



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**SILÍCIO NA INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA A *Sitobion avenae* (FABRICIUS, 1775)
(HEMIPTERA: APHIDIDAE), NA PRODUTIVIDADE E NA PRODUÇÃO DE
VOLÁTEIS EM PLANTAS DE TRIGO**

REINALDO SILVA DE OLIVEIRA

**UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016**

REINALDO SILVA DE OLIVEIRA

**SILÍCIO NA INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA A *Sitobion avenae* (FABRICIUS, 1775)
(HEMIPTERA: APHIDIDAE), NA PRODUTIVIDADE E NA PRODUÇÃO DE
VOLÁTEIS EM PLANTAS DE TRIGO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Doutorado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Doutor”.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Sampaio

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

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

O48s Oliveira, Reinaldo Silva de, 1984
2016 Silício na indução de resistência a *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775)
(Hemiptera: Aphididae), na produtividade e na produção de voláteis em
plantas de trigo / Reinaldo Silva de Oliveira. - 2016.
89 f. : il.

Orientador: Marcus Vinicius Sampaio.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Agronomia.
Inclui bibliografia.

1. Agronomia - Teses. 2. Trigo - Adubação - Teses. 3. Silício na
agricultura - Teses. 4. Trigo - Doenças e pragas - Teses. I. Sampaio,
Marcus Vinicius. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de
Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

REINALDO SILVA DE OLIVEIRA

SILÍCIO NA INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA A *Sitobion avenae* (FABRICIUS, 1775)
(HEMIPTERA: APHIDIDAE), NA PRODUTIVIDADE E NA PRODUÇÃO DE VOLÁTEIS
EM PLANTAS DE TRIGO

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Doutorado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 22 de outubro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcus Vinicius Sampaio – Orientador
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Carlos Juliano Brant Albuquerque
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Jader Braga Maia
Universidade Presidente Antônio Carlos

Prof. Dr. José Maurício Simões Bento
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela experiência do viver, pela oportunidade de crescimento enquanto ser humano e pela energia que me conduz pelos dias dessa vida em busca de sabedoria, paz e progresso.

Agradeço aos professores do curso de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia, que contribuíram com a minha formação acadêmica.

Ao Prof. Dr. José Maurício Simões Bento, pelo incentivo aos trabalhos desenvolvidos em cooperação com a equipe do Laboratório de Ecologia Química e Comportamento de Insetos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ)/Piracicaba-SP. Agradeço também, em especial, à Profa. Dra. Maria Fernanda Gomes Villalba Peñaflor e ao Felipe Goulart Gonçalves, pela contribuição fundamental nos experimentos conduzidos com voláteis de plantas.

Não mencionarei nomes aqui, mas agradeço às pessoas que nos encantam com a essência da verdadeira amizade.

Agradeço ao Prof. Dr. Marcus Vinicius Sampaio, por todo o incentivo e amizade durante o doutorado. Sou muito grato a cada palavra dita, aos conselhos dados, mesmo que alguns eu não tenha seguido por teimosia, ao tempo que ele destinava a me ouvir, apesar da sua intensa atividade acadêmica. Obrigado pela nobre orientação.

Agradeço aos meus pais, por me apoiarem em cada etapa da minha vida pessoal e profissional.

À CAPES, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por fornecer suporte financeiro ao INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) de Semioquímicos na Agricultura e ao INCT Hympar/Sudeste.

Meus sinceros agradecimentos à pessoa que é exemplo de persistência e dedicação máxima ao que faz, minha noiva Débora Maria Ferreira Canuto. Tenho a imensa satisfação de compartilhar pensamentos e ações com essa pessoa que saiu do interior de Alagoas, de uma pequena cidade denominada Taquarana, em busca de um aperfeiçoamento profissional que a direcionou ao doutorado em Entomologia na ESALQ. Também agradeço a cada momento de experiências agradáveis que passamos juntos e pelo carinho, dedicação e atenção no que diz respeito a minha pessoa. Que esse amor seja contínuo!

Muito obrigado!

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.” (Theodore Roosevelt)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Levantamento das espécies de parasitoides em trigo (safra 2012)	48
Figura 2. Levantamento de parasitoides e hiperparasitoides em trigo (safra 2012)	49
Figura 3. Levantamento de hiperparasitoides, por família, em trigo (safra 2012).....	49
Figura 4. Levantamento das espécies de coccinelídeos predadores em trigo (safra 2012).....	51
Figura 5. Produtividade das cultivares do trigo, em função dos níveis de Si.....	55
Figura 6. Produtividade do trigo (kg ha^{-1}), em função de níveis crescentes de Si, independentemente das cultivares e épocas de cultivo.....	56
Figura 7. Abundância dos voláteis emitidos pelo trigo, com os respectivos tempos de retenção, em função dos tratamentos: trigo sem adubação com silício e sem herbivoria (Cont; barras pretas); trigo adubado com silício (Si; barras vermelhas); trigo com herbivoria (Herb; barras amarelas); trigo adubado com silício e com herbivoria (Si Herb; barras verdes)	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico utilizado no experimento.....	33
Tabela 2. Caracterização química do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico utilizado no experimento.....	36
Tabela 3. Resumo do quadro de análise de variância individual para a produtividade do trigo, em função das épocas de semeadura e dos níveis de Si	40
Tabela 4. Quadro de análise de variância conjunta para a produtividade do trigo, em função das épocas de semeadura e dos níveis de Si.....	40
Tabela 5. Resumo do quadro de análise de variância individual para o número total de pulgões ao longo do ciclo do trigo, em função de épocas de semeadura (abril e maio) e níveis de Si.....	40
Tabela 6. Quadro de análise de variância conjunta para o número total de pulgões ao longo do ciclo do trigo, em função das épocas de semeadura (abril e maio) e dos níveis de Si	41
Tabela 7. Porcentagem de Si nas folhas, em função da adubação silicatada e das cultivares de trigo.....	41
Tabela 8. Porcentagem de Si na espiga, em função da adubação silicatada.....	42
Tabela 9. Número de pulgões (<i>Sitobion avenae</i>) nas folhas e na espiga de cada afilho, em função da adubação silicatada.....	42
Tabela 10. Número de pulgões (<i>Sitobion avenae</i>) nas folhas de cada afilho das cultivares de trigo, em função dos DAS.....	44
Tabela 11. Número de pulgões (<i>Sitobion avenae</i>) na espiga de cada afilho das cultivares de trigo, em função dos DAS.....	44
Tabela 12. Número de grãos por espiga de cada afilho, em função das cultivares de trigo e da adubação silicatada.....	45
Tabela 13. Massa de grãos (g) por espiga de cada afilho, em função das cultivares de trigo e da adubação silicatada	45
Tabela 14. Altura de plantas (cm), em função das cultivares de trigo e da adubação silicatada.....	46
Tabela 15. Número múmias (<i>Sitobion avenae</i>) nas folhas e espigas de cada afilho, respectivamente, em função das cultivares de trigo e da adubação silicatada	47

Tabela 16. Número de coccinelídeos predadores, em função das cultivares de trigo, da adubação silicatada e do tempo de avaliação (DAS).....	50
Tabela 17. Quadro de análise de variância para o número de pulgões por afilho, em função dos fatores “níveis de silício” (fator de parcela), “cultivares” (fator de subparcela) e “tempo de avaliação” (fator de sub-subparcela).....	51
Tabela 18. Análise de desdobramento do número de pulgões por afilho, em função das “doses de silício” dentro de cada “cultivar*tempo de avaliação”	52
Tabela 19. Análise de desdobramento do número de pulgões por afilho, em função das “cultivares” dentro de cada “Níveis de silício*tempo de avaliação”	53
Tabela 20. Quadro de análise de variância da produtividade do trigo, em função dos fatores “níveis de silício” (fator de parcela) e “cultivares” (fator de subparcela).....	54
Tabela 21. Produtividade do trigo, em função dos níveis de silício (kg ha^{-1}) e das cultivares de trigo.....	54
Tabela 22. Produtividade do trigo (kg ha^{-1}), em função das épocas de semeadura	56
Tabela 23. Número total de pulgões ao longo do ciclo do trigo, cultivar BRS 254, em função das épocas de semeadura (abril e maio) e da adubação silicatada.....	57
Tabela 24. Caracterização química do Neossolo Quartzarênico Órtico Típico utilizado no experimento	68
Tabela 25. Compostos voláteis identificados para cada tempo de retenção	73

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1	3
1.1 Introdução	3
1.2 Objetivos	6
1.3 Referencial teórico	6
1.3.1 Produção da cultura do trigo, pulgões e parasitoides.....	6
1.3.2 Silício como fator abiótico na proteção de plantas contra herbívoros	10
1.3.3 Influência de fatores abióticos na produção de voláteis pelas plantas	14
1.3.4 Influência de fatores bióticos na produção de voláteis pelas plantas	16
1.4 Referências	19
CAPÍTULO 2 – RESISTÊNCIA CONSTITUTIVA E INDUZIDA POR SILÍCIO NA POPULAÇÃO DE <i>Sitobion avenae</i> (FABRICIUS, 1775) (HEMIPTERA: APHIDIDAE), DE INIMIGOS NATURAIS E EM CARACTERÍSTICAS DE PRODUÇÃO DE CULTIVARES DE TRIGO.....	26
RESUMO.....	26
ABSTRACT.....	27
2.1 Introdução	28
2.2 Material e métodos	32
2.2.1 Etapas de condução dos experimentos	32
2.2.2 Condução experimental da primeira etapa (2012): resistência constitutiva e induzida por silício na população de pulgões e seus inimigos naturais e em características de produção de cultivares de trigo	33
2.2.2.1 Análises estatísticas.....	36
2.2.3 Condução experimental da segunda etapa (2014): doses de silício na produtividade e na indução de resistência em BRS 254 e BRS TIMBAÚVA ao pulgão <i>S. avenae</i>	36
2.2.3.1 Análises estatísticas.....	37
2.2.4 Condução experimental da terceira etapa (2015): doses de silício na produtividade e na indução de resistência ao <i>S. avenae</i> em duas épocas de	

cultivo	38
2.2.4.1 Análises estatísticas	39
2.3 Resultados e discussão.....	41
2.3.1 Resistência constitutiva e induzida por silício na população de pulgões e seus inimigos naturais e em características de produção de cultivares de trigo	41
2.3.2 Doses de silício na produtividade e na indução de resistência em BRS 254 e BRS TIMBAÚVA ao pulgão <i>S. avenae</i>	51
2.3.3 Doses de silício na produtividade e na indução de resistência ao <i>S. avenae</i> em duas épocas de cultivo	56
2.4 Conclusões.....	59
2.5 Referências	59
 CAPÍTULO 3 – PRODUÇÃO DE VOLÁTEIS E ABSORÇÃO DE SILÍCIO PELO TRIGO SUBMETIDO À ADUBAÇÃO COM SILÍCIO E À HERBIVORIA CAUSADA POR <i>Rhopalosiphum padi</i> (LINNAEUS, 1758) (HEMIPTERA: APHIDIDAE) 64	
RESUMO	64
ABSTRACT	65
3.1 Introdução	66
3.2 Material e métodos	67
3.2.1 Quantificação e identificação dos voláteis	67
3.2.2 Análise de silício foliar	69
3.2.3 Análises estatísticas	70
3.3 Resultados e discussão.....	70
3.3.1 Quantificação e identificação dos voláteis	70
3.3.2 Análise de silício foliar	75
3.4 Conclusões.....	76
3.5 Referências	77

RESUMO

OLIVEIRA, Reinaldo Silva de. **Silício na indução de resistência ao *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775) (Hemiptera: Aphididae), na produtividade e na produção de voláteis em trigo.** 2016. 89f. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2016¹.

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é a cultura mais cultivada no mundo. Apesar de ser uma gramínea reconhecidamente responsável à adubação com silício (Si), há poucos trabalhos realizados em campo com a cultura para verificar a influência na produtividade de grãos, na indução de resistência aos pulgões e na produção de voláteis de plantas. Assim, com o objetivo de avaliar essas características, foram realizados quatro ensaios, sendo três em campo e um em laboratório. O primeiro e o segundo ensaio em campo (2012 e 2014, respectivamente) foram feitos com o objetivo geral de avaliar as características de produção e a indução de resistência promovida pelo Si aos pulgões em cultivares de trigo. O primeiro ensaio aconteceu na área experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) em Uberlândia, com delineamento de blocos casualizados em três repetições e em esquema fatorial 3x2x5 (cultivares de trigo BRS 254, BRS 264 e BRS TIMBAÚVA; adubadas ou não com Si na quantidade de 300 kg ha⁻¹; e avaliadas aos 90, 97, 104, 111, 118 dias após a semeadura do trigo). Enquanto isso, o segundo ensaio ocorreu na Fazenda Capim Branco, na mesma município, sendo utilizado o delineamento de blocos casualizados com quatro repetições e em esquema de parcelas sub-subdivididas no tempo (quatro níveis de Si – 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ – e uma testemunha distribuídos nas parcelas; duas cultivares de trigo – BRS 254 e BRS TIMBAÚVA – nas subparcelas; e a avaliação da população de pulgões no tempo como sub-subparcelas). Por sua vez, o terceiro ensaio foi realizado em 2015, para avaliar a estabilidade da indução de resistência por Si ao *Sitobion avenae* e a produtividade da cultivar BRS 254 conduzida a partir de duas épocas de semeadura (abril e maio), na Fazenda Capim Branco e com quatro níveis de Si, em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. E o quarto ensaio foi conduzido em 2015, no Laboratório de Comportamento de Insetos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) em Piracicaba, São Paulo. As plantas de trigo da cultivar BRS 254 foram submetidas à adubação silicatada e/ou à herbivoria por *Rhopalosiphum padi*, além da testemunha sem herbivoria e sem Si. Os resultados obtidos em campo permitiram concluir que o Si promoveu a indução de resistência ao pulgão *S. avenae*, que foi acentuada pelas doses crescentes desse elemento, principalmente na fase reprodutiva do trigo. Também foi constatado que a indução de resistência foi estável ao longo de duas épocas de cultivo do trigo, mesmo sob diferentes densidades populacionais de *S. avenae*. BRS 254 e BRS 264 foram mais suscetíveis aos pulgões em comparação à variedade BRS TIMBAÚVA, porém, a adubação com Si proporcionou a indução de resistência e o aumento de produtividade em todas as variedades testadas. Na ausência de adubação silicatada, BRS TIMBAÚVA apresentou menor densidade populacional de pulgões em todos os ensaios. No ensaio laboratorial foi observado que o Si, associado ou não à herbivoria, estimulou a produção de compostos orgânicos voláteis pelas plantas de trigo.

Palavras-chaves: *Triticum aestivum* L. Adubação Silicatada. Pulgões.

¹ Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Sampaio - UFU.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Reinaldo Silva de. **Silicon in induced resistance to *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775) (Hemiptera: Aphididae), in wheat yield and in plant volatiles production.** 2016. 89p. Thesis (Doctorate in Agronomy / Crop Science) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais.²

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is the most widely cultivated crop worldwide. Despite being a known responsive grass to fertilization with silicon (Si), there are few studies in the field with the crop to confirm its effect on grain yield, in the induction of resistance to aphids and production of plant volatiles. In order to evaluate these characteristics four trials were conducted, three in the field and one in the laboratory. The first and the second field tests (2012 and 2014) were done to evaluate the production characteristics and resistance induction promoted by Si against aphids in wheat cultivars. The first test was conducted in the experimental area of EPAMIG in Uberlândia, Minas Gerais, in a randomized block design, with three repetitions and a 3x2x5 factorial (wheat cultivars: BRS 254, BRS 264 and BRS Timbaúva, fertilized or not with Si at 300 kg ha⁻¹, and evaluated at 90, 97, 104, 111, 118 days after sowing). The second test was conducted at Fazenda Capim Branco in Uberlândia, Minas Gerais, in a randomized block design with four replications and split plot scheme in time (four Si levels: 50, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹ and a control distributed in plots, two wheat cultivars - BRS 254 and BRS Timbaúva - in the subplots, and the evaluation of aphid population in time as subsubplots). The third trial was done in 2015, evaluating the stability of Si induced resistance to *Sitobion avenae* and productivity of BRS 254 in two sowing dates (April and May). The experiment was conducted at Fazenda Capim Branco with four Si levels in a randomized block design with four replications. The fourth trial was conducted in 2015 in the laboratory of ESALQ Insect Behavior, in Piracicaba, São Paulo. BRS 254 wheat plants were subjected to Si fertilization and, or, to herbivory by *Rhopalosiphum padi*, and a control without herbivory and without Si. Field results showed that Si induced resistance against the aphid *S. avenae*, and this induction was enhanced by increasing Si doses, especially at wheat reproductive stage. It was also observed that the induction of resistance was stable over two wheat growing seasons, even in different densities of *S. avenae*. Wheat cultivars BRS 254 and BRS 264 were more susceptible to aphids than Timbaúva; however, fertilization with Si induced resistance and increased productivity in all tested cultivars. In the absence of Si fertilization, BRS Timbaúva showed lower population density of aphids in all tests. In the laboratory test, it was observed that Si, with or without herbivory, stimulated the production of volatile organic compounds by wheat plants.

Keywords: *Triticum aestivum* L. Si Fertilization. Aphids.

² Adviser: Marcus Vinicius Sampaio – UFU.

CAPÍTULO 1

1.1 Introdução

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é a cultura mais cultivada no mundo. Em 2015, por exemplo, registrou-se uma produção mundial de 733,13 milhões de toneladas obtida em 223,80 milhões de hectares, com produtividade média de 3,28 toneladas por hectare (USDA, 2016).

No Brasil, o trigo é a quarta cultura em produção (2,65% do total de grãos produzidos), ficando atrás apenas do arroz (5,34%), do milho (40,51%) e da soja (47,36%). A produção dessa gramínea registrada na última safra foi de 5,53 milhões de toneladas, em uma área de 2,45 milhões de hectares. Vale afirmar que a produtividade tem sido bastante variável em território nacional, com média de 2.260 kg ha^{-1} (CONAB, 2016).

Em Minas Gerais, a produtividade foi maior que a média nacional, com 3.070 kg ha^{-1} . Embora seja uma cultura tradicionalmente cultivada na região Sul do país, a cultura tem se expandido para o Centro-Oeste e o Sudeste. No território mineiro, a semeadura pode ocorrer em abril, maio e junho, consideradas épocas de entressafra da produção de trigo no Sul (CONAB, 2016).

A exploração do cultivo de trigo em novas fronteiras agrícolas têm sido impulsionada devido à disponibilidade de genótipos mais adaptados às condições climáticas presentes nas regiões de Cerrado. Em Minas Gerais, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) – Cerrados e Trigo – desenvolve diversas variedades para cultivo em áreas de sequeiro e irrigadas. Desde o lançamento de BRS 264 e BRS 254, em 2004, vários produtores optaram pelo cultivo desses genótipos altamente produtivos e resistentes ao acamamento.

Especificamente no município de Uberlândia, em área experimental, Alvarenga et al. (2009) obtiveram produtividade de 7.047 e 6.491 kg ha^{-1} para BRS 254 e BRS 264, respectivamente, com uma densidade de 450 sementes por metro quadrado. Apenas em 2016, a Embrapa anunciou a disponibilização, aos produtores, do novo genótipo de trigo BRS 394, que apresenta potencial produtivo de 8.000 kg ha^{-1} , o qual poderá substituir as cultivares de trigo irrigado BRS 264 e BRS 254 que ainda são muito utilizadas pelos produtores.

Uma cultivar especial que tem despertado a atenção dos pesquisadores é a BRS TIMBAÚVA, cuja produtividade tem sido mais estável comparada à EMBRAPA 16, mesmo sob o ataque de pulgões e o efeito do vírus transmitido por esses vetores, o *Barley yellow dwarf virus* (PERUZZO et al., 2007; CEZARE; SCHONS; LAU, 2011). No entanto, ela

ainda não é recomendada para a região Sudeste, sendo necessários estudos sobre as características agronômicas de tal variedade em um novo ambiente de produção.

Nesses termos, o potencial de resistência aos pulgões precisa ser avaliado para verificar a possibilidade de uso da cultivar visando garantir o controle dos pulgões mediante a resistência constitutiva. Embora na região Sul essa resistência tenha sido relatada, é necessário investigar se ela persistirá em locais mais quentes do Cerrado, como o Triângulo Mineiro, em Minas Gerais.

De fato, o trigo se adaptou às condições edafoclimáticas das regiões do Cerrado, mas ainda há necessidade de estudos sobre a nutrição de plantas dessa gramínea à ocorrência de doenças e pragas locais. O silício (Si), embora seja utilizado em cultivos de cana-de-açúcar e arroz, apresenta grande potencial para uso em áreas cultivadas com o trigo. Além dos benefícios fisiológicos como o aumento da taxa de fotossíntese, tal elemento pode contribuir para a proteção de plantas contra o ataque de pragas e patógenos, além de estimular a elevação da produtividade (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995; DATNOFF; SNYDER; KORNDÖRFER, 2001; MENDES; SOUZA; MACHADO, 2011).

Apesar de tais pesquisas não terem sido realizadas para a cultura do trigo em campo, há muitos estudos voltados a diversas gramíneas que provaram a capacidade do Si em beneficiar a cultura, em detrimento da influência negativa de fatores abióticos e bióticos (MENDES; SOUZA; MACHADO, 2011). Trabalhos realizados por Gomes et al. (2005), por exemplo, relataram que uma planta adubada com esse elemento eleva a atividade enzimática associada ao sistema de defesa vegetal, garantindo uma redução da taxa de crescimento populacional de *Schizaphis gramineum* (Rondani, 1852) (Hemiptera: Aphididae) no trigo.

Entre as pragas que afetam o trigo, os pulgões se destacam por serem pragas-chave encontradas com frequência no campo. *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae), *Schizaphis gramineum* e *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775) (Hemiptera: Aphididae) são as principais espécies que afetam negativamente a cultura na região Sul do Brasil. Vale ressaltar que a última espécie prefere a fase reprodutiva do trigo, causando danos diretos à produção por impedir o acúmulo adequado de fotoassimilados necessários à obtenção de bons níveis de produtividade (SALVADORI; TONET, 2001; ALVES et al., 2005; REBONATTO et al., 2015).

O controle biológico dos pulgões do trigo ocorre naturalmente na região Sul do país desde o estabelecimento do programa de controle biológico promovido pela Embrapa na década de 1970 (SALVADORI, 1999; GASSEN, 1999; MACHADO; SANTOS, 2013). Em

Minas Gerais, onde essa gramínea também é cultivada, e em outras regiões do Sudeste e Centro-Oeste há carência de informações sobre a ocorrência de parasitoides e predadores que atuam no controle dos pulgões; por conseguinte, o levantamento das espécies e da densidade populacional dos pulgões é essencial.

A utilização do silício no trigo e sua influência na produção de voláteis também precisam ser investigadas. Os voláteis são compostos químicos lipofílicos e de baixo peso molecular liberados pelas plantas, principalmente quando são atacadas por herbívoros. Eles são importantes para os parasitoides e predadores no processo de localização de seus hospedeiros e presas (TURLINGS; WACKERS, 2004; MUMM; DICKE, 2010; KESSLER; HEIL, 2011; WIDHALM et al., 2015), contribuindo para o sucesso do controle biológico mediado pelos organismos do terceiro nível trófico.

Numa tentativa de compreender a interação entre a adubação com Si e a atração de parasitoides em trigo, Oliveira (2012) observou que a herbivoria estimulou esse tipo de atração, mas, interessantemente, as plantas adubadas com tal elemento também os atraíram em sistema de olfatometria, o que pode estar relacionado à produção de voláteis que são percebidos pelos parasitoides. Todavia, esses compostos ainda não foram identificados e comparados àqueles emitidos pelas plantas atacadas pelos pulgões. Desse modo, o presente estudo é necessário para verificar uma nova rota de proteção de plantas contra herbívoros, além da conhecida proteção conferida pelo acúmulo de compostos fenólicos na seiva da planta e pela deposição de sílica amorfa no tecido vegetal.

O conhecimento dos voláteis induzidos por Si abre novas possibilidades para a seleção de compostos que podem ser utilizados no controle de pragas, seja diretamente pelos voláteis com efeito repelente ou por aqueles de atração aos parasitoides, para o aumento da eficiência do controle biológico.

Previamente à realização do presente trabalho, informações tinham sido obtidas com alguns experimentos realizados em laboratório e/ou casa de vegetação (OLIVEIRA, 2012; SILVA et al., 2013; DIAS et al., 2014). Em síntese, os estudos em olfatometria permitiram observar que o Si, associado ou não à herbivoria, atrai o parasitóide de pulgões do trigo, o *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae) (OLIVEIRA, 2012).

Em experimentos de avaliação da resistência constitutiva (de cultivares) de trigo, Silva et al. (2013) elucidam que BRS TIMBAÚVA não manifestou resistência por antibiose ao pulgão *S. avenae*, comparativamente à BRS 254, e não foi verificada a manifestação de

resistência por não-preferência nas espigas das cultivares testadas. Porém, Dias et al. (2014) relataram que a adubação com Si foi capaz de promover a manifestação da resistência por antibiose aos pulgões ápteros de *S. avenae* e, curiosamente, houve a redução de pulgões alados nas partes vegetativa e reprodutiva do trigo, ou seja, houve a indução de resistência por não-preferência às plantas adubadas com tal elemento.

Esses trabalhos mencionados anteriormente, com resultados divergentes, evidenciam a necessidade de uma investigação mais apurada da função do Si, ao promover a indução de resistência aos pulgões. Algumas dúvidas ainda permaneceram, como a influência da resistência constitutiva ou induzida por silício em cultivares de trigo conduzidas em campo, no que tange ao pulgão *S. avenae*; a influência do Si na produtividade do trigo; a estabilidade da indução de resistência mediada pelo Si; e a influência desse nutriente no estímulo à produção de compostos voláteis mediadores da comunicação química entre o trigo, os pulgões e os inimigos naturais.

Portanto, novos estudos em campo e em laboratório são primordiais para auxiliar na elucidação dos efeitos do Si na interação tritrófica composta por trigo, pulgões e inimigos naturais.

1.2 Objetivos

O presente trabalho possui os seguintes objetivos:

- a) Avaliar as resistências constitutiva e induzida pela adubação silicatada de cultivares de trigo, no que se refere ao pulgão *Sitobion avenae* e aos seus inimigos naturais; o efeito da estabilidade da resistência promovida pelo Si em diferentes épocas de cultivo do trigo; e o efeito da adubação silicatada na produtividade dessa gramínea.
- b) Avaliar a produção de voláteis induzidos pelo Si e pela herbivoria causada pelo pulgão *Rhopalosiphum padi*.

1.3 Referencial teórico

1.3.1 Produção da cultura do trigo, pulgões e parasitoides

Embora a região Sul do Brasil se destaque no cenário nacional da produção de trigo, outras localidades têm aumentado sua participação nesse setor de produção agrícola. As áreas agriculturáveis do Cerrado, por exemplo, apresentam grande potencial para o cultivo de tal gramínea devido às ótimas condições de clima e solo, à posição estratégica de mercado e à

facilidade de acesso às indústrias moageiras do grão. Outra vantagem da exploração dessa cultura no Cerrado é a colheita do trigo na entressafra da produção dos estados do Sul do Brasil e da Argentina (ALBRECHT et al., 2006).

Com vistas a atender às exigências da indústria moageira e oferecer aos produtores cultivares de alta produtividade e de melhor qualidade industrial do que as já utilizadas, a Embrapa Trigo e a Embrapa Cerrados lançaram, em 2004, a cultivar BRS 254 para áreas irrigadas por aspersão situadas nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Bahia e Distrito Federal. Ela tem proporcionado resultados muito satisfatórios para os triticultores do Cerrado.

Ao considerar os dados do levantamento de produção de trigo na região do Cerrado, no período de 2002 a 2007, a produtividade média em Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal atingiu aproximadamente $6,30 \text{ t ha}^{-1}$. Em algumas regiões, tal índice supera 8 t ha^{-1} , como em Unaí (Minas Gerais), onde se registraram $8,30 \text{ t ha}^{-1}$ em 2007 (ALBRECHT et al., 2008).

No Brasil, o trigo é a quarta cultura em produção (2,65% do total de grãos produzidos), ficando atrás apenas do arroz (5,34%), do milho (40,51%) e da soja (47,36%). A produção registrada na última safra foi de 5,54 milhões de toneladas, em uma área de 2,45 milhões de hectares. Enquanto isso, a produtividade tem sido bastante variável no território nacional, sendo observada uma produtividade média de 2.260 kg ha^{-1} (CONAB, 2016).

Em Minas Gerais, a produtividade foi maior que a média nacional, com 3.070 kg ha^{-1} . Embora seja uma cultura tradicionalmente cultivada no Sul do país, a cultura tem se expandido para as regiões Centro-Oeste e Sudeste. No território mineiro, a semeadura pode ocorrer em abril, maio e junho, consideradas épocas de entressafra da produção de trigo no Sul (CONAB, 2016).

Mesmo que o potencial produtivo do trigo no Cerrado seja promissor, os pulgões e parasitoides devem receber atenção especial quanto ao conhecimento de aspectos biológicos e comportamentais nesse novo ambiente agrícola onde o clima, o solo, as cultivares de trigo, entre outros fatores são diferentes daqueles existentes na região Sul do país.

Os pulgões são pragas economicamente importantes na cultura do trigo (REBONATTO et al., 2015). Além de transmissores de vírus (PARIZOTO et al., 2013), como o vírus do nanismo amarelo da cevada – *Barley yellow dwarf virus* – em trigo (SALVADORI; TONET, 2001), eles são capazes de reduzir a produtividade da cultura devido à sucção da seiva do floema da planta e ao efeito tóxico da saliva dos pulgões (SALVADORI; TONET, 2001; SAVARIS et al., 2013).

Sitobion avenae é a única espécie de pulgão que teve o segundo maior nível de infestação na cultura do trigo desde 1970, na região Sul. Nessa década, a espécie predominantemente encontrada nas armadilhas foi *Metopolophium dirhodum* (Walker, 1849) (Hemiptera: Aphididae) (96,8%), em que *S. avenae* apresentava 2,5% de incidência; enquanto isso, em 2000, houve predominância de *R. padi* (57,6%) e *S. avenae* (31,0%) (REBONATTO et al., 2015). Na cidade de Augusto Pestana, no Rio Grande do Sul, Machado e Santos (2013) registraram a ocorrência majoritária de *S. avenae* (87,00%) nos cultivos de trigo. Por ser uma espécie que ataca preferencialmente a fase reprodutiva dessa gramínea (VEREJKEN, 1979; ROZA-GOMES et al., 2008), *S. avenae* pode causar danos diretos à produção de grãos. Portanto, estratégias de controle dessa praga devem ser melhor estudadas.

As principais espécies de pulgões encontradas na cultura do trigo em Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná e Rio Grande do Sul são *M. dirhodum*, *S. graminum*, *S. avenae*, *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae) e *R. padi*. Esta última se destaca como uma importante praga que afeta o trigo da emergência ao afilhamento das plantas (SALVADORI; TONET, 2001), e a presença de 10 pulgões por afilho na fase do alongamento ao embrorrachamento do trigo caracteriza o nível de controle (SALVADORI; SALLLES, 2002).

No Paraná, *R. padi* tem sido o pulgão de maior frequência no campo, com até 53% de ocorrência; enquanto isso, outras espécies tradicionalmente encontradas no trigo, como *S. avenae*, *R. maidis* e *M. dirhodum*, apresentaram menor porcentagem de ocorrência: 19,50%, 19,50% e 8,00%, respectivamente (ALVES et al., 2005). O aumento da incidência de *R. padi* tem sido observado nas lavouras de trigo, e os principais fatores associados a esse aspecto são o conhecimento e a tecnologia restritos que se voltam ao controle da praga supracitada (ROZA-GOMES et al., 2008).

Com o aumento da porcentagem de ocorrência de *R. padi* nas lavouras, os danos ocasionados às plantas não têm sido bastante expressivos. Em Medianeira, no estado do Paraná, *R. padi* não chegou a atingir a densidade populacional de um pulgão por afilho. Esse fato se deve principalmente ao eficiente controle biológico realizado pelos parasitoides *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hymenoptera: Braconidae) e *Diaeretiella rapae* (M'Instosh, 1855) (Hymenoptera: Braconidae) (ALVES et al., 2005). No entanto, essa realidade era bastante diferente antes do desenvolvimento do Programa de Controle Biológico dos Pulgões do Trigo no Brasil.

Durante a década de 1970, os pulgões começaram a ameaçar seriamente a produção de trigo na região Sul, e a triticultura brasileira estava em franca expansão. De 1962 a 1976, a área ocupada com essa gramínea aumentou de 260 mil para 3,5 milhões de hectares, o que representou um crescimento superior a 1000%. Entretanto, a ocupação de novas áreas foi acompanhada pelo surgimento de problemas fitossanitários, especialmente os pulgões que, adaptados ao clima e diante de alimento em abundância, tiveram sua população aumentada de maneira considerável – muitos produtores fizeram até quatro aplicações de inseticidas na tentativa de controlar os pulgões. Diante de tal ameaça, a Embrapa Trigo, em conjunto com a Food and Agricultural Organization (FAO) e a Universidade da Califórnia, elaborou um projeto de controle biológico dos pulgões do trigo, mediante a importação dos inimigos naturais dessa praga em ascensão no Brasil (SALVADORI; SALLES, 2002).

No período compreendido entre 1978 e 1992, cerca de 20 milhões de parasitoides foram liberados no campo, pertencentes a 12 espécies de micro-himenópteros introduzidos no país para o controle dos pulgões. A contribuição do controle biológico idealizado pela Embrapa Trigo pode ser verificada quando se analisa a redução drástica na aplicação de inseticidas: em 1977, 99% das lavouras aplicaram inseticidas e, em 1981, menos de 5% das lavouras utilizaram o controle químico. Embora 12 espécies de parasitoides tenham sido introduzidos, as que apresentaram melhor adaptação foram *Aphidius rhopalosiphi* (DeStefani-Perez, 1902) (Hymenoptera: Braconidae), *Aphidius usbekistanicus* (Luzhetzki, 1960) (Hymenoptera: Braconidae) e *Praon volucre* (Haliday, 1833) (Hymenoptera: Braconidae) (SALVADORI; SALLES, 2002).

Outra espécie que tem se destacado no controle biológico dos pulgões do trigo é *L. testaceipes*. Em levantamento realizado no oeste do Paraná, Zanini et al. (2006) verificaram que 100% dos parasitoides encontrados em pulgões do trigo pertenciam à espécie *L. testaceipes* (ZANINI et al., 2006). Ela já era encontrada no Brasil antes do programa de controle biológico de pulgões do trigo, embora tenham sido introduzidos indivíduos dessa espécie oriundos do Chile.

Nesse contexto, tal parasitoide tem acompanhado a dispersão dos pulgões em direção às novas áreas de produção de trigo na região Sudeste, como São Paulo e Minas Gerais. Nesses dois estados, ele parasitou diversas espécies de pulgões, inclusive *R. padi* (STARÝ; SAMPAIO; BUENO, 2007).

A resistência de plantas induzida por Si é uma alternativa ao controle de pragas. A ativação do sistema de defesa vegetal por meio da herbivoria e do referido elemento pode

desencadear a produção de compostos secundários que prejudicam a biologia do inseto. No entanto, ainda não se sabe como o Si altera a produção de voláteis de plantas. Esse conhecimento é necessário porque a comunicação entre vegetais e insetos depende da quantidade e composição dos voláteis que são liberados pelas plantas, ou seja, os pulgões e inimigos naturais podem ser atraídos ou não até o vegetal, dependendo do padrão de emissão dos voláteis.

1.3.2 Silício como fator abiótico na proteção de plantas contra herbívoros

O silício é absorvido pelas plantas como ácido monosilícico, H_4SiO_4 (JONES; HANDRECK, 1967). Entretanto, os solos tropicais são, em geral, altamente intemperizados, podendo apresentar teores menores que 2 mg dm^{-3} de Si. Nesses solos, os minerais primários contendo tal elemento praticamente já não são mais encontrados (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995).

Existem diversos trabalhos que evidenciam a importância do Si na redução dos danos ocasionados por doenças como o bruzone (*Pyricularia grisea* (Cooke) Sacc) e a mancha-parda (*Bipolaris oryzae* (Breda de Haan) Shoemaker) na cultura do arroz (DATNOFF et al., 1991; OSUNA-CANIZALES et al., 1991).

Ademais, o silício tem sido relatado como um indutor de resistência aos herbívoros, incluindo brocas como *Eldana saccharina* (Walker, 1865) (Lepidoptera: Pyralidae) em cana-de-açúcar (KEEPING et al., 2009); desfolhadores como a lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae)) em milho (GOUSSAIN et al., 2002); e insetos sugadores como a cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva fimbriolata* (Stål, 1854) (Hemiptera: Cercopidae) em cana-de-açúcar (KORNDÖRFER et al., 2011), o pulgão-verde (*S. graminum*) em trigo (BASAGLI et al., 2003; MORAES et al., 2004; GOMES et al., 2005; GOUSSAIN et al., 2005), o pulgão-da-folha (*R. maidis*) em milho (GOUSSAIN et al., 2001) e o pulgão-da-espiga *S. avenae* (DIAS et al., 2014).

Percebe-se que o Si é primordial para o desenvolvimento de gramíneas como o trigo (EPSTEIN, 2009). Alguns trabalhos já foram conduzidos no sentido de esclarecer o tipo de resistência manifestada pelas plantas adubadas com esse elemento. A resistência por antibiose tem sido recorrente nos trabalhos conduzidos com gramíneas (GOUSSAIN et al., 2002, 2005; GOMES et al., 2005; KORNDÖRFER et al., 2011, DIAS et al., 2014) e é caracterizada pelas alterações na biologia do herbívoro após a alimentação em plantas adubadas com Si. A taxa

de fecundidade geralmente diminui, e a de mortalidade aumenta quando os insetos utilizam um vegetal hospedeiro fertilizado com Si.

O aumento da resistência aos herbívoros pode ser causado pela redução da digestibilidade e/ou elevação da dureza dos tecidos das plantas, em virtude da deposição de sílica amorfa nas células da epiderme. Outros estudos têm demonstrado também que o Si está envolvido na defesa química induzida por meio do acréscimo na produção de enzimas de defesa ou da possível melhoria na liberação de voláteis responsáveis pela atração de inimigos naturais, melhorando assim o controle biológico dos herbívoros (GOMES et al., 2005; REYNOLDS et al., 2009; OLIVEIRA, 2012).

Nesse sentido, a influência do Si sobre a herbivoria do pulgão-verde *S. graminum* na cultura do trigo tem demonstrado que esse inseto, em testes de preferência com chance de escolha em laboratório, não apresentou prioridade pelas plantas que receberam aplicação de Si via foliar ou solo. Esse resultado pode estar associado à deposição de sílica na parede celular, o que teria dificultado a penetração do estilete no tecido do vegetal, cujo grau de resistência foi aumentado em função da aplicação de Si (MORAES et al., 2004). Ainda para o mesmo pulgão, Basagli et al. (2003) observaram a não-preferência das ninfas por plantas que receberam silicato de sódio, além de baixos índices de fecundidade e longevidade de *S. graminum*.

O efeito do silício e da infestação prévia com pulgões na indução da resistência a *S. graminum* em plantas de trigo foi pesquisado por Gomes et al. (2005). Em testes de não-preferência, notou-se uma redução no número de pulgões em 48 e 72 horas nos vegetais que foram fertilizados com Si, e o tratamento cujas plantas foram adubadas com esse elemento e pré-infestadas com pulgões foi menos preferido pelos pulgões na avaliação de 72 horas.

A taxa intrínseca de aumento populacional de *S. graminum* ($rm=0,37$) foi maior nas plantas que não foram pré-infestadas com pulgões e não adubadas com silicato de cálcio (controle). No entanto, a menor taxa intrínseca de aumento populacional ($rm=0,14$) foi encontrada para os pulgões criados em vegetais que receberam conjuntamente adubação silicatada e pré-infestação com tais insetos. Encontraram-se valores intermediários para as plantas que foram pré-infestadas ou que apenas receberam aplicação de silicato de cálcio ($rm = 0,23$ e $rm = 0,25$, respectivamente).

Dias et al. (2014) constataram que outra espécie de pulgão, *S. avenae*, manifestou não-preferência por plantas de trigo adubadas com Si, independentemente da fase fenológica do

trigo (vegetativa ou reprodutiva). Além disso, houve a resistência por antibiose, induzida pelo Si, ao pulgão-da-espiga a partir de plantas que receberam adubação silicatada.

Nesse contexto, a atividade de enzimas envolvidas na resistência de vegetais à herbivoria também foi avaliada por Gomes et al. (2005), com maior atividade das enzimas nas plantas que receberam a combinação da adubação com a fonte de Si e pré-infestação com pulgões. No entanto, apenas a adubação com esse elemento foi suficiente para estimular a atividade das enzimas relacionadas à defesa das plantas aos herbívoros, a saber: a peroxidase, a polifenoloxidase e fenilalanina amonialiase.

Na resposta de defesa das plantas contra a herbivoria, os elicidores estimulam a atividade de enzimas de defesa (DIXON et al., 1994). O nutriente Si tem sido considerado um importante elicitador dessas enzimas ao induzir a resistência dos vegetais contra o ataque de insetos. Além da adubação silicatada, a infestação prévia das plantas com pulgões ativa o sistema de defesa delas. O Si, sozinho ou com a pré-infestação, afeta negativamente a preferência de *S. graminum* e sua taxa intrínseca de aumento populacional, bem como desencadeia um aumento significativo das enzimas peroxidase, polifenoloxidase e fenilalanina amonialiase (GOMES et al., 2005).

A enzima peroxidase está relacionada à síntese de lignina e suberina, substâncias que contribuem com o aumento da dureza dos tecidos (GOODMAN et al., 1986; BOWLES, 1990; STOUT et al., 1994). Enquanto isso, a polifenoloxidase participa dos processos de lignificação e atua na catálise oxidativa de fenóis a quinonas, as quais se tornam conjugadas às proteínas; assim, a qualidade nutricional do alimento para os herbívoros é reduzida e a digestão das proteínas, dificultada (FELTON; DUFFEY, 1990; FELTON et al., 1994; MOHAMMADI; KAZEMI, 2002). E a fenilalanina amonialiase está relacionada à síntese de compostos fenólicos que apresentam propriedades deterrentes, tóxicas e que reduzem a qualidade nutricional da planta ao herbívoro (APPEL, 1993).

Verifica-se que a resistência induzida por Si tem reduzido a herbivoria em diversas culturas, porém existem poucos trabalhos sobre o efeito de tal elemento no comportamento e na biologia dos inimigos naturais. Estudos para avaliar a influência de Si na interação tritrófica composta por trigo, pulgão *S. graminum* e seus importantes inimigos naturais *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) e *Aphidius colemani* (Viereck, 1912) (Hymenoptera: Aphidiidae) foram conduzidos por Moraes et al. (2004). Apesar de o Si ter aumentado o grau de resistência da planta ao pulgão-verde, não se observaram alterações nas características biológicas tanto do predador quanto do parasitoide. Nesse trabalho, o

predador foi alimentado durante toda a fase imatura com pulgões que haviam permanecido 30 dias em vegetais com (e sem) silicato de sódio (via solo ou via foliar). Os pesquisadores verificaram que a duração do estádio larval e pupal do predador, além da razão sexual, não foi afetada, apesar de esse inimigo natural ter se alimentado de pulgões que se desenvolveram em plantas adubadas com silicato de sódio. O parasitoide *A. colemani* não foi afetado quando se alimentou de pulgões criados em vegetais adubados com silicato de cálcio, apresentando período de desenvolvimento médio de 12,20 dias, longevidade média de 19,80 dias e razão sexual de 0,45, além da taxa média de parasitismo de 33,50%. Com esses resultados, demonstrou-se que a resistência induzida por Si em trigo, mediante o mecanismo de não-preferência, auxilia no controle de *S. graminum* sem afetar os inimigos naturais *C. externa* e *A. colemani*.

Embora Moraes et al. (2004) tenham constatado nenhuma alteração na biologia dos inimigos naturais avaliados, ainda existiam algumas dúvidas quanto ao comportamento dos inimigos naturais dos herbívoros que se alimentavam de plantas cuja resistência às pragas era induzida por Si. Por conseguinte, Kvedaras et al. (2010) realizaram ensaios para averiguar o comportamento do predador generalista *Dicranolaius bellulus* (Boisduval, 1835) (Coleoptera: Melyridae) em vegetais adubados com silicato de potássio. Em ensaio laboratorial, esses pesquisadores utilizaram um olfatômetro para avaliar a atratividade do predador por plantas de pepino adubadas (ou não) com silicato de potássio e infestadas (ou não) com larvas de *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) (Lepidoptera: Noctuidae). Os resultados do teste mostraram que as plantas adubadas com silicato de potássio e infestadas com o inseto-praga foram mais atrativas ao predador e, dos 36 predadores testados no olfatômetro, 24 escolheram essas plantas e apenas 12 optaram por aquelas infestadas com a praga, porém sem adubação silicatada. Nesse trabalho observou-se também que não houve diferença significativa na atração do predador por vegetais que não foram infestados com a *H. armigera*, sendo eles adubados (ou não) com silicato de potássio. Dessa forma, fica evidente a relevância da herbivoria para induzir o sistema de defesa da planta na geração de voláteis importantes na atração do predador, influenciando sobremaneira no comportamento de busca do inimigo natural.

Em ensaios conduzidos em campo, Kvedaras et al. (2010) infestaram plantas de pepino (tratadas e não tratadas com silicato de potássio) com 10 larvas de *H. armigera* – cada vegetal foi coberto com um saco plástico para evitar a saída das lagartas. As plantas foram mantidas no período da noite no laboratório e, durante o dia, foram levadas ao campo, onde se

encontrava grande número de artrópodes predadores, especialmente *D. bellulus*. Nesse local, os sacos plásticos foram removidos e, sobre a terceira folha totalmente expandida de cada planta, colocaram-se 30 ovos de *H. armigera*. Após 24 horas, os pesquisadores notaram que a proporção de ovos predados foi maior nos vegetais adubados com silicato de potássio e infestados com *H. armigera* (aproximadamente 1/3 dos ovos foram predados). As plantas que foram infestadas, mas não adubadas com silicato de potássio, ou que não foram infestadas (independentemente da adubação silicatada), não apresentaram uma predação de ovos consideravelmente relevante. Tanto o ensaio laboratorial quanto o ensaio de campo mostraram que a adubação silicatada melhora a atração de *D. bellulus*, favorecendo o controle da *H. armigera*. Sendo assim, para esse sistema tritrófico, há efeito positivo na interação da resistência induzida por Si e o controle biológico.

Com a ampliação do uso de Si na agricultura, muitos estudos são conduzidos para elucidar a função desse nutriente nas interações planta-herbívoro. Todavia, a influência do Si em sistemas tritróficos tem sido pouco abordada. De fato, é quase inexistente o conhecimento acerca da influência do referido elemento sobre os semioquímicos mediadores de uma interação tritrófica, principalmente aqueles relacionados à atração de inimigos naturais.

Os trabalhos desenvolvidos para notar a influência do silício na interação tritrófica em agroecossistemas são escassos (MORAES et al., 2004; KVEDARAS et al., 2010). Na cultura do trigo, Oliveira et al. (2012) verificaram que o Si ocasionou a atração dos parasitoides às plantas de trigo, no entanto, ainda não se conhece a influência desse elemento na produção de voláteis de vegetais responsáveis por mediar a comunicação química entre plantas e insetos.

1.3.3 Influência de fatores abióticos na produção de voláteis pelas plantas

O adequado desenvolvimento vegetal depende do equilíbrio dos fatores abióticos que atuam durante o ciclo de vida das plantas. A intensidade luminosa, a umidade do solo, a umidade do ar, a temperatura e a nutrição dos vegetais atuam sobre eles e podem estimular ou reduzir a produção de voláteis, dependendo da intensidade de cada fator abiótico (HARE, 2011).

Sabe-se que a liberação de voláteis pela planta é estimulada pela herbivoria, e a indução da produção desses voláteis atrativos aos inimigos naturais varia conforme as espécies e os genótipos de vegetais. No entanto, a influência de fatores abióticos na produção de voláteis tem sido pouco explorada. De acordo com Gouinguéné e Turlings (2002), tais fatores afetam a produção dos voláteis, em que a adubação foi o único fator avaliado que

alterou a produção dos voláteis emitidos por plantas não submetidas à herbivoria – os demais aspectos observados influenciaram na produção de voláteis daquelas submetidas à herbivoria.

Esses autores observaram que as plantas em solo seco liberaram maior quantidade de voláteis, em comparação às de solo úmido. A melhor umidade do ar para uma ótima liberação de voláteis foi observada a 60%, e temperaturas entre 22 e 27 °C possibilitaram liberação mais elevada de tais compostos, em relação às altas e baixas temperaturas. A intensidade luminosa apresentou grande influência na emissão de voláteis e, na fase de escuro, as plantas não os emitiram; porém, com o aumento da intensidade luminosa, os vegetais também aumentaram a emissão dos voláteis (os testes desenvolvidos mostraram que a liberação de voláteis foi fotofase-dependente). Por sua vez, a adubação teve forte influência sobre esse tipo de emissão, sendo observada uma baixa produção nos vegetais que se desenvolveram em condições de baixa nutrição. As plantas de milho que receberam uma adubação completa (ou metade desta) obtiveram maior liberação de voláteis. Todos os fatores abióticos avaliados, com exceção da umidade do ar, também interferiram na produção qualitativa dos voláteis.

O nitrogênio é um nutriente essencial para o desenvolvimento dos vegetais. Sua influência nas interações tritróficas tem sido investigada principalmente nas relações planta-herbívoro e, em menor intensidade, nas relações planta-inimigo natural mediadas pelos voláteis (CHEN et al., 2010).

Schmelz et al. (2003) relataram a influência do nitrogênio na liberação de voláteis de milho cujas plantas foram danificadas mecanicamente e elicitadas pela volicitina, uma substância encontrada na secreção oral de *Spodoptera exigua* (Hübner, 1808) (Lepidoptera: Noctuidae). Os vegetais que receberam doses baixas de nitrogênio aumentaram a produção dos compostos orgânicos voláteis; isso elevou a produção dos sesquiterpenos ((E)- α -bergamotene, β -caryophyllene e (E)- β -farnesene) e reduziu a quantidade de ácido jasmônico.

A análise dos voláteis liberados pelas plantas de algodão submetidas à herbivoria por *S. exigua* e à adubação nitrogenada em três diferentes níveis revelaram que, em baixas e altas doses de nitrogênio, a quantidade de voláteis produzidos reduziu significativamente. Apenas os vegetais que receberam uma quantidade adequada de nitrogênio conseguiram produzir voláteis atrativos ao parasitoide *Microplitis croceipes* (Cresson, 1872) (Hymenoptera: Braconidae). De maneira semelhante, os parasitoides preferiram os voláteis liberados pelas plantas atacadas por *S. exigua* que receberam adequada quantidade de água para o seu desenvolvimento, em comparação com os voláteis liberados dquelas que foram submetidas ao estresse hídrico e à herbivoria (OLSON et al., 2009). Tais resultados sugerem que, em

condições de deficiência nutricional e de estresse hídrico, a eficiência do controle biológico na cultura do algodão pode ser afetada significativamente devido à interferência desses fatores abióticos na defesa indireta das plantas contra os herbívoros.

Embora as pesquisas sobre a influência de fatores abióticos na capacidade de defesa indireta das plantas sejam limitadas, nota-se uma significativa influência de tais fatores sobre a atração de inimigos naturais.

1.3.4 Influência de fatores bióticos na produção de voláteis pelas plantas

Cerca de 10% de todo o carbono fixado fotossinteticamente é emitido na atmosfera na forma de voláteis (PENUELAS; LLUSIA, 2004). Esses compostos orgânicos possuem diversas funções, como a atração de polinizadores (RAGUSO, 2008), a dispersão de sementes (BOLEN; GREEN, 1997; LUFT et al., 2003), a defesa de plantas contra herbívoros da parte aérea e do sistema radicular (DEGENHARDT et al., 2009; UNSICKER et al., 2009; KAPPERS et al., 2011; HILTPOLD; TURLINGS, 2012), a proteção contra patógenos (HUANG et al., 2012; KEELING; BOHLMANN, 2006) e a comunicação entre vegetais (BALDWIN et al., 2006; HEIL; BUENO, 2007).

Os compostos voláteis podem ser divididos em diversas classes, incluindo os terpenoides (monoterpenos e sesquiterpenos), os fenilpropanoides/benzenoides, os derivados de ácidos graxos e os derivados de aminoácidos (DUDAREVA et al., 2006; KNUDSEN et al., 2006; DUDAREVA et al., 2013). Apesar da ampla diversidade de compostos voláteis, de uma forma geral, esses compostos são lipofílicos e de baixo peso molecular, com alta pressão de vapor em temperatura ambiente (WIDHALM et al., 2015).

Nesse entremeio, os compostos voláteis podem auxiliar os herbívoros na escolha dos respectivos hospedeiros preferenciais. Entretanto, os organismos do terceiro nível trófico, parasitoides e predadores, também utilizam os voláteis de plantas para a localização de seus hospedeiros e presas (TURLINGS; WACKERS, 2004; MUMM; DICKE, 2010; KESSLER; HEIL, 2011). Os *blends* de voláteis emitidos pelas plantas variam quanto à composição química e quanto à quantidade. Devido a isso, os inimigos naturais conseguem informações detalhadas como a espécie, a idade e a abundância do hospedeiro ou da presa presente no vegetal (WIDHALM et al., 2015).

Sob esse viés, o processo de herbivoria é considerado um importante fator biótico de indução da produção de voláteis emitidos em grande quantidade pelo vegetal. São conhecidos aproximadamente 1.700 voláteis (KNUDSEN et al., 2006), mas apenas uma pequena fração é

emitida pelas plantas atacadas por herbívoros (WIDHALM et al., 2015), podendo ser agrupados em quatro categorias (DUDAREVA, 2004; MAFFEI et al., 2011):

- Terpenos (ou terpenoides): compreendem compostos como isopreno (cinco carbonos), monoterpeno (10 carbonos) e sesquiterpeno (15 carbonos). Existem terpenos que apresentam estrutura irregular como o (*E*)-4,8-dimethyl-1,3,7-nonatriene (DMNT), com 11 carbonos, e o methyl-1,3,7,11-tridecatetraene (TMTT), com 16 carbonos. Entre os monoterpenos normalmente liberados pelas plantas sob herbivoria, são citados o (*E*)- β -ocimene e o linalool; e, entre os sesquiterpenos, há o (*E*)- β -caryophyllene e o (*E,E*)- α -farnesene.
- Derivados de ácidos graxos: após a herbivoria, a ação das enzimas lipoxigenase e hidroperoxidoliase resulta na produção de compostos com seis carbonos, como o (*E*)-2-hexenal, o (*Z*)-3-hexenal, o (*Z*)-3-hexen-1-ol e o (*Z*)-3-hexenyl acetato, os quais são também conhecidos como GLVs (voláteis de folhas verdes), responsáveis pelo odor emitido pelas folhas verdes.
- Compostos aromáticos: são gerados a partir do metabolismo da fenilalanina e do triptofano. Entre os compostos produzidos, citam-se o methyl salicylate e o indole.
- Derivados de aminoácidos: são as aminas, oximas, nitrilas, isotiocianatos e sulfetos.

Os compostos orgânicos acima mencionados podem compor um *blend* de voláteis emitidos pelas plantas atacadas pelos herbívoros. No processo de busca hospedeira, os inimigos naturais, especialmente os parasitoides, possuem a habilidade de reconhecer as proporções específicas de cada volátil presente nesse *blend* e, consequentemente, conseguem identificar o hospedeiro causador da herbivoria. Em testes realizados em eletroantenografia (EAD) ou em cromatografia gasosa acoplada à eletroantenografia (GC_EAD), a maior parte dos inimigos naturais respondeu aos voláteis linalool, DMNT, (*E,E*)- α - farnesene, (*E*)-2-hexenal, (*Z*)-3-hexen-1-ol e (*Z*)-3-hexenyl acetato, mas quando estavam presentes em proporções específicas (SMID et al. 2002; GOUINGUENÉ et al., 2005; VERHEGGEN et al., 2008; NGUMBI et al., 2009; HEGDE, et al., 2011).

Portanto, a habilidade para discriminar os diferentes odores de *blends* de voláteis não se provavelmente à presença ou ausência de determinado composto, mas sim às diferenças nas proporções relativas de cada constituinte. Os parasitoides, por exemplo, possuem variadas sensibilidades aos voláteis e, não necessariamente, respondem com maior intensidade ao composto mais abundante. Em geral, os parasitoides generalistas apresentam forte resposta aos voláteis emitidos imediatamente após o dano, como os GLVs. Em contrapartida, os

parasitoides especialistas respondem com maior intensidade aos voláteis emitidos diversas horas após o dano (SMID et al. 2002; NGUMBI et al., 2009; NGUMBI, et al., 2010).

Cumpre citar que o nível de especialização dos parasitoides é tão grande que eles se tornam capazes de discriminar entre um hospedeiro e um não-hospedeiro atacando uma mesma planta. Isso foi observado no parasitoide *A. ervi*, que reconhece seu hospedeiro *Acyrthosiphon pisum* (Harris, 1776) (Hemiptera: Aphididae) em detrimento do não-hospedeiro *Aphis fabae* (Scopoli, 1763) (Hemiptera: Aphididae) em *Vicia faba* (Linnaeus, 1753) (BLANDE et al., 2007).

Os compostos voláteis responsáveis pela atração dos parasitoides têm sido comumente investigados. As brassicáceas, por exemplo, ao serem atacadas pelos afideos, liberam compostos da classe dos isotiocianatos que são percebidos pelos receptores de odor específicos, provocando a atração do parasitoide *D. rapae*. Curiosamente, esses mesmos receptores também estão presentes na antena de outros parasitoides, sugerindo que eles são utilizados por outros parasitoides para evitar as plantas atacadas por não-hospedeiros (BLANDE et al., 2007; POPE et al., 2008).

Ademais, os voláteis responsáveis pela repelência dos parasitoides têm recebido pouca atenção, mas deveriam ser investigados devido ao potencial de redução da eficiência do controle biológico. O isopreno, por exemplo, é um composto repelente ao parasitoide *Diadegma semiclausum* (Hellen, 1949) (Hymenoptera: Ichneumonidae) (LOIVAMAKI et al., 2008).

Um *blend* ou um volátil pode atuar como atraente ou repelente aos parasitoides e pulgões. As informações geradas a partir do conhecimento dos voláteis de plantas proporcionam a criação de plantas geneticamente modificadas para a expressão de determinado volátil de interesse agrícola, como o β -farnesene, que atua como um feromônio de alarme e impede a colonização do trigo pelos pulgões (BRUCE et al., 2015).

Outra aplicabilidade das pesquisas com voláteis está relacionada à seleção de cultivares de grandes culturas agrícolas que possuem a capacidade de repelir ou atrair os herbívoros. Os voláteis das variedades atraentes podem ser utilizados na bordadura dos campos de produção agrícola, e os repelentes, na parte central dos campos das lavouras, estabelecendo-se um sistema “push-pull”. Essa técnica foi investigada por Schröder et al. (2015) no milho e no trigo, em que o volátil (Z)-3-hexenyl acetate foi atraente ao afideo *R. padi*, e os voláteis α -farnesene, (E)-2-hexenal, indole, e (3E,7E)-4,8,12-trimethyltrideca-1,3,7,11-tetraene (TMTT) foram repelentes.

1.4 Referências

- ALBRECHT, J. C.; SILVA, M. S.; ANDRADE, J. M. V.; SOARES SOBRINHO, J.; SOUSA, C. N. A.; BRAZ, A. J. B. P.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; SOUZA, M. A.; FRONZA, V.; YAMANAKA, C. H. **Trigo BRS 264**: cultivar precoce com alto rendimento de grãos indicada para o Cerrado do Brasil Central. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2006. 18p.
- ALBRECHT, J. C.; SILVA, M. S.; SCHEEREN, P. L.; ANDRADE, J. M. V.; TRINDADE, M. G.; SOARES SOBRINHO, J.; SOUSA, C. N. A.; BRAZ, A. J. P. B.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; SOUZA, M. A. S.; FRONZA, V.; YAMANAKA, C. H. **BRS 254 – Trigo melhorador**: cultivar com alta qualidade industrial para a região do Cerrado. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. 52 p. (Embrapa Cerrados – Documentos, 228).
- ALVES, L. F. A.; PRESTES, T. M. V.; ZANINI, A.; DALMOLIN, M. F.; MENEZES JÚNIOR, A. O. Controle biológico natural de pulgões (Hemiptera: Aphididae) em lavouras de trigo por parasitoides (Hymenoptera, Aphidiinae), no município de Medianeira, PR, Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 6, n. 2, p. 155-160, 2005.
- ALVARENGA, C. B.; SOARES SOBRINHO, J.; SANTOS, E. M. Comportamento de cultivares de trigo em diferentes densidades de semeadura sob irrigação indicadas para a região do Brasil Central. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 25, n. 5, p. 98-107, 2009.
- APPEL, H. M. Phenolics in ecological interactions: the importance of oxidation. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 19, p. 1521-1552, 1993.
- BASAGLI, M. A. B.; MORAES, J. C.; CARVALHO, G. A.; ECOLE, C. C.; GONÇALVES-GERVÁSIO, R. Effects of sodium silicate application on the resistance of wheat plants to the green-aphid *Schizaphis gramineum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 32, p. 659-663, 2003.
- BALDWIN, I. T.; HALITSCHKE, R.; PASCHOLD, A.; VON DAHL, C. C.; PRESTON, C. A. Volatile signaling in plant-plant interactions: “talking trees” in the genomics era. **Science**, Washington, v. 311, p. 812-815, 2006.
- BLANDE, J. D.; PICKETT, J. A.; POPPY, G. M. A comparison of semiochemically mediated interactions involving specialist and generalist Brassica-feeding aphids and the braconid parasitoid *Diaeretiella rapae*. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 33, p. 767-779, 2007.
- BOLEN, R. H.; GREEN, S. M. Use of olfactory cues in foraging by owl monkeys (*Aotus nancymai*) and capuchin monkeys (*Cebus apella*). **Journal of Comparative Psychology**, Washington, v. 111, p. 152-158, 1997.
- BOWLES, D. J. Defense-related proteins in higher plants. **Annual Review of Biochemistry**, Palo Alto, v. 59, p. 873-907, 1990.
- BRUCE, T. J. A.; ARADOTTIR, G. I.; SMART, L. E.; MARTIN, J. L.; CAUFIELD, J. C.; DOHERTY, A.; SAPARKS, C. A.; WOODCOCK, C. M.; BIRKETT, M. A.; NAPIER, J. A.;

- JONES, H. D.; PICKETT, J. A. The first crop plant genetically engineered to release and insect pheromone for defence. **Scientific Reports**, London, v. 5, n. 11183, p. 1-9, 2015.
- CEZARE, D. G.; SCHONS, J.; LAU, D. Análise da resistência/tolerância da cultivar de trigo BRS Timbaúva ao *Barley yellow dwarf virus* – PAV. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 249-255, 2011.
- CHEN, Y.; OLSON, D. M.; RUBERSON, J. R. Effects of nitrogen fertilization on tritrophic interactions. **Arthropod-Plant Interactions**, Finland, v. 4, p. 81-94, 2010.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: décimo levantamento. Brasília, DF: Conab, 2016 (Safra 2015/16, v. 10).
- DATNOFF, L. E.; RAID, R. N.; SNYDER, G. H.; JONES, D. B. Effect of calcium silicate on bruzone and mancha parda intensities and yields of rice. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 75, p. 729-732, 1991.
- DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.
- DEGENHARDT, J.; HILTPOLD, I.; KÖLLNER, T. G.; FREY, M.; GIERL, A.; GERSHENZON, J.; HIBBARD, B. E.; ELLERSIECK, M. R.; TURLINGS, T. C. J. Restoring a maize root signal that attracts insect-killing nematodes to control a major pest. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 106, p. 13213-13218, 2009.
- 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 alate and apterous morphs of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae). **Environmental Entomology**, Oxford, v. 43, n. 4, p. 949-956, 2014.
- DIXON, R. A.; HARRISON, M. J.; LAMB, C. J. Early events in the activation of plant defense responses. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 32, p. 479-501, 1994.
- DUDAREVA, N. Biochemistry of plant volatiles. **Plant Physiology**, Washington, v. 135, p. 1893-1902, 2004.
- DUDAREVA, N.; KLEMPIEN, A.; MUHLEMANN, J. K.; KAPLAN, I. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. **New Phytologist**, Cambridge, v. 198, p. 16-32, 2013.
- DUDAREVA, N.; NEGRE, F.; NAGEGOWDA, D. N.; ORLOVA, I. Plant volatiles: recent advances and future perspectives. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Apopka, v. 25, p. 417-440, 2006.
- EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of Applied Biology**, Warwick, v. 155, p. 155-160, 2009.
- FELTON, G. W.; DUFFEY, S. S. Inactivation of baculovirus by quinones formed in insect-damaged plant tissues. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 16, p. 1221-1236, 1990.

FELTON, G. W.; SUMMERS, C. B.; MUELLER, A. J. Oxidative responses in soybean foliage to herbivory by bean leaf beetle and three-cornered alfalfa hopper. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 20, p. 639-650, 1994.

GASSEN, D. N. **Controle biológico de pulgões de trigo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999. 36 p. (Circular Técnica).

GOMES, F. B.; MORAES, J. C.; SANTOS, C. D.; GOUSSAIN, M. M. Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 6, p. 547-551, 2005.

GOODMAN, R. N.; KIRALY, Z.; WOOD, K. R. Secondary metabolite. In: GOODMAN, R. N. **The biochemistry and physiology of plant disease**. Missouri: University of Missouri, 1986, p. 211-224.

GOUINGUENÉ, S. P.; TURLINGS, T. C. J. The effects of abiotic factors on induced volatile emissions in corn plants. **Plant Physiology**, Washington, v. 129, p. 1296-1307, 2002.

GOUINGUENÉ, S. P.; PICKETT, J. A.; WADHAMS, L. J.; BIRKETT, M. A.; TURLINGS, T. C. Antennal electrophysiological responses of three parasitic wasps to caterpillar-induced volatiles from maize (*Zea mays mays*), cotton (*Gossypium herbaceum*), and cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 31, p. 1023-1038, 2005.

GOUSSAIN, M. M. **Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) e do pulgão-da-folha *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae)**. 2001. 63 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

GOUSSAIN, M. M.; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G.; NOGUEIRA, N. L.; ROSSI, M. L. Effect of silicon application on corn plants upon the biological development of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 305-310, 2002.

GOUSSAIN, M. M.; PRADO, E.; MORAES, J. C. Effect of silicon applied to wheat plants on the biology and probing behavior of the greenbug *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 807-813, 2005.

HARE, J. D. Ecological role of volatiles produced by plants in response to damage by herbivorous insects. **Annual Review of Entomology**, Stanford, v. 56, p. 161-180, 2011.

HEGDE, M.; OLIVEIRA, J. N.; COSTA, J. G. da; BLEICHER, E.; SANTANA, A. E., BRUCE, T. J.; CAULFIELD, J.; DEWHIRST, S. Y.; WOODCOCK, C. M.; PICKETT, J. A.; BIRKETT, M. A. Identification of semiochemicals released by cotton, *Gossypium hirsutum*, upon infestation by the cotton aphid, *Aphis gossypii*. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 37, p. 741-750, 2011.

HEIL, M.; BUENO, J. C. S. Within-plant signaling by volatiles leads to induction and priming of an indirect plant defense in nature. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 104, p. 5467-5472, 2007.

HILTPOLD, I.; TURLINGS, T. Manipulation of chemically mediated interactions in agricultural soils to enhance the control of crop pests and to improve crop yield. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 38, p. 641-650, 2012.

HUANG, M.; SANCHEZ-MOREIRAS, A. M.; ABEL, C.; SOHRABI, R.; LEE, S.; GERSHENZON, J.; THOLL, D. The major volatile organic compound emitted from *Arabidopsis thaliana* flowers, the sesquiterpene (*E*)- β -caryophyllene, is a defense against a bacterial pathogen. **New Phytologist**, Cambridge, v. 193, p. 997-1008, 2012.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants and animals. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 19, p. 107-149, 1967.

KAPPERS, I. F.; HOOGERBRUGGE, H.; BOUWMEESTER, H. J.; DICKE, M. Variation in herbivory-induced volatiles among cucumber (*Cucumis sativus* L.) varieties has consequences for the attraction of carnivorous natural enemies. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 37, p. 150-160, 2011.

KEELING, C.; BOHLMANN, J. Genes, enzymes and chemicals of terpenoid diversity in the constitutive and induced defense of conifers against insects and pathogens. **New Phytologist**, Cambridge, v. 170, p. 657-675, 2006.

KEEPING, M. G.; KVEDARAS, O. L.; BRUTON, A. G. Epidermal silicon on sugarcane: cultivar differences and role in resistance to sugarcane borer *Eldana saccharina*. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 60, p. 54-60, 2010.

KESSLER, A.; HEIL, M. The multiple faces of indirect defences and their agents of natural selection. **Functional Ecology**, Oxford, v. 25, p. 348-357, 2011.

KNUDSEN, J. T.; ERIKSSON, R.; GERSHENZON, J.; STAHL, B. Diversity and distribution of floral scent. **The Botanical Review**, New York, v. 72, p. 1-120, 2006.

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, v. 40, n. 3, p. 387-392, 2011.

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 70, p. 1-5, 1995.

KVEDARAS, O. L.; AN, M.; CHOI, I. S.; GURR, G. M. Silicon enhances natural enemy attraction and biological control through induced plant defences. **Bulletin of Entomological Research**, Farnham, v. 100, n. 3, p. 367-371, 2010.

LOIVAMAKI, M.; MUMM, R.; DICKE, M.; SCHNITZLER, J-P. Isoprene interferes with the attraction of bodyguards by herbaceous plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 105, p. 17430-17435, 2008.

LUFT, S.; CURIO, E.; TACUD, B. The use of olfaction in the foraging behaviour of the golden-mantled flying fox, *Pteropus pumilus*, and the greater musky fruit bat, *Ptenochirus jagori* (Megachiroptera: Pteropodidae). **Naturwissenschaften**, Leipzig, v. 90, p. 84-87, 2003.

MACHADO, C. C. L.; SANTOS, R. S. S. Pulgões do trigo e ação de parasitoides em Augusto Pestana, noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Pelotas, v. 8, n. 1, p. 179-186, 2013.

MAFFEI, M. E.; GERTSCH, J.; APPENDINO, G. Plant volatiles: production, function and pharmacology. **Natural Products Reports**, San Diego, v. 28, p. 1359-1380, 2011.

MENDES, L. S.; SOUZA, C. H. E.; MACHADO, V. J. Adubação com silício: influência sobre o solo, planta, pragas e patógenos. **Cerrado Agrociências**, Patos de Minas, v. 2, p. 51-63, 2011.

MOHAMMADI, M.; KAZEMI, H. Changes in peroxidase and polyphenol oxidase activities in susceptible and resistant wheat heads inoculated with *Fusarium graminearum* and induced resistance. **Plant Science**, Limerick, v. 162, p. 491-498, 2002.

MORAES, J. C.; GOUSSAIN, M. M.; BASAGLI, M. A. B.; CARVALHO, G. A.; ECOLE, C. C.; SAMPAIO, M. V. Influência do silício na interação tritrófica: plantas de trigo, pulgão-verde *Schizaphis graminum* (Rondani) (Hemiptera: Aphididae) e seus inimigos naturais *Chrysoperla externa* (Hagen) e *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera: Aphidiidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 619-624, 2004.

MUMM, R.; DICKE, M. Variation in natural plant products and the attraction of bodyguards involved in indirect plant defense. **Canadian Journal of Zoology**, Ottawa, v. 88, p. 628-667, 2010.

NGUMBI, E.; CHEN, L.; FADAMIRO, H. Y. Comparative GC-EAD responses of a specialist (*Microplitis croceipes*) and a generalist (*Cotesia marginiventris*) parasitoid to cotton volatiles induced by two caterpillar species. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 35, p. 1009-1020, 2009.

NGUMBI, E.; CHEN, L.; FADAMIRO, H. Y. Electroantennogram (EAG) responses of *Microplitis croceipes* and *Cotesia marginiventris* and their lepidopteran hosts to a wide array of odor stimuli: correlation between EAG response and degree of host specificity? **Journal of Insect Physiology**, Oxford, v. 56, p. 1260-1268, 2010.

OLIVEIRA, R. S. Attractivity of the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae) by wheat (*Triticum aestivum* L.) subjected to fertilization with silicon and to herbivory by *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae). 2012. 49 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

OLSON, D. M.; CORTESERO, A. M.; RAINS, G. C.; POTTER, T.; LEWIS, W. J. Nitrogen and water affect direct and indirect plant systemic induced defense in cotton. **Biological Control**, Orlando, v. 49, p. 239-244, 2009.

OZUNA-CANIZALEZ, F. J.; DE DATTA, S. K.; BONMAN, J. M. Nitrogen form and silicon nutrition effects on resistance to bruzone disease of rice. **Plant and Soil**, The Hague, v. 135, p. 223-231, 1991.

PARIZOTO, G.; REBONATTO, A.; SCHONS, J.; LAU, D. *Barley yellow dwarf virus – PAV* in Brazil: seasonal fluctuation and biological characteristics. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 38, p. 11-19, 2013.

PENUELAS, J.; LLUSIA, J. Plant VOC emissions: making use of the unavoidable. **Trends in Ecology and Evolution**, Amsterdam, v. 19, p. 402-404, 2004.

PERUZZO, R.; SALVADORI, J. R.; PEREIRA, P. R. V. S.; BERTOLLO, E. C.; TONELLO, L. S. Respostas de cultivares de trigo à infestação do pulgão *Rhopalosiphum padi*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 12, p. 1681-1685, 2007.

POPE, T. W.; KISSEN, R.; GRANT, M.; PICKETT, J. A.; ROSSITER, J. T.; POWELL, G. Comparative innate responses of the aphid parasitoid *Diaeretiella rapae* to alkenyl glucosinolate derived isothiocyanates, nitriles, and epithionitriles. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 34, p. 1302-1310, 2008.

RAGUSO, R. A. Wake up and smell the roses: the ecology and evolution of floral scent. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Palo Alto, v. 39, p. 549-569, 2008.

REBONATTO, A.; SALVADORI, J. R.; LAU, D. Temporal changes in cereal aphids (Hemiptera: Aphididae) populations in Northern Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 7, n. 10, p. 71-78, 2015.

REYNOLDS, O. L.; KEEPING, M. G.; MEYER, J. H. Silicon-augmented resistance of plants to herbivorous insects: a review. **Annals of Applied Biology**, Warwick, v. 155, p. 171-186, 2009.

ROZA-GOMES, M. F.; SALVADORI, J. R.; SCHONS, J. Danos de *Rhopalosiphum padi* L. (Hemiptera: Aphididae) no trigo em função da duração e da densidade de infestação. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 37, n. 5, p. 577-581, 2008.

SALVADORI, J. R.; SALLAS, L. A. B. Controle biológico dos pulgões do trigo. In: PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; FERREIRA, B. S. C.; BENTO, J. M. S. (Eds.). **Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores**. São Paulo: Manole, 2002, p. 427-447.

SALVADORI, J. R.; TONET, G. E. L. **Manejo integrado dos pulgões do trigo**. Passo Fundo: Embrapa/CNPT, 2001. 52 p. (Embrapa Trigo – Documentos, 34).

SAVARIS, M.; LAMPERT, S.; SALVADORI, J. R.; LAU, D.; PEREIRA, P. R. V. S.; SMANIOTTO, M. A. Population growth and damage caused by *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera: Aphididae) on different cultivars and phenological stages of wheat. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 42, p. 539-543, 2013.

SCHMELZ, E. A.; ALBORN, H. T.; ENGELBERTH, J.; TUMLINSON, J. H. Nitrogen deficiency increases volicitin-induced volatile emission, jasmonic acid accumulation, and ethylene sensitivity in Maize. **Plant Physiology**, Washington, v. 133, p. 295-306, 2003.

SCHRÖDER, M. L.; GLINWOOD, R.; WEBSTER, B.; IGNELL, R.; KRÜGER, K. Olfactory responses of *Rhopalosiphum padi* to three maize, potato, and wheat cultivars and

the selection of prospective crop border plants. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, Dordrecht, v. 157, p. 241-253, 2015.

SMID, H. M.; VAN LOON, J. J. A.; POSTHUMUS, M. A.; VET, L. E. M. GC-EAG-analysis of volatiles from Brussels sprouts plants damaged by two species of *Pieris* caterpillars: olfactory receptive range of a specialist and a generalist parasitoid wasp species. **Chemoecology**, Basel, v. 12, p. 169-176, 2002.

SILVA, A. M.; SAMPAIO, M. V.; OLIVEIRA, M. V.; KORNDORFER, A. P.; FERREIRA, S. E.; POLASTRO, G. C.; DIAS, P. A. S. Antibiosis and non-preference of *Sitobion avenae* (F.) (Hemiptera: Aphididae) on leaves and ears of comercial cultivars of wheat (*Triticum aestivum*). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 42, p. 304-310, 2013.

STARÝ, P.; SAMPAIO, M. V.; BUENO, V. H. P. Aphid parasitoids (Hymenoptera, Braconidae, Aphidiinae) and their associations related to biological control in Brazil. **Revista Brasileira de Entomologia**, São Paulo, v. 51, n. 1, p. 107-118, 2007.

STOUT, M. J.; WORKMAN, J.; DUFFEY, S. S. Differential induction of tomato foliar proteins by arthropod herbivores. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 20, p. 2575-2594, 1994.

TURLINGS, T. C. J.; WACKERS, F. L. Recruitment of predators and parasitoids by herbivore-injured plants. In: CARDE, R. T.; MILLAR, R. T. (Eds.) **Advances in Insect Chemical Ecology**. Cambridge: Cambridge University Press. 2004, p. 21-75.

UNSICKER, S. B.; KUNERT, G.; GERSHENZON, J. Protective perfumes: the role of vegetative volatiles in plant defense against herbivores. **Current Opinion in Plant Biology**, Saint Louis, v. 12, p. 479-485. 2009.

USDA. United States Department of Agriculture. **National Agricultural Statistics Service, Crop Production, Agricultural Prices, and unpublished data, and World Agricultural Outlook Board, World Agricultural Supply and Demand Estimates**. Last updated: Nov. 5, 2016. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov/data-products/wheat-data.aspx#25184>>. Acesso em: 26 maio 2016.

VEREJKEN, P. H. Feeding and multiplication of three cereal aphid species and their effect on yield of winter wheat. **Agricultural Research Reports**, Landbouwk, v. 888, 1979. 53 p.

VERHEGGEN, F. J.; ARNAUD, L.; BARTRAM, S.; GOHY, M.; HAUBRUGE, E. Aphid and plant volatiles induce oviposition in an aphidophagous hoverfly. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 34, p. 301-307, 2008.

WIDHALM, J. R.; JAINI, R.; MORGAN, J. A.; DUDAREVA, N. Rethinking how volatiles are released from plant cells. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 20, p. 545-550, 2015.

ZANINI, A.; PRESTES, T. M. V.; DALMOLIN, M. F.; ALVES, L. F. A.; MENEZES JR., A. O. Ocorrência de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hymenoptera: Aphidiidae) parasitando pulgões (Hemiptera: Aphididae), em trigo em Medianeira, PR. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 35, n. 2, p. 275-276, 2006.

CAPÍTULO 2 – RESISTÊNCIA CONSTITUTIVA E INDUZIDA POR SILÍCIO NA POPULAÇÃO DE *Sitobion avenae* (FABRICIUS, 1775) (HEMIPTERA: APHIDIDAE), DE INIMIGOS NATURAIS E EM CARACTERÍSTICAS DE PRODUÇÃO DE CULTIVARES DE TRIGO

RESUMO

O pulgão *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775) é uma praga-chave em áreas tradicionais de produção do trigo como o Rio Grande do Sul. No entanto, na região do Triângulo Mineiro, há carência de informações em relação à ocorrência de *S. avenae* e dos inimigos naturais associados ao respectivo controle biológico. Outra possibilidade de controle de *S. avenae* diz respeito à indução de resistência de plantas aos pulgões por adubação silicatada. Porém, não existem estudos sobre o efeito dessa indução nas variedades de trigo utilizadas em condições de campo. Diante do exposto, o presente trabalho apresentou os seguintes objetivos: avaliar as resistências constitutiva e induzida pela adubação silicatada de cultivares de trigo no que se refere ao *S. avenae* e aos seus inimigos naturais; avaliar as doses de silício na indução de resistência de BRS 254 e BRS TIMBAÚVA ao *S. avenae*; analisar o efeito da estabilidade da resistência promovida pelo silício em diferentes épocas de cultivo do trigo e o efeito da adubação silicatada na produtividade de grãos. Para atingir os objetivos propostos, os experimentos foram divididos em três etapas. A primeira foi conduzida em 2012, na antiga área experimental da EPAMIG em Uberlândia, Minas Gerais, onde houve o delineamento de blocos casualizados com três repetições em esquema fatorial 3x2x5 (três cultivares – BRS 254, BRS 264 e BRS TIMBAÚVA; presença e ausência de adubação silicatada – 300 kg ha⁻¹ de Si; e cinco tempos de avaliação – 90, 97, 104, 111 e 118 DAS – Dias Após a Semeadura). A segunda etapa foi feita em 2014, na Fazenda Capim Branco, na referida cidade, com um experimento em parcelas sub-subdivididas no tempo, em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições, sendo os níveis de Si (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹) distribuídos nas parcelas; BRS 254 e BRS TIMBAÚVA, nas subparcelas; e o tempo de avaliação, nas sub-subparcelas (20; 27; 34; 41; 48; 55; 62; 69; 76; 83; 90; 97; 104; 111; 118; 125 DAS). A terceira etapa foi realizada também na Fazenda Capim Branco, porém em 2015, com dois experimentos, um a partir de abril e outro a partir de maio. Ambos os ensaios foram conduzidos em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições, sendo os tratamentos constituídos de níveis de Si (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹). Ao finalizar todas as etapas experimentais, notou-se que BRS TIMBAÚVA manifestou resistência ao pulgão *S. avenae*, embora a produtividade tenha sido inferior à obtida com BRS 254. A adubação silicatada aumentou o nível de resistência induzida das cultivares de trigo aos pulgões e a elevação da produtividade de grãos. Ao avaliar o cultivo do trigo em duas épocas distintas (a partir de abril e de maio), houve a manutenção da estabilidade da resistência do trigo ao pulgão *S. avenae* sob diferentes níveis de densidade populacional da praga, após a adubação silicatada. O controle biológico de pulgões mediado pelos inimigos naturais foi ineficiente, porém, se identificaram os parasitoides *Aphidius uzbekistanicus*, *Aphidius ervi* e *Lysiphlebus testaceipes*, além das joaninhas *Hippodamia convergens*, *Cycloneda sanguinea* e *Harmonia axyridis*.

Palavras-chave: Adubação Silicatada. Pulgões. *Triticum aestivum* L.

ABSTRACT

The aphid *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775) is a relevant pest in traditional areas of wheat production as Rio Grande do Sul. However, in Triângulo Mineiro region, there is a lack of information on the occurrence of *S. avenae* and natural enemies associated with its biological control. Another possibility to control *S. avenae* is by the induction of resistance of plants to aphids by silicon fertilization. However, there are not studies about the induction of resistance in wheat varieties in field conditions. Considering these facts, this study included the following objectives: evaluate the constitutive and induced resistance by silicon fertilization of wheat cultivars in relation to *S. avenae* and its natural enemies; evaluate silicon doses in wheat cultivars and induction of resistance of BRS 254 and BRS TIMBAÚVA to *S. avenae*; analyze the effect of resistance stability promoted by silicon in different wheat growing seasons and the effect of Si fertilization on grain yield. To achieve the goals, the experiments were divided into three stages. The first was conducted in 2012, in the experimental area of EPAMIG in Uberlândia, Minas Gerais, where there were the outlining of randomized blocks with three replications in a 3x2x5 factorial scheme (three cultivars – BRS 254, BRS 264 and BRS TIMBAÚVA; presence and absence of silicon fertilization – 300 kg ha⁻¹ of Si; and five times of evaluation – 90, 97, 104, 111 and 118 DAS – Days After Seeding). The second stage was conducted in 2014, at Fazenda Capim Branco, in the referred city, with an experiment in sub-subdivided plots in time with a randomized block design with four replications, in which the Si levels (0, 50, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹) were distributed in plots; BRS 254 and BRS TIMBAÚVA, in subplots; and evaluation time in sub-subplots (20; 27; 34; 41; 48; 55; 62; 69; 76; 83; 90; 97; 104; 111; 118; 125 DAS). The third stage was also conducted at Fazenda Capim Branco, but in 2015, with two experiments, one from April and another from May. Both trials were conducted in an experimental design of randomized blocks with four replications, with treatments made up of Si levels (0, 50, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹). At the end of all experimental stages, it was observed that BRS TIMBAÚVA expressed resistance to the aphid *S. avenae*, while productivity was less than that obtained with BRS 254. Si fertilization promoted the increase of induced resistance of wheat cultivars to aphids and the increased grain yield. In assessing the wheat cultivation in two different seasons (from April and May), there was the maintaining of the stability of wheat resistance to aphid *S. avenae* under different levels of the pest population density, after Si fertilization. The biological control of aphids mediated by natural enemies was inefficient, but the parasitoids *Aphidius usbekistanicus*, *Aphidius ervi* and *Lysiphlebus testaceipes*, and the ladybirds *Hippodamia convergens*, *Cycloneda sanguinea* and *Harmonia axyridis* were identified.

Keywords: Si Fertilization. Aphids. *Triticum aestivum* L.

2.1 Introdução

A produção mundial de trigo é estimada em 2.7 bilhões de toneladas, segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), sendo a cultura mais cultivada no mundo. No Brasil, a produção de trigo deverá ter acréscimo de 13,50% em relação à safra de 2015, atingindo 6.28 milhões de toneladas – a recuperação da produtividade é o principal motivo do aumento da produção. A produtividade média da região de Minas Gerais em 2015 foi de 2.982 kg ha^{-1} , enquanto o Rio Grande do Sul obteve 1.700 kg ha^{-1} . Nas regiões do Distrito Federal e de Goiás, a produtividade foi de 6.000 e 5.054 kg ha^{-1} , respectivamente (CONAB, 2016).

Embora a cultura do trigo seja tradicionalmente cultivada nos estados do Sul do Brasil, alguns produtores das regiões Sudeste e Centro-Oeste têm investido na triticultura como uma alternativa para manter a produção agrícola durante a entressafra das culturas de verão (ALBRECHT et al., 2006; ALBRECHT et al., 2008; CONAB, 2016). Entre as condições que favoreceram a expansão do cultivo do trigo para as regiões do Cerrado se destacam as ótimas condições edafoclimáticas, a posição estratégica do mercado e a capacidade de industrialização, além da possibilidade de a colheita ocorrer no período de entressafra da produção do Sul e da Argentina. Outro fator importante é a estabilidade e a alta força de glúten, características industriais essenciais para a panificação (ALBRECHT et al., 2006).

Devido a essas condições, as variedades BRS 254 e BRS 264 vêm sendo cultivadas desde os respectivos lançamentos pela Embrapa, em que foram alcançados níveis de produtividades iguais a 6.121 kg ha^{-1} e 6.733 kg ha^{-1} , respectivamente, em ambientes favoráveis à irrigação (ALBRECHT et al., 2007). Em Coromandel, Minas Gerais, essas cultivares apresentaram rendimento de grãos de 7.047 kg ha^{-1} e 6.491 kg ha^{-1} , respectivamente (ALVARENGA et al., 2009).

A cultivar BRS TIMBAÚVA, também proveniente da Embrapa, é um genótipo com expressiva área de cultivo no Sul do Brasil. Mesmo com um nível de produtividade inferior à produtividade dos genótipos recomendados para as condições de Cerrado, ela se destaca pela menor redução de produtividade em função do ataque de pulgões virulíferos (BIANCHIN, 2008) e avirulíferos (PERUZZO et al., 2007). Outro fator que tem favorecido a recomendação da variedade é a resistência não apenas ao pulgão *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae), mas também ao vírus do nanismo amarelo da cevada, o BYDV – *Barley yellow dwarf virus*, transmitido pelos pulgões (CEZARE et al., 2011). Embora essa cultivar seja amplamente utilizada no Sul do Brasil, ainda não é conhecido o comportamento

dela no Cerrado, especificamente na região do Triângulo Mineiro, onde também há a ocorrência de pulgões, sobretudo do pulgão-da-espiga, o *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775) (Hemiptera: Aphididae).

Considera-se que os pulgões são pragas economicamente importantes na cultura do trigo, cujas espécies são: *S. avenae*, *R. padi*, *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (Hemiptera: Aphididae), *Metopolophium dirhodum* (Walker, 1849) (Hemiptera: Aphididae), *Rhopalosiphum rufiabdominale* (1899) (Hemiptera: Aphididae), *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae), *Sipha maydis* (Passerini, 1860) (Hemiptera: Aphididae) e *Sipha flava* (Forbes, 1884) (Hemiptera: Aphididae) (REBONATTO et al., 2015).

Além de transmissores de vírus (PARIZOTO et al., 2013), os pulgões são capazes de reduzir a produtividade da cultura pela sucção da seiva da planta (SAVARIS et al., 2013). A espécie *S. avenae* é a única que teve o segundo maior nível de infestação na cultura do trigo desde 1970, na região Sul. Nessa década, a espécie predominantemente encontrada nas armadilhas foi *M. dirhodum* (96,80%), seguida por *S. avenae* (2,50%). No ano 2000 houve domínio de *R. padi* (57,60%) e *S. avenae* (31,00%) (REBONATTO et al., 2015). Em Augusto Pestana, no Rio Grande do Sul, Machado e Santos (2013) registraram a ocorrência majoritária de *S. avenae* (87,00%) nos cultivos de trigo. Por ser uma espécie que ataca preferencialmente a fase reprodutiva dessa gramínea (VEREJKEN, 1979; ROZA-GOMES et al., 2008; SILVA et al., 2013), *S. avenae* pode causar danos diretos à produção de grãos; logo, estratégias de controle devem ser melhor estudadas.

O controle químico dos pulgões, via tratamento de sementes ou pulverização da parte aérea das plantas, ainda é prática comum na condução das culturas de cereais (SILVA et al., 2004; GARCIA et al., 2008). No entanto, as cultivares que manifestam resistência por antibiose, não-preferência ou tolerância podem auxiliar na redução de danos ocasionados à produção do trigo, como tem sido observado para BRS TIMBAÚVA, comprovadamente tolerante ao pulgão *R. padi*, embora não tenha sido descartada a existência de não-preferência e antibiose nos testes realizados em campo (PERUZZO et al., 2007; SAVARIS et al., 2013).

Em testes realizados para avaliar a resistência dessa cultivar, em casa de vegetação, Silva et al. (2013) relataram resultados diferentes, o que evidencia a suscetibilidade da BRS TIMBAÚVA ao pulgão *S. avenae* e a ausência de resistência por não-preferência. Diante de resultados diversos, torna-se necessária a realização de testes em campo para avaliar o comportamento da variedade quanto à manifestação da resistência por antibiose, não-

preferência e tolerância, comparada às demais cultivares predominantemente utilizadas em determinada região.

As estratégias de indução de resistência de plantas também podem ser adotadas para aumentar a resistência de cultivares produtivas, porém suscetíveis ao ataque dos pulgões. A adubação silicatada, por exemplo, é capaz de induzir a resistência de vegetais, como foi observado em estudos laboratoriais (BASAGLI et al., 2003; GOMES et al., 2005; GOUSSAIN et al., 2005). Ao avaliarem a antibiose de plantas de trigo submetidas à adubação silicatada, Dias et al. (2014) observaram também o efeito da indução de resistência aos pulgões ápteros de *S. avenae*. Os pulgões alados, por sua vez, foram encontrados em menor quantidade nas plantas adubadas com Si, o que explica os casos de não-preferência desses insetos.

O Si é capaz de induzir a resistência de plantas devido ao aumento da atividade de enzimas associadas ao sistema de defesa vegetal, que estimulam a produção de compostos secundários prejudiciais ao desenvolvimento do herbíboro (CHÉRIF et al., 1994). As atividades das enzimas polifenoloxidase e peroxidases, por exemplo, são maiores em plantas adubadas com Si, e a infestação prévia do trigo com pulgões potencializa a atividade enzimática desses vegetais (GOMES et al., 2005).

Mendonça et al. (2013) verificaram que os fenóis totais foram produzidos de forma crescente e linear, de acordo com o aumento da dose de Si fornecida ao trigo até 2.500 kg ha⁻¹. Enquanto isso, Ye et al. (2013) asseveraram que o Si também está envolvido na ativação da rota do jasmonato, reconhecidamente associada à defesa de plantas contra os herbívoros. Apesar de os estudos provarem a indução de resistência pelo Si, ainda não foram feitas pesquisas em campo para avaliar o efeito da adubação silicatada na produção de cultivares de trigo e na redução populacional de pulgões, especificamente de *S. avenae*.

Além do manejo químico e do controle realizado por meio da resistência induzida ou constitutiva, os pulgões podem ser controlados biologicamente por inimigos naturais, como os parasitoides e coccinelídeos predadores. Tambasco (1984) e Gassen (1986) citam que houve a introdução de 14 espécies de parasitoides na região Sul do Brasil para o controle biológico dos pulgões. Entre essas espécies, apenas quatro foram utilizadas no Paraná: *Aphidius usbekistanicus* (Luzhetzki, 1960) (Hymenoptera: Braconidae), *Aphidius colemani* (Viereck, 1912) (Hymenoptera: Braconidae), *Praon volucre* (Haliday, 1833) (Hymenoptera: Braconidae) e *Ephedrus plagiator* (Nees, 1811) (Hymenoptera: Braconidae). Porém, em levantamentos de campo nesse mesmo estado, foram encontrados apenas os parasitoides

Lysiphlebus testaceipes (Cresson, 1880) (Hymenoptera: Braconidae) e *Diaeretiella rapae* (M'Intosh, 1855) (Hymenoptera: Braconidae) (ZANINI et al., 2006; STARÝ et al., 2007).

Outra espécie de parasitoide associada aos pulgões do trigo e que pode ser encontrada em Minas Gerais é *A. uzbekistanicus*, cuja ocorrência ainda é registrada no Rio Grande do Sul desde a sua liberação na década de 1970, o que comprova o estabelecimento do parasitoide no local (STARÝ et al., 2007; MACHADO; SANTOS, 2013).

Em pesquisas sobre a avaliação da ocorrência de parasitoides em pulgões da espécie *S. avenae*, diferentes espécies foram relatadas. Machado e Santos (2013), por exemplo, observaram que 87% dos pulgões que atacaram o trigo em Augusto Pestana, no Rio Grande do Sul, foram da espécie *S. avenae*, e eles foram parasitados por *A. uzbekistanicus* e *Aphidius* sp. No Paraná, Bortolloto et al. (2016) verificaram que *S. avenae*, *R. padi* e *R. maidis* foram parasitados em maior porcentagem por *Lysiphlebus testaceipes* (50,92%), seguido de *A. colemani* (23,20%), *Aphidius ervi* (18,07%), *D. rapae* (5,54%) e *A. uzbekistanicus* (2,26%).

O controle biológico tem contribuído para reduzir em 95% as aplicações de defensivos químicos na cultura do trigo (GASSEN, 1999). Mesmo após o programa de controle biológico bem-sucedido, muitos produtores ainda realizam o manejo químico dos pulgões (SILVA et al., 2004; GARCIA et al., 2008). Nesse sentido, diversos produtos não seletivos contribuem negativamente para a sobrevivência dos inimigos naturais.

Assim, outro fator a ser considerado na redução da eficiência dos agentes de controle biológico é a ocorrência de hiperparasitoides. A porcentagem de hiperparasitismo encontrada no trigo tem sido muito variável, com a possibilidade de obter registros de 91,6% (PIMENTA; SMITH, 1976) e 29,4% (ZANINI et al., 2006) no Paraná. Apesar do conhecimento desse fato, ainda há a necessidade de pesquisas em campo para verificar o grau da influência negativa do hiperparasitismo no controle biológico de pulgões na cultura do trigo.

Entre as espécies de coccinélidos (ou joaninhas), predadoras de pulgões, podemos citar *Cyclonedaa sanguinea* (Linnaeus, 1763) (Coleoptera: Coccinellidae), *Hippodamia convergens* (Guerin-Meneville, 1842) (Coleoptera: Coccinellidae) e *Harmonia axyridis* (Pallas, 1773) (Coleoptera: Coccinellidae). *C. sanguinea* e *H. convergens* são capazes de consumir até 325 e 513 ninfas de pulgões durante todo o período de desenvolvimento larval, respectivamente (CARDOSO; LAZZARI, 2003), ao passo que as fêmeas adultas de *H. convergens* podem consumir, aproximadamente, 2.760 pulgões (adultos + ninfas) (LOHAR et al., 2012). Embora em menor porcentagem, a espécie *H. axyridis* merece atenção, pois desde

a primeira identificação realizada em Curitiba, no Paraná (ALMEIDA; SILVA, 2002), essa joaninha tem sido verificada em vários cultivos, podendo interferir no controle biológico realizado por espécies nativas de coccinélidos devido à vantagem competitiva na interação intraguilda. Brown et al. (2015) encontraram o DNA de diversas presas no aparelho bucal de larvas de *H. axyridis*, o que indica a predação de outras espécies de joaninhas e de sirfídeos, inimigos naturais no controle de pulgões.

Além dos pulgões (BASAGLI et al., 2003; GOUSSAIN et al., 2005; GOMES et al., 2005), os predadores (KVEDARAS et al., 2010) e os parasitoides (OLIVEIRA, 2012) podem ser influenciados biológica ou comportamentalmente pela adubação silicatada. No entanto, essa interação tritrófica ainda necessita ser estudada, sobretudo em condições de campo.

Diferentemente da região Sul do país, o Centro-Oeste e o Sudeste necessitam de mais informações quanto à ocorrência de pulgões, parasitoides, hiperparasitoides e predadores nas cultivares de trigo adaptadas às condições edafoclimáticas da região. Ademais, o efeito do Si necessita ser compreendido diante da variação da densidade populacional dos pulgões. O conhecimento da dinâmica populacional desses insetos é imprescindível para a recomendação de adubos silicatados voltados a promover a indução de resistência diante da flutuação populacional dos insetos que, segundo Leslie et al. (2009), ocorre de um ano para outro ou de uma época de cultivo a outra.

Portanto, o presente trabalho apresentou os seguintes objetivos: avaliar a resistência constitutiva e a indução da resistência de cultivares de trigo por meio da adubação silicatada aos pulgões; verificar o efeito do Si nos aspectos de produção do trigo; observar a influência do Si na população de inimigos naturais dos pulgões; e avaliar a estabilidade de indução da resistência de plantas de trigo, submetidas à adubação silicatada, aos pulgões em duas épocas de cultivo.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Etapas de condução dos experimentos

Os ensaios para avaliar os objetivos propostos no presente trabalho foram divididos em três etapas.

Na primeira etapa experimental, em 2012, foi feito um experimento com três cultivares de trigo (BRS 254, BRS 264 e BRS TIMBAÚVA) adubadas com uma dose única de Si aos 20 DAS, visando verificar as principais espécies de pulgões e de inimigos naturais

de ocorrência na região, além do efeito do referido elemento na produtividade e na indução de resistência a esses insetos.

Em 2014, na segunda etapa, um experimento foi conduzido com apenas duas cultivares de trigo, BRS 254 e BRS TIMBAÚVA, em que a primeira manifestou suscetibilidade e a segunda, resistência ao pulgão *S. avenae* na primeira etapa experimental. Ambas as variedades foram adubadas com diferentes níveis de Si (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹) aos 20 DAS.

Na terceira e última etapa, em 2015, dois experimentos foram conduzidos, um em abril e outro em maio. No início de cada um desses meses foi semeada a cultivar BRS 254, a qual foi adubada aos 20 DAS com diferentes níveis de Si (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹). Ao final de cada experimento, os dados coletados sobre o número de pulgões e a produtividade de grãos foram analisados de maneira conjunta, envolvendo os dois experimentos individuais (referentes às duas épocas de cultivo).

2.2.2 Condução experimental da primeira etapa (2012): resistência constitutiva e induzida por silício na população de pulgões e seus inimigos naturais e em características de produção de cultivares de trigo

O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho Distrófico (Tabela 1), na antiga unidade experimental da EPAMIG em Uberlândia. Essa área está localizada a 18°50'25,52" S e 48°14'54,04" O, com altitude de 835 m e classificação climática Aw, segundo Köppen.

Tabela 1. Caracterização química do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico utilizado no experimento.

pH H ₂ O	P Meh.	S-SO ₄	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ⁺³	H+Al	SB	T	V	M
---01:02,5---	-----mg/dm ³ -----	-----	-----	-----cmolc/dm ³ -----	-----	-----	-----	-----	-----	-----%	-----
6,1	2,4	11	0,15	1,8	0,8	0,1	3,8	2,8	6,6	42	3

SB = Soma de Bases; T = CTC pH 7,0

V = Sat. Base; m = Sat. Alumínio; P = [HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹]

S-SO₄ = [Fosfato Monobásico Cálcio 0,01 mol L⁻¹]; Ca, Mg, Al = [KCL 1 mol L⁻¹]

M.O. = Método colorimétrico; H+Al = [Solução Tampão SMP a pH 7,5]

Para avaliar a população de insetos no campo foi utilizado o delineamento em blocos casualizados com três repetições, em esquema fatorial 3x2x5 (três cultivares de trigo; adubadas ou não com Si; e avaliadas no tempo em cinco momentos diferentes após o

florescimento – 90, 97, 104, 111 e 118 DAS). No que concerne às características de produção do trigo, foi considerada a análise fatorial em esquema 3x2 (três variedades de trigo; adubadas ou não com Si).

A semeadura foi realizada manualmente. Cada parcela apresentou oito linhas e, em cada uma destas, de 5m, foram semeadas 60 sementes por metro linear, com espaçamento entre linhas de 20 cm. As variedades utilizadas no experimento foram BRS 264 e BRS 254, recomendadas para o cultivo em regiões do Cerrado; e BRS TIMBAÚVA, indicada para o Sul do Brasil.

Enquanto isso, a adubação foi realizada com o formulado 08-28-16 aplicado no sulco de semeadura, e aos 20 DAS houve a adubação silicatada. A fonte de Si utilizada para a adubação foi o silicato de potássio na forma líquida (Fertisilício®), o qual apresenta 12% de Si total e 12% de K₂O, com densidade de 1,39 g cm⁻³.

Na dose de 300 kg ha⁻¹ de Si, o silicato de potássio foi diluído em quatro litros de água e aplicado aos 20 DAS do trigo, com o auxílio de um regador. Como o silicato de potássio contém o nutriente potássio (K) em sua composição, foi necessário equilibrar a quantidade de K de todas as parcelas, complementando com cloreto de potássio naquelas que não receberam o silicato de potássio. Esse balanceamento de nutrientes foi primordial para garantir o efeito isolado do Si sobre as plantas.

O cultivo do trigo foi conduzido sob o sistema de irrigação por aspersores convencionais, sendo irrigado diariamente até atingir a capacidade de campo. Não se realizaram aplicações de defensivos durante o cultivo desse grão, exceto o inseticida clorpirifós, para o controle de algumas lagartas desfolhadoras aos 21 DAS.

Aos 90, 97, 104, 111 e 118 DAS, que correspondem ao período reprodutivo da cultura, foi avaliada a quantidade de pulgões presentes por afilho, com a amostra de 20 afilhos das duas linhas centrais de plantas, desprezando 1 m da extremidade de cada linha. A contagem de pulgões foi realizada semanalmente nos colmos, nas folhas e na espiga.

Nas duas linhas centrais se contaram e identificaram os coccinelídeos predadores adultos. As múmias também foram coletadas e levadas ao Laboratório de Controle Biológico da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), onde foram mantidas em tubos *eppendorff* de 2 ml. Quando emergiram, os parasitoides e hiperparasitoides foram identificados com o auxílio da chave taxonômica e do estereomicroscópio. Aos 104 dias depois da semeadura, 10 afilhos de cada parcela foram conduzidos ao Laboratório de Fertilizantes da UFU, para a

determinação da quantidade de Si foliar e na espiga, após serem colocados em estufa durante 24 horas, a 60 °C.

A determinação da quantidade de silício foliar foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Korndörfer et al. (2004). Portanto, moeu-se o material vegetal em moinho tipo Willey, em que o material foi acondicionado em sacos plásticos. Então, pesou-se 0,1 g do material vegetal moído em tubos de polipropileno de 100 mL, além de se adicionarem 2 mL de H₂O₂ (300 ou 500 g L⁻¹), com posterior agitação (agitador magnético) por alguns segundos – esse e os demais procedimentos foram efetuados dentro da capela com luvas plásticas.

Na sequência, adicionaram-se 3 mL de NaOH (500 g L⁻¹), agitados novamente em agitador do tipo Vortex. Os tubos foram colocados em banho-maria por aproximadamente uma hora, com o cuidado de sempre agitá-los quando quisessem derramar. Depois que as amostras não liberaram mais gases, foram colocadas as tampas e os tubos, acondicionados em autoclave por uma hora, a 253 °F (123 °C) e 1,5 atm. Adicionaram-se 45 mL de água destilada, e o extrato foi transferido para frasco plástico identificado e deixado em repouso até que os resíduos ficassem depositados no fundo do frasco.

Para a determinação do Si das amostras, colocou-se uma alíquota de 1 mL do sobrenadante do extrato em copo plástico de 50 mL e se acrescentaram 19 mL de água destilada – os padrões foram preparados pipetando-se 0, 2, 4, 6 e 8 mL da solução padrão de 50 ppm de Si e, *a posteriori*, colocados em balões de 50 mL. Vale ressaltar que se completou o volume dos balões com água destilada e, após, foi pipetada uma alíquota de 20 mL de cada padrão (0, 2, 4, 6, 8 mg L⁻¹ de Si), colocada em um copo plástico de 50 mL.

Em seguida, foram adicionados aos copos plásticos dos padrões e das amostras (extratos digeridos) 1 mL de HCl (1:1 ou 50 g L⁻¹) e 2 mL de molibdato de amônio, agitando-os. A cor amarela apareceu nas amostras contendo Si – quanto mais amarelo, maior foi a concentração desse elemento na amostra. Decorridos cinco a 10 minutos, adicionaram-se 2 mL de ácido oxálico, agitando levemente a solução. Depois de dois minutos foi feita a leitura do espectrofômetro UV-Visível, no comprimento de onda de 410 nm.

Ademais, a cor amarela foi pouco estável, permanecendo assim por apenas 15 minutos, e obteve-se o valor de Si em porcentagem. Todas as análises de Si foram feitas com amostras “padrão”, as quais se compuseram pela casca de arroz moída. Houve uma amostra em branco para cada 20 amostras analisadas.

Quando as plantas atingiram aproximadamente 10 dias após a maturidade fisiológica, 30 afilhos de cada parcela foram coletados e levados ao laboratório para a avaliação de altura, peso e número de grãos por espiga.

2.2.2.1 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância com a utilização do programa SISVAR[®] (Versão 5.3) (FERREIRA, 2010). Utilizou-se Teste de Tukey a 5% de significância para comparar as cultivares envolvidas na análise fatorial.

2.2.3 Condução experimental da segunda etapa (2014): Doses de silício na produtividade e na indução de resistência em BRS 254 e BRS TIMBAÚVA ao pulgão *S. avenae*

O experimento foi realizado na Fazenda Capim Branco, da UFU, em Uberlândia. A área experimental está localizada a 18°53'00,14" S e 48°20'32,67" O, com altitude de 819 m e classificação climática Aw, segundo Köppen.

Nesses termos, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho Escuro Distrófico. Realizou-se a análise química da amostra de solo (0-20 cm de profundidade) para a definição da quantidade de adubos necessários à correção da deficiência nutricional do solo e para atender às exigências nutricionais do trigo irrigado (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização química do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico utilizado no experimento.

pH H ₂ O	P Meh.	Si	S-SO ₄	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ⁺³	H+Al	SB	T	V	M
---01:02,5---	-----mg/dm ³	-----	-----	-----	-----cmolc/dm ³	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----%----
6,1	4,9	5,8	11	0,67	2,0	0,9	0,0	2,5	3,57	6,07	59	0

Si = (Cloreto de cálcio 0,01 mol L⁻¹)

SB = Soma de Bases; T = CTC pH 7,0

V = Sat. Base; m = Sat. Alumínio; P = [HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹]

S-SO₄ = [Fosfato Monobásico Cálcio 0,01 mol L⁻¹]; Ca, Mg, Al = [KCL 1 mol L⁻¹]

M.O. = Método colorimétrico; H+Al = [Solução Tampão SMP a pH 7,5]

Como delineamento experimental, utilizou-se o de blocos casualizados com quatro repetições. O experimento foi realizado em esquema de parcelas sub-subdivididas no tempo, com os tratamentos distribuídos da seguinte forma: na parcela ficaram os tratamentos do fator “níveis de silício” (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de Si); na subparcela, os tratamentos do fator

“cultivares” (BRS 254 e BRS TIMBAÚVA); e na sub-subparcela, os tratamentos do fator “tempo de avaliação” (20; 27; 34; 41; 48; 55; 62; 69; 76; 83; 90; 97; 104; 111; 118 e 125 DAS). Analisou-se o experimento em esquema de parcelas subdivididas, para a variável “produtividade”, e em esquema de parcelas sub-subdivididas no tempo, para “número de pulgões por planta”.

As parcelas constituíram-se de cinco linhas de cinco metros de comprimento, espaçadas com 0,20 metros entre si, perfazendo uma área de cinco metros quadrados. Na colheita foram consideradas apenas as três linhas centrais, eliminando-se 0,5 metro nas extremidades da parcela, o que resultou em 2,40 metros quadrados de área colhida.

Diante disso, a semeadura das variedades de trigo foi realizada manualmente na área após a correção do pH do solo e a gradagem. Utilizaram-se 400 sementes por metro quadrado ou 80 sementes por metro linear de cultivo, e os tratamentos que receberam Si foram fertilizados com uma fonte líquida de silicato de potássio (Fertisilício®), o qual apresenta 12% de Si total, 12% de K₂O e densidade de 1,39 g cm⁻³. O silicato de potássio foi diluído em água e aplicado nas parcelas com o auxílio de um regador, 20 DAS do trigo.

Na fase de perfilhamento, o trigo recebeu adubação a lanço com sulfato de amônio e monoamônio fosfato. As plantas daninhas foram eliminadas manualmente das parcelas. O monitoramento visual da evolução das doenças no trigo também foi feito, mas sem nenhuma medida de controle. Também não houve aplicação de inseticidas no experimento.

Contaram-se os pulgões da espécie *Sitobion avenae* (adultos + ninfas) semanalmente a partir dos 20 DAS até o momento da colheita. A colheita foi realizada de forma manual, e a produtividade da área útil de 2,4 m² foi extrapolada para um hectare após a pesagem, a aferição da umidade de grãos em laboratório e a correção do peso para 13% de umidade nos grãos.

2.2.3.1 Análises estatísticas

Submeteram-se os dados à análise de variância no programa SISVAR® (Versão 5.3) (FERREIRA, 2010). Os experimentos foram analisados em esquema de parcelas subdivididas, para a variável “produtividade” e em esquema de parcela sub-subdivididas, para “número de pulgões por planta”. Após a análise de variância, os “níveis de Si” e os “tempos de avaliação dos pulgões” que apresentaram diferença significativa se submeteram à análise de regressão, a

5% de significância. Para a comparação das cultivares, empregou-se o Teste de Tukey, a 5% de significância.

2.2.4 Condução experimental da terceira etapa (2015): doses de silício na produtividade e na indução de resistência ao S. avenae em duas épocas de cultivo

Os experimentos foram realizados a partir de duas épocas de semeadura (abril e maio) na Fazenda Capim Branco, da UFU. A área experimental está localizada a $18^{\circ}53'00,75''$ S e $48^{\circ}20'33,15''$ O, com altitude de 820 m e classificação climática Aw, segundo Köppen.

Ademais, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho Escuro Distrófico.

Realizou-se o experimento praticamente na mesma área do ano anterior, mas na parte adjacente e superior. Como delineamento experimental, empregou-se o de blocos casualizados com quatro repetições. Em cada época de cultivo, os tratamentos foram constituídos de diferentes níveis de Si (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha^{-1}).

Nesse caso, a avaliação dos pulgões ocorreu semanalmente, totalizando 16 semanas de avaliação ao longo do ciclo da cultura (20; 27; 34; 41; 48; 55; 62; 69; 76; 83; 90; 97; 104; 111; 118 e 125 DAS). Ao final do experimento, o número total de pulgões encontrados por ciclo do trigo foi determinado após o somatório da quantidade desses insetos observados em cada avaliação.

As parcelas constituíram-se de cinco linhas de cinco metros de comprimento, espaçadas com 0,20 metros entre si, perfazendo uma área de cinco metros quadrados. BRS 254 foi semeada manualmente na área após a aplicação do calcário e a gradagem, em que se utilizaram 80 sementes por metro linear de cultivo. O trigo recebeu adubação a lanço com sulfato de amônio e monoamônio fosfato, durante a fase de perfilhamento. Os tratamentos que receberam Si foram fertilizados com uma fonte líquida de silicato de potássio (Fertisilício®), o qual foi diluído em água e aplicado nas parcelas, a lanço, com o auxílio de um regador – essa aplicação ocorreu duas semanas após a emergência do trigo.

Como o silicato de potássio contém o nutriente K em sua composição, foi necessário equilibrar a quantidade desse elemento em todas as parcelas. Complementaram-se com cloreto de potássio as parcelas cujas quantidades recebidas foram inferiores à quantidade aplicada no tratamento de 200 kg ha^{-1} de Si, com o uso da fonte silicato de potássio.

As plantas daninhas foram eliminadas manualmente das parcelas e houve o monitoramento visual da evolução das doenças no trigo, mas nenhuma medida de controle foi necessária, tampouco a aplicação de inseticidas no experimento.

Um sistema de irrigação foi montado com aspersores disponíveis na Fazenda Capim Branco, mas sem uma avaliação exata da disponibilidade de água do solo e da evapotranspiração da cultura para quantificar a lâmina de água necessária para a cultura. A irrigação foi feita para a manutenção da umidade na capacidade de campo – em geral, o trigo era irrigado de dois em dois dias e, durante cada dia de irrigação, os aspersores ficaram aproximadamente três horas irrigando as plantas à noite, das 21h à 0h. No entanto, com o avanço do desenvolvimento da cultura, houve dias em que a irrigação aconteceu diariamente, sendo cancelada a partir da maturidade fisiológica da cultivar BRS 254.

Durante a colheita foram consideradas apenas as três linhas centrais, eliminando-se 0,5 metro das extremidades de cada linha, o que resultou em 2,40 metros quadrados de área colhida. Após a determinação da umidade dos grãos, o peso da amostra de cada parcela foi corrigido para a umidade de 13%, e a produtividade, estimada em kg ha^{-1} .

2.2.4.1 Análises estatísticas

Após a análise de variância individual e a determinação do F máximo de Hartley (1950), verificaram-se conjuntamente os experimentos realizados a partir das duas épocas de semeadura (abril e maio). Os melhores modelos de regressão foram selecionados para o fator “níveis de silício”, e aplicou-se o Teste de Tukey a 5% de significância para a comparação das épocas de semeadura do trigo quanto ao número total de pulgões e à produtividade. A análise estatística foi realizada com o programa GENES (Versão 2009.7.0) (CRUZ, 2006).

Em relação à produtividade, a razão que estabelece o F máximo de Hartley (1950) foi igual a 1,92 (Tabela 3), ou seja, os quadrados médios residuais de cada época não ultrapassaram a relação estabelecida de 7:1 – isso possibilitou a análise conjunta (Tabela 4).

Tabela 3. Resumo do quadro de análise de variância individual para a produtividade do trigo, em função das épocas de semeadura e dos níveis de Si.

Épocas	QM(Bloco)	QM(Níveis de Si)	QM(Resíduo)	F
Abril	5795,93333	164712,875	19654,975	5,74*
Maio	55813,73333	156059,5	37690,23333	5,44*
Gl	3	4	12	
CVabril = 3,08%				
CVmaio = 3,61%				
QMRAbril/QMRMaio = 1,92				

* Significativo a 5% de probabilidade.

Como não houve interação significativa ($p>0,05$) entre os níveis de Si e as épocas de semeadura (Tabela 4), houve a verificação individualizada para cada fator na análise conjunta.

Tabela 4. Quadro de análise de variância conjunta para a produtividade do trigo, em função das épocas de semeadura e dos níveis de Si.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F
Blocos dentro de épocas	6	184829,0	30804,83333	-
Níveis de Si (Si)	4	1207623,75	301905,9375	10,52942 *
Épocas (E)	1	6897302,5	6897302,5	223,90326 *
Interação (Si x E)	4	75465,75	18866,4375	0,658
Resíduo	24	688142,5	28672,60417	-
Total	39	9053363,5		
CV = 3,41%				

* Significativo a 5% de probabilidade.

Sobre o número total de pulgões por afilho ao longo do ciclo da cultura, a razão que estabelece o F máximo de Hartley (1950) foi igual a 3.31 (Tabela 5), ou seja, os quadrados médios residuais de cada época não ultrapassaram a relação estabelecida de 7:1 – isso possibilitou a análise conjunta (Tabela 6).

Tabela 5. Resumo do quadro de análise de variância individual para o número total de pulgões ao longo do ciclo do trigo, em função de épocas de semeadura (abril e maio) e níveis de Si.

Épocas	QM(Bloco)	QM(Níveis de Si)	QM(Resíduo)	F
Abril	1,80867	9,51175	2,04075	4,6609*
Maio	3,14583	2257,49925	0,61625	3663,2848*
Gl	3	4	12	
CVabril = 42,39%				
CVmaio = 1,52%				
QMRAbril/QMRMaio = 3,31156				

* Significativo a 5% de probabilidade.

Como houve interação significativa ($p < 0,05$) entre os níveis de Si e as épocas de semeadura (Tabela 6), foi realizada uma análise da interação entre os fatores.

Tabela 6. Quadro de análise de variância conjunta para o número total de pulgões ao longo do ciclo do trigo, em função das épocas de semeadura (abril e maio) e dos níveis de Si.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc
Blocos dentro de Épocas	6	14,8635	2,47725	-
Níveis de Si (Si)	4	5027,9975	1256,99938	946,17646 *
Épocas (E)	1	23314,41225	23314,41225	9411,40872 *
Interação (Si x E)	4	4040,0465	1010,01163	760,26229 *
Resíduo	24	31,8841	1,3285	-
Total	39	32429,2038		

CV = 4,19%;

* Significativo a 5% de significância.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Resistência constitutiva e induzida por silício na população de pulgões e seus inimigos naturais e em características de produção de cultivares de trigo

O trigo utilizado no presente trabalho apresentou resposta à adubação silicatada, independentemente da cultivar testada ($F = 5,128$; $p = 0,047$), devido à maior porcentagem de Si acumulado nas folhas. Porém, não foi observada diferença entre as variedades BRS 254, BRS 264 e BRS TIMBAÚVA quanto à porcentagem de Si ($F = 2,33$; $p = 0,147$) (Tabela 7).

Tabela 7. Porcentagem de Si nas folhas, em função da adubação silicatada e das cultivares de trigo.

Adubação	BRS 254	BRS 264	BRS TIMBAÚVA	Média
Com silício	2,06	1,71	1,26	1,68 A
Sem silício	1,35	1,28	1,25	1,29 B
Média	1,70 a	1,49 a	1,25 a	

CV = 24,30%

¹ Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Na espiga do trigo houve interação entre a adubação silicatada e as cultivares ($F = 8,376$; $p = 0,007$). As variedades BRS 254 e BRS 264 não diferiram quanto à porcentagem de Si nas espigas, independentemente da adubação silicatada (Tabela 8). No entanto, a BRS 264, na presença de adubação silicatada, apresentou maior porcentagem de Si nas espigas.

Tabela 8. Porcentagem de Si na espiga, em função da adubação silicatada.

	BRS 254	BRS 264 ¹	BRS TIMBAÚVA
Com silício	1,27 a	1,82 a	1,39 a
Sem silício	1,53 a	1,18 b	1,46 a
CV = 13,87%			

¹ Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Durante a condução do cultivo do trigo se identificaram duas espécies de pulgões que atacaram a cultura do trigo – *S. avenae* e *R. padi*. No entanto, essa última espécie apresentou ocorrência muito baixa nas folhas de cada afilho, com média geral de 0,02 pulgão, não sendo verificada a influência das variedades ($F = 0,899$; $p = 0,412$), da adubação silicatada ($F = 0,619$; $p = 0,434$) e do tempo de avaliação ($F = 1,900$; $p = 0,122$) sobre essa espécie ao longo do ciclo da cultura. Na espiga do trigo, a média foi menor ainda – 0,0005 pulgão por espiga. Dessa forma, também não foi possível verificar qualquer efeito das cultivares ($F = 1$; $p = 0,374$), da adubação ($F = 1$; $p = 0,321$) ou do tempo de avaliação ($F = 1$; $p = 0,415$) sobre o *R. padi* durante o cultivo do trigo.

Já o pulgão *S. avenae* apresentou maior ocorrência, sendo possível verificar a influência dos fatores em estudo sobre a população desse inseto em campo. O levantamento populacional de *S. avenae* na espiga, por exemplo, permitiu a observação de menor número de pulgões em afilhos cujo trigo foi adubado com Si, independentemente da cultivar ou do tempo de avaliação (ou monitoramento semanal) dos pulgões ($F = 5,751$; $p = 0,019$). Nas folhas, não se constatou diferença quanto ao número de pulgões, em função da adubação silicatada ($F = 1,180$; $p = 0,282$) (Tabela 9).

Tabela 9. Número de pulgões (*Sitobion avenae*) nas folhas e na espiga de cada afilho, em função da adubação silicatada.

Adubação	Número de pulgões nas folhas de cada afilho	Número de pulgões na espiga de cada afilho ¹
Com silício	3,79 a	4,68 b
Sem silício	4,45 a	6,65 a

¹ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

A adubação do trigo com Si proporcionou maior acúmulo do nutriente nas folhas. Embora as espigas das cultivares BRS 254 e BRS TIMBAÚVA não tenham apresentado diferença quanto à porcentagem de Si, notou-se que o número de pulgões na espiga de cada afilho foi menor quando o trigo foi adubado com silício. Esse fato indica que o Si promove a

indução de resistência das espigas ao pulgão após as alterações decorrentes do efeito do Si ao nível foliar, com vistas a proporcionar maior atividade enzimática que gera metabólitos secundários indutores do sistema de defesa da planta e cuja ação atinge os tecidos da espiga e, consequentemente, *S. avenae* (CHÉRIF et al., 1994; GOMES et al., 2005).

O Si reduz a população de pulgões devido ao aumento da atividade de enzimas associadas ao sistema de defesa vegetal, que estimulam a produção de compostos secundários prejudiciais ao desenvolvimento do herbívoro (CHÉRIF et al., 1994). As atividades das enzimas polifenoloxidase e peroxidases são maiores em plantas adubadas com Si, e a infestação prévia do trigo com pulgões potencializa a atividade enzimática desses vegetais (GOMES et al., 2005). Mendonça et al. (2013) arrazoam que os fenóis totais foram produzidos de forma crescente e linear, de acordo com o aumento da dose de Si fornecida ao trigo até 2.500 kg ha^{-1} de caulin ou cinza de casca de arroz (77,9% e 90% de Si, respectivamente). Para Ye et al. (2013), o Si também está envolvido na ativação da rota do jasmonato reconhecidamente associada à defesa de plantas contra os herbívoros.

Certos compostos fenólicos, como as quinonas, dificultam a digestão de proteínas ingeridas pelos herbívoros (FELTON; DUFFEY, 1990; FELTON et al., 1994), tornando a seiva nutricionalmente inadequada para os pulgões. Além de atuar diretamente na biologia dos pulgões que afetam a cultura do trigo, reduzindo a taxa de crescimento populacional (GOMES et al., 2005), a longevidade e a fecundidade (BASAGLI et al., 2003), o Si age indiretamente sobre os herbívoros promovendo a resistência, por não-preferência, às plantas adubadas com esse elemento (BASAGLI et al., 2003; GOMES et al., 2005; PINTO et al., 2012).

Em cacaueiro, doses crescentes de Si aplicado via foliar reduziram a preferência do pulgão *Aphis aurantii* (Boyer de Fonscolombe, 1841) (PINTO et al., 2012). Em razão dos efeitos direto e indireto, há uma diminuição na taxa de crescimento populacional dos pulgões, o que justifica o menor número de pulgões encontrados na espiga dos afilhos das plantas de trigo adubadas com Si.

Os pulgões infestaram as variedades de trigo de maneira diferente, em que BRS TIMBAÚVA apresenta menor densidade populacional de *S. avenae* comparada às cultivares BRS 254 e BRS 264, nos tempos de avaliação de 104 e 111 DAS, independentemente do nível de adubação com Si ($F = 8,086$; $p < 0,001$). Tanto as folhas quanto as espigas manifestaram o mesmo tipo de resposta no que tange à infestação por pulgões, sugerindo uma resistência varietal aos pulgões (Tabelas 10 e 11).

Tabela 10. Número de pulgões (*Sitobion avenae*) nas folhas de cada afilho das cultivares de trigo, em função dos DAS.

DAS	Cultivares de trigo		
	BRS 254	BRS 264	BRS TIMBAÚVA
90	2,04 a	0,82 a	0,12 a
97	1,98 a	2,56 a	0,57 a
104	4,78 ab	7,43 a	1,94 b
111	17,29 a	18,76 a	0,58 b
118	0,58 a	2,38 a	0,01 a

¹ Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela 11. Número de pulgões (*Sitobion avenae*) na espiga de cada afilho das cultivares de trigo, em função dos DAS.

DAS	Cultivares de trigo		
	BRS 254	BRS 264	BRS TIMBAÚVA
90	0,00 a	0,00 a	0,00 a
97	1,04 a	0,27 a	0,02 a
104	10,17 a	10,95 a	1,48 b
111	24,88 a	26,03 a	7,28 b
118	1,15 a	1,76 a	0,04 a

¹ Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

O pulgão *S. avenae* apresenta forte preferência pelas espigas do trigo. Ele se alimenta, sobretudo, da ráquis e da base das espiguetas, causando danos à produção de grãos (VEREJKEN, 1979; SILVA et al., 2013). Durante a realização do presente trabalho, além da relação direta com as cultivares, foi observado que os pulgões atacavam inicialmente as folhas mais próximas ao ápice do afilho e aguardavam a emissão da espiga para colonizá-la. Durante aproximadamente dois meses após a semeadura do trigo, não se verificou a presença de *S. avenae* nas folhas, indicando a não-preferência pela fase vegetativa do trigo.

A população de pulgões da espécie *S. avenae* na cultivar de trigo BRS TIMBAÚVA foi muito baixa, tanto nas folhas quanto nas espigas, comparada àquelas observadas em BRS 254 e BRS 264. Em outro estudo conduzido por Peruzzo et al. (2007), também foi verificada maior resistência ao pulgão *Rhopalosiphum padi* em plantas da variedade BRS TIMBAÚVA, em detrimento da maior suscetibilidade observada para BRS UMBU e GUABIJU, recomendadas para o cultivo na região Sul do Brasil. Em relação a essa espécie de pulgão, Savaris et al. (2013) também relataram maior resistência da BRS TIMBAÚVA em comparação à EMBRAPA 16 e à BRS GUABIJU, que pode ser devida à antibiose, à não-

preferência ou à tolerância (PAINTER, 1951). Em contrapartida, Silva et al. (2013) notaram que BRS TIMBAÚVA não apresentou antibiose ao pulgão *S. avenae*, tanto nas folhas quanto na espiga, comparada à cultivar EMBRAPA 22. Diante de resultados diferentes quanto ao nível de resistência aos pulgões, torna-se necessária a realização de ensaios em campo.

Os componentes de produção do trigo também foram avaliados, em que se verificou que não houve interação entre a adubação silicatada e as cultivares de trigo para o número ($F = 3,811$; $p = 0,060$) e a massa de grãos ($F = 0,552$; $p = 0,592$). Em geral, o número ($F = 207,91$; $p < 0,001$) e a massa ($F = 83,917$; $p < 0,001$) de grãos por espiga foi menor para BRS TIMBAÚVA. A adubação com Si estimulou o aumento do número ($F = 0,028$; $p = 6,579$) e da massa de grãos ($F = 5,448$; $p = 0,041$) por espiga, independentemente da variedade (Tabelas 12 e 13).

Tabela 12. Número de grãos por espiga de cada afilho, em função das cultivares de trigo e da adubação silicatada.

Adubação	BRS 254	BRS 264	BRS TIMBAÚVA	Média
Com silício	48,32	41,30	31,84	42,01 A
Sem silício	47,54	43,78	34,71	40,49 B
Média	47,93 a	42,54 b	33,28 c	
CV=3,05%				

¹ Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela 13. Massa de grãos (g) por espiga de cada afilho, em função das cultivares de trigo e da adubação silicatada.

Adubação	BRS 254	BRS 264	BRS TIMBAÚVA	Média
Com silício	1,84	1,75	1,14	1,57 A
Sem silício	1,79	1,57	1,03	1,46 B
Média	1,81 a	1,66 a	1,09 b	
CV=6,70%				

¹ Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Embora BRS TIMBAÚVA tenha sido registrada com o mesmo valor médio de peso e número de grãos, além do peso de 1.000 grãos de outras cultivares de trigo como BRS GUABIJU e EMBRAPA 16 (SAVARIS et al., 2013), no presente trabalho foi verificado menor nível dessas características de produção para BRS TIMBAÚVA, apesar de ter sido a

variedade com menor densidade populacional de pulgões ao longo do ciclo da cultura, comparada à BRS 254 e à BRS 264.

A aplicação de Si em plantas de trigo aumentou os valores das características de produção, independentemente da variedade. Resultado semelhante do efeito desse elemento foi observado em experimentos conduzidos em vasos para a cultivar de trigo FUNDACEP HORIZONTE, a qual apresentou aumento significativo do número e do rendimento de grãos por planta em função de doses crescentes das fontes de Si até 1.720 kg ha⁻¹, porém com as fontes caulim e cinza de casca de arroz, que apresentavam 77,9 e 90% de Si, respectivamente (MENDONÇA et al., 2013).

Nesse contexto, a altura de plantas não foi influenciada pela interação entre as cultivares e a adubação com Si ($F = 0,648$; $p = 0,544$). Entretanto, independentemente da adubação silicatada, BRS TIMBAÚVA apresentou maior altura, comparada à BRS 254 e à BRS 264 ($F = 29,753$; $p < 0,001$). O Si não afetou o crescimento em altura dos afilhos do trigo ($F = 0,487$; $p = 0,501$) (Tabela 14).

Tabela 14. Altura de plantas (cm), em função das cultivares de trigo e da adubação silicatada.

Adubação	BRS 254	BRS 264	BRS TIMBAÚVA	Média
Com silício	74,94	71,32	84,90	77,05 A
Sem silício	73,44	72,28	88,75	77,15 A
Média	74,19 a	71,80 a	86,82 b	
CV=4,68%				

¹ Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

A avaliação do número de múnias nas folhas e espigas permitiu concluir que as cultivares e a adubação com Si não afetaram a taxa de parasitismo em campo (Tabela 15). No entanto, é importante ressaltar que o número de múnias por afilho foi muito baixo, com menos de uma múnia por afilho, sugerindo que o controle biológico não foi efetivo para os pulgões nas condições de estudo, os quais atingiram níveis populacionais superiores a 15 e a 20 pulgões nas folhas e na espiga, respectivamente (Tabelas 10 e 11).

Mesmo que não existam muitos estudos para se determinar o nível de controle de *S. avenae* em trigo no Brasil, Butignol (1980) relatou que nos estádios de elongação e final da floração houve dano econômico com 10 pulgões por afilho e 18 pulgões por espiga com grão em estado de massa mole, respectivamente. Portanto, o controle biológico realizado pela baixa população de parasitoides (Tabela 15) e de coccinelídeos predadores (Tabela 16)

verificado no presente trabalho foi ineficiente, além da presença de hiperparasitoides (Figuras 2 e 3), que é um fator adicional de interferência negativa no controle da população de *S. avenae* em campo, cuja população aumentou consideravelmente na fase reprodutiva do trigo.

Outras investigações relatam que os parasitoides auxiliaram no controle biológico dos pulgões do trigo (GASSEN, 1999; ZANINI et al., 2006; MACHADO; SANTOS, 2013; BORTOLLATO et al., 2016), principalmente na região Sul do país, fato contrário ao observado no presente trabalho. É necessária, porquanto, a realização de novos estudos para verificar se a taxa de parasitismo é baixa em diferentes épocas, cultivares e sistemas de condução da cultura e, a partir disso, adotar estratégias que favoreçam o aumento populacional dos parasitoides em campos de produção de trigo.

Devido às condições de baixa população de parasitoides e à presença de hiperparasitoides, não foi possível avaliar a resistência indireta, ou seja, a atração de parasitoides por plantas adubadas com Si. No entanto, Kvedaras et al. (2010) e Oliveira (2012) discorreram que o Si pode favorecer o controle biológico de herbívoros ao estimular a atração de predadores e parasitoides em plantas adubadas com esse elemento e/ou submetidas à herbivoria.

Tabela 15. Número mûmias (*Sitobion avenae*) nas folhas e espigas de cada afilho, respectivamente, em função das cultivares de trigo e da adubação silicatada.

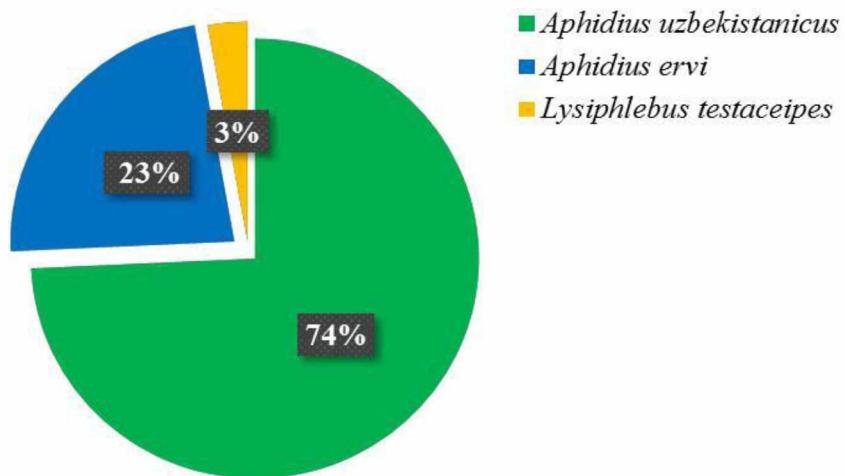
Cultivares	Número de mûmias nas folhas de cada afilho ¹	Número de mûmias na espiga ¹
BRS 254	0,14	0,47
BRS 264	0,31	0,47
Adubação		
Com silício	0,25	0,54
Sem silício	0,20	0,39

¹ Diferença não significativa pelo Teste F da ANOVA a 5% de significância.

Conforme o levantamento de espécies de parasitoides emergidas, constatou-se que a espécie *A. uzbekistanicus* foi a mais abundante, representando 74% dos parasitoides emergidos, seguida por *A. ervi* (23%) e *L. testaceipes* (3%) (Figura 1). Ao avaliar os pulgões do trigo e a ação de parasitoides em Augusto Pestana, Rio Grande do Sul, Machado e Santos (2013) verificaram a predominância do ataque de pulgões da espécie *S. avenae* (87%) e a presença de parasitoides do gênero *Aphidius* – entre as espécies encontradas, destacaram-se *Aphidius uzbekistanicus* e *Aphidius* sp.

No Paraná, Bortolloto et al. (2016) evidenciaram a predominância de *S. avenae*. No entanto, os parasitoides encontrados em maior porcentagem foram *Lysiphlebus testaceipes* (50,92%), seguido de *A. colemani* (23,20%), *A. ervi* (18,07%), *Diaeretiella rapae* (5,54%) e *A. uzbekistanicus* (2,26%), parasitando *S. avenae*, *R. padi* e *R. maidis*.

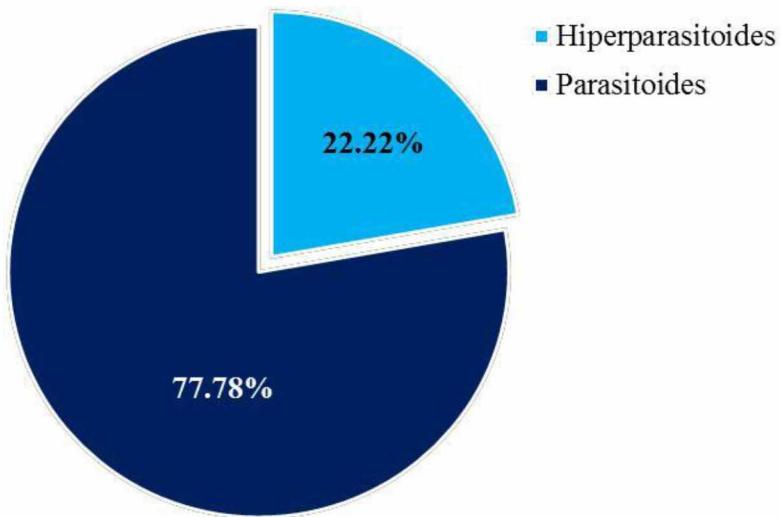
Figura 1. Levantamento das espécies de parasitoides em trigo (safra 2012).



Fonte: Elaboração do autor.

Por meio do levantamento dos insetos também foi observado que houve 22,22% de hiperparasitoides emergidos das múmias, indicando uma contribuição negativa para o sucesso do controle biológico dos pulgões (Figura 2). A porcentagem de hiperparasitismo encontrada no trigo é muito variável, sendo possível obter registros de 91,6% (PIMENTA; SMITH, 1976) e 29,4% (ZANINI et al., 2006) no Paraná.

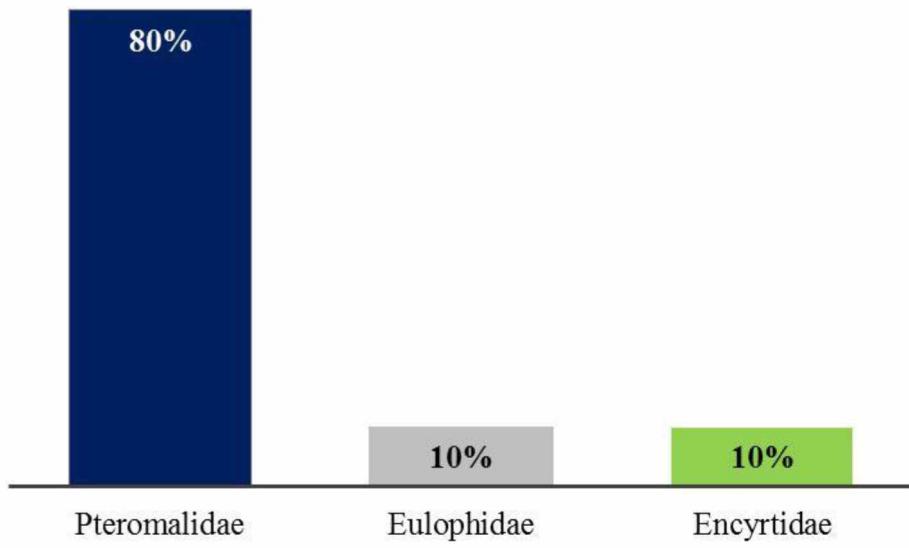
Figura 2. Levantamento de parasitoides e hiperparasitoides em trigo (safra 2012).



Fonte: Elaboração do autor.

A maioria dos hiperparasitoides encontrados pertence à família Pteromalidae (80%), seguida por Eulophidae e Encyrtidae (Figura 3).

Figura 3. Levantamento de hiperparasitoides, por família, em trigo (safra 2012).



Fonte: Elaboração do autor.

Os coccinelídeos predadores foram identificados e quantificados para avaliar o efeito do Si, das cultivares e do tempo de avaliação na quantidade desses inimigos naturais. Porém, não se observou nenhum efeito, exceto para a espécie *C. sanguinea*, cuja densidade

populacional foi maior aos 104 DAS, independentemente das variedades ou da adubação silicatada (Tabela 9).

Apesar da baixa quantidade de joaninhas encontradas no presente trabalho, é reconhecido o papel que exercem no controle de pulgões. As espécies *C. sanguinea* e *H. convergens* são capazes de consumir até 325 e 513 ninfas de pulgões durante todo o período de desenvolvimento larval (CARDOSO; LAZZARI, 2003). Nesse caso, as fêmeas adultas de *H. convergens* podem consumir, aproximadamente, 2.760 pulgões (adultos + ninfas) durante todo o ciclo de vida (LOHAR et al., 2012).

Tabela 16. Número de coccinelídeos predadores, em função das cultivares de trigo, da adubação silicatada e do tempo de avaliação (DAS).

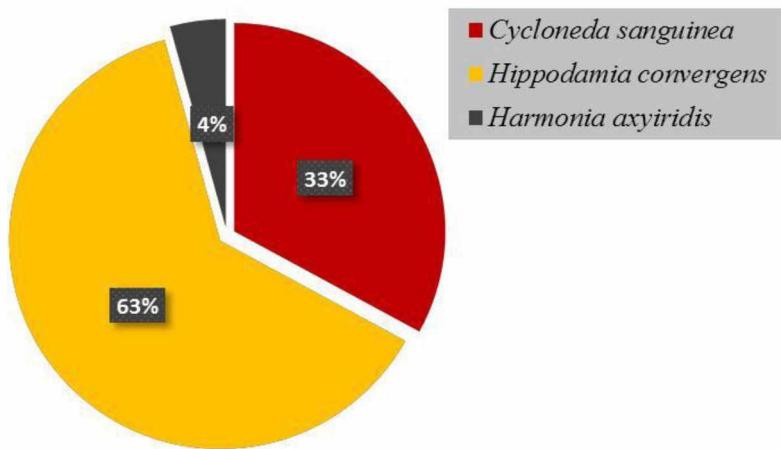
Adubação	<i>C. sanguinea</i> ¹	<i>H. convergens</i> ¹	<i>H. axyridis</i> ¹
Com silício	0,88	1,22	0,10
Sem silício	0,83	2,05	0,10
Cultivares	<i>C. sanguinea</i> ¹	<i>H. convergens</i> ¹	<i>H. axyridis</i> ¹
BRS 254	0,77	1,44	0,00
BRS 264	0,94	1,83	0,22
DAS	<i>C. sanguinea</i> ²	<i>H. convergens</i> ¹	<i>H. axyridis</i> ¹
104	1,41 a	1,58	0,00
108	0,91 ab	2,25	0,08
112	0,25 b	1,08	0,25

¹Não significativo pelo Teste F da ANOVA a 5% de significância.

²Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

A espécie de joaninha predominante no cultivo de trigo foi *H. convergens* (63%), seguida por *C. sanguinea* (33%) e *Harmonia axyridis* (4%) (Figura 4). Embora em menor porcentagem, a espécie *H. axyridis* merece atenção, pois desde a primeira identificação realizada em Curitiba, no Paraná (ALMEIDA; SILVA, 2002), ela tem sido encontrada em diversos cultivos, podendo interferir no controle biológico realizado por espécies nativas de coccinelídeos devido à vantagem competitiva na interação intraguilda. Brown et al. (2015) encontraram DNA de diversas presas no aparelho bucal de larvas de *H. axyridis*, o que indica a predação de outras espécies de joaninhas e de sirfídeos, importantes inimigos naturais no controle de pulgões.

Figura 4. Levantamento das espécies de coccinélideos predadores em trigo (safra 2012).



Fonte: Elaboração do autor.

2.3.2 Doses de silício na produtividade e na indução de resistência em BRS 254 e BRS TIMBAÚVA ao pulgão *S. avenae*

A interação tripla significativa indicou a influência mútua entre três fatores (níveis de Si, cultivares e tempo de avaliação) na resposta ao número de pulgões da espécie *S. avenae* por afilho (Tabela 17).

Tabela 17. Quadro de análise de variância para o número de pulgões por afilho, em função dos fatores “níveis de silício” (fator de parcela), “cultivares” (fator de subparcela) e “tempo de avaliação” (fator de sub-subparcela).

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc
Bloco	3	0,33	0,11	-
Níveis de Si (A)	4	69,15	17,29	79,79*
Resíduo (a)	12	2,60	0,22	-
Cultivares (B)	1	502,33	502,33	3558,92*
AxB	4	24,96	6,24	44,21*
Resíduo (b)	15	2,12	0,14	-
Tempo de avaliação (C)	15	3256,30	217,09	668,17*
AxC	60	309,60	5,16	15,88*
BxC	15	1043,60	69,57	214,14*
AxBxC	60	183,49	3,06	9,41*
Resíduo (c)	450	146,20	3,06	-
Total	639	5540,67		

$$CV(a) = 27,16\%$$

$$CV(b) = 21,92\%$$

$$CV(c) = 33,25\%$$

* Significativo a 1% de probabilidade.

O desdobramento de “doses de silício” dentro de “cultivares*tempo de avaliação” foi verificado para o número de pulgões por afilho (Tabela 18). Nota-se que BRS 254 e BRS TIMBAÚVA têm a população de pulgões influenciada pela adubação silicatada, de forma mais acentuada, dos 97 aos 111 DAS. No entanto, essa influência foi observada precocemente em BRS 254, aos 69 DAS, em detrimento da BRS TIMBAÚVA, cuja influência da adubação com Si ocorreu tardiamente, aos 76 DAS.

Tabela 18. Análise de desdobramento do número de pulgões por afilho, em função das “doses de silício” dentro de cada “cultivar*tempo de avaliação”.

Cultivar; Tempo de avaliação	Equação de regressão	R ² (%)
BRS254 69	y = -3E-06x ³ + 0,001x ² - 0,0789x + 3,5357	96,60
BRS254 97	y = -0,0235x + 11,9	78,11
BRS254 104	y = -0,0595x + 16,9	99,53
BRS254 111	y = -0,0187x + 3,34	83,91
BRSTimbaúva 76	y = 0,125x ³ - x ² + 2,125x + 0,55	74,07
BRSTimbaúva 97	y = -2E-06x ³ + 0,0004x ² - 0,0244x + 2,5643	75,89
BRSTimbaúva 104	y = -0,011x + 3,65	79,61
BRSTimbaúva 111	-1E-06x ³ + 0,0006x ² - 0,0805x + 3,2321	99,72

Nesse entremedio, a influência mais expressiva do Si na densidade populacional de *S. avenae* ocorreu para a BRS 254 aos 97, 104 e 111 DAS, sendo verificada a redução de 0,023, 0,059 e 0,019 pulgões por afilho para cada 1 kg ha⁻¹ de Si adicionado ao solo, a partir de uma população inicial na testemunha de 11,9, 16,9 e 3,34 pulgões, respectivamente. Em se tratando da BRS TIMBAÚVA, houve também a influência da adubação silicatada na redução dos pulgões, de forma linear, mas apenas aos 104 DAS, com a redução de 0,011 pulgões para cada 1kg ha⁻¹ de Si adicionado ao solo a partir de uma população inicial na testemunha de 3,65 pulgões por afilho.

A cultivar de trigo BRS 254 apresentou maior número de pulgões por afilho em relação à BRS TIMBAÚVA, predominantemente dos 55 aos 111 DAS para todos os níveis de Si testados (Tabela 19).

Tabela 19. Análise de desdobramento do número de pulgões por afilho, em função das “cultivares” dentro de cada “Níveis de silício*tempo de avaliação”.

Si; T ²	BRS254 ¹	BRSTIMBAÚVA ¹
0; 55	0,75 a	0,00 b
0; 62	1,25 a	0,00 b
0; 69	3,50 a	1,00 b
0; 76	4,50 a	1,75 b
0; 83	5,75 a	3,00 b
0; 90	7,50 a	2,75 b
0; 97	13,00 a	2,50 b
0; 104	17,00 a	3,25 b
50; 55	0,00 b	0,75 a
50; 62	1,00 a	0,50 b
50; 69	1,75 a	1,25 b
50; 76	3,00 a	2,00 b
50; 83	4,00 a	2,00 b
50; 90	5,25 a	2,25 b
50; 97	9,25 a	2,50 b
50; 104	13,75 a	3,75 b
50; 111	3,25 a	0,50 b
100; 69	2,00 a	0,25 b
100; 76	2,75 a	1,00 b
100; 83	6,5 a	1,25 b
100; 90	7,5 a	2,00 b
100; 97	9,75 a	2,50 b
100; 104	10,75 a	2,25 b
100; 111	1,00 a	0,00 b
150; 55	0,75 a	0,00 b
150; 62	1,50 a	0,50 b
150; 69	3,25 a	0,75 b
150; 76	3,50 a	1,25 b
150; 83	5,5 a	2,25 b
150; 90	6,00 a	3,25 b
150; 97	8,00 a	3,50 b
150; 104	8,50 a	2,25 b
200; 62	1,00 a	0,00 b
200; 69	2,00 a	0,75 b
200; 76	3,75 a	1,75 b
200; 83	5,50 a	2,25 b
200; 90	6,75 a	2,25 b
200; 97	7,75 a	2,00 b
200; 104	4,75 a	1,25 b

¹Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

² Si: níveis de Si, em kg ha⁻¹; T: tempo de avaliação, em DAS. As coletas não quais não houve ocorrência de pulgões não estão apresentadas na tabela.

Diante disso, a produtividade do trigo foi influenciada pela interação entre os níveis de Si e as cultivares de trigo (Tabela 20).

Tabela 20. Quadro de análise de variância da produtividade do trigo, em função dos fatores “níveis de silício” (fator de parcela) e “cultivares” (fator de subparcela).

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fc
Bloco	3	174976,675	58325,558	-
Doses de Si (A)	4	575592,250	143898,062	25,047 *
Resíduo (a)	12	68940,950	5745,0791	-
Cultivares (B)	1	23859436,225	23859436,225	3092,039*
AxB	4	150984,150	37746,037	4,89*
Resíduo (b)	15	115746,125	7716,408	-
Total	39	24945676,375		
CV(a) = 1,68%				
CV(b) = 1,95%				

* Significativo a 5% de significância.

Embora a cultivar de trigo BRS TIMBAÚVA tenha apresentado menor infestação de *S. avenae*, foi observado que ela obteve menor produtividade, na presença e na ausência de adubação com Si (Tabela 21).

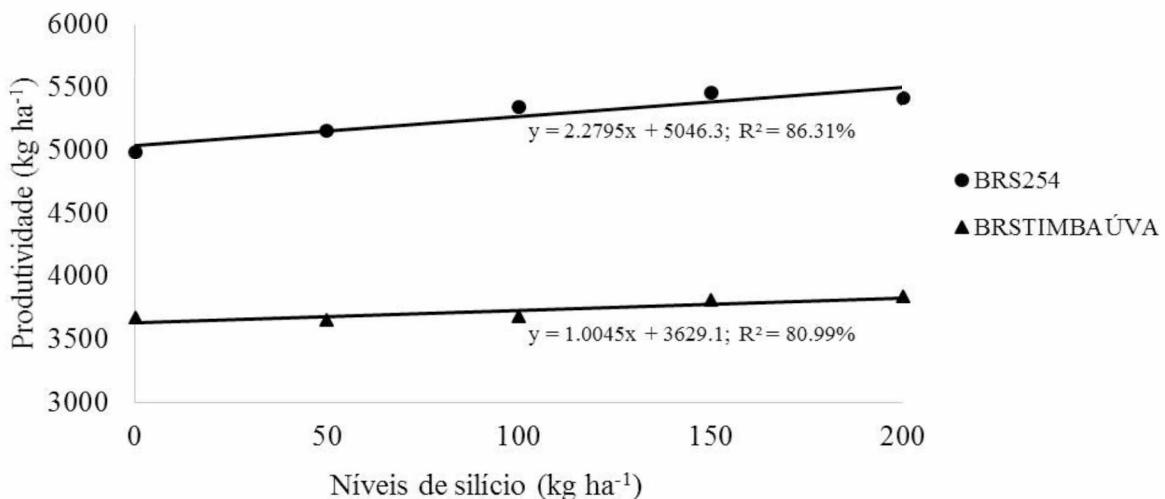
Tabela 21. Produtividade do trigo, em função dos níveis de silício (kg ha^{-1}) e das cultivares de trigo.

Níveis de silício	BRS254	BRSTIMBAÚVA
0	4994,50 a	3667,75 b
50	5158,25 a	3651,50 b
100	5345,00 a	3678,50 b
150	5459,50 a	3810,75 b
200	5413,75 a	3839,25 b

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

A adubação com Si promoveu o aumento linear da produtividade do trigo, sendo que, para a cultivar de trigo BRS 254, houve o incremento de 2,28 kg de grãos produzidos por hectare para cada 1 kg ha^{-1} de Si adicionado ao solo. Já para BRS TIMBAÚVA, esse ganho de produtividade foi 2,27 vezes menor, sendo observado um incremento de apenas 1 kg de grãos por hectare para cada 1 kg ha^{-1} de Si aplicado no solo, cuja produtividade inicial sem adubação silicatada foi igual a 3.629 kg ha^{-1} . A produtividade estimada inicial de BRS 254 foi superior e igual a 5.046 kg ha^{-1} (Figura 5).:

Figura 5. Produtividade das cultivares do trigo, em função dos níveis de Si.



Fonte: Elaboração do autor.

Os estudos relacionados ao efeito do Si na produtividade da cultura do trigo ainda são restritos. Embora BRS TIMBAÚVA tenha sido registrada com o mesmo valor médio de peso e número de grãos, além de peso de 1.000 grãos de outras variedades de trigo, como BRS GUABIJU e EMBRAPA 16 (SAVARIS et al., 2013), no presente trabalho foi verificado menor nível dessas características de produção para BRS TIMBAÚVA, apesar de ter sido a cultivar com menor densidade populacional de pulgões ao longo do ciclo da cultura, comparada à BRS 254.

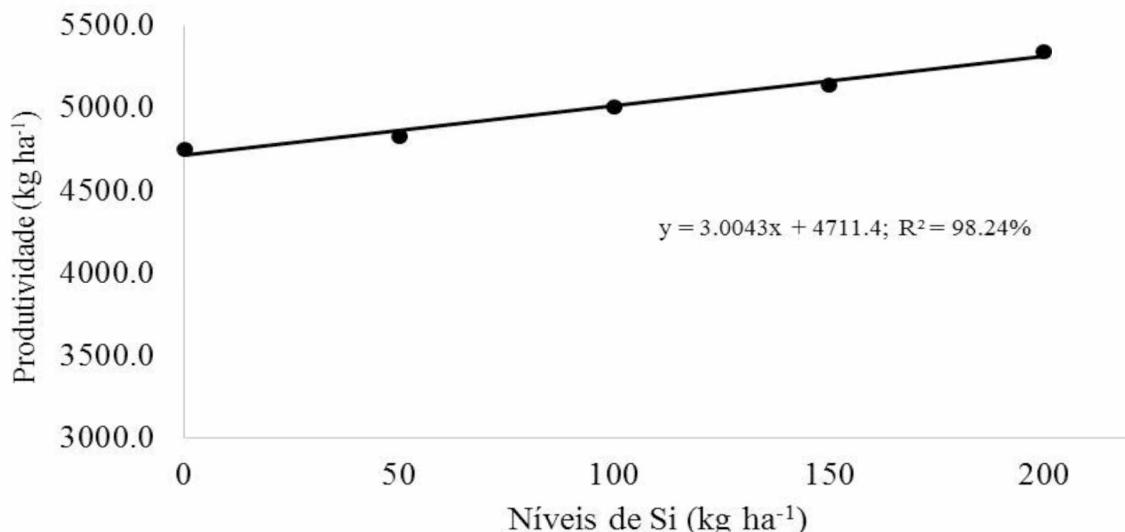
A aplicação de Si em plantas de trigo aumentou os valores das características de produção do trigo, independentemente da variedade. Resultado semelhante do efeito desse elemento foi observado para a cultivar de trigo FUNDACEP HORIZONTE, a qual obteve aumento significativo do número e do rendimento de grãos por planta em função de doses crescentes de Si até 1.720 kg ha⁻¹, porém com as fontes caulin e cinza de casca de arroz, que apresentavam 77,9 e 90,0% de Si, respectivamente (MENDONÇA et al., 2013).

Outros fatores importantes se referem à estabilidade e à alta força de glúten, características industriais essenciais para a panificação (ALBRECHT et al., 2006). Por possuírem essas características, BRS 254 e BRS 264 vêm sendo cultivadas desde os respectivos lançamentos pela Embrapa, alcançando níveis de produtividades iguais a 6.121 kg ha⁻¹ e 6.733 kg ha⁻¹, respectivamente, em ambientes favoráveis à irrigação (ALBRECHT et al., 2007). Em Coromandel, Minas Gerais, essas mesmas variedades apresentaram rendimento de grãos iguais a 7.047 kg ha⁻¹ e 6.491 kg ha⁻¹, respectivamente (ALVARENGA et al., 2009).

2.3.3 Doses de silício na produtividade e na indução de resistência ao *S. avenae* em duas épocas de cultivo

Conforme os resultados apresentados para a produtividade de grãos, foi possível notar um aumento de 3 kg de massa de grãos para cada 1 kg ha⁻¹ de Si adicionado ao solo, sendo a produtividade da testemunha igual a 4.711,4 kg ha⁻¹, independentemente da época de semeadura do trigo (Figura 6).

Figura 6. Produtividade do trigo (kg ha⁻¹), em função de níveis crescentes de Si, independentemente das cultivares e épocas de cultivo.



Fonte: Elaboração do autor.

Ao analisar a produtividade do trigo a partir das duas épocas de semeadura, foi verificada uma produtividade maior para a semeadura realizada em maio, independentemente do nível de Si utilizado, com incremento igual a 830,5 kg ha⁻¹ em relação a abril (Tabela 22).

Tabela 22. Produtividade do trigo (kg ha⁻¹), em função das épocas de semeadura.

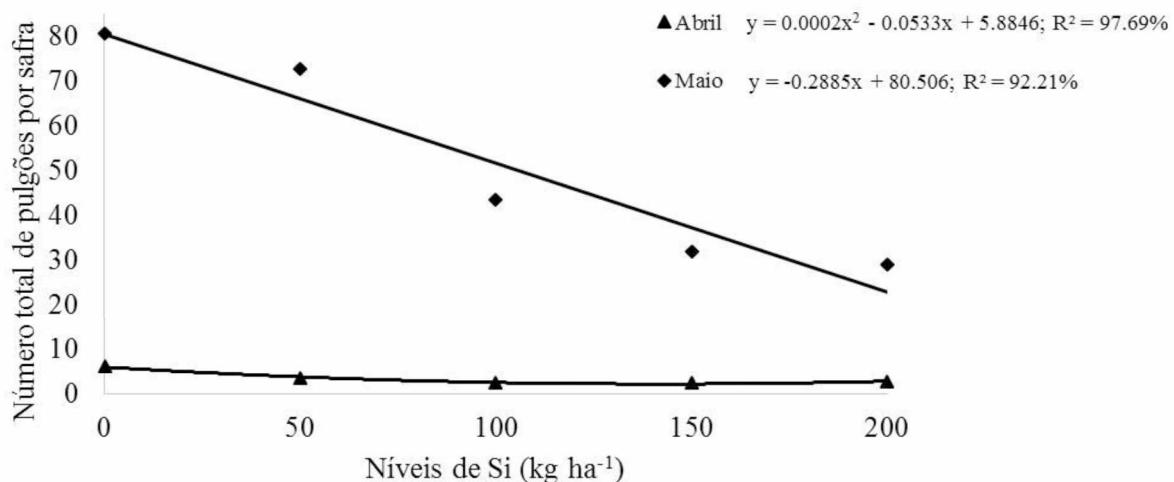
Épocas de semeadura	Produtividade do trigo (kg ha ⁻¹)
Abril	4543,5 b
Maio	5374,0 a
DMS=247,22	

¹ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

O número total de pulgões por afilho, ao longo de todo o ciclo da cultura, foi influenciado por épocas de semeadura e níveis do Si adicionado ao solo. Para cada 1,00 kg ha⁻¹ de Si aplicado no solo, houve redução de 0,29 pulgões por afilho, em que o maior número de pulgões foi registrado para a testemunha (80,50 pulgões, para o cultivo iniciado em maio) (Figura 7).

Nesse sentido, a diminuição da população de pulgões também ocorreu para o cultivo de trigo iniciado em abril, mas somente até a dose de 133,25 kg ha⁻¹ de Si, na qual se registrou a ausência de pulgões nas plantas. No entanto, a partir dessa dose, não foi possível detectar a resistência devido à baixa população dos pulgões.

Figura 7. Número total de pulgões (*Sitobion avenae*) ao longo do ciclo da cultura, em função de níveis crescentes de Si e das épocas de semeadura.



Constatou-se o maior número total de pulgões por afilho no trigo cultivado a partir do mês de maio, para todos os níveis de Si avaliados (Tabela 23).

Tabela 23. Número total de pulgões ao longo do ciclo do trigo, cultivar BRS 254, em função das épocas de semeadura (abril e maio) e da adubação silicatada.

Níveis de Si (kg ha ⁻¹)	Abril	Maio
0	6,00 b	80,77 a
50	3,50 b	72,82 a
100	2,30 b	43,60 a
150	2,47 b	32,05 a
200	2,57 b	29,02 a

¹ Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Em consonância com os resultados apresentados no presente trabalho, a adubação de BRS 254 com Si otimizou a produção de grãos, independentemente da época de semeadura. O mesmo resultado positivo da adubação silicatada na produção de grãos também foi encontrado por Mendonça et al. (2013), ao avaliarem o efeito do caulin e da cinza da casca do arroz em trigo cultivado em vasos. Embora estudos em campo para avaliar a nutrição de plantas de trigo com Si sejam restritos, esta tese confirma o efeito benéfico do nutriente à produtividade.

Outro efeito benéfico da utilização do Si na adubação do trigo se refere à redução da quantidade total de pulgões na cultura. Isso pode ter sido causado pela indução da resistência de plantas por meio da adubação silicatada, a qual pode ter estimulado o aumento da atividade de enzimas como a polifenoloxidase e a peroxidase (GOMES et al., 2005), além da ativação da rota do jasmonato (YE et al., 2013), que auxiliam na produção de metabólitos secundários, como certos compostos fenólicos (MENDONÇA et al., 2013) prejudiciais à biologia e ao comportamento dos pulgões (BASAGLI et al., 2003; GOMES et al., 2005; GOUSSAIN, 2005).

De fato, a adubação silicatada pode ser uma estratégia interessante para minimizar os impactos negativos de *S. avenae* na cultura do trigo. Por ser uma espécie de ocorrência relativamente alta, com registros de 31% no Rio Grande do Sul (REBONATTO et al., 2015) e de 87% no Paraná (MACHADO; SANTOS, 2013), os pulgões causam danos diretos à produção de grãos por atacarem intensivamente as espigas do trigo (VEREJKEN, 1979; ROZA-GOMES et al., 2008). Dessa forma, a adubação do trigo com Si pode constituir uma alternativa à proteção de plantas contra esses herbívoros considerados pragas-chave da cultura.

Durante o cultivo agrícola, é comum a flutuação populacional dos insetos de um ano para outro (LESLIE et al., 2009). No presente trabalho foi observada uma diferença significativa do número de pulgões entre os cultivos de trigo conduzidos a partir de abril e maio. Na primeira época, a população de *S. avenae* foi menor, com efeito negativo do Si na população da praga. No entanto, na segunda época, a população foi maior, e o efeito do Si na redução da quantidade de pulgões, expressivo. Com esses resultados, conclui-se que o Si é capaz de induzir a resistência do trigo aos pulgões, independentemente da densidade populacional de *S. avenae*.

2.4 Conclusões

A adubação silicatada reduz a população de *S. avenae* na espiga do trigo e proporciona maior número e peso de grãos por afilho. Porém, não influencia na população de parasitoides e coccinelídeos. Ademais, o Si reduziu a população de *S. avenae* e aumentou a produtividade das cultivares de trigo BRS 254 e BRS TIMBAÚVA.

Por fim, a época de semeadura e a cultivar têm efeito na produtividade do trigo e na população de pulgões.

2.5 Referências

- ALBRECHT, J. C.; SILVA, M. S.; ANDRADE, J. M. V.; SOARES SOBRINHO, J.; SOUSA, C. N. A.; BRAZ, A. J. B. P.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; SOUZA, M. A.; FRONZA, V.; YAMANAKA, C. H. **Trigo BRS 264**: cultivar precoce com alto rendimento de grãos indicada para o Cerrado do Brasil Central. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2006. 18 p.
- ALBRECHT, J. C.; SILVA, M. S.; SCHEEREN, P. L.; ANDRADE, J. M. V.; TRINDADE, M. G.; SOARES SOBRINHO, J.; SOUSA, C. N. A.; BRAZ, A. J. P. B.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; SOUZA, M. A. S.; FRONZA, V.; YAMANAKA, C. H. **BRS 254 – Trigo melhorador**: cultivar com alta qualidade industrial para a região do Cerrado. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. 52 p. (Embrapa Cerrados – Documentos, 228).
- ALBRECHT, J. C.; VIEIRA, E. A.; SILVA, M. S.; ANDRADE, J. M. V.; SCHEEREN, P. L.; TRINDADE, M. G.; SOARES SOBRINHO, J.; SOUSA, C. N. A.; REIS, W. P.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; FRONZA, V.; CARGNIN, A.; YAMANAKA, C. H. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de trigo irrigado no Cerrado do Brasil Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 12, p. 1727-1734, 2007.
- ALMEIDA, L. M.; SILVA, V. B. Primeiro registro de *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae): um coccinelídeo originário da região Paleártica. **Revista Brasileira de Zoologia**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 941-944, 2002.
- ALVARENGA, C. B.; SOARES SOBRINHO, J.; SANTOS, E. M. Comportamento de cultivares de trigo em diferentes densidades de semeadura sob irrigação indicadas para a região do Brasil Central. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 25, n. 5, p. 98-107, 2009.
- BASAGLI, M. A. B.; MORAES, J. C.; CARVALHO, G. A.; ECOLE, C. C.; GONÇALVES-GERVÁSIO, R. Effects of sodium silicate application on the resistance of wheat plants to the green-aphid *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 32, p. 659-663, 2003.
- BIANCHIN, V. Ocorrência do *Barley yellow dwarf virus* e *Cereal yellow dwarf virus*, transmissibilidade do BYDV-PAV pelo pulgão *Rhopalosiphum padi* e reação de cultivares de trigo ao complexo Vírus/Vetor. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2008.

BORTOLOTTO, O. C.; MENEZES JÚNIOR, A. O.; HOSHINO, A. T. Abundância de inimigos naturais de pulgões do trigo em diferentes distâncias da borda da mata. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 51, n. 2, p. 187-191, 2016.

BROWN, P. M. J.; INGELS, B.; WHEATLEY, A.; RHULE, E. L.; CLERCQ, P.; VAN LEEWEN, T.; THOMAS, A. Intraguild predation by *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) on native insects in Europe: molecular detection from field samples. **Entomological Science**, Tokyo, v. 18, p. 130-133, 2015.

BUTIGNOL, C. A. **Efeitos de níveis populacionais de *Macrosiphum avenae* nas folhas ou espigas de trigo, em casa de vegetação**. 1980. 52 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

CARDOSO, J. T.; LAZZARI, S. M. N. Consumption of *Cinara* spp. (Hemiptera, Aphididae) by *Cycloneda sanguinea* (Linnaeus, 1763) and *Hippodamia convergens* Guérin-Méneville, 1842 (Coleoptera, Coccinellidae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 47, n. 4, p. 559-562, 2003.

CEZARE, D. G.; SCHONS, J.; LAU, D. Análise da resistência/tolerância da cultivar de trigo BRS Timbaúva ao *Barley yellow dwarf vírus* – PAV. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 249-255, 2011.

CHÉRIF, M.; ASSELIN, A.; BÉLANGER, R. R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 84, p. 236-242, 1994.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: décimo levantamento. Brasília, DF: Conab, 2016 (Safra 2015/16, v. 10).

CRUZ, C. D. **Progama Genes**: biometria. Viçosa: UFV, 2006. 382 p.

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 alate and apterous morphs of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae). **Environmental Entomology**, College Park, v. 43, n. 4, p. 949-956, 2014.

FELTON, G. W.; DUFFEY, S.S. Inactivation of baculovirus by quinones formed in insect-damaged plant tissues. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 16, p. 1221-1236, 1990.

FELTON, G. W.; SUMMERS, C. B.; MUELLER, A. J. Oxidative responses in soybean foliage to herbivory by bean leaf beetle and three-cornered alfalfa hopper. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 20, p. 639-650, 1994.

FERREIRA, D. F. **Programa computacional Sisvar** (Versão 5.3). Lavras: UFLA, 2010.

GARCIA, F. R. M.; CAMBRUZZI, E. R.; BUHLER NETO, W. B. Eficiência e seletividade de inseticidas no controle de *Schizaphis graminum* e *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera, Aphididae) em lavoura de aveia preta. **Ambiência**, Guarapuava, v. 4, n. 3, p. 453-459, 2008.

GASSEN, D. N. **Controle biológico de pulgões de trigo no Brasil.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999. 36 p. (Circular Técnica).

GASSEN, D. N. **Parasitos, patógenos e predadores de insetos associados à cultura do trigo.** Passo Fundo: Embrapa, 1986. 86 p. (Circular Técnica).

GOMES, F. B.; MORAES, J. C.; SANTOS, C. D.; GOUSSAIN, M. M. Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 6, p. 547-551, 2005.

GOUSSAIN, M. M.; PRADO, E.; MORAES, J. C. Effect of silicon applied to wheat plants on the biology and probing behavior of the greenbug *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 807-813, 2005.

KÖRNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de Si:** solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34p.

KVEDARAS, O. L.; AN, M.; CHOI, I. S.; GURR, G. M. Silicon enhances natural enemy attraction and biological control through induced plant defences. **Bulletin of Entomological Research**, Farnham, v. 100, n. 3, p. 1-5, 2010.

LESLIE, T. W.; VAN DER WERF, W.; BIANCHI, F. J. J. A.; HONEK, A. Population dynamics of cereal aphids: influence of a shared predator and weather. **Agricultural and Forest Entomology**, Cambridge, v. 11, 73-82, 2009.

LOHAR, M. K.; KHUHRO, S. N.; LAKHO, M. H.; MAGSI, G. A.; KHUHRO, T. A. Biology and feeding potential of predator, *Hippodamia convergens* Guir (Coleoptera: Coccinellidae) on mustard aphid, *Lipaphis erysimi* (Kalt.) in laboratory. **Pakistan Journal of Agriculture**, Faisalabad, v. 28, n. 2, p. 150-159, 2012.

MACHADO, C. C. L.; SANTOS, R. S. S. Pulgões do trigo e ação de parasitoídeos em Augusto Pestana, noroeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Pelotas, v. 8, n. 1, p. 179-186, 2013.

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, v. 29, n. 5, p. 1154-1162, 2013.

OLIVEIRA, R. S. **Attractivity of the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae) by wheat (*Triticum aestivum* L.) subjected to fertilization with silicon and to herbivory by *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae).** 2012. 49 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

PAINTER, R. H. **Insect resistance in crop plants.** New York: MacMillan, 1951. 520p.

PARIZOTO, G.; REBONATTO, A.; SCHONS, J.; LAU, D. *Barley yellow dwarf virus – PAV* in Brazil: seasonal fluctuation and biological characteristics. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 38, p. 11-19, 2013.

PERUZZO, R.; SALVADORI, J. R.; PEREIRA, P. R. V. S.; BERTOLLO, E. C.; TONELLO, L. S. Respostas de cultivares de trigo à infestação do pulgão *Rhopalosiphum padi*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 12, p. 1681-1685, 2007.

PIMENTA, H. R.; SMITH, J. G. Afídeos, seus danos e inimigos naturais em plantações de trigo (*Triticum sp.*) no estado do Paraná. Curitiba: Organização das Cooperativas do Estado do Paraná, 1976. Relatório Técnico.

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. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 3, p. 360-367, 2012.

REBONATTO, A.; SALVADORI, J. R.; LAU, D. Temporal changes in cereal aphids (Hemiptera: Aphididae) populations in Northern Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 7, n. 10, p. 71-78, 2015.

ROZA-GOMES, M. F.; SALVADORI, J. R.; SCHONS, J. Danos de *Rhopalosiphum padi* L. (Hemiptera: Aphididae) no trigo em função da duração e da densidade de infestação. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 37, n. 5, p. 577-581, 2008.

SAVARIS, M.; LAMPERT, S.; SALVADORI, J. R.; LAU, D.; PEREIRA, P. R. V. S.; SMANIOTTO, M. A. Population growth and damage caused by *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera: Aphididae) on different cultivars and phenological stages of wheat. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 42, p. 539-543, 2013.

SILVA, A. M.; SAMPAIO, M. V.; OLIVEIRA, R. S.; KORNDORFER, A. P.; FERREIRA, S. E.; POLASTRO, G. C.; DIAS, P. A. S. Antibiosis and non-preference of *Sitobion avenae* (F.) (Hemiptera: Aphididae) on leaves and ears of comercial cultivars of wheat (*Triticum aestivum*). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 42, p. 304-310, 2013.

SILVA, M. T. B.; COSTA, E. C.; BALARDIN, R. S. Reação de cultivares e eficiência do controle químico de pulgões vetores do *Barley yellow dwarf virus* em trigo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1333-1340, 2004.

STARÝ, P.; SAMPAIO, M. V.; BUENO, V. H. P. Aphid parasitoids (Hymenoptera, Braconidae, Aphidiinae) and their associations related to biological control in Brazil. **Revista Brasileira de Entomologia**, São Paulo, v. 51, n. 1, p. 107-118, 2007.

TAMBASCO, F. J. Determinação de níveis de dano de pulgões em trigo. In: EMBRAPA. **Resultados de Pesquisa do Centro Nacional de Pesquisa de Trigo**. Passo Fundo, 1984, v. 1, p. 85-97.

VEREJKEN, P. H. Feeding and multiplication of three cereal aphid species and their effect on yield of winter wheat. **Agricultural Research Reports**, Landbouwk, v. 888, 1979. 53p.

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. 3631-3639, 2013.

ZANINI, A.; PRESTES, T. M. V.; DALMOLIN M. F.; ALVES, L. F. A.; MENEZES JR., A. O. Ocorrência de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hymenoptera: Aphidiidae) parasitando pulgões (Hemiptera: Aphididae), em trigo em Medianeira, PR. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 35, n. 2, p. 275-276, 2006.

CAPÍTULO 3 – PRODUÇÃO DE VOLÁTEIS E ABSORÇÃO DE SILÍCIO PELO TRIGO SUBMETIDO À ADUBAÇÃO COM SILÍCIO E À HERBIVORIA CAUSADA POR *RHOPALOSIPHUM PADI* (LINNAEUS, 1758) (HEMIPTERA: APHIDIDAE)

RESUMO

Os compostos orgânicos voláteis desempenham funções importantes no agroecossistema, como a mediação da comunicação química entre insetos e plantas. A herbivoria é um fator biótico muito comum de estímulo à produção de voláteis que atuam na defesa indireta de plantas. Os parasitoides, ao perceberem tais sinalizadores químicos da presença do hospedeiro na planta, fazem a busca hospedeira para garantir a sua reprodução e, consequentemente, a morte do inseto-praga. Embora seja conhecida a relevância dos herbívoros no estímulo à produção de voláteis, poucos estudos são realizados no sentido de avaliar o papel dos fatores abióticos na emissão desses compostos orgânicos. Sabe-se que o silício (Si), como fator abiótico, é capaz de prejudicar os insetos fitófagos a partir da deposição de sílica amorfa nos tecidos vegetais ou por meio da ativação de enzimas associadas à atividade de defesa de plantas. No entanto, uma pesquisa que visou avaliar o Si na atração de *Lysiphlebus testaceipes*, em relação às plantas de trigo, evidenciou que os parasitoides são atraídos pelas plantas adubadas exclusivamente com Si, ou seja, elas atraíram o parasitoide até mesmo na ausência de herbivoria causada por *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758). Com o objetivo de avaliar o efeito da adubação silicatada na emissão de voláteis por plantas de trigo, foi realizado um experimento no Laboratório de Ecologia Química e Comportamento de Insetos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) em Piracicaba, São Paulo.

Prepararam-se quatro tratamentos – trigo (controle); trigo + silício (300 kg ha^{-1} de Si); trigo + herbivoria (com *Rhopalosiphum padi*); trigo + herbivoria + silício –, sendo utilizado um delineamento inteiramente casualizado com seis repetições. O silício, na forma de sílica gel, foi triturado, diluído em água e aplicado no solo quando o trigo emergiu o coleóptilo. Ao ser atingido o estádio fenológico Z1.3 (três folhas totalmente expandidas) pelo trigo, acondicionaram-se as plantas em câmaras de vidro para a coleta de voláteis que, retidos no polímero, foram eluídos com hexano e, posteriormente, analisados em cromatógrafo gasoso acoplado ao espectrômetro de massa. Vale ressaltar que se analisaram a abundância e a identidade dos voláteis emitidos e, após a extração destes, a parte aérea do trigo foi removida, seca em estufa a 60°C durante 24 horas, triturada e analisada quanto ao teor de Si acumulado no trigo. De acordo com os resultados obtidos, o silício estimula a produção de sete compostos orgânicos voláteis, da mesma forma que a herbivoria (associada ou não à adubação silicatada) é capaz de realizar tal ação – esse resultado explica porque o parasitoide *L. testaceipes* é atraído pelas plantas adubadas com Si, mesmo na ausência de herbivoria. Além dos sete compostos, o silício ocasionou a produção de outros três voláteis que não foram estimulados em plantas adubadas ou não com tal elemento e submetidas à herbivoria. A quantidade de Si na parte aérea do trigo evidenciou que as plantas submetidas à herbivoria absorveram maior quantidade desse elemento, o que pode ser explicado pela necessidade fisiológica dele em alguma rota de produção de compostos orgânicos voláteis, embora tal hipótese ainda necessite ser investigada em estudos futuros.

Palavras-chave: Compostos Orgânicos Voláteis. Interação Tritrófica. Pulgões.

ABSTRACT

Volatile organic compounds perform important roles in the agroecosystem, such as the mediation of chemical communication between insects and plants. Herbivory is a very common biotic component to stimulate the production of volatile working in indirect defense of plants. The parasitoids, when realize these chemical signals from the host's presence in the plant, make the host search to ensure their reproduction and consequently the death of the insect pest. Although there is the relevance of herbivores in stimulating the production of volatile blends, few studies are conducted to assess the role of abiotic factors in the emission of these organic compounds. It is known that silicon (Si), as an abiotic factor, can harm the herbivorous insects by depositing amorphous silica in plant tissues or through the activation of enzymes associated to plant defense activity. However, a study that intended to evaluate the silicon in the attraction of *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880), in relation to wheat plants, evidenced that the parasitoids are attracted by plants exclusively fertilized by silicon, i.e., they attracted the parasitoid even in the absence of herbivory caused by *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758). Aiming to evaluate the effect of silicon fertilization on the emission of volatile by wheat plants, an experiment was conducted in the Laboratory of Chemical Ecology and Insect Behavior at Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) in Piracicaba, São Paulo. Four treatments were prepared – wheat (control); wheat + silicon (300 kg ha^{-1} of Si); wheat + herbivory (with *Rhopalosiphum padi*); wheat + herbivory + silicon – with a completely randomized design with six replications. The silicon in the form of silica gel was crushed, diluted in water and applied to the soil when wheat emerged the coleoptile. When the developmental stage Z1.3 (three fully expanded leaves) was reached by wheat, the plants were placed in glass chambers for collecting volatile compounds that, retained in the polymer, were eluted with hexane and subsequently analyzed by gas chromatography coupled to mass spectrometer. It is worth to mention that the abundance and identity of the emitted volatiles were analyzed and, after extraction of them, the aerial part of wheat was removed, dried in a heating chamber at 60°C for 24 hours, crushed and analyzed for silicon in relation to the content of Si accumulated in wheat. According to the results, silicon stimulates the production of seven volatile organic compounds in the same way that herbivores (with or without silicon fertilization) is capable of this action – this result explains why the parasitoid *L. testaceipes* is attracted by plants fertilized with Si, even in the absence of herbivory. In these seven compounds, silicon caused the production of three other volatiles that were not stimulated in plants fertilized or not with this element and subjected to herbivory. The amount of Si in the aerial part of wheat showed that plants subjected to herbivory absorbed greater amount of silicon, which can be explained by physiological need of this element for any production route of volatile organic compounds, although this hypothesis remains to be investigated in future studies.

Keywords: Volatile Organic Compounds. Tritrophic Interaction. Aphids.

3.1 Introdução

As plantas emitem grande variedade de compostos orgânicos voláteis que participam da proteção de plantas contra estresses bióticos e abióticos (NIEDERBACHER; WINKLER; SCHNITZLER, 2015). Embora elas possam emitir voláteis de maneira constitutiva (KESSELMEIER; STAUDT, 1999), fatores bióticos como a herbivoria (PARÉ; TUMLINSON, 1999; ARIMURA; KOST; BOLAND, 2005) e abióticos como a nutrição de plantas podem induzir a produção de voláteis (GOUINGUENÉ; TURLINGS, 2002; LORETO; SCHNITZLER, 2010).

Diversos trabalhos têm sido conduzidos para a compreensão do efeito da herbivoria na produção de voláteis e das consequências decorrentes da herbivoria na comunicação química entre plantas e insetos – inimigos naturais ou pragas (DE MORAES et al., 1998; KESSLER; BALDWIN, 2001; McCORMICK; UNSICKER; GERSHENZON, 2012; GISH; DE MORAES; MESCHER, 2015).

Por outro lado, os fatores abióticos são pesquisados em menor proporção, comparados aos bióticos (LORETO et al., 2014). O efeito da nutrição de plantas com Si na emissão de voláteis e as possíveis consequências sobre o comportamento dos insetos precisam ser melhor investigados. Um estudo conduzido por Oliveira (2012), por exemplo, relatou que o parasitoide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hymenoptera: Braconidae) foi atraído por plantas de trigo adubadas com Si, mesmo aquelas que não foram submetidas à herbivoria causada por *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae).

Existe uma clara influência do Si na produção de compostos secundários na seiva da planta (GOMES et al., 2005), na atividade enzimática (CHÉRIF et al., 1994; GOMES et al., 2005) e na deposição de uma barreira física por meio de sílica amorfa na parede celular das plantas (YOSHIDA et al., 1962; MA; TAKAHASHI, 2002; MA; YAMAJI, 2006). No entanto, praticamente inexistem estudos que avaliaram a influência do referido elemento na produção de voláteis pelos vegetais (KVEDARAS et al., 2010). Esses compostos normalmente são liberados pela planta, quando submetida à herbivoria, e desempenham papel fundamental na sinalização aos inimigos naturais da presença dos hospedeiros ou presas atacando as plantas (TURLINGS et al., 1990; VET; DICKE, 1992; ALBORN et al., 1997; DE MORAES, 1998; ALLMANN; BALDWIN, 2010; HARE, 2011).

A liberação desses compostos também pode ter efeito direto na população dos herbívoros a partir da produção de substâncias químicas voláteis repelentes aos insetos

(WEBSTER et al., 2010; VERHEGGEN et al., 2013). A inserção da fertilização silicatada nesse contexto gera muitas dúvidas quanto à influência no padrão de emissão dos voláteis, tanto em termos de quantidade como de identidade ou formação dos compostos químicos ,em um *blend* de voláteis emitido pelo vegetal. Ademais, são desconhecidas as consequências que seriam notadas na interação ou comunicação entre insetos e plantas.

O controle de pragas com o uso de voláteis de vegetais, sejam eles sintetizados em laboratórios ou pelas plantas melhoradas geneticamente, é uma estratégia a ser estimulada, pois se trata de uma técnica inovadora que não polui o solo, a água ou a atmosfera, aumenta a eficiência do controle biológico natural, não prejudica a saúde do trabalhador e não deixa resíduos em alimentos.

Com o estudo do efeito do Si na produção de voláteis e destes na resposta do herbívoro e do inimigo natural, será possível apontar potenciais voláteis que poderão ser utilizados na agricultura para o controle da praga, seja diretamente, por influência do volátil sobre ela, ou indiretamente, por estímulo olfativo ao inimigo natural, o que aumentaria a eficiência do manejo biológico.

Nesse viés, tencionou-se estudar do efeito da adubação com Si e da herbivoria causada por *R. padi* na quantidade e na composição dos voláteis emitidos pelo trigo. Também foi avaliada a quantidade de Si acumulado pelas plantas, em função da herbivoria e da adubação com esse elemento.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Quantificação e identificação dos voláteis

O experimento foi realizado no Laboratório de Ecologia Química e Comportamento de Insetos da ESALQ. Um solo, classificado como Neossolo Quartzarenico Órtico Típico (81% de areia, 5% de silte, 14% de argila e $1,2 \text{ mg dm}^{-3}$ de Si) (Tabela 1), foi coletado na Fazenda do Glória da UFU e conduzido até o referido laboratório.

Tabela 24. Caracterização química do Neossolo Quartzarênico Órtico Típico utilizado no experimento.

pH H ₂ O	pH CaCl ₂	P Meh.	Si	S-SO ₄	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ⁺³	H+Al	SB	T	V	M
				mg/dm ³					cmolc/dm ³				
5	4,1	2,3	1,2	13	0,06	0,4	0,3	0,4	2,2	0,76	2,9	26	34

SB = Soma de Bases | T = CTC pH 7,0

V = Sat. Base | m = Sat. Alumínio | P = [HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹]S-SO₄ = [Fosfato Monobásico Cálcio 0,01 mol L⁻¹] | Ca, Mg, Al = [KCL 1 mol L⁻¹]

M.O. = Método colorimétrico | H+Al = [Solução Tampão SMP a pH 7,5]

O solo foi tratado com calcário (carbonato de cálcio, 970 kg ha⁻¹; carbonato de magnésio, 380 kg ha⁻¹) para a neutralização do alumínio e elevação dos teores de cálcio e magnésio no solo. Após a aplicação do calcário foi realizada a adubação com macro e micronutrientes com sulfato de amônio (equivalente a 80 kg ha⁻¹ de N), superfosfato simples (80 kg ha⁻¹ de P₂O₅), cloreto de potássio (50 kg ha⁻¹ de K₂O) e FTE BR12 (100 kg ha⁻¹).

No que se refere ao cultivo das plantas destinadas à criação dos insetos e ao ensaio de extração dos voláteis, cada vaso de 300 mL com solo foi semeado com a variedade de trigo BRS 254. Realizou-se o desbaste de plantas deixando apenas uma por vaso.

Para a extração de voláteis em plantas de trigo, empregaram-se quatro tratamentos: 1) Trigo (controle), com plantas sem adubação com Si e sem herbivoria; 2) Trigo + silício, com plantas adubadas com Si e sem herbivoria; 3) Trigo + herbivoria, com plantas não adubadas com Si e com herbivoria; e 4) Trigo + herbivoria + silício, com plantas adubadas com Si e com herbivoria.

As plantas utilizadas no tratamento com Si foram adubadas com 0,350 g de sílica (5,7% de Si disponível), equivalente a 300 kg ha⁻¹, quando o trigo atingir o estádio fenológico Z0.7 (emergência do coleóptilo). Elas foram empregadas para determinar a emissão de voláteis quanto atingirem o estádio fenológico Z1.3 (presença de três folhas totalmente expandidas). Além disso, no estádio Z1.3 os vegetais foram submetidos à herbivoria causada pela infestação com 40 afídeos adultos da espécie *R. padi*, os quais foram deixados na planta durante 24 horas. Na sequência, os afídeos foram retirados dos vegetais com pincel, antes da determinação dos voláteis. Vale ressaltar que a distribuição dos tratamentos nas câmaras de voláteis ocorreu de forma casualizada (delineamento inteiramente casualizado), com seis repetições para cada tratamento.

Diante disso, a extração dos voláteis foi conduzida em sala apropriada para o processo, com uso do equipamento VCS (Volatile Collection System, Analytical Research Systems,

Gainesville, EUA). Nesse mesmo aparelho, ajustaram-se os fluxômetros para que fornecessem um fluxo constante de ar, purificado e umidificado, em 400 mL min^{-1} em direção às câmaras de voláteis (54 cm de altura e 9,5 cm de diâmetro). No ponto de saída do ar na parte apical de cada câmara de voláteis se adicionou, junto à fibra de algodão, o polímero polydivinylbenze (HayeSep[®] Q80/100). Em seguida, o polímero foi eluído com 3 ml de hexano (Aldrich Chemical, Milwaukee, WI, EUA), para a extração dos voláteis.

Nesse contexto, as amostras foram injetadas no cromatógrafo gasoso acoplado ao espectrômetro de massas. Identificaram-se os compostos por comparação do espectro de massa com o da biblioteca NIST (National Institute of Standards and Technology).

3.2.2 Análise de silício foliar

Na análise do silício foliar, todas as plantas provenientes dos tratamentos utilizados na extração de voláteis tiveram a parte aérea removida, sendo acondicionadas em sacos de papel. Em seguida, estes foram colocados em estufa durante 24 horas, a 60° C, e conduzidos até o Laboratório de Fertilizantes da UFU.

Determinou-se a quantidade de Si foliar de acordo com a metodologia proposta por Korndörfer et al. (2004). Portanto, o material vegetal foi moído em moinho tipo Willey, sendo acondicionado em sacos plásticos. Foi pesado 0,1 g do material vegetal moído em tubos de polipropileno de 100 mL, adicionando-se 2 mL de H₂O₂ (300 ou 500 g L⁻¹), com posterior agitação (agitador magnético) por alguns segundos – esse e os demais procedimentos foram efetuados dentro da capela com luvas plásticas. Acrescentaram-se, ainda, 3 mL de NaOH (500 g L⁻¹), agitados novamente em agitador do tipo Vortex.

Em seguida, colocaram-se os tubos em banho-maria por aproximadamente uma hora, tendo o cuidado de sempre agitar os tubos quando eles quisessem derramar. Depois que as amostras não liberaram mais gases, colocaram-se as tampas, e os tubos foram acondicionados em autoclave por uma hora a 253 °F (123 °C) e 1,5 atm. Adicionaram-se 45 mL de água destilada, e o extrato foi transferido para um frasco plástico identificado, sendo deixado em repouso até que os resíduos ficassem depositados no fundo desse frasco.

Para a determinação do Si das amostras, colocou-se uma alíquota de 1 mL do sobrenadante do extrato em copo plástico de 50 mL, acrescentando-se 19 mL de água destilada. Os padrões foram preparados; assim, pitetaram-se 0, 2, 4, 6 e 8 mL da solução padrão de 50 ppm de Si que foram colocados em balões de 50 mL. O volume dos balões foi completado com água destilada e, depois disso, pipetou-se uma alíquota de 20 mL de cada

padrão (0, 2, 4, 6, 8 mg L⁻¹ de Si) que, por sua vez, foi colocada em um copo plástico de 50 mL. Em seguida, adicionaram-se aos copos plásticos dos padrões e das amostras (extratos digeridos) 1 mL de HCl (1:1 ou 50 g L⁻¹) e 2 mL de molibdato de amônio. Os copos plásticos foram agitados, e a cor amarela apareceu nas amostras contendo Si – quanto mais amarelo, maior foi a concentração de Si na amostra.

Decorridos cinco a 10 minutos, acrescentaram-se 2 mL de ácido oxálico, agitando levemente a solução. Depois de dois minutos, foi feita a leitura espectrofotômetro UV-Visível no comprimento de onda de 410 nm. A cor amarela ficou pouco estável, permanecendo assim por apenas 15 minutos. Cabe destacar que todas as análises de Si foram feitas com amostras “padrão”, as quais foram compostas pela casca de arroz moída. Houve uma amostra em branco para cada 20 amostras analisadas.

3.2.3 Análises estatísticas

Os compostos voláteis foram quantificados e identificados. Expuseram-se os resultados em gráfico (com o erro padrão para a quantidade de cada composto identificado) e tabela.

Para a variável de silício foliar foi feita uma análise fatorial 2x2 (Si – trigo com ou sem Si; afídeos – trigo com ou sem afídeos). Os resultados de cada tratamento foram comparados pelo teste de F da ANOVA a 5% de significância. Realizaram-se as análises estatísticas no programa SISVAR® (Versão 5.3) (FERREIRA, 2010).

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Quantificação e identificação dos voláteis

A análise da abundância E da identidade dos voláteis emitidos pelo trigo (Figura 7), em cada tempo de retenção (Tabela 25), permitiu concluir que a maior quantidade de voláteis emitida pelas plantas foi observada quando elas foram submetidas à herbivoria, independentemente da presença ou ausência de adubação silicatada.

Geralmente, as plantas emitem diversos compostos orgânicos voláteis devido à herbivoria; assim, os inimigos naturais conseguem localizar os respectivos hospedeiros e presas (TURLINGS et al., 1990; VET; DICKE, 1992; ALBORN et al., 1997; DE MORAES,

1998; ALLMANN; BALDWIN, 2010; HARE, 2011; NIEDERBACHER; WINKLER; SCHNITZLER, 2015). O parasitoide *L. testaceipes*, por exemplo, é atraído até as plantas atacadas pelo herbívoro *R. padi*, conforme demonstrado em olfactometria por Oliveira (2012).

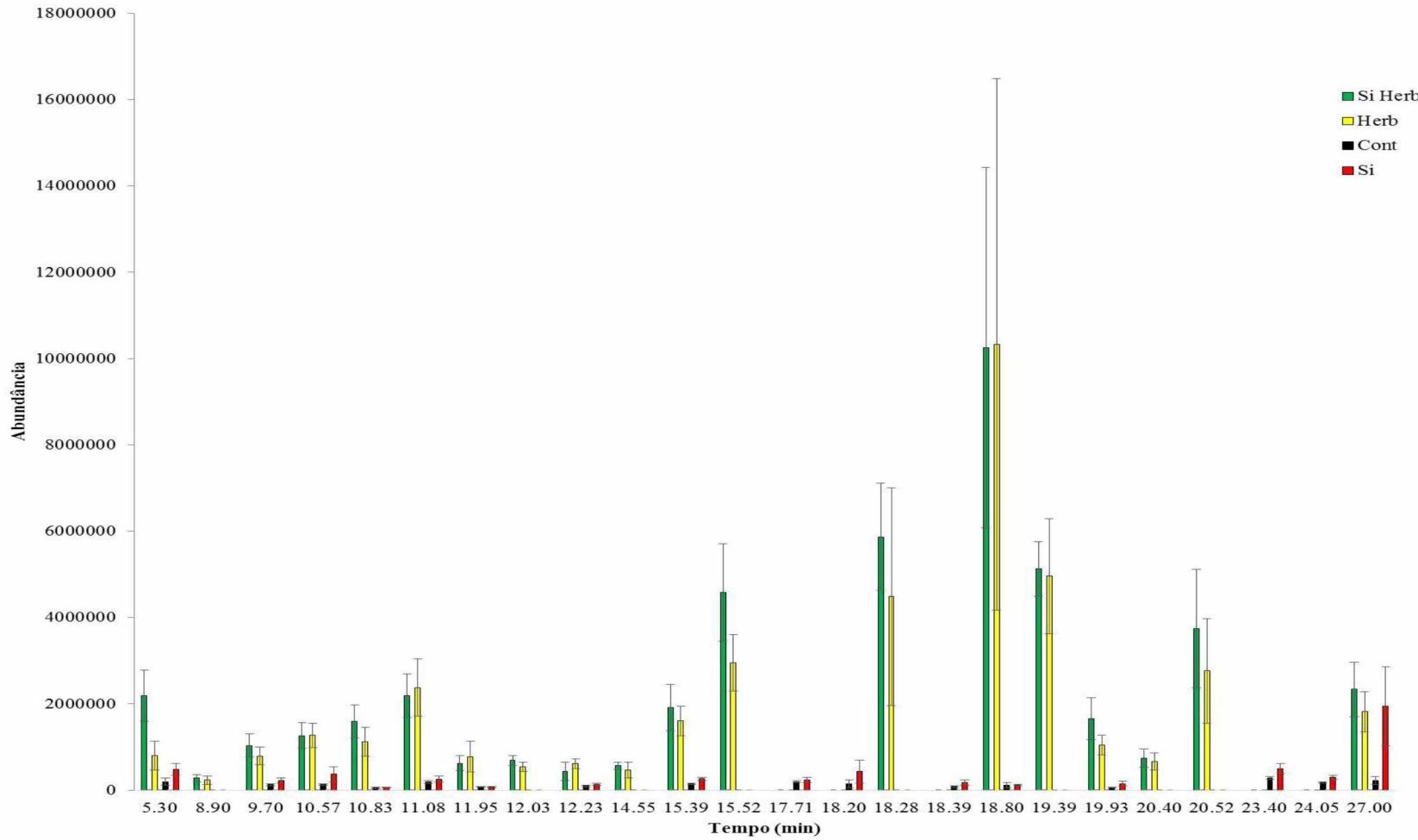
O Si não aumentou a quantidade de voláteis produzidos pelas plantas submetidas à herbivoria, exceto para o composto volátil observado no tempo de retenção 5,30 min. (não identificado). Nesses termos, os compostos não identificados no presente trabalho se devem à não semelhança dos espectros de cada composto químico sugerido pelo biblioteca NIST, do cromatógrafo gasoso acoplado ao espectrômetro de massas.

Tais compostos poderão ser identificados se aumentar o número de repetições de cada tratamento ou por meio da comparação dos compostos candidatos a cada tempo de retenção, com os padrões sintéticos de cada composto sugeridos pelo programa. No entanto, esse procedimento não foi realizado em virtude dos elevados custos envolvidos na aquisição de padrões que necessitam ser importados para serem injetados no cromatógrafo e comparados com os voláteis presentes na amostra de trabalho.

Plantas adubadas com Si, na ausência de herbivoria, também foram capazes de estimular a produção de três compostos voláteis: tempo de retenção 18,39 min. (citronella), 23,40 min. (não identificado) e 24,05 min. (não identificado). Esses compostos foram emitidos exclusivamente devido à adubação com Si.

Ademais, os tratamentos com herbivoria, associada ou não à adubação silicatada, não estimularam a produção de tais compostos. Seria conveniente, futuramente, um estudo para avaliar o potencial de repelência da citronella induzida pelo Si aos pulgões do trigo.

Figura 7. Abundância dos voláteis emitidos pelo trigo, com os respectivos tempos de retenção, em função dos tratamentos: trigo sem adubação com silício e sem herbivoria (Cont; barras pretas); trigo adubado com silício (Si; barras vermelhas); trigo com herbivoria (Herb; barras amarelas); trigo adubado com silício e com herbivoria (Si Herb; barras verdes).



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 25. Compostos voláteis identificados para cada tempo de retenção.

Tempo de retenção	Composto volátil	Fórmula química
5,30	não identificado*	
8,90	1,3-dimethyl-benzene	C ₈ H ₁₀
9,70	não identificado*	
10,57	1,1,2,2-tetrachloro-ethane	C ₂ H ₂ Cl ₄
10,83	tetramethylpropylidone-cyclopropane	
11,08	6-octen-2-one	C ₈ H ₁₄ O
11,95	furaneol	C ₆ H ₈ O ₃
12,03	propyl benzene	C ₉ H ₁₂
12,23	não identificado*	
14,55	o-cymene	C ₁₀ H ₁₄
15,39	2-decyne	C ₁₀ H ₁₈
15,52	6-methyl-2-heptanone	C ₈ H ₁₆ O
17,71	5,5,8a-trimethyldecalin-1-one	C ₁₃ H ₂₂ O
18,20	2,5-hexanedione	C ₆ H ₁₀ O ₂
18,28	3,7,11,15-tetramethyl-2-hexadecen-1-ol	C ₂₀ H ₄₀ O
18,39	Citronella	C ₁₀ H ₁₈ O
18,80	3-decen-5-one	C ₁₀ H ₁₈ O
19,39	não identificado	C ₁₀ H ₁₈ O
19,93	trans-2-dodecen-1-ol	C ₁₂ H ₂₄ O
20,40	1-(1-oxo-2,5-octadecadienyl)-pyrrolidine	C ₂₂ H ₃₉ NO
20,52	2-propenoic acid, 2-methyl-1,2-ethanediylester	C ₁₀ H ₁₄ O ₄
23,40	não identificado*	
24,05	não identificado*	
27,00	geranylacetone	C ₁₃ H ₂₂ O

* Não identificado: indica os compostos que não foram identificados por meio da análise do índice de Kovats e da comparação dos espectros observados com aqueles compostos candidatos disponíveis na biblioteca do cromatógrafo gasoso.

Da mesma forma que as plantas submetidas à herbivoria, associadas ou não à adubação silicatada, os vegetais que se submeteram apenas à adubação com Si também ativaram, de maneira semelhante, a produção de sete compostos voláteis: tempo de retenção 5,30 min. (não identificado), 9,70 min. (não identificado), 10,57 min. (1,1,2,2-tetrachloroethane), 12,23 min. (não identificado), 15,39 min. (2-decyne), 19,93 min. (trans-2-dodecen-1-ol), 27,00 min. (geranylacetone). Esses compostos emitidos em função da adubação silicatada podem explicar os resultados citados por Oliveira (2012), o qual observou a atração do parasitoide *L. testaceipes*, em olfatômetro, pelas plantas adubadas com Si, mesmo com a ausência de herbivoria.

O presente trabalho enfatiza a necessidade de investigação do efeito de fatores abióticos na emissão de voláteis. De acordo com Loreto et al. (2014), a maior parte dos artigos científicos se referem à influência de fatores bióticos, como a herbivoria, na liberação de voláteis de vegetais.

De fato, pesquisas realizadas com o Si (KVEDARAS et al., 2010; OLIVEIRA, 2012) e outros fatores abióticos devem ser estimuladas. São muitas as informações desconhecidas sobre a influência da manipulação do ambiente no padrão de emissão de voláteis, como a disponibilização de nutrientes ao solo, o controle da disponibilidade de água para as plantas e até mesmo o aumento da temperatura em algumas regiões (GOUINGUENÉ; TURLINGS, 2002; LORETO; SCHNITZLER, 2010).

Assim, os fatores abióticos necessitam ser melhor investigados para a compreensão dos efeitos que serão ocasionados à comunicação química entre insetos e plantas, ou seja, se a alteração desse fatores abióticos favorecerá os herbívoros, intensificando os problemas na agricultura, ou se os prejudicará, estimulando a atração de parasitoides capazes de controlar biologicamente os insetos-praga.

Em relação ao uso do Si na agricultura, existem diversos estudos que evidenciam a indução de resistência às pragas e aos patógenos (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995; DATNOFF; SNYDER; KORNDÖRFER, 2001; MENDES; SOUZA; MACHADO, 2011). Essa resistência pode ocorrer em função da influência do Si no estímulo da produção de compostos secundários na seiva da planta (GOMES et al., 2005), do aumento da atividade enzimática (CHÉRIF et al., 1994; GOMES et al., 2005) e da deposição de uma barreira física por meio de sílica amorfa na parede celular dos vegetais (YOSHIDA et al., 1962; MA; TAKAHASHI, 2002; MA; YAMAJI, 2006).

Os resultados da presente pesquisa, associados ao trabalho de Oliveira (2012), evidenciam uma nova rota de proteção de plantas mediante o favorecimento da atração de parasitoides em trigo adubado com Si, devido ao estímulo à produção de voláteis que podem aumentar a eficiência do controle biológico dos pulgões. Entretanto, essa relação ainda deve ser investigada no laboratório, para verificar como os voláteis são emitidos pelos vegetais em resposta aos diferentes níveis de Si no solo e em resposta aos diferentes níveis populacionais do afídeo.

Outrossim, em ensaios de olfatometria, será necessário verificar como as alterações na emissão dos voláteis provocará mudanças comportamentais em relação aos parasitoides e afídeos. Pode ser que um dos voláteis emitidos, ou até mesmo um *blend* de voláteis, seja capaz de produzir um efeito de repelência aos pulgões, como tem sido observado em estudos realizados por Webster et al. (2010) e Verheggen et al. (2013), os quais notaram a ação de voláteis repelentes aos insetos.

As informações geradas a partir do conhecimento dos voláteis de plantas são importantes porque proporcionam a criação de plantas geneticamente modificadas para a expressão de determinado volátil de interesse agrícola. Isso foi feito para o β -farnesene, que atua como um feromônio de alarme e impede a colonização do trigo pelos pulgões (BRUCE et al., 2015).

Outra aplicabilidade das pesquisas com voláteis está relacionada à seleção de cultivares de grandes culturas agrícolas que possuem a capacidade de repelir ou atrair os herbívoros: os voláteis das variedades atraentes podem ser utilizados na bordadura dos campos de produção agrícola e os repelentes, na parte central dos campos das lavouras, estabelecendo-se um sistema “push-pull”. Essa técnica foi investigada por Schröder et al. (2015) no milho e no trigo, em que o volátil (Z)-3-hexenyl acetate foi atraente ao afídeo *R. padi*, e os voláteis α -farnesene, (E)-2-hexenal, indole e (3E,7E)-4,8,12-trimethyltrideca-1,3,7,11-tetraene (TMTT), repelentes.

3.3.2 Análise de silício foliar

Não existiu interação significativa entre os fatores “afídeos” e “silício”. Porém, houve diferença significativa para os fatores analisados na ausência de interação (silício: $F = 15,27$, $p = 0,0009$; afídeos: $F = 11,58$, $p = 0,0028$).

Um fato observado no experimento diz respeito à maior quantidade de Si absorvido pelas plantas que foram submetidas à herbivoria (vegetais com afídeos) (Tabela 26). Esse resultado indica que elas recrutaram uma quantidade maior de Si do solo, possivelmente devido à sucção da seiva do floema, que diminuiu o teor de água na planta. Assim, houve o aumento da absorção de água e, consequentemente, da absorção de Si da solução do solo.

O Si absorvido é essencial para suprir a demanda do sistema de defesa da planta, inclusive na produção de compostos voláteis, como foi verificado na análise de voláteis emitidos pelos vegetais (Figura 7). Tal elemento também pode ter sido absorvido e direcionado para ativar as enzimas associadas ao sistema de defesa das plantas (CHÉRIF et al., 1994; GOMES et al., 2005), além de ser depositado como sílica amorfa na parede celular das células epidérmicas foliares (YOSHIDA et al., 1962; MA; TAKAHASHI, 2002; MA; YAMAJI, 2006).

Tabela 26. Teor de silício foliar ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) de plantas de trigo.

	Sem afídeos	Com afídeos	Média geral
Sem silício	4,26	7,38	5,82 b
Com silício	7,74	9,49	8,62 a
Média geral	6,00 b	8,44 a	

* Médias seguidas por letras distintas apresentam diferença significativa pelo teste F a 5% de significância.

Outro fato verificado foi que as plantas adubadas com Si, independentemente da presença de afídeos, apresentaram maior quantidade de Si foliar (Tabela 3). É importante ressaltar que as avaliações foram realizadas na fase inicial de desenvolvimento do trigo. Apesar do pouco tempo para a absorção dos nutrientes e do pequeno desenvolvimento do sistema radicular, os vegetais ainda conseguiram absorver e acumular uma quantidade significativa de Si na parte aérea.

3.4 Conclusões

O Si e a herbivoria (associada ou não à adubação silicatada) estimulam a produção de voláteis de plantas. Além disso, as plantas submetidas à adubação silicatada e à herbivoria acumulam uma quantidade maior de Si foliar.

3.5 Referências

- ALBORN, H. T.; TURLINGS, T. C. J.; JONES, T. H.; STENHAGEN, G.; LOUGHRIN, J. H.; TUMLINSON, J. H. An elicitor of plant volatiles from beet armyworm oral secretion. **Science**, Washington, v. 276, p. 945-949, 1997.
- ALLMANN, S.; BALDWIN, I. T. Insects betray themselves in nature to predators by rapid isomerization of green leaf volatiles. **Science**, Washington, v. 329, p. 1075-1078, 2010.
- ARIMURA, G.; KOST, C.; BOLAND, W. Herbivore-induced, indirect plant defences. **Biochimica et Biophysica Acta**, Cambridge, v. 1734, p. 91-111, 2005.
- BRUCE, T. J. A.; ARADOTTIR, G. I.; SMART, L. E.; MARTIN, J. L.; CAUFIELD, J. C.; DOHERTY, A.; SAPARKS, C. A., WOODCOCK, C. M.; BIRKETT, M. A.; NAPIER, J. A.; JONES, H. D.; PICKETT, J. A. The first crop plant genetically engineered to release and insect pheromone for defence. **Scientific Reports**, Sydney, v. 5, n. 11183, p. 1-9, 2015.
- CHÉRIF, M.; ASSELIN, A.; BÉLANGER, R. R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 84, p. 236-242, 1994.
- DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.
- DE MORAES, C. M.; LEWIS, W. J.; PARÉ, P. W.; ALBORN, H. T.; TUMLINSOM, J. H. Herbivore-infested plants selectively attract parasitoids. **Nature**, London, v. 393, p. 570-573, 1998.
- 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 alate and apterous morphs of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae). **Environmental Entomology**, New York, v. 43, n. 4, p. 949-956, 2014.
- FERREIRA, D. F. **Programa computacional Sisvar**. Lavras: UFLA, 2010. (Versão 5.3).
- GISH, M.; DE MORAES, C. M.; MESCHER, M. C. Herbivore-induced plant volatiles in natural and agricultural ecosystems: open questions and future prospects. **Current Opinion in Insect Science**, Ohio, v. 9, p. 1-6, 2015.
- GOMES, F. B.; MORAES, J. C.; SANTOS, C. D.; GOUSSAIN, M. M. Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 6, p. 547-551, 2005.
- GOUINGUENÉ, S. P.; TURLINGS, T. C. J. The effects of abiotic factors on induced volatile emissions in corn plants. **Plant Physiology**, Washington, v. 129, p. 1296-1307, 2002.
- HARE, J. D. Ecological rule of volatiles produced by plants in response to damage by herbivorous insects. **Annual Review of Entomology**, Stanford, v. 56, p. 161-180, 2011.

KESSELMEIER, J.; STAUDT, M. Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology. **Journal of Atmospheric Chemistry**, Dordrecht, v. 33, p. 23-88, 1999.

KESSLER, A.; BALDWIN, I. T. Defensive function of herbivore-induced plant volatile emissions in nature. **Science**, Washington, v. 291, p. 2141-2144, 2001.

KORNDÖRFER, G.H.; DATNOFF, L.E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 70, p. 1-3, 1995.

KÖRNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de Si: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34 p.

KVEDARAS, O. L.; AN, M.; CHOI, I. S.; GURR, G. M. Silicon enhances natural enemy attraction and biological control through induced plant defences. **Bulletin of Entomological Research**, v. 100, n. 3, p. 367-371, 2010.

LORETO, F.; DICKE, M.; SCHNITZLER, J. P.; TURLINGS, T. C. J. Plant volatiles and the environment. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 37, p. 1905-1908, 2014.

LORETO, F.; SCHNITZLER, J. P. Abiotic stresses and induced BVOCs. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 15, p. 154-166, 2010.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier, 2002.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends Plant Science**, Oxford, v. 11, p. 392-397, 2006.

MENDES, L. S.; SOUZA, C. H. E.; MACHADO, V. J. Adubação com silício: influência sobre o solo, planta, pragas e patógenos. **Cerrado Agrociências**, Patos de Minas, v. 2, p. 51-63, 2011.

McCORMICK, A. C.; UNSICKER, S. B.; GERSHENZON, J. The specificity of herbivore-induced plant volatiles in attracting herbivore enemies. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 17, p. 303-310, 2012.

NIEDERBACHER, B.; WINKLER, J. B.; SCHNITZLER, J. P. Volatile organic compounds as non-invasive markers for plant phenotyping. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, p. 5403-5416, 2015.

OLIVEIRA, R. S. **Attractivity of the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae) by wheat (*Triticum aestivum* L.) subjected to fertilization with silicon and to herbivory by *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae)**. 2012. 49 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

PARÉ, P. W.; TUMLINSON, J. H. Plant volatiles as a defense against insect herbivores. **Plant Physiology**, Washington, v. 121, p. 325-331, 1999.

- SILVA, A. M.; SAMPAIO, M. V.; OLIVEIRA, M. V.; KORNDORFER, A. P.; FERREIRA, S. E.; POLASTRO, G. C.; DIAS, P. A. S. Antibiosis and non-preference of *Sitobion avenae* (F.) (Hemiptera: Aphididae) on leaves and ears of comercial cultivars of wheat (*Triticum aestivum*). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 42, p. 304-310, 2013.
- TURLINGS, T. C. J.; TUMLINSON, J. H.; ELLER, F. J.; LEWIS, W. J. Exploitation of herbivore-induced plant odors by host-seeking parasitic wasps. **Science**, Washington, v. 250, p. 1251-1253, 1990.
- VET, L. E. M.; DICKE, M. Ecology of infochemical use by natural enemies in a tritrophic context. **Annual Review of Entomology**, Stanford, v. 37, p. 141-172, 1992.
- VERHEGGEN, F. J.; HAUBRUGE, E.; DE MORAES, C. M.; MESCHER, M. C. Aphid responses to volatile cues from turnip plants (*Brassica rapa*) infested with phloem-feeding and chewing herbivores. **Arthropod-Plant Interactions**, New York, v. 7, p. 567-577, 2013.
- WEBSTER, B.; BRUCE, T.; PICKETT, J.; HARDIE, J. Volatile functioning as host cues in a blend become nonhost cues when presented alone to the blanck bean aphid. **Animal Behaviour**, London, v. 79, p. 451-457, 2010.
- YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Histochemistry of silicon in rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 8, p. 107-111, 1962.