUKH; BÉLANGER, 2016; GRÉGOIRE et al., 2012). Ao atingir o xilema o silício é transportado por fluxo de massa através do processo transpiratório para parte aérea, onde pode ser polimerizado formando sílica amorfa. A maior parte do Si é incorporada na parede celular, principalmente nas células da epiderme, estômatos, espinhos e tricomas (HARTLEY et al., 2015; MA, 2004; MITANI; MA, 2005).

Mesmo não sendo considerado um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, o silício tem sido associado a diversos efeitos benéficos, dentre os quais se destacam: o baixo coeficiente de transpiração, com melhor aproveitamento da água; o maior teor de clorofila e a maior rigidez estrutural dos tecidos, com o aumento da resistência mecânica das células, deixando as folhas mais eretas e aumentando a área fotossintética e a

absorção de CO<sub>2</sub>. Somam-se a isto, a diminuição do autossombreamento e a redução do acamamento; o aumento do número de folhas e da matéria seca e o crescimento da planta; o retardo da senescência, além de reduzir a toxidez de alumínio e ferro, amenizar os efeitos do estresse salino, suprimento de carboidratos, assimilação de amônia, tolerância a altas doses de adubação com nitrogênio, e a proteção contra estresses bióticos por meio da diminuição da incidência de patógenos e do aumento da resistência a insetos pela formação de uma barreira mecânica, formada pela dupla camada protetora sílica-cutícula, além de levar a um maior rendimento da cultura (AHMED et al., 2014; EPSTEIN, 1999; HATTORI et al., 2003; KORNDÖRFER; LEPSCH, 2001; LIMA et al., 2011; MANIVANNAN; AHN, 2017; MARAFON; ENDRES, 2011).

É importante ressaltar, que apesar de não se conhecer muito bem sua sinalização metabólica, o Si pode melhorar o desenvolvimento de espécies vegetais em condições normais de cultivo e sob estresses, através de alterações metabólicas (CHEN et al., 2018). O silício induz a formação de compostos fenólicos, considerados compostos de defesa da planta, caso ocorra ataque de doenças e pragas (CAMARGO, 2011; RAHMAN et al., 2015; REYNOLDS et al., 2016; VIVANCOS et al., 2015; YE et al., 2013), aumentando a atividade de enzimas, como por exemplo, as peroxidases e polifenoloxidasas e a enzima fenilalanina amônia-liase relacionadas com a síntese de compostos fenólicos, que apresentam propriedades repelentes, tóxicas e antinutricionais aos insetos (GOMES et al., 2005; MENDONÇA et al., 2013).

Resultados positivos da ação do Si também têm sido verificados na redução de danos causados por estresses bióticos (pragas e doenças) e abióticos (seca, metais pesados, salinidade) que, geralmente ocorrem durante o desenvolvimento das plantas (CAMARGO, 2016), devido ao seu papel na regulação da transcrição de genes específicos, influenciando mecanismos bioquímicos e moleculares de sinalização celular (CARVALHO et al., 2011). Durante os processos metabólicos, os radicais livres atuam como mediadores para a transferência de elétrons nas várias reações bioquímicas. A produção contínua desses radicais durante os processos metabólicos pode culminar no desenvolvimento de mecanismos de defesa antioxidante (BARBOSA et al., 2010). O ensaio antioxidante de determinação do poder de redução do ferro, FRAP (do inglês Ferric Reducing Antioxidant Power), está baseado na produção do íon Fe<sup>2+</sup> (forma ferrosa) a partir da redução do íon Fe<sup>3+</sup> (forma férrica) presente no complexo 2,4,6-tripiridil-s-triazina (TPTZ) (URREA-VICTORIA et al., 2016), sendo importante avaliar o efeito do Si na potencialização ou não desse processo.

Um dos principais papéis do Si na indução de resistência de plantas se dá em sua atuação como indutor e ativador, preparando as respostas de defesa que serão então totalmente

implantadas no início do estresse (no caso dos insetos, a herbivoria). O Si provavelmente ativa o estado metabólico da planta, tornando-a mais eficiente em responder a estímulos exógenos (LUYCKX et al., 2017). A indução de defesas químicas pelo Si e sua interação com a via de sinalização do jasmonato (JA), facilita a produção das enzimas defensivas, como catalase (CAT), peroxidase (POD), superóxido dismutase (SOD), polifenol oxidase (PPO) e fenilalanina amônia-liase (PAL), que são enzimas chave que regulam a produção e acumulação de compostos metabólicos secundários, como fenólicos e fitoalexinas (FREW et al., 2018; GOMES et al., 2005; HAN et al., 2016; YE et al., 2013), apresentando propriedades repelentes, tóxicas e antinutricionais aos insetos (MENDONÇA et al., 2013).

Contudo, há uma série complexa de mecanismos de resistência induzida em plantas em que o efeito do Si é desconhecido, principalmente se forem consideradas as respostas das plantas à herbivoria de insetos com diferentes tipos de alimentação, como mastigadores e sugadores de seiva. Os membros da família Poaceae, que inclui todas as culturas de cereais, usam benzoxazinoides como metabólitos secundários de defesa produzidos constitutivamente, especialmente 2,4-dihidróxi-1,4-benzoxazin-3-ona (DIBOA) e seu derivado 2,4-dihidróxi-7-metóxi-1,4-benzoxazin-3-ona (DIMBOA), normalmente são armazenados no vacúolo como glicosídeos ligados à D-glicose (Glc). Após a herbivoria por insetos, os glicosídeos inativos são hidrolisados, gerando agliconas, que são tóxicas não só para insetos herbívoros, mas também para patógenos (TAIZ et al., 2017), ocorrendo tanto no trigo quanto no milho (GLAUSER et al., 2011; HU et al., 2018; OIKAWA et al., 2004) e provavelmente no sorgo. A indução de resistência em gramíneas envolvendo os benzoxazinoides ocorre tanto com a herbivoria por lagartas quanto por pulgões (BETSIASHVILI et al., 2015; MEIHLS et al., 2013; TZIN et al., 2015; WOUTERS et al., 2016). A herbivoria por um grupo de insetos, como lagartas, pode afetar a capacidade da planta de combater outro grupo, como os pulgões, devido à indução de rotas metabólicas diferentes dependendo do tipo de herbivoria (TZIN et al., 2015; WOUTERS et al., 2016).

As estratégias de resistência das plantas são complicadas pelo fato de que herbívoros com comportamento alimentar diferentes, tanto sugadores como mastigadores, são suscetíveis a diferentes tipos de defesas (LI et al., 2018), principalmente quando se adiciona a adubação silicatada neste contexto. Os herbívoros mastigadores, como lagartas, por exemplo, ingerem partes inteiras da folha, portanto, são suscetíveis às toxinas das plantas que se acumulam por toda a folha (HOWE; JANDER, 2008; MACHADO et al., 2016). Por outro lado, herbívoros perfuradores e sugadores, como pulgões, geralmente se alimentam diretamente do floema, por isso, são mais suscetíveis a defesas específicas do floema (WILL et al., 2013; ZÜST;

AGRAWAL, 2016). A pressão de seleção resultante para a implantação de defesas específicas de herbívoros tem consequências importantes para a evolução, fisiologia e ecologia da imunidade das plantas contra herbívoros (SCHMELZ, 2015; THALER et al., 2012).

A análise metabolômica, ou seja, o estudo das alterações dos metabólitos (CANUTO et al., 2018) é uma abordagem que se mostra muito interessante, pois além de auxiliar no entendimento do metabolismo dos seres vivos/plantas, também pode trazer melhorias em termos de rendimento nos cultivos (FERNANDEZ et al., 2016). A análise da produção das substâncias de defesa, através dos estudos metabolômicos representa uma oportunidade única e inédita de estudar a influência do silício em eventos metabólicos e novas rotas de biossíntese de produtos naturais e de compreender como os vegetais, que são organismos sésseis, resistem ao ataque de microrganismos e pragas e sobrevivem em um ambiente altamente competitivo. Conhecer a resposta química e o efeito nos herbívoros é assim uma informação importante para o desenvolvimento de estratégias de resistência de plantas e controle de insetos pragas. Paralelamente aos estudos químicos, os estudos dos efeitos biológicos auxiliam e comprovam a presença destas respostas químicas após a herbivoria.

Tanto o milho, *Zea mays* L., quanto o sorgo, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, são plantas da família Poaceae e acumuladoras de Si (BOER et al., 2019; HATTORI et al., 2003; LIMA et al., 2019; MA et al., 2001; RESENDE et al., 2009) e a indução de resistência por antibiose, reduzindo o potencial biótico de lagartas e pulgões pelo uso do Si, foi observado nessas culturas (ALMEIDA et al., 2015; BOER et al., 2019; CARVALHO et al., 1999; COSTA; MORAES, 2002; LIMA, 2018; MORAES et al., 2005; PERDOMO, 2017; SAMPAIO et al., 2020; SANTOS, 2011). Com isso, estas duas culturas, são consideradas espécies promissoras para o estudo dos efeitos do Si e da herbivoria nas alterações metabólicas das plantas.

O interesse econômico pela cultura do milho tem levado a várias pesquisas com o objetivo de minimizar danos causados por pragas e obter maior produção. Dentre as principais pragas que ocorrem na cultura do milho se destaca a lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), a qual pode causar danos já nos estádios iniciais de desenvolvimento da planta, comprometendo todo o estande. No período vegetativo atingem a região do tecido foliar e, no reprodutivo elas infestam as espigas, ocasionando danos severos e diretos à produção (SIMIONATO et al., 2020). Além disso, facilitam a entrada de patógenos e outras pragas devido aos danos ocasionados (NAIS, 2012). Esta praga está distribuída pelo continente americano em especial nas regiões de maior temperatura em diferentes países da África. Foi registrada também na Ásia, na Índia e recentemente formalizada sua ocorrência na

China (TAVARES, 2019). No Brasil, a lagarta-do-cartucho pode ser encontrada em todas as regiões produtoras de milho (TAVARES, 2019).

Apesar do efeito observado de Si na biologia de *S. frugiperda* em laboratório (ANTUNES, 2009; GONZALEZ et al., 2015; GOUSSAIN et al., 2002; NERI et al., 2005; NOGUEIRA et al., 2018), apenas um trabalho relata que o uso da adubação silicatada aumentou o teor desse elemento nas folhas, diminuindo os danos causados pela *S. frugiperda* em plantas de milho tratadas com 600 kg ha<sup>-1</sup> de Si via solo em condições de campo (PERDOMO, 2017). Estes resultados indicam a necessidade de se estudar doses maiores de Si no controle de *S. frugiperda*, já que 600 kg ha<sup>-1</sup> foi a maior dose avaliada por Perdomo (2017) em seu trabalho.

Assim, a primeira parte deste trabalho teve como objetivo contribuir para o manejo integrado de *S. frugiperda*, avaliando o efeito de doses maiores que 600 kg ha<sup>-1</sup> de Si via solo na desfolha de *S. frugiperda* em condições de campo, além do efeito deste elemento na produtividade, trocas gasosas, eficiência fotossintética, polifenóis totais e poder de redução do ferro (FRAP) em plantas de milho. Na segunda parte deste trabalho foi avaliado o efeito do Si na interação da planta hospedeira com insetos sugadores e mastigadores. Como foi observado que não há antibiose induzida pelo Si nem em plantas de milho ao pulgão *Rhopalosiphum maidis* (L.) (BOER et al., 2019) e nem em plantas de sorgo ao pulgão *Schizaphis graminum* (Rondani) (SAMPAIO et al., 2020), principais pragas dessas culturas (MENDES et al., 2014; SIMIONATO et al., 2020; WORDELL FILHO et al., 2016), foi utilizado como modelo de estudo o sorgo, a lagarta *S. frugiperda* e o pulgão *R. maidis*, respectivamente, planta hospedeira, inseto mastigador e inseto sugador. Desta forma, o objetivo do segundo trabalho foi analisar todos os compostos químicos que tiveram suas concentrações alteradas com o uso do Si, com os diferentes tipos de herbivoria e suas interações, por meio do estudo da metabolômica. Além disso, avaliar os efeitos sobre o crescimento populacional do pulgão e na produção de compostos fenólicos e FRAP.

## 2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram:

Verificar o efeito de doses de silício via solo na indução de resistência à *S. frugiperda* em plantas de milho.

- Hipótese nula ( $H_0$ ): a adubação silicatada não induz a resistência em plantas de milho à lagarta-do-cartucho.

- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): a adubação silicatada induz a resistência em plantas de milho à lagarta-do-cartucho.

Verificar o efeito de doses de silício via solo na produtividade do milho.

- Hipótese nula ( $H_0$ ): a aplicação de silício não interfere na produtividade da cultura do milho.

- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): a aplicação de silício interfere na produtividade da cultura do milho.

- Hipótese alternativa ( $H_{11}$ ): a aplicação de silício reduz a produtividade da cultura do milho.

- Hipótese alternativa ( $H_{12}$ ): a aplicação de silício aumenta a produtividade da cultura do milho.

Verificar o efeito de doses de silício via solo nas trocas gasosas e na eficiência fotossintética em plantas de milho.

- Hipótese nula ( $H_0$ ): a adubação silicatada não interfere nas trocas gasosas e na eficiência fotossintética em plantas de milho.

- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): a adubação silicatada interfere nas trocas gasosas e na eficiência fotossintética em plantas de milho.

- Hipótese alternativa ( $H_{11}$ ): a adubação silicatada aumenta as trocas gasosas e a eficiência fotossintética em plantas de milho.

- Hipótese alternativa ( $H_{12}$ ): a adubação silicatada diminui as trocas gasosas e a eficiência fotossintética em plantas de milho.

Verificar o efeito do silício via solo na produção de polifenóis e no poder de redução de ferro em plantas de milho e de sorgo.

- Hipótese nula ( $H_0$ ): a adubação silicatada não interfere na produção de polifenóis e no poder de redução do ferro em plantas de milho e de sorgo.

- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): a adubação silicatada interfere na produção de polifenóis e no poder de redução do ferro em plantas de milho e de sorgo.

Verificar o efeito do silício via solo na indução de resistência por antibiose à *R. maidis* em plantas de sorgo.

- Hipótese nula ( $H_0$ ): a adubação silicatada não induz resistência por antibiose em plantas de sorgo ao pulgão do milho.

- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): a adubação silicatada induz a resistência por antibiose em plantas de sorgo ao pulgão do milho.

Verificar o efeito da herbivoria prévia por *S. frugiperda* na indução de resistência por antibiose à *R. maidis* em plantas de sorgo.

- Hipótese nula ( $H_0$ ): a herbivoria prévia não induz resistência por antibiose ao pulgão do milho.

- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): a herbivoria prévia induz resistência por antibiose ao pulgão do milho.

Verificar o efeito da herbivoria por inseto mastigador, *S. frugiperda*, e/ou por inseto sugador, *R. maidis*, na produção de metabólitos em plantas de sorgo.

- Hipótese nula ( $H_0$ ): a herbivoria por inseto mastigador e/ou por inseto sugador não interfere na produção de metabólitos em plantas de sorgo.

- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): a herbivoria por inseto mastigador e/ou por inseto sugador interfere na produção de metabólitos em plantas de sorgo.

Verificar o efeito do silício via solo na produção de metabólitos em plantas de sorgo.

- Hipótese nula ( $H_0$ ): a adubação silicatada não interfere na produção de metabólitos em plantas de sorgo.

- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): a adubação silicatada interfere na produção de metabólitos em plantas de sorgo.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, M.; ASIF, M.; HASSAN, F. U. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 36, n. 2, p. 473-483, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1427-2>
- ALMEIDA, A. C. L.; SILVA, L. P.; JESUS, F. G.; NOGUEIRA, L.; SOUZA NETO, M.; CUNHA, P. C. R. Efeito de indutores de resistência em híbridos de milho na atratividade do pulgão *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae). **Agrarian**, Dourados-MS, v. 8, n. 27, p. 23-29, 2015.
- ANTUNES, C. S. **Efeitos do silício sobre as lagartas-chave e seus inimigos naturais em milho e girassol**. 2009. Dissertação (Mestrado em Entomologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- BAKHAT, H. S. F. G.; BIBI, N.; ZIA, Z.; ABBAS, S.; HAMMAD, H. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, M. R.; SHAH, G. M.; RABBANI, F.; SAEED, S. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. **Crop Protection**, Guildford, v.104, p.21-34, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- BARBOSA, K. B. F.; COSTA, N. M. B.; ALFENAS, R. C. G.; DE PAULA, S. O.; MINIM, V. P. R.; BRESSAN, J. Estresse oxidativo: conceito, implicações e fatores modulatórios. **Revista de Nutrição**, Campinas-SP, v. 23, n. 4, p. 629-643, ago. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-52732010000400013>
- BETSIASHVILI, M.; AHERN, K. R.; JANDER, G. Additive effects of two quantitative trait loci that confer *Rhopalosiphum maidis* (corn leaf aphid) resistance in maize inbred line Mol 17. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 2, p. 571-578. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru379>
- BOER, C. A., SAMPAIO, M. V., PEREIRA, H. S. Silicon-mediated and constitutive resistance to *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae) in corn hybrids. **Bulletin of Entomological Research**, Cambridge, v. 119, n. 3, p. 356-364. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007485318000585>
- BRUCE, T. J. A. Interplay between insects and plants: dynamic and complex interactions that have coevolved over millions of years but act in milliseconds. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 2, p 455-465. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru391>
- CAMARGO, M. S. Silício em cana-de-açúcar. **Pesquisa & Tecnologia**, Campinas-SP, v. 8, n. 88, jul./dez. 2011.
- CAMARGO, M. S. Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. **Informações Agronômicas**, Piracicaba-SP, n. 155, p. 1-8, set. 2016.
- CANUTO, G. A. B.; COSTAB, J. L.; CRUZA, P. L. R.; SOUZA, A. R. L.; FACCIOA, A. T.; KLASSENC, A.; RODRIGUES, K. T.; TAVARES, M. F. M. Metabolômica: definições, estado-da-arte e aplicações representativas. **Química Nova**, São Paulo-SP, v. 41, n. 1, p. 75-91, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170134>

- CARVALHO, S. P.; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G. Efeito do silício na resistência do sorgo (*Sorghum bicolor*) ao pulgão verde (*Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, Londrina-PR, v. 28, n. 4, p. 505-510, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0301-80591999000300017>
- CARVALHO, R. F.; CAMPOS, M. L.; AZEVEDO, R. A. The role of phytochrome in stress tolerance. **Journal of Integrative Plant Biology**, Beijing, v. 53, n. 12, p. 920-929, 2011. DOI: 10.1111/j.1744-7909.2011.01081.x.
- CHEN, D.; WANG, S.; YIN, L.; DENG, X. How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency? **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 9, p. 281, mar. 2018.
- COSTA, R. R.; MORAES, J. C. Resistência induzida em sorgo por silicato de sódio e infestação inicial pelo pulgão-verde *Schizaphis graminum*. **Revista Ecosistema**, Espírito Santo do Pinhal-SP, v. 27, n. 1/2, p. 37- 9, 2002.
- DESHMUKH, R; BÉLANGER, R. R. Molecular evolution of aquaporins and silicon influx in plants. **Functional Ecology**, London, v. 30, n. 8, p. 1277-1285, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12570>
- EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Washington, v. 50, n. 1, p. 641-664, jun. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>
- FERNANDEZ, O.; URRUTIA, M.; BERNILLON, S.; GIAUFFRET, C.; TARDIEU, F.; LE GOUIS, J.; LANGLADE, N.; CHARCOSSET, A.; MOING, A.; GIBON, Y. Fortune telling: metabolic markers of plant performance. **Metabolomics**, Springer, v. 12, n. 10, p. 1-14, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11306-016-1099-1>
- FREW, A.; WESTON, L. A.; REYNOLDS, O. L.; GURR, G. M. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach, **Annals of Botany**, Oxford, v. 121, n. 7, p. 1265-1273, jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
- GLAUSER, G.; MARTI, G.; VILLARD, N.; DOYEN, G. A.; WOLFENDER, J.-L.; TURLINGS, T. C. J.; ERB, M. Induction and detoxification of maize 1,4-benzoxazin-3-ones by insect herbivores. **The Plant Journal**, Hoboken, v. 68, n. 5, p. 901-911. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04740.x>
- GOMES, F. B.; MORAES, J. C.; SANTOS, C. D.; GOUSSAIN, M. M. Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. **Scientia Agricola**, Piracicaba-SP, v. 62, n. 6, p. 547-551, nov./dez. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000600006>
- GONZALEZ, L. C, PRADO, R. M.; DA SILVA JÚNIOR, B.; CAMPOS, C. N. S, FERNÁNDEZ, O.; DA SILVA, R. P.; MODA, L. R.; PUENTE, R. A. Daños por *Spodoptera frugiperda* Smith en maíz en función de nitrógeno, potasio y silicio. **Revista de Protección Vegetal**, Cienfuegos, v. 30, n. 3, p. 176-184, 2015.

- GOUSSAIN, M. M.; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G.; NOGUEIRA, N. L.; ROSSI, M. L. Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta do cartucho *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotropical Entomology**, Londrina-PR, v. 31, n. 2, p. 305-310, apr./june 2002.
- GRÉGOIRE, C.; RÉMUS-BOREL, W.; VIVANCOS, J.; LABBÉ, C.; BELZILE, F.; BÉLANGER, R. R. Discovery of a multigene Family of aquaporina silicon transportes in the primitive plant *Equisetum arvense*. **The Plant Journal**, Oxford, v. 72, n. 2, p. 320-330, 2012.
- HAN, Y.; LI, P.; GONG, S.; YANG, L.; WEN, L.; HOU, M. Defense responses in rice induced by silicon amendment against infestation by the leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*. **PloS One**, San Francisco, v. 11, n. 4, p. 1-14 (e0153918), 2016.
- HARTLEY, S. E.; FITT, R. N.; MCLAMON, E. L.; WADE, R. N. Defending the leaf surface: intra- and inter-specific differences in silicon deposition in grasses in response to damage and silicon supply. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 6, p. 1-8 (art. 35), 2015.
- HARTLEY, S. E.; DEGABRIEL, J. L. The ecology of herbivore-induced silicon defences in grasses. **Functional Ecology**, London, v. 30, n. 8, p. 1311-1322, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12706>
- HATTORI, T.; INANAGA, S.; TANIMOTO, E.; LUX, A.; LUXOVA, M.; SUGIMOTO, Y. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v.44, n. 7, p. 743-749, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcg090>
- HEIDEL-FISCHER, H. M.; MUSSER, R. O.; VOGEL, H. Plant transcriptomic responses to herbivory. *In*: VOELCKEL, C.; JANDER, G. (eds) **Annual Plant Reviews**, Insect-plant interactions, v. 47, Wiley-Blackwell, Chichester, 2014. p. 155-196.
- HOWE, G. A.; JANDER, G. Plant immunity to insect herbivores. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, Califórnia, v. 59, p. 41-66, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092825>
- HU, L.; MATEO, P.; YE, M.; ZHANG, X.; BERSET, J. D.; HANDRICK, V.; RADISCH, D.; GRABE, V.; KÖLLNER, T. G.; GERSHENZON, J.; ROBERT, C. A. M.; ERB, M. Plant iron acquisition strategy exploited by an insect herbivore. **Science**, New York, v. 361, n. 6403, p. 694-697, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aat4082>
- KORNDÖRFER, G. H.; LEPSCH, I. Effect of silicon on plant growth and yield. *In*: DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H. (eds.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam, Netherlands : Elsevier Science, 2001. p. 133-147.
- LI, B.; FÖRSTER, C.; ROBERT, C. A. M.; ZÜST, T.; HU, L.; MACHADO, R. A. R.; BERSET, J. -D.; HANDRICK, V.; KNAUER, T.; HENSEL, G.; CHEN, W.; KUMLEHN, J.; YANG, P.; KELLER, B.; GERSHENZON, J.; JANDER, G.; KÖLLNER, T. G.; ERB, M. Convergent evolution of a metabolic switch between aphid and caterpillar resistance in cereals. **Science Advances**, Washington, v. 4, n. 12, eaat6797, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat6797>

- LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BELANGER, R.; HAIJUN, G.; SONG, A. **Silicon in agriculture**: from theory to practice. Dordrecht: Springer. 2015. 235p.
- LIMA, D. T. **Silício na produtividade e na indução de resistência direta e indireta do sorgo aos pulgões**. 2018. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2018.
- LIMA, M. A.; CASTRO, V. F.; VIDAL, J. B.; ENÉAS-FILHO, J. Aplicação de silício em milho e feijão-de-corda sob estresse salino. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza-CE, v. 42, n. 2, p. 398-403, abr-jun, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000200019>.
- LIMA, D. T.; SAMPAIO, M. V.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; PEREIRA, H. S.; MARTINS, W. G. Silicon accumulation and its effect on agricultural traits and anthracnose incidence in lignocellulosic sorghum. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia-GO, v. 49, e54201, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632019v4954201>.
- LUYCKX, M.; HAUSMAN, J.F.; LUTTS, S.; GUERRIERO, G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 8, n. 411, p. 1-8, March 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>
- MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants, *In*: DATNOFLF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (eds). **Silicon in Agriculture**. The Netherland, Elsevier Science, 2001, p.17-39. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9).
- MA, J. F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 50, n. 1, p. 11-18, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>
- MACHADO, R. A. R.; MCCLURE, M.; HERVÉ, M. R.; BALDWIN, I. T.; ERB, M. Benefits of jasmonate-dependent defenses against vertebrate herbivores in nature. **eLife**, Cambridge, v. 5, e13720, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7554/eLife.13720>
- MANIVANNAN, A.; AHN, Y. K. Silicon regulates potential genes involved in major physiological processes in plants to combat stress. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01346>
- MARAFON, A. C.; ENDRES, L. Adubação silicatada em cana-de-açúcar. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, Aracaju-SE, dez. 2011.
- MEIHLS, L. N.; HANDRICK, V.; GLAUSER, G.; BARBIER, H.; KAUR, H.; HARIBAL, M. M.; LIPKA, A. E.; GERSHENZON, J.; BUCKLER, E. S.; ERB, M.; KÖLLNER, T. G.; JANDER, G. Natural variation in maize aphid resistance is associated with 2,4-dihydroxy-7-methoxy-1,4-benzoxazin-3-one glucoside methyltransferase activity. **The Plant Cell**, Rockville, v. 25, n. 6, p. 2341–2355. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.113.112409>
- MENDES, S. M.; WAQUIL, J. M.; RODRIGUES, J. A. S.; SAMPAIO, M. V.; VIANA, P. A. Manejo de pragas na cultura do sorgo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte-MG, v. 35, n. 278, p. 73-81, jan./fev. 2014.

MENDONÇA, A. O.; TAVARES, L. C.; BRUNES, A. P.; MONZÓN, D. L. R.; VILLELA, F. A. Acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada. **Bioscience Journal**, Uberlândia-MG, v.29, n.5, p.1154-1162. 2013.

MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 56, n. 414, p. 1255-1261, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eril121>

MORAES, J. C.; GOUSSAIN, M. M.; CARVALHO, G. A.; COSTA, R. R. Feeding non-preference of the corn leaf aphid *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae) to corn plants *Zea mays* (L.) treated with silicon. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, v. 29, p. 761-766, 2005.

NAIME, R. Resistência Sistêmica Induzida (RSI) em plantas. **EcoDebate**. ISSN 2446-9394. 2019. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2019/05/21/resistencia-sistemica-induzida-rsi-em-plantas-artigo-de-roberto-naime/>. Acesso em: 23 nov. 2020.

NAIS, J. **Infestação de *Spodoptera frugiperda* e *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) em híbridos comerciais de milho (*Zea mays* L.)**. 2012. Tese (Doutorado em Entomologia Agrícola) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal-SP, 2012.

NERI, D. K. P.; MORAES, J. C.; GAVINO, M. A. Interação silício com inseticida regulador de crescimento no manejo da lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) em milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, v.29, n.4. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000600010>.

NOGUEIRA, A. M.; JESUS, K. A.; LINS JUNIOR, J. C.; BEZERRA, C. E. S. Efeito do silício no desenvolvimento de *Spodoptera frugiperda* (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) na cultura do arroz. **Connection Line**, n. 19, 2018. ISSN 1980-7341

OIKAWA, A.; ISHIHARA, A.; TANAKA, C.; MORI, N.; TSUDA, M.; IWAMURA, H. Accumulation of HDMBOA-Glc is induced by biotic stresses prior to the release of MBOA in maize leaves. **Phytochemistry**, Toronto, v. 65, n. 22, p. 2995–3001. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.09.006>

PERDOMO, D. N. **Doses de silício na produtividade e na indução de resistência de plantas de milho a *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2017.

RAHMAN, A.; WALLIS, C.; UDDIN, W. Silicon induced systemic defense responses in perennial ryegrass against infection by *Magnaporthe oryzae*. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 105, n. 6, p. 748-757, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-14-0378-R>

RESENDE, R. S.; RODRIGUES, F. A.; SOARES, J. M.; CASELA, C. R. Influence of silicon on some components of resistance to anthracnose in susceptible and resistant sorghum lines. **European Journal of Plant Pathology**, Dordrecht, v. 124, n. 3, p.533-541. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-009-9430-6>

REYNOLDS, O. L.; PADULA, M. P.; ZENG, R.; GURR, G. M. Silicon: potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v.7, n.744, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00744>

SANTOS, F. A. **Milho Bt e silício na resistência a *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2011.

SAMPAIO, M. V.; FRANCO, G. M.; LIMA, D. T.; OLIVEIRA, A. R. C.; SILVA, P. F.; SANTOS, A. L. Z.; RESENDE, A. V. M.; SANTOS, F. A. A.; GIRÃO, L. V. C. Plant silicon amendment does not reduce population growth of *Schizaphis graminum* or host quality for the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes*. **Neotropical Entomology**, Londrina-PR, v. 49, n. 5, p. 745-757, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13744-020-00775-w>

- SCHMELZ, E. A. Impacts of insect oral secretions on defoliation-induced plant defense. **Current Opinion in Insect Science**, Amsterdã: Elsevier, v. 9, p. 7-15, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2015.04.002>
- 
- SIMIONATO, R. S.; NUNES, J.; NEPOMOCENO, T. A. R.; MOSCARDINI, V. F. Controle de *Spodoptera frugiperda* e *Helicoverpa zea* a partir de diferentes tecnologias de milho Bts. **Revista Cultivando o Saber**, Cascavel-PR, v. 13, n. 2, p. 94-103, abr./jun 2020.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

TAVARES, M. **Manejo Integrado da *Spodoptera frugiperda* no milho**. [s. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.promip.agr.br/o-manejo-integrado-da-spodoptera-frugiperda-no-milho/>. Acesso: 23 nov. 2020.

THALER, J. S.; HUMPHREY, P. T.; WHITEMAN, N. K. Evolution of jasmonate and salicylate signal crosstalk. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 17, n. 5, p. 260-270, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.02.010>

TZIN, V.; LINDSAY, P. L.; CHRISTENSEN, S. A.; MEIHLS, L. N.; BLUE, L. B.; JANDER, G. Genetic mapping shows intraspecific variation and transgressive segregation for caterpillar-induced aphid resistance in maize. **Molecular Ecology**, Oxford, v. 24, n. 22, p. 5739-5750, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/mec.13418>

URREA-VICTORIA, V.; PIRES, J.; TORRES, P. B.; SANTOS, D. Y. A. C.; CHOW, F. **Ensaio antioxidante em microplaca do poder de redução do ferro (FRAP) para extratos de algas**. Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2016.

VIVANCOS, J.; LABBE, C.; MENZIES, J. G.; BELANGER, R. R. Silicon-mediated resistance of Arabidopsis against powdery mildew involves mechanisms other than the salicylic acid (AS)-dependent defence pathway. **Molecular plant pathology**, Oxford, v. 16, n. 6, p. 572-582, 2015.

- WAR, A. R.; PAULRAJ, M. G.; AHMAD, T.; BUHROO, A. A.; HUSSAIN, B.; IGNACIMUTHU, S.; SHARMA, H. C. Mechanisms of plant defense against insect herbivores. **Plant Signaling & Behavior**, Philadelphia, v. 7, n. 10, p. 1306-1320, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4161/psb.21663>
- WILL, T.; FURCH, A. C. U.; ZIMMERMANN, M. R. How phloem-feeding insects face the challenge of phloem-located defenses. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 4, n. 336, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00336>
- WORDELL FILHO, J. A.; RIBEIRO, L. P.; CHIARADIA, L. A.; MADALÓZ, J. C.; NESI, C. N. **Pragas e doenças do milho**: diagnose, danos e estratégias de manejo. Florianópolis: Epagri, 2016.
- WOUTERS, F. C.; BLANCHETTE, B.; GERSHENZON, J.; VASSÃO, D. G. Plant defense and herbivore counter-defense: benzoxazinoids and insect herbivores. **Phytochemistry Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 6, p. 1127-1151. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11101-016-9481-1>
- YE, M.; SONG, Y.; LONG, J.; WANG, R.; BAERSON, S. R.; PAN, Z.; ZHU-SALZMAN, K.; XIE, J.; CAI, K.; LUO, S.; ZENG, R. Priming of jasmonate-mediated antiherbivore defense responses in rice by silicon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 110, n. 38, p. E3631-E3639, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1305848110>
- ZÜST, T.; AGRAWAL, A. A. Mechanisms and evolution of plant resistance to aphids. **Nature Plants**, [s.l.], v. 2, p. 15206, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.206>

## CAPÍTULO 2

### **Efeito do silício na desfolha causada por *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) e no metabolismo e produtividade de plantas de milho**

**Resumo:** O cultivo do milho apresenta grande relevância no agronegócio brasileiro e mundial, sendo um dos cereais mais produzidos no mundo. A cultura é atacada por diversas pragas como *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) que é uma praga de difícil controle. Redução no potencial biótico e na alimentação de *S. frugiperda* pela aplicação de silício (Si) tem sido observada em estudos de laboratório e casa-de-vegetação, porém, existe carência de estudos com resultados positivos do uso do Si na redução de desfolha por essa praga no campo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de doses de Si, maiores do que 600 kg ha<sup>-1</sup>, na produtividade, no peso de mil grãos, no peso fresco e seco das plantas, na indução de resistência à *S. frugiperda*, nas trocas gasosas, eficiência fotossintética, na produção de polifenóis e no poder de redução do ferro (FRAP) em plantas de milho em condições de campo. O experimento foi realizado na fazenda experimental da UFU safra 2017/2018, com cinco doses de silício (0; 600; 800; 1.000; 1.200 kg ha<sup>-1</sup>) aplicados via solo e 2 tipos de infestação de *S. frugiperda* (natural; manual). A aplicação de silício induziu a resistência em plantas de milho à lagarta-do-cartucho, reduzindo a desfolha e aumentando o teor desse elemento na folha. No entanto, a produtividade não foi influenciada pela adubação silicatada e nem as outras características agrônômicas do milho, como peso de mil grãos e peso fresco e seco das plantas, assim como não influenciou nas trocas gasosas e eficiência fotossintética, na produção de polifenóis e no FRAP. O Si pode ser utilizado em conjunto com outros métodos de controle, no manejo integrado de *S. frugiperda* em plantas de milho.

**Palavras-chave:** *Zea mays*. Lagarta-do-cartucho. Adubação silicatada. Indução de resistência.

## CHAPTER 2

### **Effect of silicon on defoliation caused by *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) and on the metabolism and productivity of corn plants**

**Abstract:** Corn cultivation has great relevance in Brazilian and world agribusiness, being one of the most produced cereals in the world. The crop is attacked by several pests such as *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) which is a pest of difficult control. Reduction in biotic potential and feeding of *S. frugiperda* by the application of silicon (Si) has been observed in laboratory and greenhouse studies, however, there is a lack of studies with positive results of the use of Si in the reduction of defoliation by this pest in the field. The objective of this work was to evaluate the effect of doses of Si, greater than 600 kg ha<sup>-1</sup>, on productivity, weight of one thousand grains, fresh and dry weight of plants, induction of resistance to *S. frugiperda*, gas exchange, photosynthetic efficiency, polyphenol production and iron reduction power (FRAP) in corn plants under field conditions. The experiment was carried out at the experimental farm of the UFU in 2017/2018, with five doses of silicon (0; 600; 800; 1,000; 1,200 kg ha<sup>-1</sup>) applied via soil and 2 types of infestation of *S. frugiperda* (natural; manual). The application of silicon induced the resistance in corn plants to the fall armyworm, reducing defoliation and increasing the content of this element in the leaf. However, the productivity and the other agronomic characteristics of corn, such as weight of a thousand grains and fresh and dry weight of plants, were not influenced by silicate fertilization, as well as Si application did not influence gas exchange and photosynthetic efficiency, polyphenol production and FRAP. Si can be used, together with other control methods, in the integrated management of *S. frugiperda* in maize plants.

**Keywords:** *Zea mays*. Fall armyworm. Silicate fertilization. Induction of resistance.

## 1 INTRODUÇÃO

O milho, *Zea mays* L., no decorrer das últimas décadas, alcançou o patamar de maior cultura agrícola do mundo, sendo a única a ter ultrapassado a marca de 1 bilhão de toneladas, superando culturas como o arroz e o trigo (CONTINI et al., 2019). Concomitantemente à sua importância em termos de produção, a cultura ainda se notabiliza pelos diversos usos, sendo relatadas mais de 3.500 aplicações deste cereal. Além da relevância no aspecto de segurança alimentar, na alimentação humana e animal, é possível produzir com o milho uma infinidade de produtos, tais como combustíveis, bebidas, rações, cosméticos etc. (MIRANDA, 2018).

No primeiro levantamento da safra brasileira de grãos, a estimativa é de que a área cultivada de milho no país para a safra de 2020/2021 seja de 18.482,4 mil hectares com produtividade de 5.690 kg ha<sup>-1</sup> (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2020). Para atingir o potencial produtivo desta cultura diversos itens devem ser observados, dentre eles, o controle eficaz de pragas, principalmente o da lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). Esta praga ocorre praticamente durante todo o ciclo da cultura com perdas que podem variar de acordo com alguns fatores, como a cultivar utilizada, a fase fenológica, o sistema de produção e o local de plantio (SARMENTO et al., 2002), podendo reduzir a produção do milho em 20 a 60% (TAVARES, 2019), chegando a 100% caso o ataque ocorra na fase inicial de desenvolvimento da planta (MICHELOTTO et al., 2011).

Observando a necessidade de um controle eficiente desta e de outras pragas, buscando-se métodos que não ofereçam riscos ao meio ambiente, diversas alternativas são apresentadas, dentre elas a utilização de fontes de silício. O silício (Si) é um dos elementos químicos em maior abundância na crosta terrestre (KORNDÖRFER, 1999), sendo considerado um elemento benéfico para as plantas (EPSTEIN, 1994; LUYCKX et al., 2017) algumas plantas, como o milho, são acumuladoras desse elemento. A recente descoberta de transportadores de Si específicos, através de canais tipo aquaporina (MA et al., 2006) e os enormes avanços no sequenciamento de alto rendimento e na genômica, abriram o caminho para uma compreensão mais clara dos mecanismos moleculares subjacentes à absorção de Si nas plantas. Como resultado, tornou-se mais fácil classificar corretamente as plantas com base em suas capacidades de acumulação de Si e até prever quais espécies de plantas são mais propensas a se beneficiar da adubação com Si (DESHMUKH; BÉLANGER, 2016).

Com condições controladas em estudos de laboratório, foi demonstrado aumento do canibalismo (GOUSSAIN et al., 2002), redução da população (ALVARENGA et al., 2017) e

do consumo de *S. frugiperda* em folhas de milho tratadas com Si (GONZALEZ et al., 2015; GOUSSAIN et al., 2002; NERI et al., 2005). Em estudos realizados envolvendo *S. frugiperda* constatou-se redução da população e dos danos, devido à deposição e polimerização do silício na parede celular em função do enrijecimento foliar, dificultando a alimentação desta praga, causando desgaste excessivo da região incisora da mandíbula. Também foi observado alto índice de canibalismo entre lagartas de primeiro e sexto ínstar. Além de criar uma barreira mecânica, o silício proporcionou uma ativação mais rápida do sistema de defesa vegetal, formando compostos fenólicos envolvidos no processo de resistência da planta (GOUSSAIN et al., 2002).

Embora sejam poucos os trabalhos em condições de campo testando Si no controle da *S. frugiperda* e não sendo encontradas evidências de que a indução de resistência ocorre em plantas cultivadas no campo de maneira análoga ao que ocorre em condições de laboratório (ANTUNES et al., 2010; NERI et al., 2009). Perdomo (2017) observou a tendência de redução da desfolha por *S. frugiperda* em plantas de milho na dose de 450 kg ha<sup>-1</sup> de Si, com menor desfolha na dose de 600 kg ha<sup>-1</sup> de Si, não afetando a produtividade de grãos. Os resultados de Perdomo (2017) indicam que doses maiores de Si podem ter efeito mais incisivo na redução da desfolha de *S. frugiperda* e na produtividade do milho, havendo a necessidade de se testar a relação dose/resposta nesse sistema.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de doses de Si, maiores do que 600 kg ha<sup>-1</sup>, na produtividade e na indução de resistência à *S. frugiperda* em plantas de milho em condições de campo. Além disso, como são escassos os conhecimentos sobre o efeito do Si no metabolismo das plantas de milho foram avaliadas as trocas gasosas e eficiência fotossintética, polifenóis e poder de redução do ferro.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Local do experimento

O experimento foi realizado na Fazenda experimental Capim Branco, pertencente à Universidade Federal de Uberlândia, no município de Uberlândia – MG, latitude 18°53'19''S, longitude 48°20'57''W e altitude de 835m, durante o período de novembro de 2017 a maio de 2018. De acordo com o método de Köppen, o clima da região é classificado como Aw, tropical quente e úmido, com inverno frio e seco, sendo a temperatura média anual de 21,5°C com 1.479 mm de pluviosidade média anual (ROLIM et al., 2007).

### 2.2 Características, preparo e adubação do solo

A área onde o experimento foi instalado possui tipo de solo caracterizado como LATOSSOLO VERMELHO Escuro distrófico de textura argilosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2013). Antes da instalação do experimento realizou-se a coleta de solo e a análise química para averiguar a fertilidade do solo (Tabela 1). A área em estudo foi escolhida por apresentar baixo teor de Si no solo (6,3 mg kg<sup>-1</sup> de solo), o que favorece a resposta a adubação silicatada (KORNDÖRFER et al., 1999).

Tabela 1 – Análise química do solo da área do experimento.

pH em H <sub>2</sub> O	M.O	P Meh <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> e Al <sup>+</sup>	Si	V
	(dag kg <sup>-1</sup> )	(mg dm <sup>-3</sup> )		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>				(mg kg <sup>-1</sup> )	(%)
6,1	1,7	1,3	118	2,1	0,7	0,0	2,5	6,3	55

Fonte: Laboratório de Análise de Solos e Calcários do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

Para o preparo do solo foi realizado uma aração e duas gradagens. A adubação foi realizada de forma manual no dia 07/11/2017, 43 dias antes da semeadura, utilizando-se o produto comercial Agrosilício Plus® (10,5% Silício; 35% de CaO; e 10% MgO) para os tratamentos com Si e para os tratamentos sem Si foi utilizado o calcário dolomítico Ercal® (37-38% de CaO e 8-10% de MgO) para equilibrar as quantidades de Ca e Mg (Tabela 2). As quantidades de Si e de calcário aplicadas foram definidas de acordo com as doses de Si utilizadas de modo que todos os tratamentos recebessem a mesma quantidade de cálcio e

magnésio.

Tabela 2 – Quantidade de silício e calcário utilizada no experimento.

<b>Dose de Silício kg ha<sup>-1</sup></b>	<b>Dose de Calcário kg ha<sup>-1</sup></b>
0	1.200
600	600
800	400
1.000	200
1.200	0

Fonte: A autora

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso com esquema fatorial de 5 x 2 (5 níveis de Si x com e sem infestação manual de lagarta) com 4 repetições, totalizando 40 parcelas para os dados de desfolha, aspectos produtivos do milho e teor de Si foliar. Para os dados de avaliação metabólica da planta foram comparados dois tratamentos (dose 0 e 1.200 kg de Si ha<sup>-1</sup> ambos com infestação manual) com 4 repetições.

### 2.3 Semeadura e condução do experimento

A lavoura foi implantada na safra 2017/2018 seguindo manejo recomendado pela Embrapa, sem aplicação de inseticidas, sendo feita semeadura em 20/12/2017, com o híbrido DEKALB 4600 RR<sub>2</sub> (resistente ao glifosato e não Bt).

A semeadura foi realizada de forma manual na profundidade de 3-4 centímetros, sendo distribuídas uniformemente 17 sementes em cada linha de 5,0 metros, totalizando assim 68 mil sementes por hectare. Sete dias após a emergência das plântulas, foi realizado o desbaste retirando as plantas menos vigorosas e deixando 60 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

Cada parcela foi constituída de seis linhas de cinco metros cada, espaçadas de 0,50 m entre linhas, totalizando 15 m<sup>2</sup>. A parcela útil foi formada pelas quatro linhas centrais, eliminando-se as duas linhas laterais e 1,0 m de cada extremidade, perfazendo 6,0 m<sup>2</sup> para cada parcela útil. Junto à semeadura realizou-se a primeira adubação com 350 kg ha<sup>-1</sup> do formulado NPK 8-28-16. No decorrer do experimento realizou-se o controle de plantas daninhas, aplicando-se 15 dias antes da semeadura e 21 dias após a emergência das plântulas (V6) o herbicida não seletivo com ação sistêmica à base de glifosato (Roundup<sup>®</sup> WG) na dose de 2,5 kg ha<sup>-1</sup>. Dezoito dias após a semeadura (DAS) (V4) realizou-se a segunda adubação com 150 kg ha<sup>-1</sup> de Ureia+72 kg ha<sup>-1</sup> de Cloreto de Potássio (KCl) e 13 dias após (V8), uma terceira

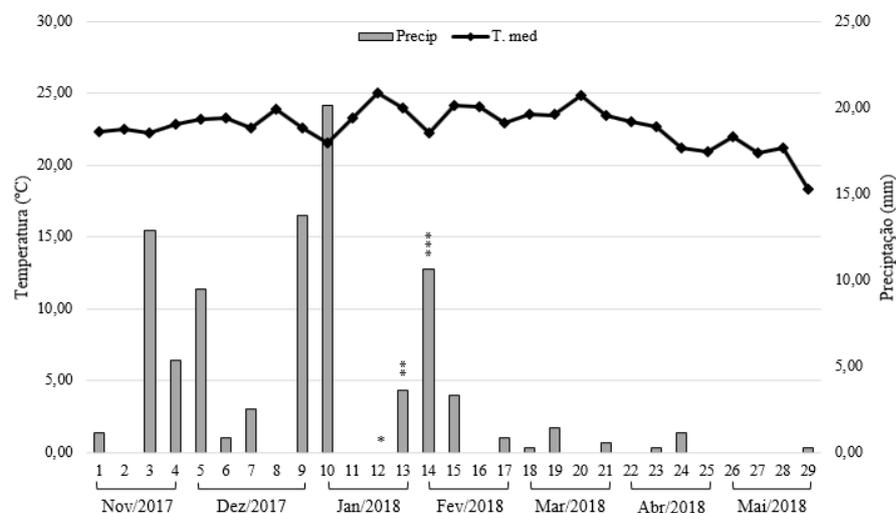
aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> de Ureia. Para proporcionar condições ótimas que a cultura necessita, foi utilizada irrigação por aspersão, com lâmina de 10 mm de água, duas vezes por semana.

O Laboratório de Criação de Insetos da Embrapa forneceu as posturas das lagartas de *S. frugiperda*, sendo sua população multiplicada no Laboratório de Entomologia e Controle Biológico (LACOB-UFU) utilizando-se a dieta modificada de Greene et al. (1976) e criação seguindo metodologia adaptada de Parra (2001). As posturas foram colocadas em copos plásticos de 100 mL com tampa, contendo uma porção de dieta artificial, as lagartas de 3º ínstar foram utilizadas no experimento.

Metade das parcelas foi infestada manualmente com *S. frugiperda*, enquanto, na outra metade das parcelas a infestação da lagarta-do-cartucho ocorreu naturalmente. Para a infestação manual das plantas, 30 dias após a semeadura (V8), todas as plantas das quatro linhas centrais das parcelas foram infestadas, transferindo-se para o cartucho das plantas, com auxílio de um pincel fino, três lagartas de 3º ínstar de *S. frugiperda*.

Durante o período de condução do experimento (07/11/2017 a 15/05/2018) os dados climáticos foram coletados na estação meteorológica instalado na Fazenda Capim Branco a aproximadamente 300 m da área experimental (Figura 1).

Figura 1 – Variação de temperatura média do ar (°C) e precipitação pluvial acumulada (mm) por semana, durante o experimento (07 de novembro 2017 - 15 de maio de 2018). Avaliações de desfolha em dias após a infestação manual (DAI) de *Spodoptera frugiperda* e estágio vegetativo das plantas de milho: \*Prévia (V8); \*\*5DAI (V10) e 10DAI (V12) e \*\*\*15DAI (V14).



Fonte: Estação meteorológica da Fazenda Capim Branco - UFU, Uberlândia-MG, 2018.

Para a avaliação da desfolha causada por *S. frugiperda*, foi utilizada a escala visual de danos proposta por Carvalho (1970), atribuindo notas de 0-5 (Tabela 3). A avaliação foi realizada em folhas do cartucho e, quando uma planta apresentou danos correspondentes a mais de uma nota, prevaleceu a mais alta (PALMA et al., 2012). As avaliações da desfolha foram efetuadas em 20 plantas nas duas linhas centrais. Antes da infestação (aos 29 dias após a semeadura – V8) foi realizada uma avaliação prévia para verificar a desfolha em função da infestação natural de lagartas. Após a infestação foram realizadas três avaliações de desfolha, aos 5, 10 e 15 dias após a infestação (DAI) com *S. frugiperda*, aos 35 (V10), 40 (V12) e 45 DAS (V14), respectivamente (Figura 1).

Tabela 3 – Escala de dano causado por *Spodoptera frugiperda* (Smith).

NOTA	DESCRIÇÃO DO DANO
0	Plantas sem desfolha
1	Plantas com folhas raspadas
2	Plantas com folhas furadas
3	Plantas com lesões nas folhas e cartucho
4	Plantas com o cartucho destruído
5	Plantas com muitas folhas e cartucho totalmente destruído

Fonte: Carvalho (1970).

Dezessete dias após a maturação fisiológica foram cortadas rente à raiz 10 plantas nas linhas adjacentes às linhas centrais para determinação do peso da matéria fresca com o auxílio de uma balança portátil. Em seguida estas plantas foram ensiladas e as amostras foram acondicionadas em sacos de papel, e levadas à estufa de circulação forçada de ar a 60 - 65°C até massa constante, foram trituradas em moinho tipo Wiley, para reduzir as amostras em partículas entre 4 e 6 mm e em seguida pesadas para determinar o peso seco. Uma amostra de cada tratamento foi retirada e realizada a análise de silício foliar no Laboratório de Fertilizantes (LAFER-UFU) de acordo com o método azul descrito por Korndörfer et al. (2004).

A produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) foi obtida mediante a colheita das espigas das duas linhas centrais de cada parcela, 144 DAS (R8). Posteriormente, essas espigas passaram pelo processo de debulha manual e limpeza, depois os grãos foram pesados. Os dados obtidos em gramas por parcela útil foram transformados em quilogramas por hectare e corrigidos para 13% de umidade mediante a seguinte fórmula:

$$\text{Peso final} = \text{Peso inicial da amostra} \times \frac{100 - \text{Umidade inicial da amostra}}{100 - 13\% (\text{Umidade final da amostra})}$$

Para obtenção do peso de mil grãos, durante a debulha manual das espigas foram coletadas oito amostras de 100 grãos cada, de acordo com a metodologia indicada para análise de sementes segundo BRASIL (2009). Após pesagem das amostras, foram calculadas a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos valores obtidos nas pesagens, após esses cálculos, o peso médio das oito subamostras foi multiplicado por 10. Os dados obtidos foram transformados a 13% de umidade com apoio da mesma fórmula usada para produtividade.

## 2.4 Avaliação metabólica

### 2.4.1 Trocas gasosas e eficiência fotossintética

As medidas das taxas de assimilação líquida do CO<sub>2</sub> (A<sub>CO<sub>2</sub></sub> - mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), condutância estomática (g<sub>s</sub> - mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e a taxa de transpiração (E - mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) foram determinadas com um sistema portátil de análise de trocas gasosas no infra-vermelho (IRGA - Infra-red Gas Analyser - Lepro ADC). O sistema de trocas gasosas do aparelho é aberto de maneira que o fluxo de ar fresco (novo) seja contínuo. As medidas foram feitas 99 DAS (R3), no período matutino entre 9h e 12h em uma planta por parcela nos tratamentos sem Si e 1.200 kg ha<sup>-1</sup> de Si, ambos com infestação manual de *S. frugiperda*. Foram realizadas três medições na folha mais expandida e saudável abaixo da espiga. Pela razão entre taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> e a taxa de transpiração, foi calculada a eficiência instantânea do uso da água (A/E - mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> / mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), eficiência intrínseca do uso da água (A/g<sub>s</sub> - mmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O) e a eficiência de carboxilação (A/ci - mol ar m<sup>-2</sup> s<sup>-2</sup>).

### 2.4.2 Análise de polifenóis e poder de redução do ferro (FRAP)

Para as análises de polifenóis em plantas de milho, aos 99 DAS (R3), foi coletada a folha oposta abaixo da espiga em cada parcela dos tratamentos 0 e 1.200 kg ha<sup>-1</sup> de Si, ambos com infestação manual de lagarta. Em seguida retirado 15 cm centrais da folha, congelado em nitrogênio líquido, acondicionado em papel alumínio e conservado em gelo seco, sendo posteriormente armazenado em ultrafreezer a -80°C até o momento das análises, que foram

realizadas no Laboratório de Bioquímica e Biologia Molecular (LABIBI-UFU). Para a determinação das concentrações totais de polifenóis nos extratos utilizou-se como base o método de Zou et al. (2011) em microplacas de 96 poços.

Os extratos foram diluídos em metanol na concentração de  $1 \text{ mg mL}^{-1}$ . Todas as análises foram feitas em triplicata. Para a determinação de fenóis totais e poder de redução do ferro (FRAP), utilizou-se o reagente Folin Ciocalteu na qual envolve a redução do reagente de Folin (mistura dos ácidos fosfomolibdico e fosfotúngstico) pelos compostos fenólicos. O ensaio foi iniciado com a adição de  $5 \text{ }\mu\text{L}$  de solução de extrato/partição,  $25 \text{ }\mu\text{L}$  de solução aquosa do reagente Folin-Ciocalteu e  $195 \text{ }\mu\text{L}$  de água milli-Q em cada poço e depois incubado por 6 min à  $25^\circ\text{C}$ . Após a incubação, adicionou-se  $75 \text{ }\mu\text{L}$  de carbonato de sódio  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (7%) e a placa foi novamente incubada por 2h à  $25^\circ\text{C}$  na ausência de luz. A determinação foi feita pela medida da absorbância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 760 nm.

O mesmo procedimento foi realizado utilizando  $5 \text{ }\mu\text{L}$  de etanol para obtenção do branco. O conteúdo de fenóis totais foi obtido utilizando uma curva analítica construída com padrões de ácido gálico, nas concentrações de 15,62; 31,25; 62,5; 125; 250; 500; 1.000 e 2.000  $\mu\text{g/mL}$ . Os resultados dos polifenóis foram expressos como miligramas de equivalentes de ácido gálico por grama de amostra (mg GAE/g) e  $\mu\text{mol Trolox eq/L}$  para o poder de redução do ferro (FRAP).

## 2.5 Análise dos dados

Os resultados foram primeiramente submetidos aos testes de pressuposições com o auxílio do programa SPSS 20.0 (NORUSIS, 2008) a fim de avaliar a normalidade dos resíduos, pelo teste de Shapiro-Wilk, e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene, considerando 5% de probabilidade para os resultados de desfolha por planta em cada avaliação, trocas gasosas e eficiência fotossintética, peso fresco e seco, teor de silício e peso de mil grãos, e 1% para os resultados de produtividade. Todos os dados atenderam as pressuposições de normalidade e homogeneidade, exceto teor de Si, que foi transformado para arco seno da raiz de x.

Para os dados de desfolha, aspectos produtivos do milho, teor de Si foliar foi realizada ANOVA e as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5%. Para os dados das avaliações metabólicas as médias foram comparadas pelo teste T a 5%. E para avaliar o efeito das doses de Si nos dados de desfolha 15 DAI foi proposto o modelo quadrático para infestação manual e o modelo linear para a infestação natural, assim como para o teor de Si foliar.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Desfolha

Nas avaliações de desfolha por *S. frugiperda* em plantas de milho, não houve interação significativa entre doses de Si e tipo de infestação de lagartas, nas avaliações prévia (F = 0,213; df= 4/27; P = 0,9288), 5 DAI (dias após a infestação) (F = 0,343; df= 4/27; P = 0,8466) e 10 DAI (F = 1,228; df = 4/27; P = 0,3223). Na avaliação prévia, ou seja, um dia antes da infestação manual com lagartas, as médias de desfolha não diferiram em relação ao tipo de infestação (F=0,014; df= 1/27; P= 0,9057), indicando que a presença natural de *S. frugiperda* foi homogênea entre os tratamentos. Também não houve diferenças entre as doses de Si utilizadas (F=0,607; df= 4/27; P= 0,6612) (Tabela 4). Aos 5 DAI não houve diferença entre as doses de Si (F= 0,402; df= 4/27; P= 0,8056), no entanto, a infestação manual apresentou maior média (média 2,93±0,07) que a infestação natural (média 1,82±0,04), diferindo entre si (F= 149,028; df= 1/27; P< 0,0001) (Tabela 4). Aos 10 DAI houve diferença entre as médias de desfolha apenas para o tipo de infestação (F= 174,915; df= 1/27; P< 0,0001), sendo a média maior (média 3,35±0,06) para a infestação manual. Não havendo diferença entre as doses testadas (F= 1,935; df= 4/27; P= 0,1333) (Tabela 4).

Foi observada interação entre a dose de Si e o método de infestação aos 15 DAI (F= 21,322; df= 4/27; P< 0,0001). Observou-se efeito do Si na redução da desfolha, tanto na infestação manual (F= 66,145; df= 4/27; P< 0,0001) quanto natural (F= 4.842; df= 4/27; P= 0,0044), utilizando um modelo linear e quadrático para infestações naturais e manuais, respectivamente, com uma tendência de diminuição da desfolha com aumento do Si no solo (Figura 2). A desfolha não foi afetada pelo método de infestação a 800 kg ha<sup>-1</sup> de Si (F= 1,693; df= 1/27; P= 0,2042); no entanto, foram observados níveis mais altos de desfolhamento em plantas infestadas manualmente do que naquelas com infestação natural da lagarta no controle (F= 164,839; df= 1/27; P< 0,0001) e nas doses de 600 (F= 59.610; df= 1/27; P< 0,0001), 1.000 (F= 18,814; df= 1/27; P= 0,0002) e 1.200 (F= 7.232; df= 1/27; P= 0,0121) kg ha<sup>-1</sup> de Si (Tabela 4).

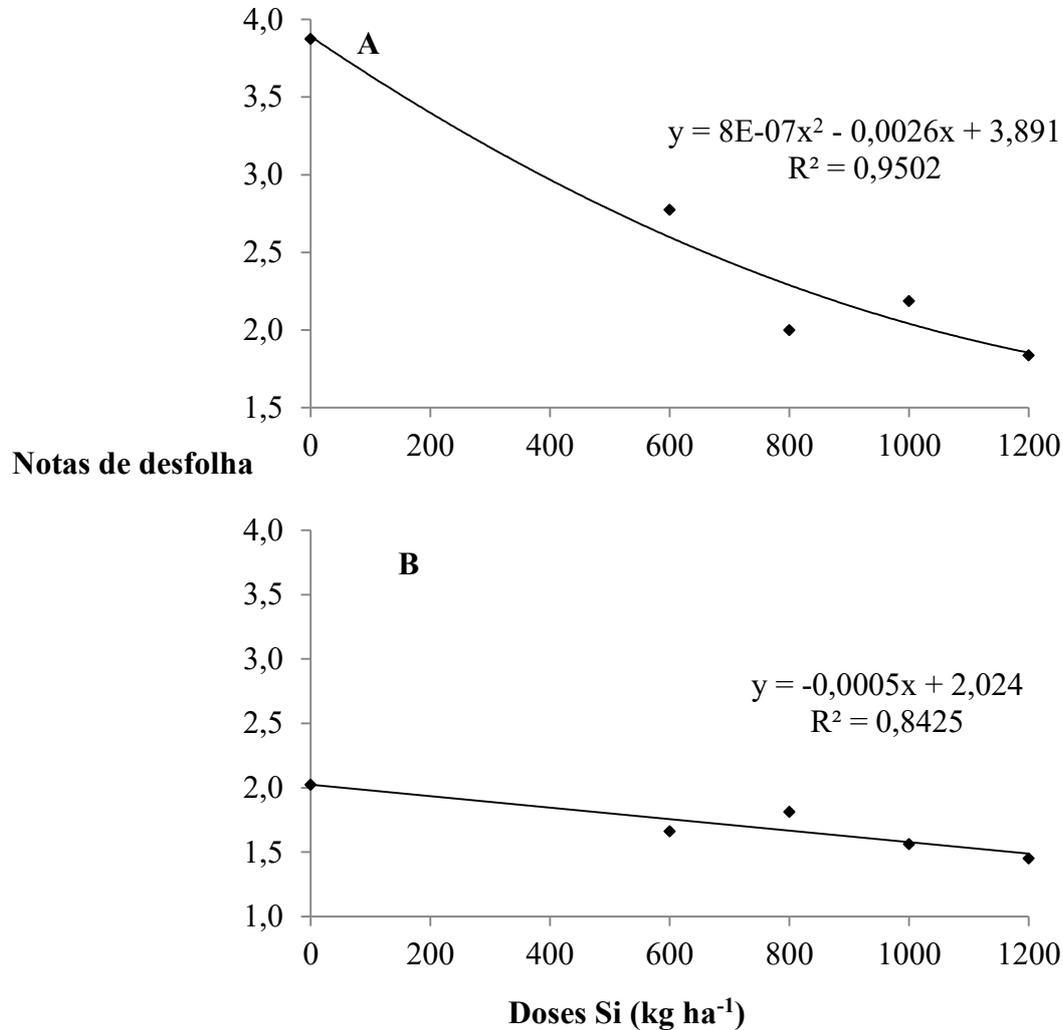
Tabela 4 – Notas de desfolha, segundo escala (0 a 5) de Carvalho (1970), em milho com diferentes doses de silício ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) aplicado via solo com infestação natural e após infestação manual de *Spodoptera frugiperda*.

Avaliação	Doses silício	Infestação		
		Manual	Natural	Média±Erro
Prévia	0	1,68±0,19	1,73±0,10	1,70±0,10 a
	600	1,84±0,11	1,78±0,17	1,81±0,10 a
	800	1,63±0,20	1,73±0,12	1,68±0,11 a
	1.000	1,90±0,05	1,80±0,11	1,85±0,06 a
	1.200	1,71±0,17	1,78±0,15	1,74±0,11 a
	<b>Média±Erro</b>	1,75±0,07 A	1,76±0,05 A	CV(%) = 15,06
5 DAI	0	2,89±0,17	1,83±0,08	2,36±0,22 a
	600	2,99±0,17	1,84±0,09	2,41±0,24 a
	800	2,81±0,10	1,89±0,08	2,35±0,19 a
	1.000	3,06±0,12	1,85±0,06	2,46±0,24 a
	1.200	2,89±0,27	1,69±0,12	2,29±0,27 a
	<b>Média±Erro</b>	2,93±0,07 B	1,82±0,04 A	CV(%) = 12,12
10 DAI	0	3,53±0,14	1,89±0,07	2,71±0,29 a
	600	3,45±0,15	2,45±0,14	2,95±0,29 a
	800	3,38±0,14	2,01±0,05	2,68±0,26 a
	1.000	3,35±0,13	1,99±0,04	2,67±0,27 a
	1.200	3,10±0,14	1,96±0,02	2,53±0,23 a
	<b>Média±Erro</b>	3,35±0,06 B	2,06±0,03 A	CV(%) = 11,42
15 DAI	0	3,88±0,11 B	2,03±0,72 A	---
	600	2,78±0,06 B	1,66±0,07 A	---
	800	2,00±0,11 A	1,81±0,09 A	---
	1.000	2,19±0,08 B	1,56±0,12 A	---
	1.200	1,84±0,06 B	1,45±0,18 A	---
	<b>Média±Erro</b>	---	---	CV(%) = 9,62

Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. DAI= Dias após a infestação manual.

Fonte: A autora.

Figura 2 – Notas de desfolha, segundo escala de (0 a 5) de Carvalho (1970), aos 15 dias após a infestação (DAI) manual de *Spodoptera frugiperda* em milho com diferentes doses de silício ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) aplicado via solo. A: Infestação manual; B: Infestação natural.



Fonte: A autora.

### 3.2 Aspectos produtivos do milho e teor de silício foliar

Não houve interação significativa entre doses de Si e tipo de infestação de lagartas para peso fresco ( $F = 0,246$ ;  $df = 4/27$ ;  $P = 0,9093$ ) e peso seco ( $F = 0,820$ ;  $df = 4/27$ ;  $P = 0,5238$ ) das plantas de milho. O peso fresco das plantas (Tabela 5) não diferiu nem em relação às doses de Si utilizadas ( $F = 1,325$ ;  $df = 4/27$ ;  $P = 0,2860$ ), nem ao tipo de infestação ( $F = 0,286$ ;  $df = 1/27$ ;  $p = 0,5970$ ), assim como o peso seco das plantas (doses:  $F = 0,455$ ;  $df = 4/27$ ;  $P = 0,7676$ ) (infestação:  $F = 0,082$ ;  $df = 1/27$ ;  $P = 0,7767$ ) (Tabela 6).

Tabela 5 – Peso fresco (g) das plantas inteiras de milho, adubadas com diferentes doses (kg ha<sup>-1</sup>) de silício aplicadas via solo, com infestação manual e natural de *Spodoptera frugiperda*.

<b>Infestação de <i>S. frugiperda</i></b>			
<b>Doses de Silício</b>	<b>Manual</b>	<b>Natural</b>	<b>Média±Erro</b>
<b>0</b>	1.150,0±92,47	1.182,5±241,33	1.166,25±16,25 a
<b>600</b>	1.250,0±126,75	1.282,5±137,50	1.266,25±16,25 a
<b>800</b>	1.347,5±106,96	1.277,5±157,50	1.312,50±35,00 a
<b>1.000</b>	1.330,0±226,09	1.482,5±262,25	1.406,25±76,25 a
<b>1.200</b>	1.200,0±80,62	1.242,5±122,98	1.221,25±21,25 a
<b>Média±Erro</b>	1.255,50±31,06 A	1.293,50±51,33 A	<b>CV(%) = 17,62</b>

Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

Tabela 6 – Peso seco (g) das plantas de milho adubadas com diferentes doses (kg ha<sup>-1</sup>) de silício aplicadas via solo, com infestação manual e natural de *Spodoptera frugiperda*.

<b>Infestação de <i>S. frugiperda</i></b>			
<b>Doses de Silício</b>	<b>Manual</b>	<b>Natural</b>	<b>Média±Erro</b>
<b>0</b>	174,76±13,63	153,93±9,36	164,35±10,42 a
<b>600</b>	170,60±8,44	174,93±6,10	172,77±2,17 a
<b>800</b>	174,35±7,17	172,16±7,74	173,25±1,10 a
<b>1.000</b>	168,30±14,28	179,98±5,56	174,14±5,84 a
<b>1.200</b>	167,08±6,55	165,56±11,91	166,32±0,76 a
<b>Média±Erro</b>	171,01±1,55 A	169,31±4,50 A	<b>CV(%) = 11,07</b>

Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

Não houve interação significativa entre doses de Si e tipo de infestação de lagartas para produtividade (F= 0,448; df= 4/27; P= 0,7732) e nem para peso de mil grãos (F= 0,377; df= 4/27; P= 0,8227). A produtividade das plantas de milho não diferiu entre as doses de Si (F= 1,007; df= 4/27; P= 0,4212) e tipo de infestação (F= 0,057; df= 1/27; P= 0,8139) (Tabela 7), assim como o peso de mil grãos (Tabela 8). Não houve interação significativa entre doses de Si e tipo de infestação de lagartas para os teores de Si presente nas folhas das plantas de milho (F= 0,140; df= 4/27; P= 0,9662), contudo, o teor de Si foliar aumentou de forma linear com o aumento das doses de Si no solo (F= 2,967; df= 4/27; P= 0,0354) (Figura 3). Os teores de Si não variaram em relação ao tipo de infestação (F= 2,249; df= 1/27; P= 0,1441) (Tabela 9).

Tabela 7 – Produtividade (kg ha<sup>-1</sup>) de plantas de milho sob diferentes doses de silício (kg ha<sup>-1</sup>), com infestação manual e natural de *Spodoptera frugiperda*.

<b>Infestação de <i>S. frugiperda</i></b>			
<b>Doses de Silício</b>	<b>Manual</b>	<b>Natural</b>	<b>Média±Erro</b>
<b>0</b>	15.424±1.568,2	16.321±904,4	15.873±855,0 a
<b>600</b>	14.784±546,3	15.269±1.486,0	15.027±738,6 a
<b>800</b>	14.835±457,3	13.775±712,4	14.305±440,1 a
<b>1.000</b>	14.268±1.382,5	15.588±251,9	14.928±696,7 a
<b>1.200</b>	16.683±1.229,8	15.875±1.744,3	16.279±999,7 a
<b>Média±Erro</b>	15.199±487,7 A	15.366±499,3 A	<b>CV(%) = 14,59</b>

Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

Tabela 8 – Peso de mil grãos (g) de plantas de milho sob diferentes doses de silício (kg ha<sup>-1</sup>), com infestação manual e natural de *Spodoptera frugiperda*.

<b>Infestação de <i>S. frugiperda</i></b>			
<b>Doses de Silício</b>	<b>Manual</b>	<b>Natural</b>	<b>Média±Erro</b>
<b>0</b>	28,4±1,04	27,9±1,51	28,1±0,25 a
<b>600</b>	28,9±1,26	28,7±1,97	28,8±0,10 a
<b>800</b>	29,0±1,03	26,3±0,57	27,7±1,35 a
<b>1.000</b>	27,2±2,48	26,4±1,36	26,8±0,40 a
<b>1.200</b>	29,5±1,59	27,2±0,65	28,4±1,15 a
<b>Média±Erro</b>	28,6±0,39 A	27,3±0,45 A	<b>CV(%) = 9,37</b>

Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

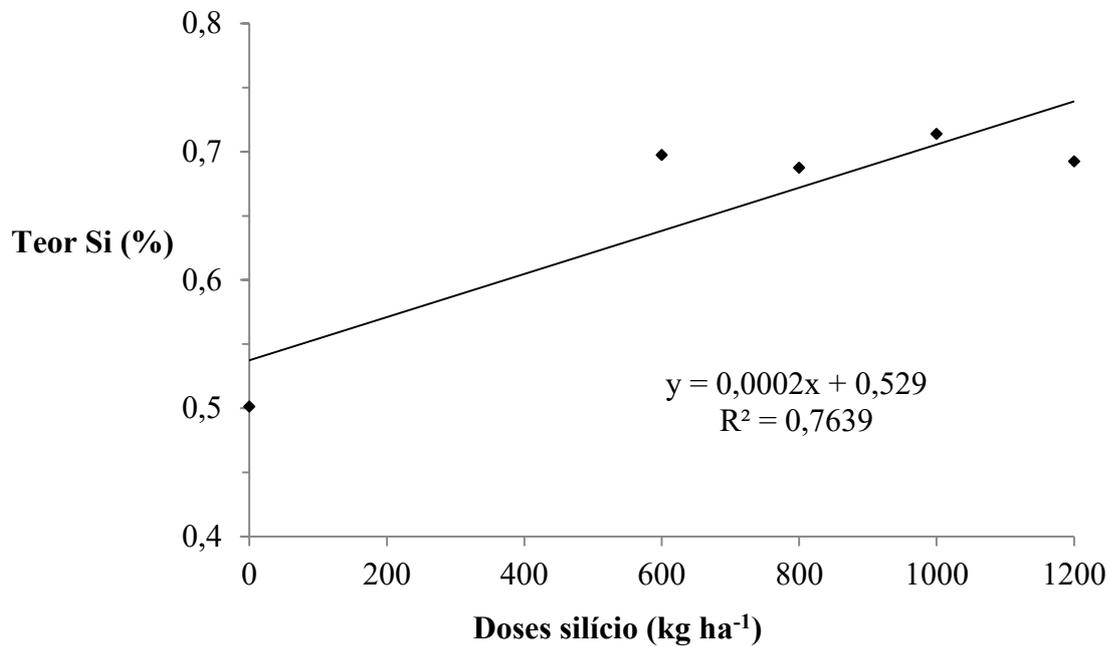
Tabela 9 – Teores de silício (%) presente nas folhas de plantas de milho adubadas com diferentes doses (kg ha<sup>-1</sup>) de silício aplicadas via solo, com infestação manual e natural de *Spodoptera frugiperda*.

<b>Infestação de <i>S. frugiperda</i></b>			
<b>Doses de Silício</b>	<b>Manual</b>	<b>Natural</b>	
<b>0</b>	0,5±0,04	0,5±0,09	
<b>600</b>	0,7±0,07	0,7±0,09	
<b>800</b>	0,7±0,04	0,6±0,04	
<b>1.000</b>	0,7±0,12	0,7±0,08	
<b>1.200</b>	0,7±0,06	0,6±0,08	
<b>Média±Erro</b>	0,68±0,04 A	0,63±0,04 A	<b>CV(%) = 11,61</b>

Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na linha, diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

Figura 3 – Teores de silício (%) presente nas folhas de plantas de milho adubadas com diferentes doses ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de silício aplicadas via solo.



Fonte: A autora.

### 3.3 Avaliação metabólica

Não houve diferença entre os tratamentos 0 e  $1.200 \text{ kg ha}^{-1}$  de Si, ambos com infestação manual de *S. frugiperda*, e as características do metabolismo do carbono (Tabela 10), os teores de polifenóis e FRAP (Tabela 11).

Tabela 10 – Trocas gasosas e eficiência fotossintética (média  $\pm$  erro padrão) em plantas de milho adubadas ou não com silício e infestação manual de *Spodoptera frugiperda*.

	Doses de silício ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	
	0	1.200
E ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	1,87 $\pm$ 0,71 A	3,21 $\pm$ 0,97 A
gs ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	0,06 $\pm$ 0,04 A	0,24 $\pm$ 0,13 A
A ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	3,13 $\pm$ 2,04 A	5,25 $\pm$ 1,25 A
ci ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol ar}^{-1}$ )	300,25 $\pm$ 17,82 A	307,00 $\pm$ 21,96 A
A/E ( $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ )	1,31 $\pm$ 0,39 A	1,77 $\pm$ 0,18 A
A/gs ( $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ )	54,38 $\pm$ 9,48 A	47,91 $\pm$ 17,10 A
A/ci ( $\text{mol ar m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ )	0,01 $\pm$ 0,01 A	0,02 $\pm$ 0,01 A

Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na linha, diferem entre si, pelo teste T a 5% de probabilidade. E= Transpiração; gs= Condutância estomática; A= Assimilação de  $\text{CO}_2$  (fotossíntese); ci= Carbono interno; A/E= Eficiência instantânea do uso da água; A/gs = Eficiência intrínseca do uso da água (estomática); A/ci= Eficiência instantânea de carboxilação.

Fonte: A autora.

Tabela 11 – Teor de polifenóis e poder de redução do ferro (FRAP) em plantas de milho adubadas ou não com silício, e infestação manual de *Spodoptera frugiperda*.

Doses de silício (kg ha <sup>-1</sup> )	Polifenóis	FRAP
	mg GAE/g	μmol Trolox eq/L
Média±Erro		
<b>0</b>	63,31±10,95 a	110,57±9,30 a
<b>1.200</b>	76,74±9,55 a	135,70±9,65 a

Médias seguidas por letras distintas, minúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste T a 5% de probabilidade.  
Fonte: A autora.

## 4 DISCUSSÃO

A aplicação de Si no solo aumentou em 42% o teor de Si nas folhas de plantas de milho, que atingiu 0,71% de SiO<sub>2</sub>, enquanto na testemunha (sem Si) foi de 0,50%. Resultados semelhantes foram obtidos por diversos autores em diferentes culturas (BENNETT, 1982; CARVALHO et al., 1999; GOUSSAIN et al., 2002; HODSON, SANGSTER, 1988; OKUDA; TAKAHASHI, 1964). O aumento no teor de Si nas folhas pode, portanto, dificultar a alimentação das lagartas, tornando as plantas de milho mais resistentes à lagarta-do-cartucho.

A redução da desfolha em plantas de milho, causada por *S. frugiperda*, foi promovida pela adubação silicatada via solo, o que também promoveu aumento no teor foliar do Si, diminuindo praticamente pela metade a nota de desfolha no tratamento com 1.200 kg ha<sup>-1</sup> de Si. Estes resultados corroboram com os encontrados por Perdomo (2017), pelas plantas apresentarem maior resistência ao ataque de insetos, como a lagarta-do-cartucho, seja pela formação de barreira física (GOUSSAIN et al., 2002; MENZIES et al., 1991) ou pela atuação fisiológica, aumentando a produção de enzimas de proteção das plantas (CHÉRIF et al., 1994; EPSTEIN, 1999; FAWE et al., 1998). Essa formação da barreira de sílica amorfa impede o acesso ao nitrogênio e outros nutrientes, além de causar danos no trato digestivo das lagartas, reduzindo a sua capacidade de alimentação (BAKHAT et al., 2018).

Segundo os resultados encontrados por Goussain et al. (2002) em condições controladas com plantas de milho, a aplicação de Si foi capaz de diminuir o consumo de folhas por lagartas de *S. frugiperda*.

No presente trabalho não foram observados efeitos do Si na produtividade e outros aspectos produtivos da cultura do milho, como peso de mil grãos, peso fresco e seco das plantas. Porém, outros autores afirmam que o Si está relacionado ao aumento do crescimento e produção vegetal por meio de diferentes ações como o aumento da absorção de água (LIU et al., 2015) e aumento na rigidez estrutural dos tecidos, o que leva a reduzir o acamamento e quebramento das plantas, além da formação de folhas mais eretas, diminuindo o autossombreamento e aumentando a eficiência fotossintética (DATNOFF et al., 1991; 2001; EPSTEIN, 1994; MANIVANNAN; AHN, 2017; MARSCHNER, 1995; TRIPATHI et al., 2015) e a redução da evapotranspiração (COOKE; LEISHMAN, 2016; DATNOFF et al., 1991; 2001; KORNDÖRFER et al., 1999; NERI et al., 2005; PULZ et al., 2008). Esses fatores, associados à indução de resistência contra insetos herbívoros, faz com que ocorra aumento da produtividade das culturas com o uso do silício (CAMARGO et al., 2010; EPSTEIN, 1999; LIANG et al., 2007; PULZ et al., 2008; SOUSA et al., 2010; WANG et al., 2017).

Sousa et al. (2010) encontraram aumento da produtividade de grãos em plantas de milho com a aplicação de silício via foliar, porém, outros autores (FREITAS et al., 2011; REZENDE, 2018; TEODORO et al., 2014) observaram resultados similares aos do presente trabalho, não encontrando alterações na produtividade desta cultura com a aplicação de Si. O efeito benéfico do Si no crescimento das plantas é mais evidente em situações de estresse hídrico e nutricional (LUYCKX et al., 2017; MEHARG; MEHARG, 2015; PULZ, et al., 2008; SILVA; BOHNEN, 2003), podendo proporcionar maior peso seco por unidade de área foliar e desempenhar um importante papel no crescimento e desenvolvimento das plantas (EPSTEIN, 1994). Assim, a ausência de efeito do Si nas características agronômicas avaliadas, como peso fresco e seco, peso de mil grãos e produtividade, pode estar relacionado às condições hídricas e nutricionais, mais próximas possível das ideais, as quais as plantas do presente trabalho foram submetidas.

Não houve influência do Si nas trocas gasosas e eficiência fotossintética avaliadas no presente trabalho. Estudos têm demonstrado o efeito positivo do Si em plantas sob estresse hídrico. No milho, por exemplo, a adição de Si aumentou a eficiência do uso da água, reduzindo a transpiração da folha e a taxa de fluxo de água no vaso do xilema (GAO et al., 2006). Hattori et al. (2003) relataram a melhoria das características fisiológicas, como a fotossíntese, transpiração e condutância estomática com a aplicação de Si em plantas com estresse hídrico. Como no presente trabalho as plantas de milho não estavam sob estresse hídrico é provável que essa condição de estresse seja necessária para a obtenção de ganhos fotossintéticos com a adubação silicatada.

O metabolismo de carbono de plantas de milho, neste trabalho, não respondeu à adubação silicatada. Reduções na condutância estomática refletem em menor transpiração, portanto, menor perda de água e maior resistência a estresses abióticos. A condutância estomática por regular as trocas gasosas, tem relação direta com o processo fotossintético (FERREIRA, 2008). Madeiros et al. (2009) ao trabalharem com aplicação de escória de 37 siderurgias para fornecimento de Si a plantas de cana-de-açúcar observaram aumento de condutância estomática e de transpiração nas plantas acrescidas de Si.

Pinto et al. (2012) obtiveram acréscimo de 44% na taxa de fotossíntese líquida em plantas de trigo tratadas com aplicação foliar de 3 mL L<sup>-1</sup> de silicato de potássio. O autor também observou que os tratamentos não influenciaram a condutância estomática e transpiração. A condutância estomática é um fator de grande importância, uma vez que os estômatos correspondem à principal via de trocas gasosas entre atmosfera e interior das plantas, sendo também um canal de elevada perda de água (AMARAL et al., 2006).

Embora a aplicação de Si, neste trabalho, não tenha influenciado na produção de polifenóis e FRAP, o uso do Si induz a produção de enzimas relacionadas a mecanismos de defesa contra insetos, tais como a polifenol oxidase e tripsina proptease (BAKHAT et al., 2018; WU; BALDWIN, 2010) compostos tóxicos como os flavonoides (MANIVANNAN; AHN, 2017) e substâncias de baixa digestibilidade na seiva das plantas (KORNDÖRFER et al., 2011), que interferem na biologia das pragas.

A fonte de Si deve permitir o uso de uma dose de Si alta o suficiente para reduzir os danos dos insetos sem afetar o rendimento da cultura. As doses de Si neste estudo de 600 a 1.200 kg ha<sup>-1</sup> de Si promoveram a redução da desfolha sem qualquer efeito prejudicial no rendimento do milho. Isso demonstra que o Si pode ser efetivamente usado no milho, a resistência induzida é uma estratégia de manejo que pode ser combinada com outros métodos de controle, otimizando o manejo integrado da lagarta-do-cartucho e outras pragas.

## 5 CONCLUSÕES

A adubação silicatada induziu a resistência em plantas de milho à lagarta-do-cartucho, reduzindo a desfolha e aumentando o teor desse elemento na folha. No entanto, a produtividade não foi influenciada pela aplicação de silício e nem as outras características agronômicas do milho, como peso fresco e seco das plantas e peso de mil grãos. Não houve influência do silício nas trocas gasosas e eficiência fotossintética, na produção de polifenóis e no poder de redução do ferro.

## REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, R.; MORAES, J. C.; AUAD, A. M.; COELHO, M.; NASCIMENTO, A. M. Induction of resistance of corn plants to *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) by application of silicon and gibberellic acid. **Bulletin of Entomological Research**, London, v. 107, n. 4, p. 527-533, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007485316001176>
- AMARAL, J. A. T.; RENA, A. B.; AMARAL, J. F. T. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e suas relações com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 41, n. 3, p. 377-384, mar. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300002>.
- ANTUNES, C. S.; MORAES, J. C.; ANTÔNIO, A.; SILVA, V. F. Influência da aplicação de silício na ocorrência de lagartas (lepidóptera) e de seus inimigos naturais chaves em milho (*Zea mays* L.) e em girassol (*Helianthus annuus* L.). **Bioscience Journal**, Uberlândia-MG, v. 26, n. 4, p. 619-625, 2010.
- BAKHAT, H. S. F. G.; BIBI, N.; ZIA, Z.; ABBAS, S.; HAMMAD, H. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, M. R.; SHAH, G. M.; RABBANI, F.; SAEED, S. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. **Crop Protection**, Guildford, v.104, p.21-34, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- BENNETT, D. M. An ultrastructural study on the development of silicified tissue in the leaf tip of barley (*Hordeum sativum* Jess). **Annals of Botany**, Oxford, v. 50, n. 2, p. 229-237, aug. 1982. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086360>
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília-DF, 2009. 395 p.
- CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; FOLTRAN, D. E.; HENRIQUE, C. M.; ROSSETTO, R. Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas-SP, v.69, n.4, p.937-944, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000400020>
- CARVALHO, R. L. P. **Danos, flutuação da população, controle e comportamento de *Spodoptera frugiperda* (J.E.Smith, 1797) e susceptibilidade de diferentes cultivares de milho, em condições de campo**. 1970. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1970.
- CARVALHO, S. P.; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G. Efeito do silício na resistência do sorgo (*Sorghum bicolor*) ao pulgão verde (*Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, Londrina-PR, v. 28, n. 4, p. 505-510, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0301-80591999000300017>
- CHÉRIF, M.; ASSELIN, A.; BÉLANGER, R. R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. **Phytopathology**, St. Paul, v. 84, n. 3, p. 236- 242, mar., 1994. DOI: 10.1094/Phyto-84-236.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento safra brasileira de grãos**, Safra 2020/21 – Primeiro levantamento, Brasília-DF, v. 8, n.1, p. 1-77, out. 2020.

CONTINI, E.; MOTA, M. M.; MARRA, R.; BORGHI, E.; MIRANDA, R. A.; SILVA, A. F.; SILVA, D. D.; MACHADO, J. R. A.; COTA, L. V.; COSTA, R. V.; MENDES, S. M. **Milho – Caracterização e Desafios Tecnológicos. Parte 2**. Brasília-DF: Embrapa, 2019. 45 p. (Desafios do Agronegócio Brasileiro). Nota técnica.

COOKE, J.; LEISHMAN, M. R. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Functional Ecology**, London, v.30, n. 8, p.1340-1357, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12713>

DATNOFF, L. E.; RAID, R. N.; SNYDER, G. H. Effect of calcium silicate on bruzone and brown spot intensities and yields of rice. **Plant Disease**, St. Paul, v. 75, n. 7, p. 729-732, jan. 1991. DOI: <http://dx.doi.org/10.1094/PD-75-0729>

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon on Agriculture**. Amsterdam, Netherlands : Elsevier Science, 2001. 403p.

DESHMUKH, R; BÉLANGER, R. R. Molecular evolution of aquaporins and silicon influx in plants. **Functional Ecology**, London, v. 30, n. 8, p. 1277-1285, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12570>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília-DF, 2013. 353p.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 91, n. 1, p. 11–17, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Washington, v. 50, n. 1, p. 641-664, jun. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>

FAWE, A.; ABOU-ZAID, M.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Silicon – mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. **Phytopatology**. St. Paul, v. 88, n. 5, p. 396-401, maio 1998. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1998.88.5.396>

FERREIRA, S. M. **Efeito do silício na cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.): aspectos bioquímicos, qualidade de fibra e produtividade**. 2008. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2008.

FREITAS, L. B.; COELHO, E. M.; MAIA, S. C. M.; SILVA, T. R. B. Adubação foliar com silício na cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa-SP, v. 58, n. 2, p. 262-267, 2011.

- GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, [s.l.], v. 29, n. 9, p. 1637-1647, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904160600851494>

GONZALEZ, L. C.; PRADO, R. M.; DA SILVA JÚNIOR, B.; CAMPOS, C. N. S.; FERNÁNDEZ, O.; DA SILVA, R. P.; MODA, L. R.; PUENTE, R. A. Daños por *Spodoptera frugiperda* Smith en maíz en función de nitrógeno, potasio y silicio. **Revista de Protección Vegetal**, Cienfuegos, v. 30, n. 3, p. 176-184, 2015.

GOUSSAIN, M. M.; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G.; NOGUEIRA, N. L.; ROSSI, M. L. Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta do cartucho *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotropical Entomology**, Londrina-PR, v. 31, n. 2, p. 305-310, Apr./June 2002.

GREENE, G. L.; LEPPLA, N. C.; DICKERSON, W. A. Velvetbean caterpillar a rearing procedure and artificial médium. **Journal of Economic Entomology**, Oxford, v. 69, n. 4, p. 487-488, 1976. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/69.4.487>

HATTORI, T.; INANAGA, S.; TANIMOTO, E.; LUX, A.; LUXOVA, M.; SUGIMOTO, Y. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v.44, n. 7, p. 743-749, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcg090>

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. Observations on the distribution of mineral elements in the leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.), with particular reference to silicon. **Annals of Botany**, Oxford, v. 62, n. 5, p. 463-471, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087681>

KORNDÖRFER, G. H. Existe alguma relação entre Si e Plantio direto? *In*: **Plantio Direto no Cerrado**, APDC – Associação de Plantio Direto no Cerrado, v. 4, n. 12, p. 5, abr. 1999.

KORNDÖRFER, G. H.; ARANTES, V. A.; CORRÊA, G. F.; SNYDER, G. H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG. v. 23, n. 3, p.623-629, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300017>

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. **Boletim técnico**, 2. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 34p. 2004.

KORNDÖRFER, A. P.; GRISOTO, E.; VENDRAMIM, J. D. Induction of insect plant resistance to the spittlebug *Mahanarva fimbriolata* Stal (Hemiptera: Cercopidae) in sugarcane by silicon application. **Neotropical Entomology**, Londrina-PR, v. 40, n. 3, p. 387-392, 2011.

LIANG, Y. C.; SUN, W.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, Londres, v. 147, p. 422-428. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>

LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; ZHANG, M.; DENG, X.; ZHANG, S.; TANAKA, K. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 111, p. 42–51, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.10.006>

LUYCKX, M.; HAUSMAN, J.F.; LUTTS, S.; GUERRIERO, G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 8, n. 411, p. 1-8, March 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>

MA, J. F.; TAMAI, K.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; KONISHI, S.; KATSUHARA, M. A silicon transporter in rice. **Nature**, Londres, v. 440, n. 7084, p. 688-691. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04590>

MANIVANNAN, A.; AHN, Y. K. Silicon regulates potential genes involved in major physiological processes in plants to combat stress. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01346>

MADEIROS, L. B.; VIEIRA, A. O.; AQUINO, B. F. Influência da escória siderúrgica sobre trocas gasosas e produção de biomassa da cana-de-açúcar. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal-SP, v. 6, n. 2, p. 121-129, maio/ago. 2009.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. San Diego: Academic, 1995. 889p.

MEHARG, C.; MEHARG, A. A. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice? **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 120, p. 8-17, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.07.001>

MENZIES, J. G.; EHRET, D. L.; GLASS, A. D. M.; HELMER, T.; KOCH, C.; SEYWERD, F. Effects of soluble silicon on the parasitic fitness of *Sphaerotheca fuliginea* on *Cucumis sativus*. **Phytopathology**, St. Paul, v. 81, n.1, p. 84-88, jan. 1991.

MICHELOTTO, M. D.; FINOTO, E. L.; MARTINS, A. L. M.; DUARTE A. P. Interação entre transgênicos (Bt) e inseticidas no controle de pragas-chave em híbridos de milho-safrinha. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo-SP, v. 78, n. 1, p. 71-79, 2011.

MIRANDA, R. A. Uma história de sucesso da civilização. **A Granja**, v. 74, n. 829, p. 24-27, jan. 2018.

NERI, D. K. P.; MORAES, J. C.; GAVINO, M. A. Interação silício com inseticida regulador de crescimento no manejo da lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) em milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, v.29, n.4. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000600010>.

NERI, D.K.P.; GOMES, F.B.; MORAES, J.C.; DE GÓES, G.C.; DE TARCIO, T.; MARROCOS, P. Influência do silício na suscetibilidade de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) ao inseticida lufenuron e no desenvolvimento de plantas de milho. Santa Maria, **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 39, n. 6, p. 1-6, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000111>

NORUSIS, M. **SPSS 16.0 statistical procedures companion**. Prentice Hall Press, New Jersey, 2008.

OKUDA, A.; TAKAHASHI, E. The role of silicon, *In*: HOPKINS, J. The mineral nutrition of the rice plant. **Proceedings of a Symposium at the International Rice Research Institute**. São Paulo: Kosmos, 1964. p. 123-146.

PALMA, N. L.; IVAN, E. A. F.; OLIVA, M. V.; DAMASCENO, R. T.; DOS SANTOS, F. G.; SANITÁ, D. A.; DA SILVA, T. L.; PINTO, A. Confiabilidade de Escalas de Notas de Danos em Folhas Causados por *Spodoptera frugiperda* na Cultura do Milho de Segunda Safra. *In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO*, 29, 2012, Águas de Lindóia, **resumo**, Águas de Lindóia-SP, p. 1-7.

PARRA, J. R. P. **Técnicas de criação de insetos para programas de controle biológico**. 3. ed. Piracicaba: FEALQ, 2001. 134 p.

PERDOMO, D. N. **Doses de silício na produtividade e na indução de resistência de plantas de milho a *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2017.

PINTO, D. G.; AGUILAR, M. A. G.; SOUZA, C. A. S.; SILVA, D. M.; SIQUEIRA, P. R.; CAO, J. R.; ZANETTI, L. V. Alterações fisiológicas após aplicação de silício em cacau e sua influência na preferência por pulgões. *Ceres*, Viçosa-MG, v. 59, n. 3, p. 360-367, 2012. DOI: 10.1590/S0034-737X2012000300010.

PULZ, A. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Campinas-SP, n. 32, n. 4, p.1651-1659, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400030>

REZENDE, G. F. **Atividade de silício na produtividade e na indução de resistência de gramíneas ao ataque de pragas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2018.

ROLIM, G. D. S.; CAMARGO, M. D.; LANIA, D. G.; MORAES, J. D. Classificação climática de Köppen e de Thorn thwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas-SP, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

SARMENTO, R. A.; AGUIAR, R. W. S.; AGUIAR, R. A. S. S.; VIEIRA, S. M. J.; OLIVEIRA, H. G.; HOLTZ, A. M. Revisão da biologia, ocorrência e controle de *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera, Noctuidae) em milho no Brasil. **Bioscience Journal**, Uberlândia-MG, v. 18, n. 2, p. 41-48, dez. 2002.

SILVA, L. S.; BOHNEN, H. Produtividade e absorção de nutrientes pelo arroz cultivado em solução nutritiva com diferentes níveis de silício e cálcio. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas-RS, v. 9, n. 1, p. 49-52, jan./mar. 2003.

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

TAVARES, M. **Manejo Integrado da *Spodoptera frugiperda* no milho**. [s. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.promip.agr.br/o-manejo-integrado-da-spodoptera-frugiperda-no-milho/>. Acesso: 23 nov. 2020.

TEODORO, P. E.; RIBEIRO, L. P.; CORRÊA, C. C. G.; TORRES, F. E. Desempenho de híbridos de milho sob aplicação foliar de silício no cerrado sul-mato-grossense. **Bioscience Journal**, Uberlândia-MG, v. 30, supplement 1, p. 224-231, 2014.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M.; CHAUHAN, D. K.; KISHORE DUBEY, N.; RAI, A. K. Silicon-mediated alleviation of Cr (VI) toxicity in wheat seedlings as evidenced by chlorophyll fluorescence, laser induced breakdown spectroscopy and anatomical changes. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdam, Netherlands : Elsevier Science, v. 113, p. 133-144, march 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.09.029>

WANG, M.; GAO, L.; DONG, S.; SUN, Y.; SHEN, Q.; GUO, S. Role of silicone on plant-pathogen interactions. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 8, n. 701, p. 1-14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00701>

WU, J.; BALDWIN, I. T. New insights into plant responses to the attack from insect herbivores. **Annual Review of Genetics**, Palo Alto, Califórnia, v. 44, p. 1-24, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-102209-163500>

ZOU, Y.; CHANG, S. K. C.; GU, Y.; QIAN, S. Y. Antioxidant activity and phenolic compositions of lentil (*Lens culinaris* var. Morton) extract and its fractions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 59, n. 6, p. 2268-2276, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf104640k>

### CAPÍTULO 3

#### **Silício e herbivoria por *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) na indução de resistência a *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera: Aphididae) e no metabolismo de plantas de sorgo**

**Resumo:** A indução de resistência de plantas é uma estratégia em potencial para prevenir danos de insetos às culturas. A utilização de silício (Si) e o tipo de herbivoria sofrida pela planta podem influenciar na indução dessa resistência. O presente estudo teve o objetivo de avaliar os compostos químicos produzidos pela planta de sorgo relacionadas à indução de resistência por Si e pela herbivoria, causada por insetos mastigadores e sugadores. Para tanto, plantas de sorgo cultivadas em vasos foram adubadas com Si e expostas aos estímulos adubação com Si e/ou herbivoria por lagartas de *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). Também foi avaliado o crescimento populacional de *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera: Aphididae) nessas plantas, sendo considerado como um terceiro estímulo. Para confirmar os possíveis efeitos do Si e da herbivoria, foram avaliados o teor de silício foliar, produção de polifenóis e poder de redução do ferro (FRAP) e realizada a análise de metabolômica. As plantas analisadas foram comparadas com plantas controle sem os estímulos. A adubação silicatada e a herbivoria não interferiu na produção de polifenóis e FRAP em plantas de sorgo. A aplicação de Si não alterou o teor de Si foliar ou a concentração dos compostos nas plantas sem herbivoria, porém, a herbivoria e a combinação de Si com a herbivoria promoveu o aumento do teor Si foliar e alteração na concentração de 23 metabólitos nas plantas. A herbivoria prévia por lagarta em plantas sem Si induziu resistência por antibiose à *R. maidis*, provavelmente relacionada a redução na concentração dos compostos 236,1388 e 474,3718. Indução de resistência por antibiose ao pulgão também foi observada em plantas com herbivoria e Si, relacionada à alteração na concentração dos compostos 186,0715; 236,1388; 294,1832; 304,2408; 311,2479; 474,3718 e 571,4608. O teor de Si foliar e a atividade metabólica foi maior nas plantas de sorgo que receberam, em conjunto, aplicação de Si via solo e ambas as herbivorias. O Si apresentou importante papel na indução de resistência em plantas de sorgo, reduzindo a população de *R. maidis* e promovendo maior atividade metabólica na planta.

**Palavras-chave:** *Sorghum bicolor*. Lagarta-do-cartucho. Pulgão-do-milho. Metabolômica. Metabólitos secundários. Polifenóis. FRAP.

### CHAPTER 3

#### **Silicon and herbivory by *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in the induction of resistance to *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera: Aphididae) and in the metabolism of sorghum plants**

**Abstract:** Plant resistance induction is a potential strategy to prevent insect damage to crops. The use of silicon (Si) and the type of herbivory suffered by the plant may influence the induction of this resistance. The present study aimed to evaluate the chemical compounds produced by the sorghum plant related to resistance induction by Si and herbivory caused by chewing and sucking insects. For this, sorghum plants grown in pots were fertilized with Si and exposed to stimuli fertilization with Si and/or herbivory by caterpillars of *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). The population growth of *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera: Aphididae) in these plants was also evaluated, being considered as a third stimulus. To confirm the possible effects of Si and herbivory, the leaf silicon content, polyphenol production and iron reduction power (FRAP) were evaluated and metabolomics analysis was performed. The plants analyzed were compared with control plants, without the stimuli. Silicate fertilization and herbivory did not interfere in the production of polyphenols and FRAP in sorghum plants. The application of Si did not alter the content of Si foliar or the concentration of compounds in plants without herbivory, however, herbivory and the combination of Si with herbivory increased leaf Si content and changed in the concentration of 23 metabolites in the plants. Previous herbivory by caterpillar in plants without Si induced resistance by antibiosis to *R. maidis*, probably related to the reduction in the concentration of compounds 236.1388 and 474.3718. Induction of resistance by antibiosis to the aphid was also observed in plants with herbivory and Si, related to the change in the concentration of compounds 186.0715; 236.1388; 294.1832; 304.2408; 311.2479; 474.3718 and 571.4608. The leaf Si content and metabolic activity were higher in sorghum plants that received, together, application of Si via soil and both herbivories. Si played an important role in inducing resistance in sorghum plants, reducing the population of *R. maidis* and promoting greater metabolic activity in the plant.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*. Fall armyworm. Corn aphid. Metabolomics. Secondary metabolites. Polyphenols. FRAP.

## 1 INTRODUÇÃO

O uso do silício (Si) é uma das estratégias que vem mostrando resultados satisfatórios como indutor de resistência de plantas contra pragas e doenças, seja por ação mecânica, produção de compostos químicos ou pela atração do terceiro nível trófico (LIU et al., 2017). Conforme relatado por vários pesquisadores o Si induz resistência contra pragas em trigo (GOMES et al., 2005), arroz (NASCIMENTO et al., 2014), cana-de-açúcar (CAMARGO et al., 2010), milho (ALVARENGA et al., 2017) e sorgo (CARVALHO et al., 1999; MORAES; CARVALHO, 2002) o aumento do teor de Si foliar leva a um menor período reprodutivo e uma menor reprodução dos pulgões, induzindo resistência por antibiose (CARVALHO et al., 1999; DIAS et al., 2014; SAMPAIO et al., 2020).

Sob ataque de herbívoros, as respostas de expressão gênica estão fortemente correlacionadas com modo de alimentação do herbívoro, a quantidade de dano ao tecido, os padrões temporais e espaciais específicos no local de alimentação, bem como as espécies de plantas hospedeiras (KESSLER; BALDWIN, 2002; WALLING, 2000). Podendo levar a indução de defesas sistêmicas, incluindo tecidos vegetais que não foram atacados pelos insetos (TAIZ et al., 2017). Foi proposto um modelo de reconhecimento de insetos por plantas através de padrões moleculares associados a herbívoros e padrões moleculares associados à herbivoria que desencadeiam respostas de defesa de plantas (HEIL, 2009). Uma vez que a reprogramação transcricional está subjacente a muitas respostas de defesa de plantas, análises transcriptômicas de respostas a pulgões e outros insetos herbívoros foram conduzidas usando várias espécies de plantas (APPEL et al., 2014; COPPOLA et al., 2013; COULDRIDGE et al., 2007; HEIDEL-FISCHER et al., 2014; THOMPSON; GOGGIN, 2006;). No entanto, são relativamente incomuns estudos para a compreensão dessas interações complexas e dinâmicas das respostas genômicas e metabolômicas das plantas à herbivoria por insetos (COPPOLA et al., 2013; FERRY et al., 2011; GUAN et al., 2015).

Para montar respostas de defesa específicas de herbívoros, as plantas desenvolveram vários mecanismos reguladores. A sinalização fitohormonal, por exemplo, permite que as plantas regulem com precisão suas respostas induzidas (ERB et al., 2012). Nesse contexto, a sinalização de jasmonato (JA) está frequentemente associada à resistência induzida a herbívoros mastigadores, enquanto a sinalização de salicilato (SA) está associada à resistência a insetos sugadores (BROEKGAARDEN et al., 2011; DE VOS et al., 2005; HEIDEL; BALDWIN, 2004; HEIDEL-FISCHER et al., 2014; KESSLER; BALDWIN, 2002; LI et al., 2016; MEWIS et al., 2006; WALLING, 2000). No entanto, esses mecanismos de defesa induzida de plantas são,

provavelmente, mais complexos, já que as plantas usam uma variedade de hormônios para formar redes de sinalização que permitem respostas direcionadas contra herbívoros mastigadores e sugadores (ERB et al., 2012; LI et al., 2015). Pouco se conhece sobre a atuação do Si nos mecanismos de indução de resistência e na produção de metabólitos de defesa vegetal.

Neste contexto, os estudos de metabolômica podem ser chave para o entendimento das respostas das plantas adubadas com Si e expostas a diferentes tipos de herbivoria. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar os compostos químicos produzidos pela planta de sorgo relacionadas à indução de resistência por Si e pela herbivoria por insetos mastigadores e sugadores, usando como modelo de estudo o sorgo como planta hospedeira, lagartas de *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) e o pulgão *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera: Aphididae).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Produção de plantas de sorgo

#### 2.1.1 Produção de plantas de sorgo para criação de pulgões

O híbrido de sorgo BRS332 foi semeado em vasos plásticos (15 cm de altura e 13 cm de diâmetro) contendo substrato orgânico Bioplant® e colocado para germinar e se desenvolver na casa de vegetação da Universidade Federal de Uberlândia. Após 15 dias da semeadura, foi realizado o desbaste deixando apenas quatro plantas por vaso. Quando as plantas estavam com cerca de dois meses de desenvolvimento foram utilizadas na criação dos pulgões.

#### 2.1.2 Produção de plantas de sorgo para o experimento

Para realizar os experimentos de crescimento populacional do pulgão em plantas de sorgo com e sem adubação silicatada foi coletado solo tipo LATOSSOLO VERMELHO Escuro distrófico de textura argilosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2013) (6,1 mg kg<sup>-1</sup> de Si) na fazenda experimental Capim Branco, pertencente à Universidade Federal de Uberlândia (Tabela 1).

Tabela 1 – Análise química do solo da área do experimento.

pH em H <sub>2</sub> O	M.O (dag kg <sup>-1</sup> )	P Meh <sup>-1</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> e Al <sup>+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Si (mg kg <sup>-1</sup> )	V (%)
6,2	1,8	1,7	142	2,0	0,6	0,0	2,2	6,1	57

Fonte: Laboratório de Análise de Solos e Calcários do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

O solo coletado foi peneirado e colocado em sacos plásticos, para posteriormente receber os tratamentos. Para o tratamento com Si foi adicionado Agrossilício Plus® (10,5% de Silício; 35% de CaO; e 10% MgO) na dose de 800 kg ha<sup>-1</sup> em cada vaso de 0,8 L, já para o tratamento sem Si, foi adicionado calcário dolomítico Ercal® (37-38% de CaO e 8-10% de MgO), também na dose de 800 kg ha<sup>-1</sup>, totalizando 80 vasos para obtenção das plantas de sorgo para o experimento.

Em cada vaso foi adicionado 0,11 L de água e então fechados com saco plástico e deixados para incubar, no dia 03/05/2018. Após 34 dias, foi realizada a semeadura e adubação. Foram adicionadas quatro sementes de sorgo da cultivar BRS332 por vaso e a adubação de semeadura foi realizada conforme recomendação para a cultura (SANTOS et al., 2014).

Quando as plantas de sorgo estavam com sete dias foram colocadas gaiolas de garrafa PET de 3 L, cobertas com organza e lacradas com elástico para evitar contaminações por afídeos. Após 14 dias da semeadura foi realizado desbaste deixando apenas uma planta por copo e em seguida realizada a adubação de cobertura de acordo com Santos et al. (2014). Quando as plantas estavam com 30 dias foram utilizadas nos experimentos.

## **2.2 Criação dos pulgões**

Os pulgões *R. maidis* utilizados para iniciar a criação foram obtidos na fazenda experimental Capim Branco, pertencente à Universidade Federal de Uberlândia. Os indivíduos foram colocados em placas de Petri de 90 mm contendo duas sessões foliares de sorgo da cultivar BRS332 sobre uma camada de solução ágar-água a 1% e vedadas com organza, presas por um elástico e então colocadas em câmaras do tipo BOD a 23°C e fotoperíodo de 12h, a fim de aumentar o número de afídeos. Para manutenção da criação, os pulgões que estavam nas placas de Petri foram colocados em plantas de sorgo de aproximadamente dois meses de desenvolvimento para que continuassem aumentando o número de indivíduos e, a cada semana a planta da criação foi trocada. Para a padronização da idade dos pulgões utilizados no experimento, 30 placas de Petri com as sessões foliares de sorgo foram infestadas com 15 pulgões adultos/placa. Após 24h da infestação, os adultos foram retirados das placas, deixando-se apenas as ninfas produzidas neste intervalo de tempo. Dez dias após, quando atingiram a fase adulta, os pulgões foram utilizados nas infestações das plantas de sorgo no experimento.

## **2.3 Criação das lagartas**

As lagartas de *S. frugiperda* utilizadas no experimento foram fornecidas pelo Laboratório de Criação de Insetos da Embrapa e a população foi mantida no Laboratório de Entomologia e Controle Biológico (LACOB-UFU), utilizando a dieta artificial modificada de Greene et al. (1976) e multiplicada através da metodologia adaptada de Parra (2001). Para a utilização das lagartas no experimento, as posturas foram colocadas em copos plásticos de 100 mL com tampa, contendo uma porção da dieta artificial, assim que as lagartas eclodiram e

atingiram o 3º ínstar foram utilizadas no experimento.

## 2.4 Instalação e condução do experimento

Para avaliar a indução de resistência por antibiose ao pulgão *R. maidis* e avaliar os metabólitos produzidos pelas plantas de sorgo foram utilizadas 80 plantas de sorgo, das quais 40 receberam aplicação de Si (Si+) via solo e 40 não receberam este elemento (Si-). Metade das plantas de cada grupo (20 plantas Si+ e 20 plantas Si-) foram expostas a herbivoria por *S. frugiperda* aos 30 dias após semeadura (DAS), quando foi feita a infestação com duas lagartas de 3º instar, as quais foram mantidas por 2 dias. Desta forma, foram formados quatro grupos de plantas: sem Si e sem herbivoria de lagarta (Si-) com Si e sem herbivoria de lagarta (Si+), com herbivoria de lagarta e sem Si (L Si-) e com herbivoria de lagarta e com Si (L Si+). Metade das plantas de cada um dos quatro grupos foram infestadas com pulgões para verificar a indução da resistência a *R. maidis* pelo Si e pela herbivoria de *S. frugiperda*. Para isso, imediatamente após a retirada das lagartas (32 DAS), seções de folhas de sorgo contendo 4 pulgões adultos (10 dias de idade) provenientes das colônias de padronização etária (ver item 2.2) foram colocadas no cartucho das plantas após 15 dias as plantas foram cortadas e levadas para o Laboratório de Entomologia e Controle Biológico (LACOB-UFU) para a contagem da população de pulgões, visando verificar o crescimento populacional de *R. maidis* nas plantas com e sem Si e com e sem herbivoria de *S. frugiperda*. Assim foram formados oito grupos com 10 plantas cada (Tabela 2).

Tabela 2 – Descrição dos tratamentos utilizados no experimento com o uso de silício (Si) e herbivorias de lagartas de *Spodoptera frugiperda* (L) e do pulgão *Rhopalosiphum maidis* (P).

GRUPO	DESCRIÇÃO
Si –	sem Si, sem herbivoria de lagarta e sem herbivoria por pulgão
Si +	com Si, sem herbivoria de lagarta e sem herbivoria por pulgão
L Si –	com herbivoria de lagarta, sem Si e sem herbivoria por pulgão
L Si +	com herbivoria de lagarta, com Si e sem herbivoria por pulgão
P Si –	com herbivoria por pulgão, sem Si e sem herbivoria de lagarta
P Si +	com herbivoria por pulgão, com Si e sem herbivoria de lagarta
LP Si –	com herbivoria de lagarta, com herbivoria por pulgão e sem Si
LP Si +	com herbivoria de lagarta, com herbivoria por pulgão e com Si

Fonte: A autora.

### **2.4.1 Metabolômica**

Para as análises metabolômicas e de polifenóis do experimento, foi coletada uma folha logo abaixo do cartucho de cada tratamento, em seguida congelada em nitrogênio líquido, acondicionado em papel alumínio e conservado em gelo seco, sendo posteriormente armazenado em ultrafreezer a  $-80^{\circ}\text{C}$  até o momento das análises foram realizadas no Laboratório de Nanobiotecnologia do Instituto de Biotecnologia (IBTEC-UFU) e Laboratório de Bioquímica e Biologia Molecular (LABIBI-UFU).

Para a extração dos metabólitos 0,2 g do material vegetal que estava no ultrafreezer foi triturado e adicionado em béquer com etanol 95% PA, esta mistura foi colocada em ultrassom por 30 minutos em seguida filtrada e o extrativo concentrado em evaporador rotativo e liofilizador. Para as análises dos metabólitos cerca de 1 miligrama do extrativo seco foi ressuspenso em 4 mL de metanol espectroscópico, e subsequente filtrado em filtro de ponta de seringa de poros de  $0,22\ \mu$ , totalizando 2 repetições por amostra, na qual 1 das repetições foi utilizada na análise de polifenóis. As análises IES/EM (espectrometria de massas com ionização por eletrospray por infusão direta) foram realizadas com um cromatógrafo líquido (marca Agilent modelo Infinity 1260) para injeção das amostras, acoplado a um espectrômetro de massas de alta resolução tipo Q-TOF da marca Agilent® modelo 6520 B com fonte de ionização por electrospray (IES). Os parâmetros cromatógrafo foram:  $0,2\ \text{mL min}^{-1}$  de fluxo constante da fase móvel com a composição de 90% metanol e 10% de água acidificada com ácido fórmico ( $0,1\ \%$  (v v<sup>-1</sup>)), o volume de injeção das amostras foi de  $2\ \mu\text{L}$ . Os parâmetros de ionização foram: pressão do nebulizador de 20 psi, gás secante a  $8\ \text{L min}^{-1}$  a uma temperatura de  $220^{\circ}\text{C}$  e no capilar foi aplicado uma energia de 4,5 KVa. Os dados foram adquiridos nos modos de ionização positivo.

### **2.4.2 Análise de polifenóis e poder de redução do ferro (FRAP)**

Para a determinação das concentrações totais de polifenóis nos extratos utilizou-se como base o método de Zou et al. (2011) em microplacas de 96 poços. O poder de redução do ferro (FRAP) que mede a capacidade de redução de compostos fenólicos (ROGINSKY; LISSI, 2005) é baseado na redução do complexo 2,4,6-tri(2-piridil)-1,3,5-triazina férrico  $[\text{Fe(III)-(TPTZ)}_2]^{3+}$  para o complexo ferroso de cor azul escura  $[\text{Fe(II)-(TPTZ)}_2]^{2+}$  na presença de um antioxidante. O composto formado pode ser avaliado em espectrofotômetro a 595 nm (HUANG et al., 2005). Os extratos foram diluídos em metanol na concentração de  $1\ \text{mg mL}^{-1}$ . Todas as

análises foram feitas em triplicata. Para a determinação de fenóis totais, utilizou-se o reagente Folin Ciocalteu na qual envolve a redução do reagente de Folin (mistura dos ácidos fosfomolibdico e fosfotúngstico) pelos compostos fenólicos. O ensaio foi iniciado com a adição de 5 µL de solução de extrato/partição, 25 µL de solução aquosa do reagente Folin-Ciocalteu e 195 µL de água milli-Q em cada poço e depois incubado por 6 min a 25°C. Após a incubação, adicionou-se 75 µL de carbonato de sódio Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (7%) e a placa foi novamente incubada por 2h a 25°C na ausência de luz. A determinação foi feita pela medida da absorbância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 760 nm. O mesmo procedimento foi realizado utilizando 5 µL de etanol para obtenção do branco. O conteúdo de fenóis totais foi obtido utilizando uma curva analítica construída com padrões de ácido gálico, nas concentrações de 15,62; 31,25; 62,5; 125; 250; 500; 1.000 e 2.000 µg mL<sup>-1</sup>. Os resultados foram expressos como miligramas de equivalentes de ácido gálico por grama de amostra (mg GAE g<sup>-1</sup>) e µmol Trolox eq/L para o poder de redução do ferro (FRAP).

#### **2.4.3 Crescimento populacional de *R. maidis* e teor de silício foliar**

Para verificar o crescimento populacional de *R. maidis* nas plantas com e sem Si e com e sem herbivoria de *S. frugiperda* foi feita a contagem dos pulgões nas plantas de sorgo, que em seguida foram secas em estufa até massa constante, trituradas e separadas para análise de Si foliar no Laboratório de Fertilizantes (LAFER-UFU) de acordo com o método azul descrito por Korndörfer et al. (2004).

#### **2.5 Análises dos dados**

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, totalizando 80 parcelas, sendo 10 repetições dos tratamentos descritos na Tabela 2. Para o crescimento populacional de *R. maidis* foram considerados os quatro tratamentos nos quais o pulgão estava presente: 1- P Si- (*R. maidis* sem Si); 2- P Si+ (*R. maidis* com Si); 3- LP Si- (*S. frugiperda* + *R. maidis* sem Si); 4- LP Si+ (*S. frugiperda* + *R. maidis* com Si).

Os resultados foram primeiramente submetidos aos testes de pressuposições com o auxílio do programa SPSS 20.0 (NORUSIS, 2008) a fim de avaliar a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene a 1% de probabilidade. Para os dados de teor de Si, crescimento populacional de *R. maidis*, produção de polifenóis e FRAP foi realizada ANOVA e as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5%.

Os dados de crescimento populacional de *R. maidis* foram transformados em raiz quadrada de  $x$  para satisfazerem as pressuposições.

Os espectros de massa adquiridos foram extraídos utilizando o software MassHunter Qualitative v. 7.0 e convertidos para extensão .CEF. Estes arquivos foram submetidos ao programa MassHunter Mass Profiler Professional v. B.13.1.1 para alinhamento, normalização, teste de significância e fold change. Os metabólitos foram filtrados utilizando abundância absoluta mínima de 10.000 contagens, frequência de 100% (apenas os compostos encontrados em 100% das amostras biológicas dentro de pelo menos um grupo foram considerados),  $p < 0,05$  e fold change  $> 2$ .

Os dados foram transformados em escala de  $\log_2$  e a abundância dos metabólitos foi analisada usando o teste ANOVA, com  $p < 0,05$  como critério de significância. Para identificar a diferença significativa entre os grupos foi utilizado o teste post hoc Tukey. A clusterização hierárquica foi realizada utilizando a intensidade normalizada dos compostos diferencialmente expressos, sendo a distância métrica Pearson's centered-absolute, com ligação completa. A identificação dos constituintes foi realizada levando em consideração a massa de alta resolução (considerando o erro com a massa exata menores que 10 ppm) e os espectros de massa/massa (EM/EM).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Teor de silício foliar

Houve efeito da aplicação de Si e da herbivoria no teor de Si foliar das plantas de sorgo ( $F= 35,866$ ;  $d= 7/72$ ;  $P< 0,0001$ ). O teor de Si foliar foi maior nas plantas de sorgo adubadas com esse elemento e que foram expostas a ambas herbivorias, tanto a de lagartas quanto a de pulgões (LP Si+). Plantas adubadas com Si e que receberam herbivoria por *R. maidis* (P Si+) apresentaram maior teor de Si do que as plantas sem a herbivoria de *R. maidis*. As plantas expostas apenas a herbivoria de lagartas, independente de terem sido adubadas com Si, as plantas adubadas com Si, mas não expostas a nenhuma herbivoria não apresentaram diferença no teor de Si entre si e em comparação às plantas sem adubação deste elemento (Tabela 3).

Tabela 3 – Teor de silício (%) foliar em plantas de sorgo adubadas (Si+) ou não (Si-) com esse elemento via solo e submetidas ou não a herbivoria de lagartas de *Spodoptera frugiperda* (L) e a pulgões *Rhopalosiphum maidis*(P).

Tratamentos	Teor de Si
	Média±Erro
Si-	0,197±0,006 c
Si+	0,225±0,003 c
L Si-	0,217±0,007 c
L Si+	0,379±0,049 c
P Si-	0,216±0,007 c
P Si+	0,967±0,158 b
LP Si-	0,203±0,009 c
LP Si+	1,613±0,180 a
<b>CV(%) = 54,61</b>	

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

#### 3.2 Crescimento populacional de *R. maidis*

A população do pulgão (Tabela 4) foi menor nos tratamentos com Si, independente se as plantas de sorgo foram expostas ou não a herbivoria prévia de lagartas de *S. frugiperda*. Já em plantas que não receberam Si, mas foram expostas a herbivoria de *S. frugiperda*, o crescimento populacional de *R. maidis* foi intermediário, não diferenciando dos demais tratamentos ( $F=3,780$ ;  $d= 3/36$ ;  $P= 0,0186$ ).

Tabela 4 – População de pulgão do milho, *Rhopalosiphum maidis*, em plantas de sorgo adubadas (Si+) ou não (Si-) com silício aplicados via solo e submetidas ou não a herbivoria de lagartas de *Spodoptera frugiperda* (L).

Tratamentos	População <i>R. maidis</i>
	Média±Erro
P Si-	74,3±4,93 b
P Si+	49,8±7,26 a
LP Si-	59,0±7,40 ab
LP Si+	48,1±4,98 a
<b>CV(%) = 17,45</b>	

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

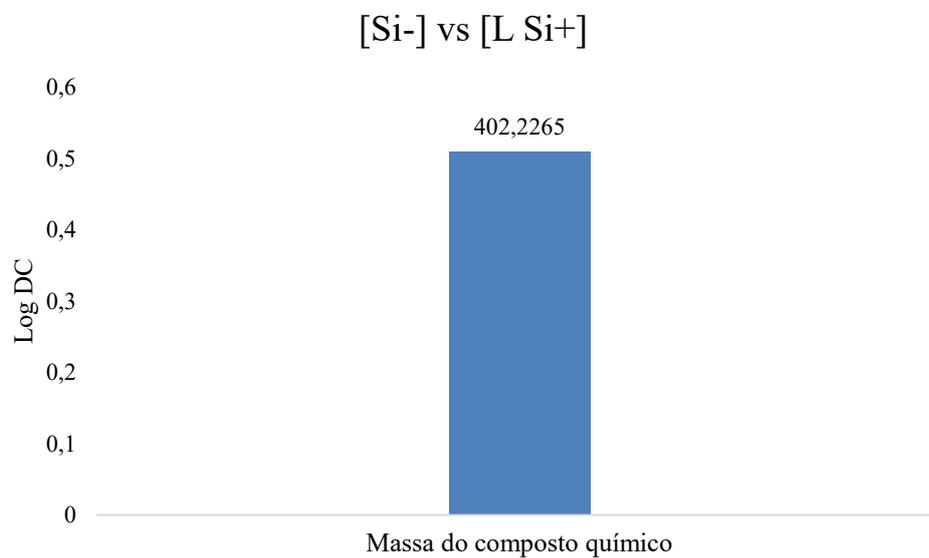
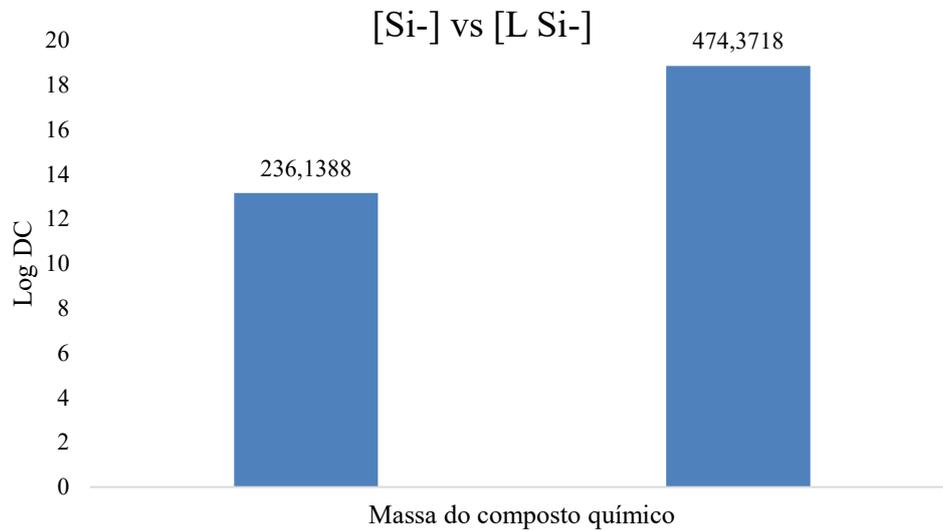
Fonte: A autora.

### 3.3 Metabolômica

Na análise metabolômica foram encontrados 797 metabólitos, e destes, 23 compostos químicos foram diferencialmente expressos em plantas de sorgo adubadas ou não com Si aplicado via solo e/ou submetidas a diferentes herbivorias (Anexo A). Não houve diferença na produção dos compostos químicos quando comparadas as plantas que não receberam herbivoria, independente da aplicação (Si+) ou não (Si-) de Si no solo. Já as diferentes herbivorias tiveram influência na produção dos compostos, e a adubação com Si esteve envolvida na diferente produção dos compostos químicos nas plantas de sorgo sobre o efeito de herbivoria de lagartas (L), pulgões (P) ou ambas (LP).

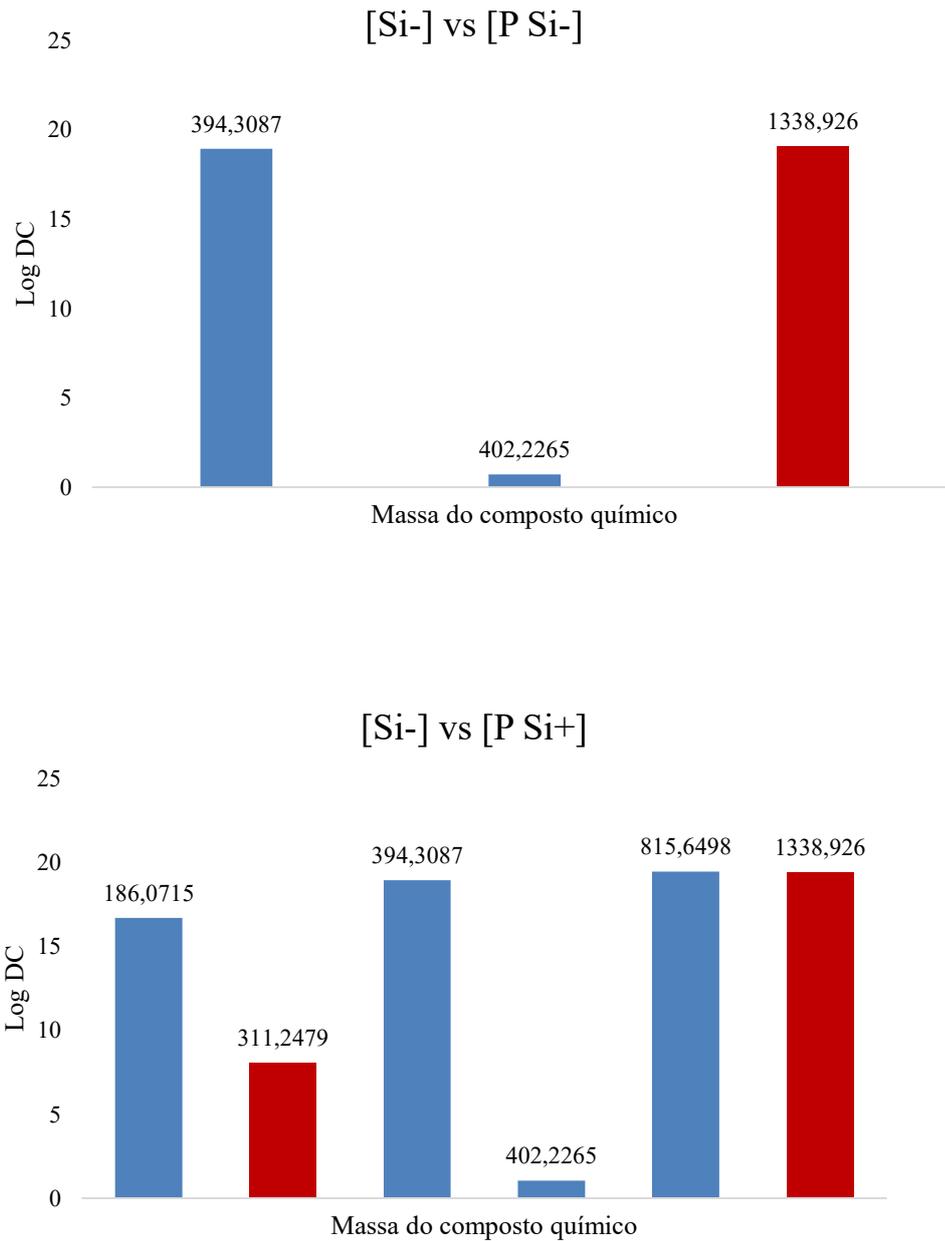
Quando comparadas as plantas que não receberam nenhum estímulo (Si-), nem da aplicação de Si no solo e nem de herbivoria com as plantas que receberam herbivoria de lagarta (L Si-) e de lagarta e Si (L Si+), percebe-se que, respectivamente, dois e um compostos foram silenciados, apresentando maior concentração nas plantas sem estímulo (Figura 1). Já quando a herbivoria foi de pulgão, dois compostos químicos tiveram maior concentração nas plantas Si- e um composto na planta com pulgão (P Si-), quando o Si foi adicionado a planta com herbivoria de pulgão (P Si+), quatro compostos foram silenciados na P Si+ e dois compostos apresentaram maior concentração nessas plantas (Figura 2). De forma análoga, porém envolvendo compostos diferentes, exceto o composto químico 402,2265, em plantas com as duas herbivorias (LP Si-) seis compostos foram modificados, quatro com maior concentração nas plantas Si- e dois com maior concentração nas plantas LP Si-. Já uma maior atividade metabólica foi percebida nas plantas que receberam as duas herbivorias e a aplicação de Si no solo (LP Si+) com sete compostos com maior concentração em plantas Si- e 11 compostos com maior concentração em LP Si+ (Figura 3).

Figura 1 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) expressos em plantas de sorgo, indicando quantas vezes foi maior nas plantas sem silício [Si-] quando comparadas às plantas com herbivoria de lagarta *Spodoptera frugiperda* e sem [L Si-] ou com [L Si+] silício aplicado via solo.



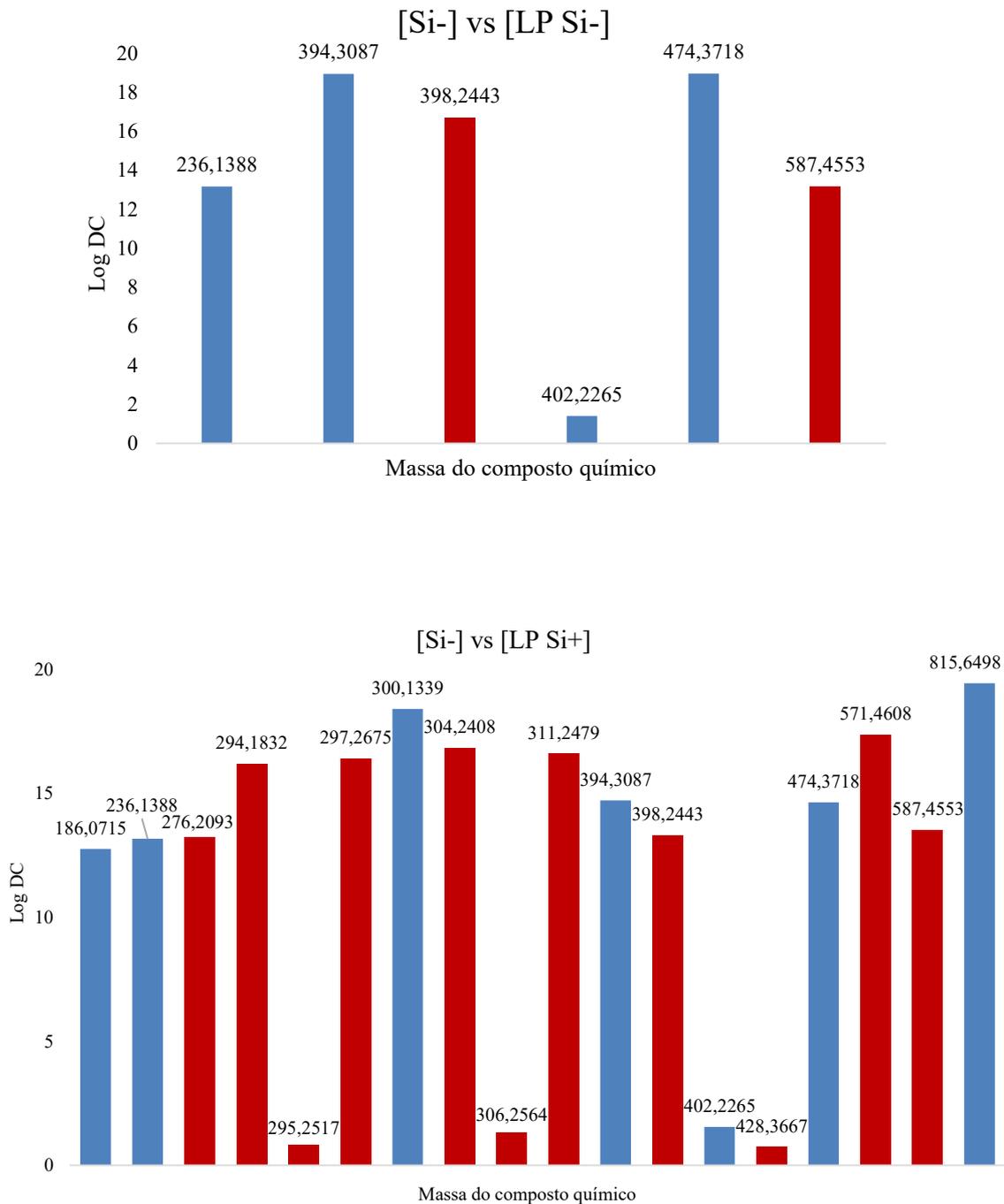
Fonte: A autora.

Figura 2 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) comparando plantas de sorgo com diferentes estímulos. Plantas sem silício e sem herbivoria [Si-]; plantas com herbivoria do pulgão *Rhopalosiphum maidis* e sem [P Si-] ou com [P Si+] silício aplicado via solo. Barra em azul indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [Si-]; barra em vermelho indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [P Si-] ou [P Si+].



Fonte: A autora.

Figura 3 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) comparando plantas de sorgo com diferentes estímulos. Plantas sem silício e sem herbivoria [Si-]; plantas com dois tipos de herbivoria, de lagarta *Spodoptera frugiperda* e do pulgão *Rhopalosiphum maidis*, e sem [LP Si-] ou com [LP Si+] silício aplicado via solo. Barra em azul indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [Si-]; barra em vermelho indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [LP Si-] ou [LP Si+].



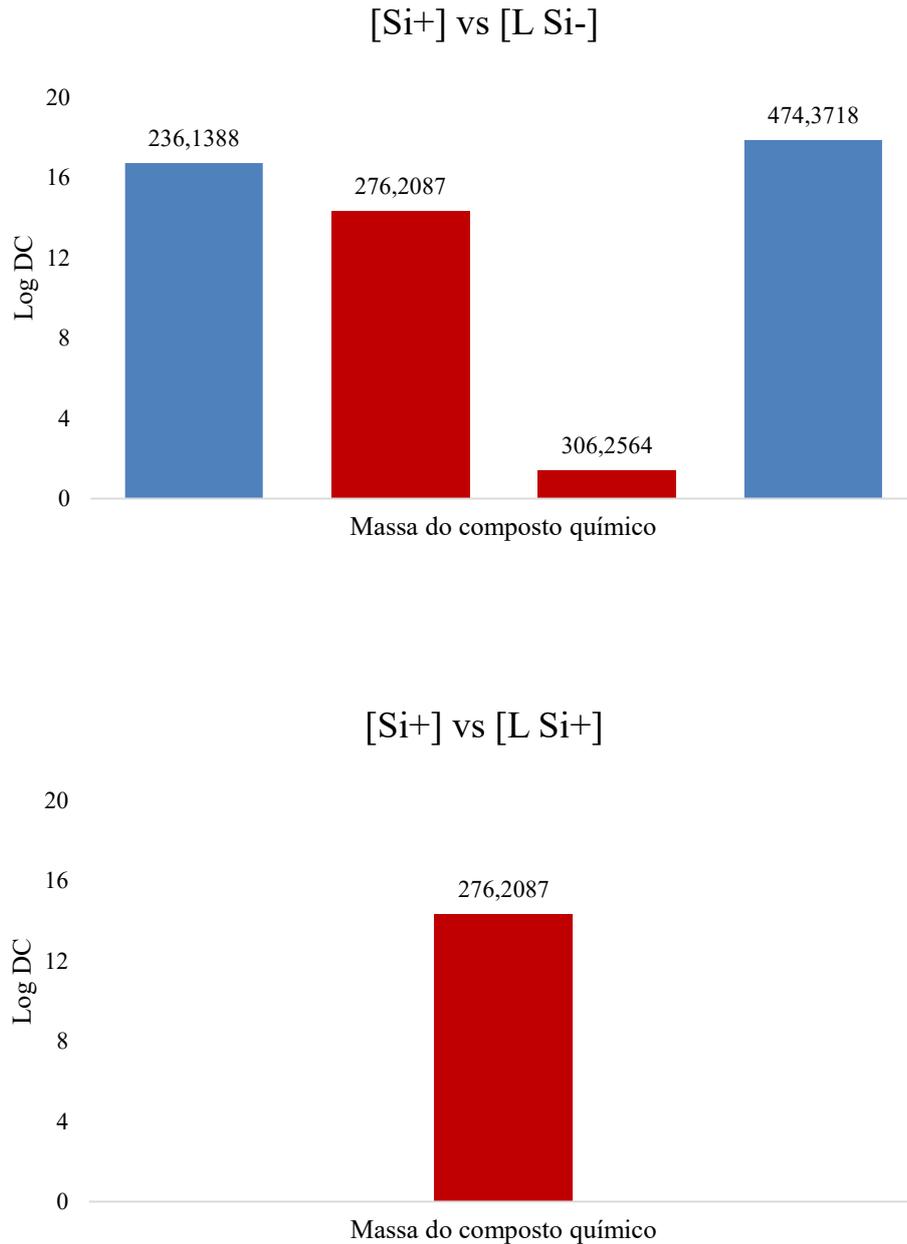
Fonte: A autora.

Quando a comparação foi realizada na concentração dos compostos das plantas que receberam Si via solo (Si+) e as plantas que receberam herbivoria, nota-se semelhança na comparação das plantas Si- com as plantas com herbivoria. Dois compostos químicos tiveram maior concentração em plantas com Si+ e dois em plantas com lagartas (L Si-) quando essas foram comparadas, apenas um composto químico teve maior concentração em plantas L Si+ do que em Si+ (Figura 4). Quando plantas Si+ foram comparadas com plantas com herbivoria de pulgão, um composto foi maior em Si+ e dois em P Si-, e dois compostos foram maiores em Si+ e quatro em P Si+, quando essas plantas foram comparadas (Figura 5). Já quando a comparação foi realizada com plantas com as duas herbivorias, três compostos foram maiores nas plantas Si+ e quatro nas LP Si- e, assim como em plantas sem Si, uma maior diferença na atividade metabólica foi verificada em plantas com os três estímulos com cinco compostos com maior concentração nas plantas Si+ e 14 nas plantas LP Si+, quando essas foram comparadas entre si (Figura 6).

Na comparação entre plantas que receberam o mesmo tipo de herbivoria, mas receberam (Si+) ou não (Si-) aplicação de Si no solo, plantas com herbivoria de lagartas tiveram dois compostos com maior concentração em plantas com Si do que nas sem Si. Com herbivoria de pulgão, foi observado um composto com maior concentração em cada tipo de planta (P Si+ e P Si-), quando as plantas receberam as duas herbivorias, houve maior atividade metabólica com um composto químico com menor concentração, e quatro compostos com maior concentração em LP Si+ comparado com LP Si- (Figura 7).

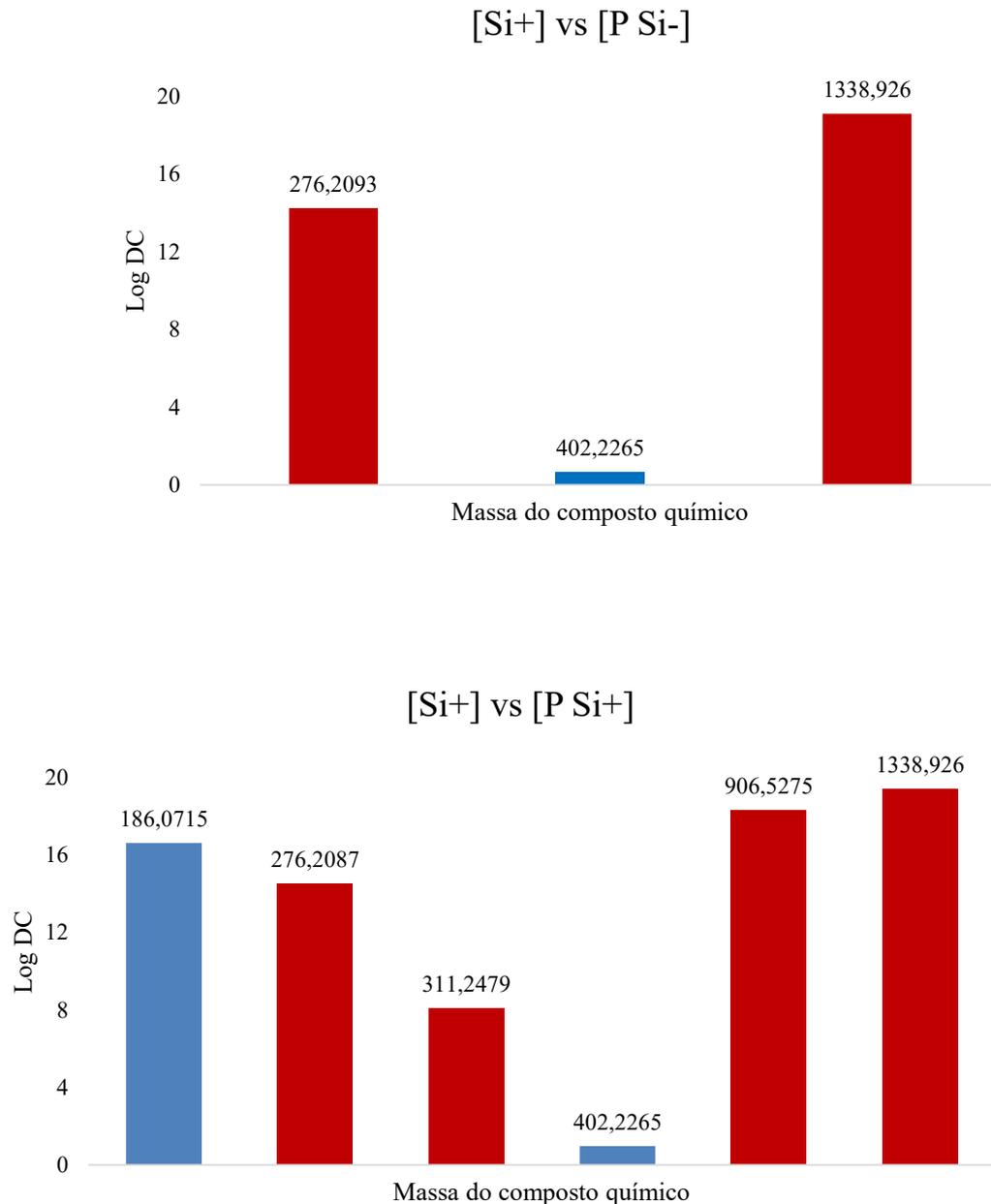
Quando comparadas plantas que receberam aplicação de Si no solo (Si+) e diferentes tipos de herbivoria, seis compostos tiveram concentrações diferentes na comparação entre lagartas (L Si+) e pulgões (P Si+) com três compostos com concentração maior em cada uma das herbivorias (Figura 8). As plantas com ambas as herbivorias foram comparadas àquelas com apenas uma das herbivorias, notamos, mais uma vez, maior atividade metabólica nas plantas com dois tipos de herbivoria (LP Si+) com 17 compostos alterados na comparação com a herbivoria só de lagarta (L Si+) e 15 compostos alterados na comparação com a herbivoria só de pulgão (P Si+) (Figura 9).

Figura 4 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) comparando plantas de sorgo com diferentes estímulos. Plantas com silício e sem herbivoria [Si+]; plantas com herbivoria de lagarta *Spodoptera frugiperda* e sem [L Si-] ou com [L Si+] silício aplicado via solo. Barra em azul indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [Si+]; barra em vermelho indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [L Si-] ou [L Si+].



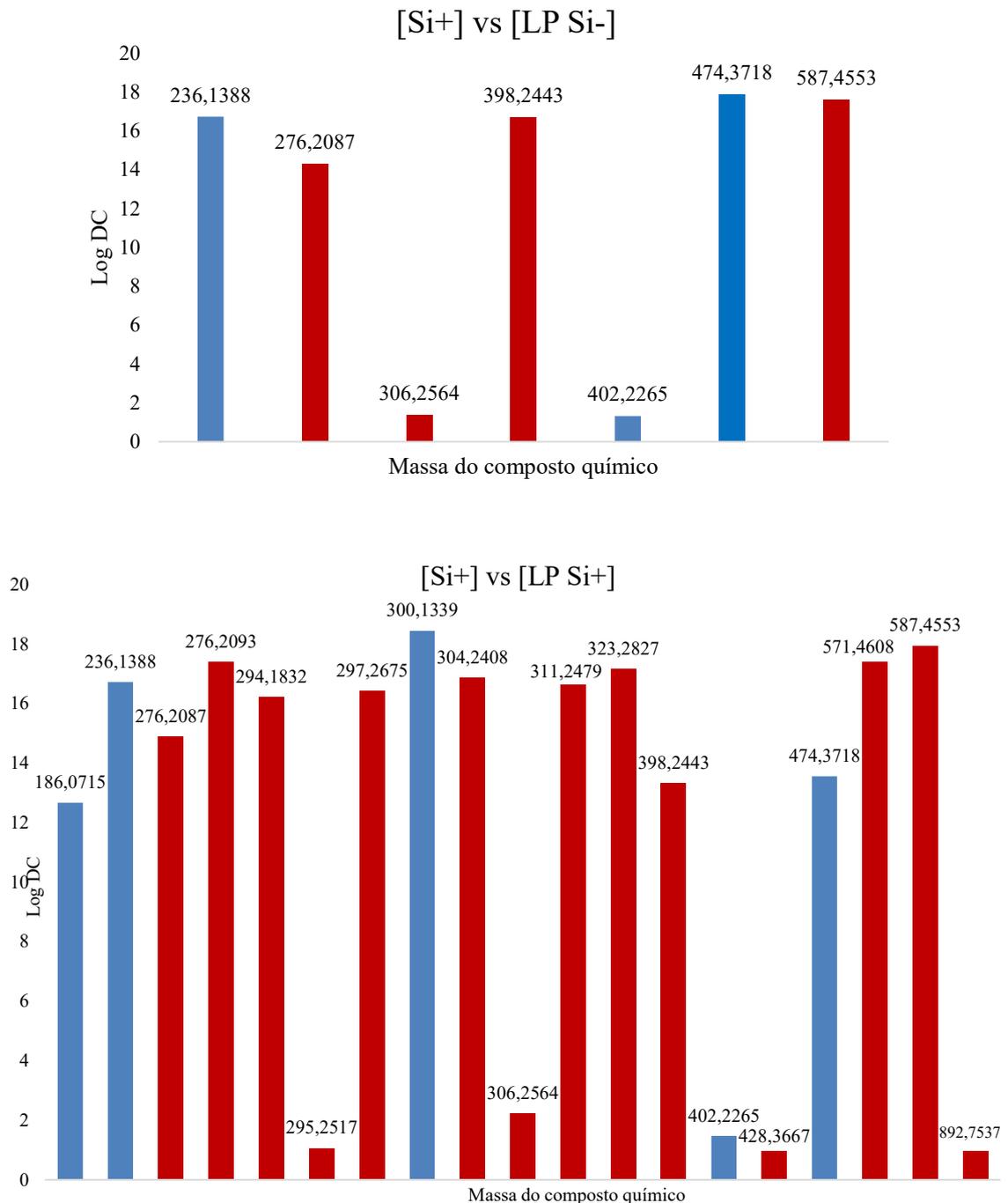
Fonte: A autora.

Figura 5 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) comparando plantas de sorgo com diferentes estímulos. Plantas com silício e sem herbivoria [Si+]; plantas com herbivoria do pulgão *Rhopalosiphum maidis* e sem [P Si-] ou com [P Si+] silício aplicado via solo. Barra em azul indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [Si+]; barra em vermelho indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [P Si-] ou [P Si+].



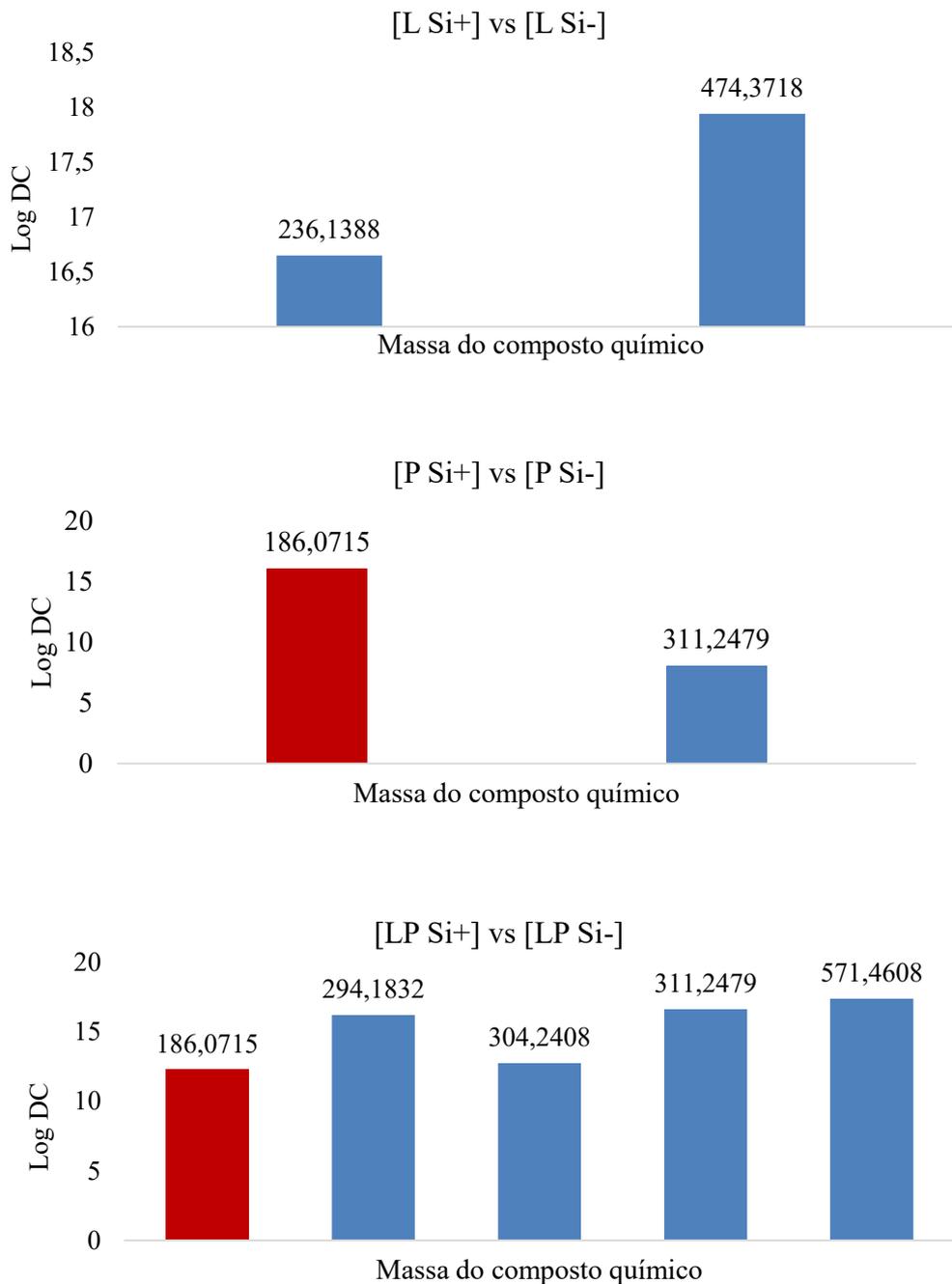
Fonte: A autora.

Figura 6 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) comparando plantas de sorgo com diferentes estímulos. Plantas com silício e sem herbivoria [Si+]; plantas com dois tipos de herbivoria, de lagarta *Spodoptera frugiperda* e do pulgão *Rhopalosiphum maidis*, e sem [LP Si-] ou com [LP Si+] silício aplicado via solo. Barra em azul indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [Si+]; barra em vermelho indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [LP Si-] ou [LP Si+].



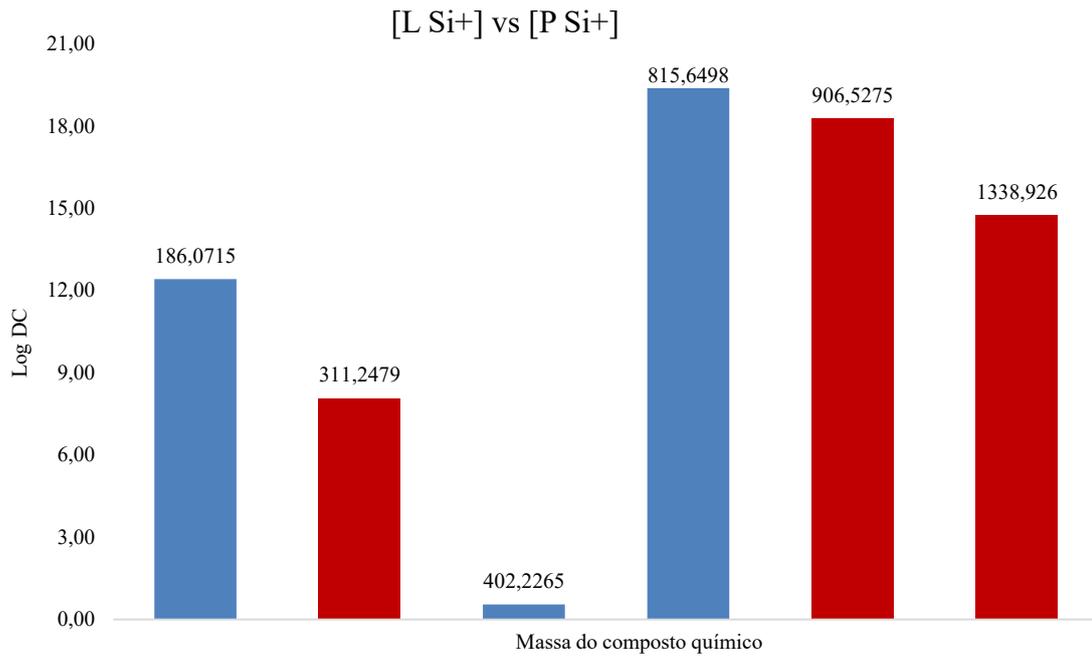
Fonte: A autora.

Figura 7 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) comparando plantas de sorgo que receberam o mesmo tipo de herbivoria e com (Si+) ou sem (Si-) aplicação de silício no solo. Plantas com herbivoria de lagarta (L) *Spodoptera frugiperda*; plantas com herbivoria do pulgão (P) *Rhopalosiphum maidis*; plantas com os dois tipos de herbivoria, de lagarta e do pulgão (LP). Barra em azul indica quantas vezes à concentração do composto químico foi maior nas plantas [Si+]; barra em vermelho indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [Si-].



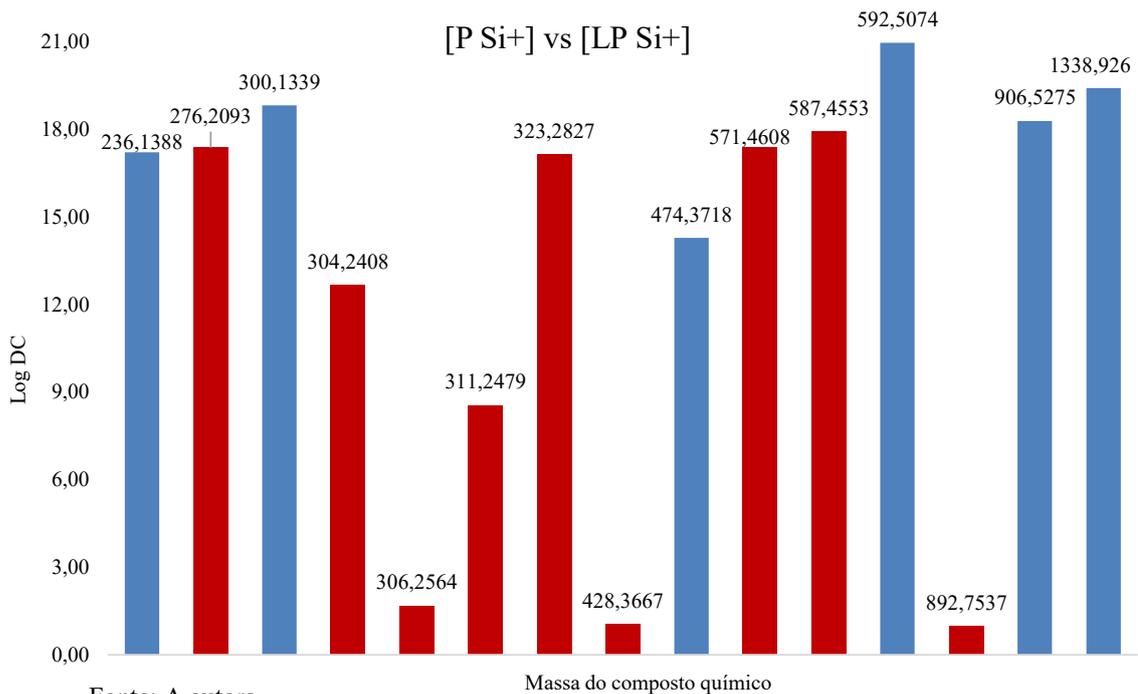
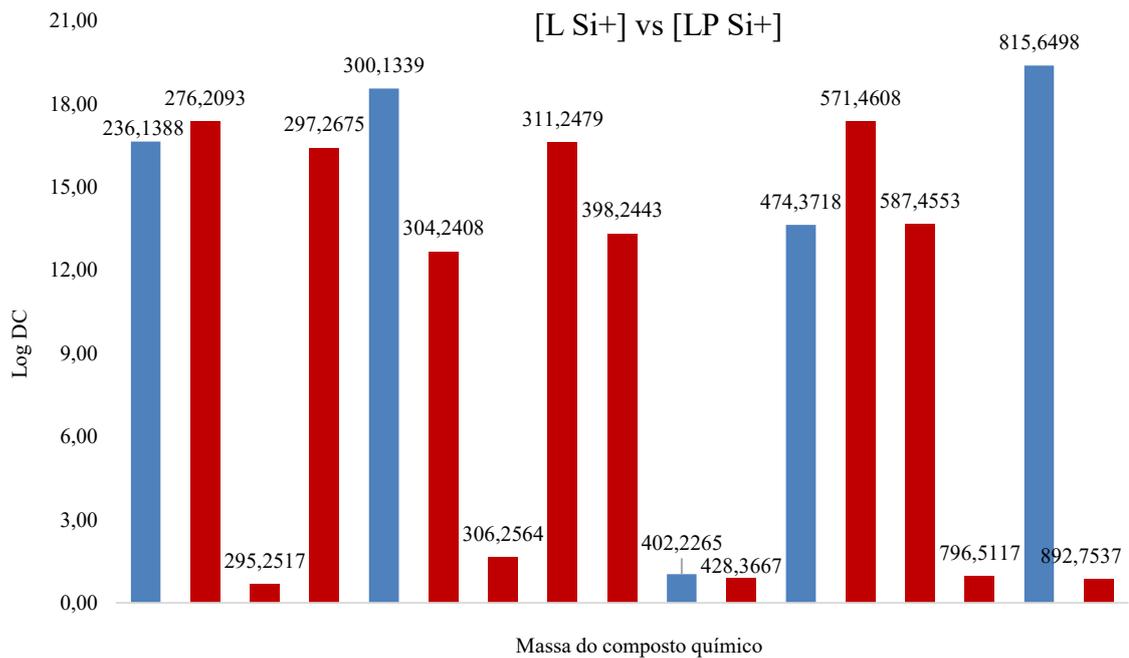
Fonte: A autora.

Figura 8 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) comparando plantas de sorgo que receberam aplicação de silício no solo e diferentes tipos de herbivoria. Plantas com herbivoria de lagarta (L) *Spodoptera frugiperda*; plantas com herbivoria do pulgão (P) *Rhopalosiphum maidis*. Barra em azul indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [L Si+]; barra em vermelho indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [P Si+].



Fonte: A autora.

Figura 9 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) comparando plantas de sorgo que receberam aplicação de silício no solo e diferentes tipos de herbivoria. Plantas com herbivoria de lagarta (L) *Spodoptera frugiperda*; plantas com herbivoria do pulgão (P) *Rhopalosiphum maidis*; plantas com os dois tipos de herbivoria, de lagarta e do pulgão (LP). Barra em azul indica quantas vezes à concentração do composto químico foi maior nas plantas [L Si+] ou [P Si+]; barra em vermelho indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [LP Si+].



Fonte: A autora.

O número de vezes que cada um dos 23 compostos químicos teve sua concentração alterada nas comparações entre plantas de sorgo que receberam diferentes estímulos, seja a aplicação de Si no solo ou herbivoria, foi variável. Sete compostos químicos, 186,0715; 236,1388; 294,1832; 304,2408; 311,2479; 474,3718 e 571,4608, podem ser destacados quanto as suas relações com a aplicação de Si no solo e as diferentes herbivorias. Dois compostos químicos, 236,1388 e 474,3718, foram alterados com a herbivoria por lagarta, seja somente lagarta (L) ou em conjunto com pulgões (P) (Figuras 1, 3, 4, 6, 7, 9 e 10; Tabela 5), sendo alterados em onze comparações, reduzidos nas plantas com herbivoria por lagarta (L Si-) e lagarta e pulgão (LP Si+ e LP Si-) quando comparadas às plantas sem herbivoria (Si- e Si+). Quando foram comparadas plantas de sorgo com e sem Si e com herbivoria por lagarta (L Si+ vs L Si-), as concentrações desses dois compostos químicos foram maiores em plantas com Si do que em plantas sem Si, menores nas plantas com dupla herbivoria com Si (LP Si+) quando comparadas às plantas com apenas uma herbivoria e Si (L Si+ e P Si+), e maiores nas plantas com pulgão e sem Si (P Si-) quando comparadas às plantas com dupla herbivoria com e sem Si (LP Si+ e LP Si-).

Sob a influência da herbivoria por pulgão (P) e relacionada à adubação com Si, dois compostos químicos, 186,0715 e 311,2479, tiveram suas concentrações alteradas (Figuras 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 e 10; Tabela 5). A concentração do composto 186,0715 foi reduzida, enquanto a do composto 311,2479 foi aumentada em oito e dez comparações, respectivamente, todas em plantas que o estímulo foi herbivoria do pulgão e adição de Si (P Si+ e LP Si+) quando comparadas com plantas com Si sem herbivoria ou com herbivoria de lagarta ou pulgão (Si+, L Si+ e P Si+), e sem Si e sem herbivoria ou com herbivoria de pulgão ou ambas herbivorias (Si-, P Si- e LP Si-).

Três compostos químicos, 294,1832; 304,2408 e 571,4608, foram alterados sob o efeito do Si e somente em plantas de sorgo que foram submetidas a herbivoria por lagarta somada a herbivoria por pulgões (LP) (Figuras 3, 6, 7, 9 e 10; Tabela 5). As concentrações desses compostos foram maiores em plantas que receberam as duas herbivorias e Si (LP Si+) do que em plantas sem herbivoria (Si+ e Si-), ou somente com herbivoria de pulgão (P Si-), ou com ambas as herbivorias, mas que não receberam Si (LP Si-), ou nas que receberam Si, no entanto, com apenas uma das herbivorias (L Si+ e P Si+).

Tabela 5 – Compostos químicos expressos em plantas de sorgo em função da aplicação [Si+] ou não [Si-] de silício via solo e da herbivoria de lagarta *Spodoptera frugiperda* [L] e/ou do pulgão *Rhopalosiphum maidis* [P]. Log DC = logaritmo da diferença na concentração do composto químico, comparando o primeiro tratamento [trat 1] versus o segundo tratamento [trat 2].

<b>Massa do composto químico</b>	<b>[trat 1] vs [trat 2]</b>	<b>Log DC</b>
236.1388	[Si-] vs [L Si-]	13,17
	[Si-] vs [LP Si-]	13,17
	[Si-] vs [LP Si+]	13,17
	[P Si-] vs [LP Si-]	13,00
	[P Si-] vs [LP Si+]	13,00
	[Si+] vs [L Si-]	16,72
	[Si+] vs [LP Si-]	16,72
	[Si+] vs [LP Si+]	16,72
	[L Si+] vs [L Si-]	16,65
	[L Si+] vs [LP Si+]	16,65
	[P Si+] vs [LP Si+]	17,21
474.3718	[Si-] vs [L Si-]	18,95
	[Si-] vs [LP Si-]	18,95
	[Si-] vs [LP Si+]	14,64
	[P Si-] vs [LP Si-]	19,03
	[P Si-] vs [LP Si+]	14,72
	[Si+] vs [L Si-]	17,86
	[Si+] vs [LP Si-]	17,86
	[Si+] vs [LP Si+]	13,56
	[L Si+] vs [L Si-]	17,95
	[L Si+] vs [LP Si+]	13,64
	[P Si+] vs [LP Si+]	14,28
186.0715	[Si-] vs [P Si+]	16,68
	[Si-] vs [LP Si+]	12,76
	[P Si-] vs [P Si+]	16,09
	[P Si-] vs [LP Si+]	12,17
	[LP Si-] vs [LP Si+]	12,30
	[Si+] vs [P Si+]	16,59
	[Si+] vs [LP Si+]	12,67
	[L Si+] vs [P Si+]	12,42
311.2479	[P Si+] vs [Si-]	8,07
	[P Si+] vs [Si+]	8,07
	[P Si+] vs [P Si-]	8,07
	[P Si+] vs [L Si+]	8,07
	[LP Si+] vs [Si-]	16,62
	[LP Si+] vs [Si+]	16,62
	[LP Si+] vs [LP Si-]	16,62
	[LP Si+] vs [L Si+]	16,62
	[LP Si+] vs [P Si+]	8,55
	[LP Si+] vs [P Si-]	16,62

Continua...

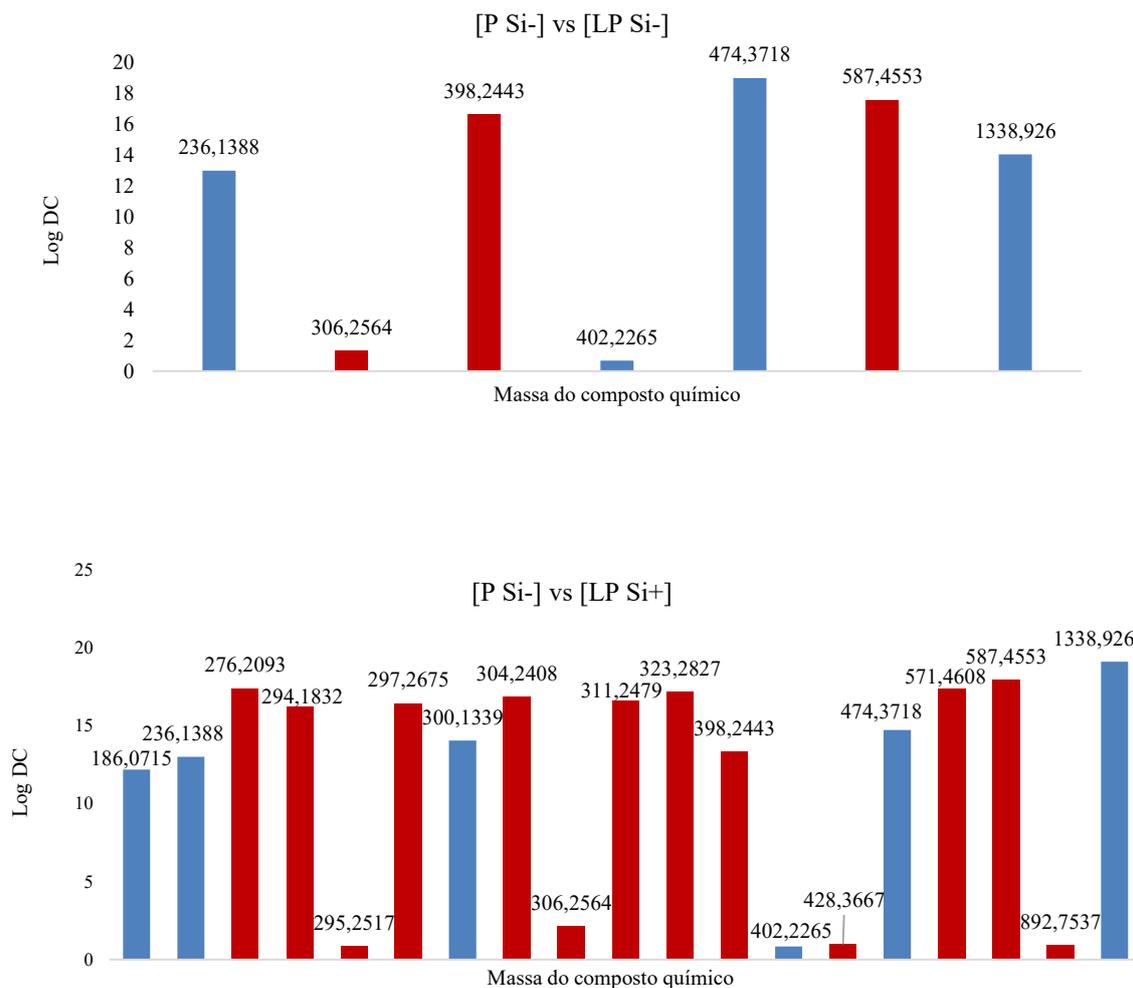
Tabela 5 – Continuação

<b>Massa do composto químico</b>	<b>[trat 1] vs [trat 2]</b>	<b>Log DC</b>
294.1832	[LP Si+] vs [Si-]	16,21
	[LP Si+] vs [Si+]	16,21
	[LP Si+] vs [P Si-]	16,21
	[LP Si+] vs [LP Si-]	16,21
304.2408	[LP Si+] vs [Si-]	16,85
	[LP Si+] vs [Si+]	16,85
	[LP Si+] vs [L Si+]	12,68
	[LP Si+] vs [P Si-]	16,85
	[LP Si+] vs [P Si+]	12,66
	[LP Si+] vs [LP Si-]	12,74
571.4608	[LP Si+] vs [Si-]	17,38
	[LP Si+] vs [Si+]	17,38
	[LP Si+] vs [L Si+]	17,38
	[LP Si+] vs [P Si-]	17,38
	[LP Si+] vs [P Si+]	17,38
	[LP Si+] vs [LP Si-]	17,38

Fonte: A autora.

Ao se observar as plantas que receberam herbivoria do pulgão, percebeu-se que os compostos 186,0715 e 311,2479 foram os únicos alterados quando comparadas plantas com e sem Si (P Si- vs P Si+) (Figura 7; Tabela 5). Ao comparar as plantas sem herbivoria prévia de lagartas e sem Si (P Si-) com aquelas que receberam herbivoria prévia de lagartas (LP Si-) ou com as que receberam os três estímulos (LP Si+), constatou-se alteração de outros 7 e 19 compostos químicos, respectivamente (Figura 10) com destaque para a redução na concentração dos compostos 236,1388 e 474,3718 nas plantas com herbivoria de lagartas. Esses mesmos compostos também foram reduzidos em várias outras comparações nas plantas que receberam herbivoria por lagartas (Figuras 1, 3, 4, 6, 7, 9 e 10).

Figura 10 – Diferença (em logaritmo) na concentração de compostos químicos (Log DC) comparando plantas de sorgo com herbivoria do pulgão *Rhopalosiphum maidis* e que não receberam aplicação de silício no solo [P Si-] e plantas que receberam a herbivoria de lagarta *Spodoptera frugiperda* e do pulgão, sem [LP Si-] ou com [LP Si+] aplicação de Si no solo. Barra em azul indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [P Si-]; barra em vermelho indica quantas vezes a concentração do composto químico foi maior nas plantas [LP Si-] ou [LP Si+].



Fonte: A autora.

### 3.4 Análise de polifenóis e poder de redução do ferro (FRAP)

Não houve diferença entre os tratamentos para os teores de polifenóis ( $F= 1,038$ ;  $d= 24/31$ ;  $P= 0,4314$ ) e nem para o poder de redução do ferro (FRAP) ( $F= 1,266$ ;  $d= 24/31$ ;  $P= 0,3082$ ) (Tabela 6).

Tabela 6 – Teor de polifenóis e poder de redução do ferro (FRAP) em plantas de sorgo adubadas (Si+) ou não (Si-) com silício aplicado via solo e submetidas ou não a herbivoria de lagartas de *Spodoptera frugiperda* (L) e de pulgões *Rhopalosiphum maidis* (P).

Doses de silício (kg ha <sup>-1</sup> )	Polifenóis	FRAP
	mg GAE/g	μmol Trolox eq/L
Média±Erro		
Si-	261,47±11,05 a	141,49±15,00 a
Si+	336,22±18,34 a	178,38±32,10 a
L Si-	372,35±38,43 a	136,74±4,01 a
L Si+	348,50±44,70 a	126,33±7,38 a
P Si-	295,91±14,36 a	124,33±8,08 a
P Si+	284,37±28,63 a	158,18±27,66 a
LP Si-	347,41±67,97 a	176,84±22,71 a
LP Si+	313,56±36,09 a	133,41±16,64 a
	<b>CV(%) = 23,05</b>	<b>CV(%) = 26,13</b>

Médias seguidas por letras distintas, minúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.  
Fonte: A autora.

## 4 DISCUSSÃO

No presente estudo, houve maior teor de Si nas plantas de sorgo adubadas com esse elemento somente quando submetidas à herbivoria pelo pulgão *R. maidis* ou a dupla herbivoria e o aumento do teor de Si nas folhas de sorgo esteve relacionada à redução da população do pulgão. No entanto, a herbivoria por lagarta de *S. frugiperda* sem a herbivoria do pulgão não interferiu no teor de Si na folha. Já as plantas de sorgo com dupla herbivoria, de lagarta e pulgão, foram as que apresentaram o maior teor de Si foliar. Um dos principais fatores no aumento da absorção e no acúmulo de Si pelas plantas é a herbivoria (GARBUZOV et al., 2011; HARTLEY et al., 2015; HARTLEY; DEGABRIEL, 2016; JOHNSON et al.; 2020).

O teor de Si das plantas de sorgo foi avaliado após 15 dias da herbivoria pelas lagartas (2 dias de herbivoria) e imediatamente após finalizada a herbivoria por pulgões (15 dias de herbivoria). É provável que pelo pequeno tempo ou por ter ocorrido no início do desenvolvimento das plantas (dos 30 aos 32 dias após a semeadura), a herbivoria pelas lagartas não tenha sido suficiente para interferir no teor de Si nas plantas de sorgo. De forma análoga, Johnson et al. (2020) observaram que a submissão de plantas de trigo, no início de seu desenvolvimento (32 a 49 dias após a semeadura), à herbivoria por *Rhopalosiphum padi* (L.) não interferiu no teor de Si foliar 14 dias após. Porém, ao exporem essas plantas à herbivoria por lagartas de *Helicoverpa armigera* (Hubner), sete dias após a retirada dos pulgões e por um período de sete dias de herbivoria, houve aumento do teor de Si foliar.

Vários estudos observaram redução no potencial reprodutivo de pulgões com a aplicação de Si no solo, indicando indução de resistência por antibiose (BOER et al., 2019; CARVALHO et al., 1999; DIAS et al., 2014; HANISCH, 1980; KEEPING et al., 2009; LI et al., 2018; RANGER et al., 2009; REYNOLDS et al., 2016; SAMPAIO et al., 2020). Contudo, nem sempre o aumento do teor foliar de Si reduz o crescimento populacional de pulgões. Pelo menos, *R. maidis* em milho (BOER et al., 2019) e *Schizaphis graminum* (Rondani) em sorgo (SAMPAIO et al., 2020) não apresentaram redução no crescimento populacional em plantas com Si. Segundo Sampaio et al. (2020), muitos trabalhos em que o Si reduziu a fecundidade dos pulgões foram realizados com pulgões isolados, já em colônias, os pulgões aumentam a quantidade de saliva injetada na planta o que, provavelmente, reduz o efeito da resistência induzida pelo Si.

A variação na concentração de vários compostos químicos nas plantas de sorgo foi influenciada pela aplicação de Si no solo associada aos diferentes tipos de herbivoria, demonstrando a importância desse elemento no metabolismo de plantas de sorgo quando

atacadas por insetos. A aplicação de Si sem herbivoria não alterou os compostos químicos produzidos pelas plantas de sorgo, assemelhando-se ao observado para o teor de Si foliar. Porém, a herbivoria, tanto por lagartas, como por pulgões, ou ambas as herbivorias (de lagartas somada a de pulgões), foi responsável por alterações na produção de compostos químicos.

O composto 186,0715 foi silenciado e o 311,2479 foi estimulado nas plantas com Si com herbivoria de pulgões, já os compostos 236,1388 e 474,3718 foram silenciados na herbivoria por lagartas, independente da presença de Si. A maior atividade metabólica foi observada em plantas de sorgo que receberam os três estímulos, aplicação de Si via solo e as duas herbivorias, por lagarta e por pulgão. Nesse contexto, pelo menos sete compostos químicos (186,0715; 236,1388; 294,1832; 304,2408; 311,2479; 474,3718 e 571,4608) apresentaram destaque na relação Si e herbivoria e podem ser elementos chave no entendimento dessas relações, uma vez que sejam identificados. No presente trabalho a adubação silicatada e herbivoria (tanto da lagarta quanto do pulgão) não foram suficientes para alterarem a concentração de polifenóis e por isso, como consequência, não houve aumento na atividade antioxidante (FRAP), apesar de outros autores (GOMES et al., 2005; RANGER et al., 2009) terem observado aumento da atividade desses compostos associados a aplicação de Si e de herbivoria por pulgões.

Porém, a necessidade de herbivoria para que o Si induza modificações nas plantas é controversa. Oliveira et al. (2020) constataram que as plantas de trigo com Si liberaram cerca de 3,5 vezes mais voláteis do que as sem Si. Os autores ainda verificaram que um único composto, o geranil acetona, estava relacionado à atração do parasitoide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson), sendo emitido por plantas com Si, mesmo sem infestação de *R. padi*. Também, Ranger et al. (2009) observaram aumento na concentração de ácidos fenólicos e flavonoides no tecido foliar da planta *Zinnia elegans* (Jacq.) com a adubação com Si, sem a presença de herbivoria. Os autores associaram a redução na fecundidade do pulgão *Myzus persicae* (Sulzer) a presença desses compostos induzidos por Si. Já Gomes et al. (2005), verificaram que plantas de trigo que receberam um dos estímulos, ou o Si ou a herbivoria prévia do pulgão *S. graminum*, aumentaram a síntese de compostos de defesa, como peroxidase, polifenoloxidase e fenilalanina amônia-liase, reduzindo a taxa de crescimento de *S. graminum*. Porém, segundo os autores, plantas que receberam os estímulos combinados (Si mais herbivoria prévia) apresentaram as maiores ativações dos compostos de defesa e a maior redução na reprodução do pulgão.

A herbivoria é notadamente um importante fator de indução de defesa de plantas, o que está relacionado a compostos químicos injetados nas plantas pelos insetos na oviposição ou

junto com a saliva, durante a alimentação (DIXON et al., 1994; JAOUANNET et al., 2014). Os pulgões secretam uma variedade de proteínas no floema à medida que se alimentam (ELZINGA; JANDER, 2013; GUERRIERI; DIGILIO, 2008; HAYAMIZU, 1984; MILES, 1999; SANDSTRÖM et al., 2000) e algumas delas são conhecidas por suprimir as respostas de defesa das plantas (BOS et al., 2010; ELZINGA et al., 2014; WILL et al., 2007). No entanto, tenha sido proposto que os pulgões induzam ativamente a produção de ácido salicílico (JOHNSON et al., 2020; WALLING, 2008) e suprimam as concentrações de ácido jasmônico (JOHNSON et al., 2020) para desviar as defesas das plantas, os componentes salivares específicos envolvidos neste processo ainda não foram identificados. Na secreção oral de lagartas foram encontrados dois tipos de substâncias elicitoras, os conjugados de ácidos graxos e aminoácidos e as enzimas líticas, os quais estimulam a produção de compostos que atuam na defesa das plantas e na atração dos inimigos naturais (MATTIACCI et al., 1995; PINTO-ZEVALLOS et al., 2013; RODRÍGUEZ-SAONA et al., 2002).

A herbivoria prévia por *S. frugiperda* teve efeito na indução de resistência nas plantas de sorgo que não receberam Si, reduzindo a população de *R. maidis* a números semelhantes aos das plantas com Si. Apesar da herbivoria por lagarta não ter alterado o teor de Si foliar, ela foi responsável pela variação na concentração dos compostos químicos, indicando que esses compostos estão relacionados à defesa das plantas de sorgo e que a alteração em sua composição reduziu a população de *R. maidis*.

Como os compostos 236,1388 e 474,3718 foram silenciados em plantas sem Si e com herbivoria por lagartas, é provável que tenham papel chave na redução da população de *R. maidis*. Johnson et al. (2020) encontraram efeito oposto, com as taxas de crescimento do mastigador, *H. armigera*, não apresentando alterações quando se alimentaram de plantas que receberam herbivoria anterior do pulgão *R. padi*, porém com redução de 75% no ganho de peso da lagarta ao se alimentar de plantas com Si, tanto nas com herbivoria como nas sem herbivoria do pulgão. Tzin et al. (2015a), observaram que o efeito da herbivoria por lagartas de *Spodoptera exigua* (Hübner) aumentou a fecundidade do pulgão *R. maidis* em alguns genótipos de milho, mas nos genótipos com maior concentração de metiltransferase DIMBOA-Glc a herbivoria da lagarta reduziu a fecundidade do pulgão. De maneira análoga, Li et al. (2018) observaram que em plantas de trigo com maior concentração de DIMBOA-Glc a herbivoria por lagartas de *Spodoptera littoralis* (Boisduval) promoveu a *O*- metilação desse composto em HDMBOA-Glc, aumentando a resistência da planta a lagartas, porém, reduzindo a resistência ao pulgão *Sitobion avenae* (Fabricius).

No presente trabalho, a herbivoria por lagartas foi provocada 15 dias antes da análise de metabolômica das plantas de sorgo, e as plantas tendem a não manter ativos os compostos induzidos após tanto tempo (APPEL et al., 2014; COPPOLA et al., 2013; TZIN et al., 2015b; ZHU-SALZMAN et al., 2004). Por exemplo, para elucidar os processos metabólicos e mudanças de expressão gênica envolvidos nas respostas do milho ao ataque de pulgões, Tzin et al. (2015b) utilizaram folhas da linhagem consanguínea B73, as quais foram infestadas com pulgões do milho (*R. maidis*) por 2 a 96h. A análise das folhas de milho infestadas mostrou duas fases de resposta distintas com as mudanças transcricionais e metabólicas mais significativas ocorrendo nas primeiras horas após o início da alimentação dos pulgões. Após 4 dias, a expressão gênica e os perfis de metabólitos do milho infestado por pulgões voltaram a ser mais semelhantes aos das plantas controle. No presente trabalho, os perfis metabólicos das plantas de sorgo que receberam somente herbivoria por *S. frugiperda* foram mais parecidos com os controles, sem herbivoria, do que os perfis metabólicos das plantas que receberam herbivoria por lagarta e por pulgão, já que neste último caso, as plantas receberam herbivoria durante os 17 dias que antecederam as análises de metabolômica, dois dias por lagarta e 15 dias por pulgões.

Por outro lado, a dupla herbivoria (lagartas mais pulgões) somada à aplicação de Si no solo, foi o estímulo que provocou a maior alteração nas concentrações dos compostos químicos nas plantas de sorgo. Embora o crescimento populacional de *R. maidis* não tenha sido menor em plantas com dupla herbivoria e Si do que em plantas que receberam só herbivoria de lagartas ou só Si, a maior atividade desses compostos em plantas com os três estímulos (Si e duas herbivorias) indica maior indução de compostos de defesa nas plantas de sorgo. Porém, pode haver um ajuste dinâmico na produção de compostos de defesa induzidos e na adequação dos pulgões às defesas da planta. Segundo Tzin et al. (2015b), alterações prolongadas de oxilipinas, induzidas pela alimentação de *R. maidis* em plantas de milho, indicam mudanças dinâmicas nas respostas da planta à alimentação de pulgões ao longo do tempo. Uma possível explicação, segundo os autores, é que os pulgões são capazes de suprimir algumas respostas de defesa das plantas durante a alimentação de longo prazo. Por outro lado, a mudança para diferentes respostas de longo prazo pode indicar que o milho e outras plantas são capazes de ajustar suas respostas transcriptômicas e metabolômicas ao longo do tempo para ajustar as defesas para o tipo específico de ataque que está sendo percebido.

Tanto a aplicação de Si no solo quanto a herbivoria prévia por *S. frugiperda* tiveram efeito na indução de resistência por antibiose nas plantas de sorgo, reduzindo o crescimento populacional de *R. maidis*. A herbivoria foi o principal elicitor de compostos químicos nas

plantas de sorgo, e o Si sem herbivoria não teve efeito sobre a concentração dos compostos químicos na planta. Porém, plantas de sorgo que foram submetidas aos três estímulos em conjunto, Si, herbivoria por lagarta e herbivoria por pulgão apresentaram maior atividade metabólica do que as plantas que não receberam, pelo menos, um desses estímulos, indicando a importância do Si no metabolismo de defesa de plantas de sorgo atacadas por insetos.

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação do silício via solo aumentou o teor deste elemento em plantas com herbivoria e atuou na indução de resistência por antibiose à *R. maidis* em plantas de sorgo, reduzindo o crescimento populacional do pulgão.

O crescimento populacional de *R. maidis* foi reduzido em plantas de sorgo sem Si e que foram expostas a herbivoria prévia por *S. frugiperda*, o que indica que os metabólitos 236,1388 e 474,3718, silenciados devido a essa herbivoria, apresentaram papel na indução de resistência ao pulgão.

A herbivoria, tanto por lagartas, como por pulgões, ou ambas as herbivorias, foi responsável por alterações na produção de compostos químicos, porém, a atividade metabólica foi maior nas plantas de sorgo que receberam, em conjunto, aplicação de Si via solo e ambas as herbivorias. A alteração dos compostos químicos 186,0715; 236,1388; 294,1832; 304,2408; 311,2479; 474,3718 e 571,4608, em plantas com Si e com herbivoria indica a importância desses compostos na indução de resistência em plantas de sorgo.

A adubação silicatada e a herbivoria não interferiu na produção de polifenóis e no poder de redução do ferro em plantas de sorgo.

## REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, R.; MORAES, J. C.; AUAD, A. M.; COELHO, M.; NASCIMENTO, A. M. Induction of resistance of corn plants to *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) by application of silicon and gibberellic acid. **Bulletin of Entomological Research**, Cambridge, London, v. 107, n. 4, p. 527-533, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007485316001176>
- APPEL, H. M.; FESCEMYER, H.; EHLTING, J.; WESTON, D.; REHRIG, E.; JOSHI, T.; XU, D.; BOHLMANN, J.; SCHULTZ, J. Transcriptional responses of *Arabidopsis thaliana* to chewing and sucking insect herbivores. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 5, n. 565. 2014. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00565>
- BOER, C. A., SAMPAIO, M. V., PEREIRA, H. S. Silicon-mediated and constitutive resistance to *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae) in corn hybrids. **Bulletin of Entomological Research**, Cambridge, London v. 119, n. 3, p. 356-364. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007485318000585>
- BOS, J. I.; PRINCE, D.; PITINO, M.; MAFFEI, M. E.; WIN, J.; HOGENHOUT, S. A. A functional genomics approach identifies candidate effectors from the aphid species *Myzus persicae* (green peach aphid). **PLoS Genet**, San Francisco, Califórnia, v. 6, n. 11, e1001216, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1001216>
- BROEKGAARDEN, C.; VOORRIPS, R. E.; DICKE, M.; VOSMAN, B. Transcriptional responses of *Brassica nigra* to feeding by specialist insects of different feeding guilds. **Insect Science**, Victoria, Australia, v. 18, n. 3, p. 259-272. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7917.2010.01368.x>
- CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; FOLTRAN, D. E.; HENRIQUE, C. M.; ROSSETTO, R. Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas-SP, v.69, n.4, p.937-944, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000400020>
- CARVALHO, S. P.; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G. Efeito do silício na resistência do sorgo (*Sorghum bicolor*) ao pulgão verde (*Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, Londrina-PR, v. 28, n. 4, p. 505-510, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0301-80591999000300017>
- COPPOLA, V.; COPPOLA, M.; ROCCO, M.; DIGILIO, M. C.; D'AMBROSIO, C.; RENZONE, G.; MARTINELLI, R.; SCALONI, A.; PENNACCHIO, F.; RAO, R. Transcriptomic and proteomic analysis of a compatible tomato-aphid interaction reveals a predominant salicylic acid-dependent plant response. **BMC Genomics**, London, v. 14, n. 515, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-515>
- COULDRIDGE, C.; NEWBURY, H. J.; FORD-LLOYD, B.; BALE, J.; PRITCHARD, J. Exploring plant responses to aphid feeding using a full *Arabidopsis* microarray reveals a small number of genes with significantly altered expression. **Bulletin of Entomological Research**, Cambridge, London, v. 97, n. 5, p. 523-532, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007485307005160>

DE VOS, M.; VAN OOSTEN, V. R.; VAN POECKE, R. M.; VAN PELT, J. A.; POZO, M. J.; MUELLER, M. J.; BUCHALA, A. J.; MÉTRAUX, J. P.; VAN LOON, L. C.; DICKE, M.; PIETERSE, C. M. Signal signature and transcriptome changes of *Arabidopsis* during pathogen and insect attack. **Molecular Plant-Microbe Interactions** : MPMI, Saint. Paul, Minnesota, v. 18, n. 9, p. 923-937, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1094/MPMI-18-0923>

DIAS, P. A. S.; SAMPAIO, M. V.; RODRIGUES, M. P.; KORNDÖRFER, A. P.; OLIVEIRA, R. S.; FERREIRA, S. E.; KORNDÖRFER, G. H. Induction of resistance by silicon in wheat plants to a late and apterous morphs of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae). **Environmental Entomology**, Oxford, v. 43, n. 4, p. 949-956, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1603/EN13234>

DIXON, R. A.; HARRISON, M. J.; LAMB, C. J. Early events in the activation of plant defense response. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, Califórnia, v. 32, p 479-501, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.py.32.090194.002403>

ELZINGA, D.A.; JANDER, G. The role of protein effectors in plant-aphid interactions. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 16, n. 4, p. 451-456, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.06.018>

ELZINGA, D.A., DE VOS, M.; JANDER, G. Suppression of plant defenses by a *Myzus persicae* (green peach aphid) salivary effector protein. **Molecular Plant-Microbe Interactions** : MPMI, Saint. Paul, Minnesota v. 27, n. 7, p. 747-756, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-14-0018-R>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília-DF, 2013. 353p.

ERB, M.; MELDAU, S.; HOWE, G. A. Role of phytohormones in insect-specific plant reactions. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 17, n. 5, p. 250-259, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.01.003>

FERRY, N.; STAVROULAKIS, S.; GUAN, W.; DAVISON, G. M.; BELL, H. A.; WEAVER, R. J.; DOWN, R. E.; GATEHOUSE, J. A.; GATEHOUSE, A. M. R. Molecular interactions between wheat and cereal aphid (*Sitobion avenae*): analysis of changes to the wheat proteome. **Proteomics**, Weinheim, Germany, v. 11, n. 10, p. 1985-2002, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/pmic.200900801>.

GARBUZOV, M.; REIDINGER, S.; HARLEY, S. E. Interactive effects of plants-available soil silicon and herbivory on competition between two grass species. **Annals of Botany**, Oxford, v. 108; n. 7, p. 1355-1363. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcr230>

GOMES, F. B.; MORAES, J. C.; SANTOS, C. D.; GOUSSAIN, M. M. Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. **Scientia Agricola**, Piracicaba-SP, v. 62, n. 6, p. 547-551, nov./dez. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000600006>

GREENE, G. L.; LEPPLA, N. C.; DICKERSON, W. A. Velvetbean caterpillar a rearing procedure and artificial médium. **Journal of Economic Entomology**, Oxoford, v. 69, n. 4, p. 487-488, 1976. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/69.4.487>

- GUAN, W.; FERRY, N.; EDWARDS, M. G.; BELL, H. A.; OTHMAN, H.; GATEHOUSE, J. A.; GATEHOUSE, A. M. R. Proteomic analysis shows that stress response proteins are significantly up-regulated in resistant diploid wheat (*Triticum monococcum*) in response to attack by the grain aphid (*Sitobion avenae*). **Molecular Breeding** : new strategies in plant improvement, Dordrecht ; Boston, v. 35, n. 2, p. 57, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11032-015-0220-x>
- GUERRIERI, E.; DIGILIO, M. C. Aphid-plant interactions: a review. **Journal of Plant Interactions**, Oxfordshire, U.K., v. 3, n. 4, p. 223-232, 2008. DOI: [10.1080/17429140802567173](https://doi.org/10.1080/17429140802567173)
- JAOUANNET, M.; RODRIGUEZ, P. A.; THORPE, P.; LENOIR, C. J. G.; MACLEOD, R.; ESCUDERO-MARTINEZ, C.; BOS, J. I. B. Plant immunity in plant-aphid interactions. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 5, n. 663, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00663>
- HANISCH, H. C. Zum einfluss der stickstoffdungung und vorbeugender spritzung von natronwasser glas zu weizenpflanzen auf deren widerstandsfähigkeit gegen getreideblattläuse. **Kali-Driefe**, Berlin, v. 15, p. 287-296, 1980.
- HARTLEY, S. E.; FITT, R. N.; MCLAMON, E. L.; WADE, R. N. Defending the leaf surface: intra- and inter-specific differences in silicon deposition in grasses in response to damage and silicon supply. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 6, p. 1-8 (art. 35), 2015.
- HARTLEY, S. E.; DEGABRIEL, J. L. The ecology of herbivore-induced silicon defences in grasses. **Functional Ecology**, Oxford, v. 30, n. 8, p. 1311-1322, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12706>
- HAYAMIZU, E. Comparative studies on aggregations among aphids in relation to population dynamics: II effects of aggregation on the growth and fecundity of *Brevicoryne brassicae* L. and *Myzus persicae*: SULZER: Homoptera: Aphididae. **Applied Entomology and Zoology**, Tokyo, v. 19, n. 4, p. 468-475, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1303/aez.19.468>
- HEIDEL, A. J.; BALDWIN, I. T. Microarray analysis of salicylic acid- and jasmonic acid-signalling in responses of *Nicotiana attenuate* to attack by insects from multiple feeding guilds. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 27, n. 11, p. 1362-1373, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01228.x>
- HEIDEL-FISCHER, H. M.; MUSSER, R. O.; VOGEL, H. Plant transcriptomic responses to herbivory. In: VOELCKEL, C.; JANDER, G. (eds) **Annual Plant Reviews**, Insect-plant interactions, v. 47, Wiley-Blackwell, Chichester, 2014. p. 155-196.
- HEIL, M. Damaged-self recognition in plant herbivore defence. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 14, n. 7, p. 356-363, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.04.002>
- HUANG, D.; OU, B.; PRIOR, R. L. The chemistry behind antioxidant capacity assays. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 53, n. 6, p. 1841-1856, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf030723c>

JOHNSON, S. N.; ROWE, R. C.; HALL, C. R. Aphid Feeding Induces Phytohormonal Cross-Talk without Affecting Silicon Defense against Subsequent Chewing Herbivores. **Plants**, Basel, Switzerland, v. 9, n. 8, p. 1009, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9081009>

KEEPING, M. G.; KVEDARAS, O. L.; BRUTON, A. G. Epidermal silicon in sugarcane: Cultivar differences and role in resistance to sugarcane borer *Eldana saccharina*. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 1, p. 54-60, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.12.012>

KESSLER, A.; BALDWIN, I. T. Plant responses to insect herbivory: the emerging molecular analysis. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, Califórnia, v. 53, p. 299-328, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.53.100301.135207>

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. **Boletim técnico**, 2. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 34p. 2004.

LI, R.; ZHANG, J.; LI, J.; ZHOU, G.; WANG, Q.; BIAN, W.; ERB, M.; LOU, Y. Prioritizing plant defense over growth through WRKY regulation facilitates infestation by non-target herbivores. **eLife**, Cambridge, London, v. 4, e04805, 2015. DOI: 10.7554/eLife.04805

LI, Y.; DICKE, M.; KROES, A.; LIU, W.; GOLDS, R. Interactive effects of cabbage aphid and caterpillar herbivory on transcription of plant genes associated with phytohormonal signalling in wild cabbage. **Journal of Chemical Ecology**, New York v. 42, n. 8, p. 793-805, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10886-016-0738-3>

LI, B.; FÖRSTER, C.; ROBERT, C. A. M.; ZÜST, T.; HU, L.; MACHADO, R. A. R.; BERSET, J. -D.; HANDRICK, V.; KNAUER, T.; HENSEL, G.; CHEN, W.; KUMLEHN, J.; YANG, P.; KELLER, B.; GERSHENZON, J.; JANDER, G.; KÖLLNER, T. G.; ERB, M. Convergent evolution of a metabolic switch between aphid and caterpillar resistance in cereals. **Science Advances**, Washington, v. 4, n. 12, eaat6797, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat6797>

LIU, J.; ZHU, J.; ZHANG, P.; HAN, L.; REYNOLDS, O.L.; ZENG, R. et al. Silicon supplementation alters the composition of herbivore induced plant volatiles and enhances attraction of parasitoids to infested rice plants. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v. 8, n. 1265, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01265>

MATTIACCI, L.; DICKE, M.; POSSHUMUS, M. A. beta-Glucosidase: an elicitor of herbivore-induced plant odor that attracts host-searching parasitic wasps. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 92, n. 6, p. 2036-2040, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.92.6.2036>

MEWIS, I.; TOKUHISA, J. G.; SCHULTZ, J. C.; APPEL, H. M.; ULRICHS, C.; GERSHENZON, J. Gene expression and glucosinolate accumulation in *Arabidopsis thaliana* in response to generalist and specialist herbivores of different feeding guilds and the role of defense signaling pathways. **Phytochemistry**, Toronto, v. 67, n. 22, p. 2450-2462, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.004>

MILES, P. W. Aphid saliva. **Biological Reviews**, Cambridge, London, v. 74, n. 1, p. 41-85, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1999.tb00181.x>

- MORAES, J. C.; CARVALHO, S. P. Indução de resistência em plantas de sorgo *Sorghum bicolor* (L.) Moench. ao pulgão *Schizaphis graminum* (Rond., 1852) (Hemiptera: Aphididae) com a aplicação de silício. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, v. 26, n. 6, p. 1185-1189, 2002.
- NASCIMENTO, A. M.; FRANSCINELY, A.; MORAES, J. C.; SAKOMURA, R. Não preferência a *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) induzida em arroz pela aplicação de silício. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife-PE, v. 9, n. 2, p. 215-218, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i2a3930>
- NORUSIS, M. **SPSS 16.0 statistical procedures companion**. Prentice Hall Press, New Jersey, 2008.
- OLIVEIRA, R. S.; PEÑAFLORES, M. F. G. V.; GONÇALVES, F. G.; SAMPAIO, M. V.; KORNDÖRFER, A. P.; SILVA, W. D.; BENTO, J. Silicon-induced changes in plant volatiles reduce attractiveness of wheat to the bird cherry-oat aphid *Rhopalosiphum padi* and attract the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes*. **PLoS ONE**, San Francisco, Califórnia, v. 15, n. 4, e0231005, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231005>
- PARRA, J. R. P. **Técnicas de criação de insetos para programas de controle biológico**. 3. ed. Piracicaba: FEALQ, 2001. 134 p.
- PINTO-ZEVALLOS, D. M.; MARTINS, C. B. C.; PELLEGRINO, A. C.; ZARBIN, P. H. G. Compostos orgânicos voláteis na defesa induzida das plantas contra insetos herbívoros. **Química Nova**, São Paulo-SP, v. 36, n. 9, p. 1395-1405, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000900021>.
- RANGER, C. M.; SINGH, A. P.; FRANTZ, J. M.; CANÃS, L.; LOCKE, J. C.; REDING, M. E.; VORSA, N. Influence of Silicon on Resistance of *Zinnia elegans* to *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). **Environmental Entomology**, Oxford, v. 38, n. 1, p. 129-136, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1603/022.038.0116>
- REYNOLDS, O. L.; PADULA, M. P.; ZENG, R.; GURR, G. M. Silicon: potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, Switzerland, v.7, n.744, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00744>
- RODRÍGUEZ-SAONA, C.; CRAFTS-BRANDNER, S. J.; WILLIAMS, L. 3<sup>rd</sup>; PARÉ, P. W. *Lygus hesperus* feeding and salivary gland extracts induce volatile emissions in plants. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 28, n. 9, p. 1733-1747, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020552932566>
- ROGINSKY, V.; LISSI, E. A. Review of methods to determine chain-breaking antioxidant activity in food. **Food Chemistry**, Amsterdam, Netherlands : Elsevier Science, v. 92, n. 2, p. 235-254, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.004>

SAMPAIO, M. V.; FRANCO, G. M.; LIMA, D. T.; OLIVEIRA, A. R. C.; SILVA, P. F.; SANTOS, A. L. Z.; RESENDE, A. V. M.; SANTOS, F. A. A.; GIRÃO, L. V. C. Plant silicon amendment does not reduce population growth of *Schizaphis graminum* or host quality for the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes*. **Neotropical Entomology**, Londrina-PR, v. 49, n. 5, p. 745-757, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13744-020-00775-w>

SANDSTRÖM, J.; TELANG, A.; MORAN, N. Nutritional enhancement of host plants by aphids-a comparison of three aphid species on grasses. **Journal of Insect Physiology**, Oxford, v. 46, n. 1, p. 33-40, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0022-1910\(99\)00098-0](https://doi.org/10.1016/s0022-1910(99)00098-0)

SANTOS, F. C.; COELHO, A. M.; RESENDE, A. V.; MIRANDA, R. A. Correção do solo e adubação na cultura do sorgo. **Informe agropecuário: Sorgo: Inovações tecnológicas**. Belo Horizonte-MG, v. 35, n. 278, p. 34-42. 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

TZIN, V.; LINDSAY, P. L.; CHRISTENSEN, S. A.; MEIHLS, L. N.; BLUE, L. B.; JANDER, G. Genetic mapping shows intraspecific variation and transgressive segregation for caterpillar-induced aphid resistance in maize. **Molecular Ecology**, Oxford, v. 24, n. 22, p. 5739-5750, 2015a. DOI: <https://doi.org/10.1111/mec.13418>

TZIN, V.; FERNANDEZ-POZO, N.; RICHTER A.; SCHMELZ, E. A.; SCHOETTNER, M.; SCHÄFER, M.; AHERN, K. R.; MEIHLS, L. N.; KAUR, H.; HUFFAKER, A.; MORI, N.; DEGENHARDT, J.; MUELLER, L. A.; JANDER, G. Dynamic maize responses to aphid feeding are revealed by a time series of transcriptomic and metabolomic assays. **Plant Physiology**, Rockville, v. 169, n. 3, p. 1727-1743, 2015b. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.15.01039>

THOMPSON, G. A.; GOGGIN, F. L. Transcriptomics and functional genomics of plant defence induction by phloem-feeding insects. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 4, p. 755-766, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erj135>

WALLING, L. L. The myriad plant responses to herbivores. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 19, n. 2, p. 195-216, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003440000026>

WALLING, L. L. Avoiding effective defenses: strategies employed by phloem-feeding insects. **Plant Physiology**, Rockville, v. 146, n. 3, p. 859-866, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.107.113142>

WILL, T.; TJALLINGII, W. F.; THÖNNESEN, A.; VAN BEL, A. J. Molecular sabotage of plant defense by aphid saliva. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 104, n. 25, p. 10536-10541, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0703535104>

ZOU, Y.; CHANG, S. K. C.; GU, Y.; QIAN, S. Y. Antioxidant activity and phenolic compositions of lentil (*Lens culinaris* var. Morton) extract and its fractions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 59, n. 6, p. 2268-2276, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf104640k>

ZHU-SALZMAN, K.; SALZMAN, R. A.; AHN, J. E.; KOIWA, H. Transcriptional regulation of sorghum defense determinants against a phloem-feeding aphid. **Plant Physiology**, Rockville, v. 134, n. 1, p. 420-431, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.103.028324>

**ANEXO A - Metabólitos expressos em plantas de sorgo com ou sem Si, submetidas a diferentes herbivórias.**

Compostos/ Massa	Log FC	Log FC	Log FC	Log FC	Log FC	Log FC	Legenda
	[Si-] vs [L Si-]	[Si-] vs [L Si+]	[Si-] vs [LP Si-]	[Si-] vs [LP Si+]	[Si-] vs [P Si-]	[Si-] vs [P Si+]	
186.0715	NS	NS	NS	12,76	NS	16,68	FC: Fold Change
236.1388	13,17	NS	13,17	13,17	NS	NS	Si-: Sem silício
276.2087	NS	NS	NS	NS	NS	NS	Si+: Com silício
276.2093	NS	NS	NS	-13,23	NS	NS	L Si-: Lagarta sem silício
294.1832	NS	NS	NS	-16,21	NS	NS	L Si+: Lagarta com silício
295.2517	NS	NS	NS	-0,83	NS	NS	P Si-: Pulgão sem silício
297.2675	NS	NS	NS	-16,42	NS	NS	P Si+: Pulgão com silício
300.1339	NS	NS	NS	18,41	NS	NS	LP Si-: Lagarta + pulgão sem silício
304.2408	NS	NS	NS	-16,85	NS	NS	LP Si+: Lagarta + pulgão com silício
306.2564	NS	NS	NS	-1,34	NS	NS	NS: não significativo
311.2479	NS	NS	NS	-16,62	NS	-8,07	
323.2827	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
394.3087	NS	NS	18,94	14,72	18,94	18,94	
398.2443	NS	NS	-16,68	-13,32	NS	NS	
402.2265	NS	0,51	1,40	1,55	0,71	1,06	
428.3667	NS	NS	NS	-0,75	NS	NS	
474.3718	18,95	NS	18,95	14,64	NS	NS	
571.4608	NS	NS	NS	-17,38	NS	NS	
587.4553	NS	NS	-13,17	-13,52	NS	NS	
815.6498	NS	NS	NS	19,45	NS	19,45	
892.7537	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
906.5275	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
1338.926	NS	NS	NS	NS	-19,09	-19,41	

Continua...

## ANEXO A – Continuação

Compostos/ Massa	Log FC		Log FC		Log FC		Log FC	
	[Si+] vs [P Si+]	[Si+] vs [L Si-]	[Si+] vs [L Si+]	[Si+] vs [LP Si-]	[Si+] vs [LP Si+]	[Si+] vs [P Si+]		
186.0715	NS	NS	NS	NS	12,67	16,59		
236.1388	NS	16,72	NS	16,72	16,72	NS		
276.2087	NS	-14,34	-14,35	-14,29	-14,89	-14,52		
276.2093	-14,52	NS	NS	NS	-17,38	NS		
294.1832	NS	NS	NS	NS	-16,21	NS		
295.2517	NS	NS	NS	NS	-1,06	NS		
297.2675	NS	NS	NS	NS	-16,42	NS		
300.1339	NS	NS	NS	NS	18,44	NS		
304.2408	NS	NS	NS	NS	-16,85	NS		
306.2564	NS	-1,41	NS	-1,38	-2,22	NS		
311.2479	NS	NS	NS	NS	-16,62	-8,07		
323.2827	NS	NS	NS	NS	-17,15	NS		
394.3087	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
398.2443	NS	NS	NS	-16,68	-13,32	NS		
402.2265	0,98	NS	NS	1,32	1,47	0,98		
428.3667	NS	NS	NS	NS	-0,94	NS		
474.3718	NS	17,86	NS	17,86	13,56	NS		
571.4608	NS	NS	NS	NS	-17,38	NS		
587.4553	NS	NS	NS	-17,60	-17,94	NS		
815.6498	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
892.7537	NS	NS	NS	NS	-0,94	NS		
906.5275	NS	NS	NS	NS	NS	-18,29		
1338.926	-19,41	NS	NS	NS	NS	-19,41		

Continua...

## Legenda

FC: Fold Change

Si-: Sem silício

Si+: Com silício

L Si-: Lagarta sem silício

L Si+: Lagarta com silício

P Si-: Pulgão sem silício

P Si+: Pulgão com silício

LP Si-: Lagarta + pulgão sem silício

LP Si+: Lagarta + pulgão com silício

NS: não significativo

## ANEXO A – Continuação

Compostos/ Massa	Log FC		Log FC		Log FC		Log FC	
	[L Si-] vs [LP Si-]	[L Si-] vs [LP Si+]	[L Si-] vs [P Si-]	[L Si-] vs [P Si+]	[L Si+] vs [L Si-]	[L Si+] vs [LP Si-]		
186.0715	NS	NS	NS	12,01	NS	NS		
236.1388	NS	NS	-13,00	-17,21	16,65	16,65		
276.2087	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
276.2093	NS	-13,18	NS	NS	NS	NS		
294.1832	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
295.2517	NS	-0,65	NS	NS	NS	NS		
297.2675	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
300.1339	NS	18,53	NS	NS	NS	NS		
304.2408	NS	-16,85	NS	NS	NS	NS		
306.2564	NS	NS	1,35	NS	NS	NS		
311.2479	NS	-16,62	NS	-8,07	NS	NS		
323.2827	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
394.3087	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
398.2443	-16,68	-13,32	NS	NS	NS	NS	-13,32	
402.2265	1,09	1,24	NS	0,75	NS	NS	1,04	
428.3667	NS	-1,05	NS	NS	NS	NS	NS	
474.3718	NS	NS	-19,03	-18,58	17,94	13,64		
571.4608	NS	-17,38	NS	NS	NS	NS		
587.4553	-17,60	-17,94	NS	NS	NS	NS	-13,66	
815.6498	NS	19,48	NS	19,48	NS	NS		
892.7537	NS	-1,08	NS	NS	NS	NS		
906.5275	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
1338.926	NS	NS	-19,09	-19,41	NS	NS		

Continua...

## Legenda

- FC: Fold Change  
Si-: Sem silício  
Si+: Com silício  
L Si-: Lagarta sem silício  
L Si+: Lagarta com silício  
P Si-: Pulgão sem silício  
P Si+: Pulgão com silício  
LP Si-: Lagarta+pulgão sem silício  
LP Si+: Lagarta+pulgão com silício  
NS: não significativo

## ANEXO A – Continuação

Compostos/ Massa	Log FC		Log FC		Log FC		Log FC		Logenda
	[L Si+] vs [LP Si+]	[L Si+] vs [P Si-]	[L Si+] vs [P Si+]	[LP Si-] vs [P Si-]	[LP Si-] vs [P Si+]	[LP Si+] vs [LP Si-]			
186.0715	NS	NS	12,42	NS	16,23	-12,30		FC: Fold Change	
236.1388	16,65	NS	NS	-13,00	-17,21	NS		Si-: Sem silício	
276.2087	NS	NS	NS	NS	NS	NS		Si+: Com silício	
276.2093	-17,38	NS	NS	NS	NS	NS		L Si-: Lagarta sem silício	
294.1832	NS	NS	NS	NS	NS	16,21		L Si+: Lagarta com silício	
295.2517	-0,68	NS	NS	NS	NS	NS		P Si-: Pulgão sem silício	
297.2675	-16,42	NS	NS	NS	NS	NS		P Si+: Pulgão com silício	
300.1339	18,56	NS	NS	NS	NS	NS		LP Si-: Lagarta+pulgão sem silício	
304.2408	-12,68	NS	NS	NS	NS	12,74		LP Si+: Lagarta+pulgão com silício	
306.2564	-1,65	NS	NS	1,32	NS	NS		NS: não significativo	
311.2479	-16,62	NS	-8,07	NS	-8,07	16,62			
323.2827	NS	NS	NS	NS	NS	NS			
394.3087	NS	NS	NS	NS	NS	NS			
398.2443	-13,32	NS	NS	16,68	NS	NS			
402.2265	1,04	NS	0,54	-0,69	NS	NS			
428.3667	-0,88	NS	NS	NS	NS	NS			
474.3718	13,64	NS	NS	-19,03	-18,58	NS			
571.4608	-17,38	NS	NS	NS	NS	17,38			
587.4553	-13,66	NS	NS	17,60	17,60	NS			
815.6498	19,39	NS	19,39	NS	NS	NS			
892.7537	-0,85	NS	NS	NS	NS	NS			
906.5275	NS	NS	-18,29	NS	NS	NS			
1338.926	NS	-14,44	-14,76	-14,06	-14,38	NS			

Continua...

## ANEXO A – Continuação

Compostos/ Massa	Log FC		Log FC [P Si+] vs [P Si-]	Legenda
	[LP Si+] vs [P Si-]	[LP Si+] vs [P Si+]		
186.0715	-12,17	NS	-16,09	FC: Fold Change
236.1388	-13,00	-17,21	NS	Si-: Sem silício
276.2087	NS	NS	NS	Si+: Com silício
276.2093	17,38	17,38	NS	L Si-: Lagarta sem silício
294.1832	16,21	NS	NS	L Si+: Lagarta com silício
295.2517	0,85	NS	NS	P Si-: Pulgão sem silício
297.2675	16,42	NS	NS	P Si+: Pulgão com silício
300.1339	-14,04	-18,82	NS	LP Si-: Lagarta + pulgão sem silício
304.2408	16,85	12,66	NS	LP Si+: Lagarta + pulgão com silício
306.2564	2,16	1,69	NS	NS: não significativo
311.2479	16,62	8,55	8,07	
323.2827	17,15	17,15	NS	
394.3087	NS	NS	NS	
398.2443	13,32	NS	NS	
402.2265	-0,84	NS	NS	
428.3667	0,98	1,04	NS	
474.3718	-14,72	-14,28	NS	
571.4608	17,38	17,38	NS	
587.4553	17,94	17,94	NS	
815.6498	NS	NS	NS	
892.7537	0,90	0,99	NS	
906.5275	NS	-18,29	NS	
1338.926	-19,09	-19,41	NS	