

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**Regulação da população do afídeo *Rhopalosiphum padi* por predadores
e parasitoides em cereais no norte do Rio Grande do Sul: abordagem
por meio de modelo baseado em agente**

Monique D'Agostini

Passo Fundo

2021

Monique D'Agostini

Regulação da população do afídeo *Rhopalosiphum padi* por predadores e parasitoides em cereais no norte do Rio Grande do Sul: abordagem por meio de modelo baseado em agente

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Agronomia.

Orientadora: Dra. Carolina Cardoso Deuner
Coorientador: Dr. Douglas Lau

Passo Fundo

2021

CIP – Catalogação na Publicação

D127r D’Agostini, Monique
Regulação da população do afídeo *Rhopalosiphum*
padipor predadores e parasitoides em cereais no norte do
Rio Grande do Sul [recurso eletrônico] : abordagem por
meio de modelo baseado em agente / Monique D’Agostini.
– 2021.
2 MB. ; PDF.

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Cardoso
Deuner. Coorientador: Prof. Dr. Douglas Lau.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) –
Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Pragas agrícolas - Controle biológico. 2. Cereais -
Doenças e pragas. 3. Homoptero. 4. Agentes no controle
biológico de pragas. I. Deuner, Carolina Cardoso,
orientadora.
II. Lau, Douglas, coorientador. III. Título.

CDU: 632.937

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO



PPGAgro
Programa de Pós-Graduação
em Agronomia

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

“Regulação da população do afídeo *Rhopalosiphum padi* por predadores e parasitoides em cereais no norte do Rio Grande do Sul: abordagem por meio de modelo baseado em agente”

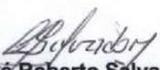
Elaborada por

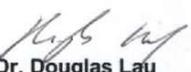
Monique D’Agostini

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestra em
Agronomia – Produção e Proteção de Plantas

Aprovada em: 12/04/2021
Pela Comissão Examinadora

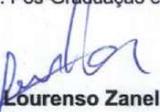

Dra. Carolina Cardoso Deuner
Presidente da Comissão Examinadora
Orientadora

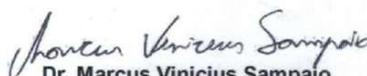

Dr. José Roberto Salvadori
Examinador – Pesquisador independente


Dr. Douglas Lau
Coorientador – Embrapa Trigo


Dr. Alexandre Augusto Nienow
Coord. Prog. Pós-Graduação em Agronomia


Dra. Crislaine Sartori Suzana
Examinadora – UPF


Dr. Eraldo Lourenso Zanella
Diretor FAMV


Dr. Marcus Vinicius Sampaio
Examinador - UFU

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, irmãos e avós, dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela fonte de força e por ter me guiado durante todo o caminho.

À minha mãe, Edilaine, por nunca medir esforços para que meus objetivos fossem alcançados, por ser minha motivação. Ao meu pai, Marcelo por todo amor, apoio e incentivo.

Às minhas irmãs e avós pela presença, por todo amor, carinho e preocupação.

Ao meu namorado, pelo apoio, compreensão, cumplicidade e paciência.

À minha Orientadora Dra. Carolina Cardoso Deuner, por ter me acolhido, por toda atenção e disponibilidade.

Ao meu Co-orientador Dr. Douglas Lau, por ter dedicado seu tempo e me conduzir, com muita paciência e atenção, nos trabalhos realizados, por todos os ensinamentos.

Ao Dr. José Roberto Salvadori, pela prontidão e ensinamentos.

Ao Dr. José Maurício Cunha Fernandes, pela disponibilidade e suporte na análise e interpretação dos dados, pelas contribuições.

À Embrapa Trigo, pela concessão do estágio e possibilidade de conduzir o experimento.

À equipe do laboratório de Entomologia e Fitovirologia da Embrapa Trigo, Vânia, Maria Elaine, Odirlei e Elias, pela amizade, acolhimento, suporte e apoio.

À professora Dra. Crislaine Sartori Suzana, por ter cedido espaço no laboratório de entomologia da FAMV-UPF para condução das avaliações, por todos os ensinamentos e disponibilidade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade de Passo Fundo, por todo o conhecimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Pós-Graduação.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo”.

(Martin Luther King)

RESUMO

D'AGOSTINI, Monique. **Regulação da população do afídeo *Rhopalosiphum padi* por predadores e parasitoides em cereais no norte do Rio Grande do Sul: abordagem por meio de modelo baseado em agente.** 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2021.

Dentre as espécies de afídeos que ocorrem em culturas de cereais, principalmente trigo, atualmente, *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae), se destaca como uma das mais importantes pelos danos que causa, especialmente pela capacidade de transmissão de barley yellow dwarf virus (BYDV). Em sistemas de cultivo, a densidade populacional das pragas além dos fatores abióticos é influenciada por inimigos naturais. Modelos de simulação baseados em agentes se constituem em uma ferramenta importante diante da necessidade de monitoramento de afídeos para tomada de decisão assertiva em relação ao seu controle. Assim, este trabalho teve como objetivo geral avaliar o papel dos inimigos naturais sobre o crescimento populacional do afídeo *R. padi* ao longo do desenvolvimento das culturas do trigo, milho e aveia-preta. Especificamente, objetivou-se: a) avaliar como oscila a ação de inimigos naturais ao longo do ano; b) determinar quais inimigos naturais são os principais responsáveis pela regulação da população de afídeos e c) estabelecer taxas de mortalidade por inimigos naturais no modelo de simulação ABISM. O trabalho foi conduzido no campo experimental da Embrapa Trigo (28°13'43.4"S, 52°24' 04.7"W) entre agosto de 2019 e julho de 2020. Bandejas contendo plantas de trigo foram infestadas com adultos pré-reprodutivos de *R. padi* e expostas a campo, mensalmente, ao longo do ciclo das culturas de trigo, milho e aveia-preta. Para distinguir o efeito de parasitoides e predadores, as bandejas foram cobertas com gaiolas que geravam efeito de exclusão (impediam a entrada de parasitoides e predadores), de restrição (impediam a entrada de predadores) e sem gaiola (permitindo entrada de parasitoides e predadores). As simulações do crescimento populacional de afídeos, ajustando taxas de mortalidade por parasitismo e predação, foram realizadas no modelo ABISM (<http://200.132.58.15:6538/ABISM/>). Ao longo de um ano, a redução média exercida por parasitoides na população de afídeos foi de 98,1 % e por parasitoides mais predadores de 99,3%. A menor redução populacional, foi observada para o sistema de restrição nos meses de março e abril e para o sistema aberto no mês de maio. Os agentes de controle biológico associados a afídeos foram coccinelídeos (*Harmonia axyridis*, *Hippodamia convergens* e *Eriopis connexa* observadas em maior quantidade durante todo o período de monitoramento), sirfídeos (*Toxomerus duplicatus* e *Allograpta exotica*) e parasitoides (*Aphidius platensis*, *Aphidius uzbekistanicus* e *Aphidius rhopalosiphii* predominantes de agosto a novembro e entre abril e julho e *Lysiphlebus testaceipes* durante os meses de dezembro a março). Foi alcançado um bom ajuste do modelo entre os dados observados e simulados através da adição de taxas de mortalidade variáveis para cada um dos 12 meses avaliados. A ação dos inimigos naturais é determinante na regulação da população de afídeos e o seu efeito de regulação deve ser considerado no manejo integrado destas pragas. O modelo de simulação ABISM é uma ferramenta adequada para simular o crescimento populacional de afídeos.

Palavras-chave: 1. Pulgão-da-aveia. 2. Inimigos naturais. 3. Sistemas de produção. 4. Controle biológico. 5. Modelos de simulação.

ABSTRACT

D'AGOSTINI, Monique. **Regulation of the population of the aphid *Rhopalosiphum padi* by predators and parasitoides in cereal in northern Rio Grande do Sul: an approach through agente-based model.** 100 f. Thesis (Master in Agronomy) – University of Passo Fundo, Passo Fundo, 2021.

Among the species of aphids that occur in cereal crops, mainly wheat, currently, *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae), stands out as one of the most important due to the damage it causes, especially due to the transmission capacity of barley yellow dwarf virus (BYDV). In cropping systems, the population density of pests in addition to abiotic factors is influenced by natural enemies. Simulation models based on agents are an important tool in the face of the need to monitor aphids for assertive decision-making in relation to their control. Thus, this work aimed to evaluate the role of natural enemies on the population growth of the aphid *R. padi* along the development of wheat, corn and black oat crops. Specifically, the objective was to: a) evaluate how the action of natural enemies fluctuates throughout the year; b) determine which natural enemies are primarily responsible for regulating the aphid population and c) establish mortality rates by natural enemies in the ABISM simulation model. The work was conducted in the experimental field of Embrapa Trigo (28 ° 13'43.4 "S, 52 ° 24 '04.7" W) between August 2019 and July 2020. Trays containing wheat plants were infested with pre-reproductive adults from *R. padi* and exposed to the field, monthly, throughout the cycle of wheat, corn and black oat crops. To distinguish the effect of parasitoids and predators, the trays were covered with cages that generated an exclusion effect (prevented the entry of parasitoids and predators), restriction (prevented the entry of predators) and without cage (allowing entry of parasitoids and predators). Simulations of aphid population growth, adjusting mortality rates from parasitism and predation, were performed using the ABISM model (<http://200.132.58.15:6538/ABISM/>). Over the course of a year, the average reduction exerted by parasitoids in the aphid population was 98.1% and by parasitoids and predators, 99.3%. The smallest population reduction was observed for the restriction system in the months of March and April and for the open system in the month of May. The biological control agents associated with aphids were coccinellids (*Harmonia axyridis*, *Hippodamia convergens* and *Eriopis connexa* observed in greater quantity throughout the monitoring period), sirphids (*Toxomerus duplicatus* and *Allograpta exotica*) and parasitoids (*Aphidius platensis*, *Aphidius uzbekistanicus* predominant from August to November and between April and July and *Lysiphlebus testaceipes* during the months of December to March). A good fit of the model between the observed and simulated data was achieved by adding variable mortality rates for each of the 12 months evaluated. The action of natural enemies is decisive in the regulation of the aphid population and its regulatory effect must be considered in the integrated management of these pests. The ABISM simulation model is an adequate tool to simulate the population growth of aphids.

Key words: 1. Bird Cherry Oat aphid. 2. Natural enemies. 3. Biological control. 4. Production systems. 5. Simulation models.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	<i>Características gerais dos afídeos</i>	15
2.2	<i>Afídeos associados à cultura do trigo</i>	17
2.2.1	<i>Rhopalosiphum padi</i>	18
2.3	<i>Aspectos populacionais dos afídeos</i>	19
2.3.1	Condições meteorológicas	21
2.3.2	Sucessão de culturas dentro da paisagem agrícola	22
2.3.3	Inimigos Naturais	23
2.4	<i>Controle biológico de afídeos do trigo no Brasil</i>	26
2.5	<i>Modelos de Simulação</i>	28
2.5.1	Modelo Baseado em Agentes	29
3	CAPÍTULO I	32
3.1	<i>Resumo</i>	32
3.2	<i>Introdução</i>	32
3.3	<i>Material e Métodos</i>	36
3.4	<i>Resultados</i>	39
3.5	<i>Discussão</i>	52
3.6	<i>Conclusões</i>	57
4	CAPÍTULO II	58
4.1	<i>Resumo</i>	58
4.2	<i>Introdução</i>	59
4.3	<i>Material e Métodos</i>	61
4.4	<i>Resultados</i>	64
4.5	<i>Discussão</i>	74
4.6	<i>Conclusões</i>	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
6	CONCLUSÃO GERAL	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE	
	<i>A) Estrutura que protege as gaiolas contra o impacto das gotas de chuva e B) gaiolas utilizadas para avaliar o crescimento populacional de afídeos (sistema de exclusão, à esquerda) e o efeito de parasitoides (sistema de restrição, à direita).</i>	98

1 INTRODUÇÃO

Os afídeos são importantes pragas para os cereais, principalmente para o cultivo do trigo, por causarem danos diretos, como resultado da sucção de seiva do floema das plantas e dano indireto pela transmissão de fitovírus. *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae), denominado vulgarmente de pulgão-do-colmo-do-trigo ou pulgão-da-aveia, é uma das principais espécies de afídeos de cereais de inverno. É uma praga cosmopolita e no sul do Brasil, por sua abundância e capacidade de transmissão de barley yellow dwarf virus (BYDV), é uma das espécies de afídeos de maior impacto econômico. A atual relevância de *R. padi* pode ter relação com uma cadeia de eventos e de mudanças de cenários nessa região.

As populações de afídeos, em um contexto de cereais de inverno como produtores primários do sistema, sofreram significativas alterações no sul do Brasil. Nos anos 1970, as espécies *Metopolophium dirhodum* e *Sitobion avenae* eram protagonistas em um período de expansão das culturas agrícolas com uso do manejo convencional do solo em sistemas de cultivo envolvendo a sucessão trigo-soja. Naquela época, os picos populacionais de afídeos eram muito elevados na transição inverno-primavera, quando as plantações de trigo estavam em pleno crescimento. O controle biológico não era considerado eficiente devido à ação insignificante dos poucos inimigos naturais endêmicos presentes em um sistema de menor diversidade de espécies de plantas hospedeiras. No final dos anos 1970 e na década de 1980, ocorreram algumas mudanças de cenários. A fim de diminuir a dependência de inseticidas para controlar os surtos de afídeos que ocorriam naquele período, o controle biológico através da introdução de inimigos naturais, principalmente de parasitoides, foi uma das soluções de manejo propostas pela Embrapa Trigo. Após à introdução de inimigos naturais, também houve a adoção do sistema plantio direto na região, manejo que fornece cobertura vegetal do solo e plantas hospedeiras, como aveia, ao longo de todo o ano. Com isso, a composição das populações de afídeos sofreu profunda modificação. A população de *M. dirhodum*,

sobretudo, reduziu significativamente, ao passo que *R. padi*, uma espécie secundária nos anos 1970, atualmente é a de maior ocorrência.

Na região subtropical o ciclo de vida dos afídeos é marcado pela partenogênese telítoca e produção de fêmeas ápteras e aladas. As oscilações das populações dependem da disponibilidade de plantas hospedeiras e das variações sazonais das condições meteorológicas, sobretudo temperatura, uma vez que as precipitações pluviométricas são bem distribuídas ao longo de todo o ano. Outro fator que influencia as populações de afídeos são os inimigos naturais.

Os principais inimigos naturais dos afídeos são parasitoides e predadores. Parasitoides de afídeos são microhimenópteros, pequenas vespínhas, pertencentes em sua grande maioria às famílias Braconidae (subfamília Aphidiinae) e Aphelinidae. A fêmea destes insetos deposita um ovo dentro do afídeo onde ocorre o desenvolvimento larval do parasitoide, matando o hospedeiro pouco antes da pupação. O resultado desse processo é o desenvolvimento de uma cutícula enrijecida no afídeo, denominada de múmia, que protege o parasitoide até a emergência do adulto. Coccinélídeos (Coleoptera, Coccinellidae), crisopídeos (Neuroptera: Chrysopidae) e sirfídeos (Diptera: Syrphidae), são alguns dos principais grupos de predadores associados a regulação populacional de afídeos. Os predadores consomem vários afídeos durante o seu desenvolvimento, sendo que alguns destes agem somente durante sua fase larval e outros também na fase adulta.

Para entender a dinâmica de afídeos de cereais foi desenvolvido um modelo baseado em agentes denominado “*Agent Based Insect Simulation Model*” (ABISM). Este modelo simula cada etapa do ciclo de vida dos afídeos e permite ajustar parâmetros dos fatores responsáveis pela mortalidade, como parasitismo, predação, precipitação pluviométrica e temperatura. Originalmente parametrizado para *R. padi* sob condições controladas e a campo, mas sem ação de inimigos naturais, o modelo e dados observados demonstraram, para a região norte do Rio Grande do Sul, que em havendo plantas hospedeiras disponíveis a população de *R. padi* atinge seu ápice no verão e seu patamar mais baixo no inverno.

A densidade populacional a campo deve estar relacionada à disponibilidade de plantas hospedeiras, mas também a variações na ação dos inimigos naturais. A parametrização da mortalidade por inimigos naturais é um dos desafios atuais para melhoria da capacidade de simulação do ABISM, uma vez que são afetados pelas condições ambientais e pela disponibilidade de alimento ou hospedeiros.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o papel dos inimigos naturais sobre a população de *R. padi* ao longo do desenvolvimento das culturas do trigo, milho e aveia-preta. Especificamente, objetivou-se: a) avaliar como oscila a ação de inimigos naturais ao longo do ano; b) determinar quais inimigos naturais são os principais responsáveis pela redução da população de afídeos e c) estimar taxas de mortalidade por inimigos naturais de acordo com dados observados, parametrizando-as no modelo de simulação ABISM.

Este trabalho está organizado de forma que após esta introdução, será apresentada uma revisão de literatura, que contém alguns aspectos conceituais sobre o sujeito (*R. padi*) e o objeto de pesquisa (inimigos naturais). No Capítulo I, são apresentados e discutidos dados sobre a influência de parasitoides e predadores na determinação do tamanho da população de afídeos, as variações do efeito regulatório exercido por estes insetos ao longo do tempo e a flutuação populacional de cada grupo de inimigo natural. No Capítulo II, é simulado e discutido o crescimento populacional de afídeos após o ajuste de diferentes taxas de mortalidade por parasitismo e predação inseridas na interface gráfica do modelo ABISM. Em seguida, são apresentadas considerações finais sobre os dois estudos e, por fim, apresenta-se a conclusão geral.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Características gerais dos afídeos

Os afídeos ou pulgões pertencem à Ordem Hemiptera, Subordem Sternorrhyncha, Superfamília Aphidoidea e Família Aphididae. Como insetos fitófagos, constituem um dos mais importantes grupos de pragas com cerca de 5.000 espécies conhecidas, sendo que destas em torno de 450 podem estar associadas a plantas cultivadas. São insetos pequenos, cujas principais estruturas utilizadas na identificação são as antenas, dois apêndices latero-abdominais denominados cornículos ou sifúnculos e uma codícula (cauda) no último segmento abdominal (BLACKMAN; EASTOP, 2017, p.1).

Estas pragas apresentam polifenismo, característica na qual, a partir de um único genótipo, diferentes fenótipos podem se desenvolver, conferindo-lhes enorme plasticidade. O polifenismo se refere ao modo de reprodução e às formas áptera e alada dos indivíduos, que lhes possibilita adaptarem-se ao ambiente e a condições desfavoráveis para seu desenvolvimento como a presença de inimigos naturais ou qualidade inadequada do hospedeiro (planta) (BRISSON, 2016; OGAWA; MIURA 2014).

Da maneira como ocorre em clima de inverno rigoroso, o ciclo de vida dos afídeos é denominado de holocíclico (partenogênese cíclica). Este é composto por uma fase sexuada, ovípara, para gerar novas combinações genotípicas, e outra assexuada, partenogenética e vivípara, que acelera o processo de multiplicação. Sem a necessidade de acasalamento com indivíduos machos, as fêmeas são capazes de originar rapidamente formas jovens (ninfas), com elevada prolificidade. Em ambientes tropicais e subtropicais, os afídeos multiplicam-se, ao longo do ano, somente assexuadamente, através de partenogênese obrigatória, como acontece nas condições brasileiras (DUAN 2017; OGAWA; MIURA 2014; SIMON 2018).

De maneira geral, a partenogênese cíclica que ocorre em regiões com inverno de temperaturas negativas, determina a necessidade da diapausa para garantir a sobrevivência das colônias. Nestas condições de frio rigoroso, uma vez por ano a fêmea, por meio de reprodução sexuada, produz ovos que são resistentes ao frio. Já a partenogênese obrigatória ocorre em regiões com inverno ameno, onde, sem a necessidade de diapausa, os indivíduos assexuados são favorecidos pela temperatura (DEDRYVER et al., 2019; DUAN et al., 2017).

Além do modo de reprodução, outra característica polifênica importante dos afídeos é a capacidade de, para o mesmo genótipo, ter a ocorrência de fêmeas ápteras e aladas. Enquanto as formas ápteras ficam encarregadas da reprodução dentro da mesma colônia, as aladas são definidas como menos férteis, porém capazes de dispersar-se para outros lugares, ampliando as possibilidades de explorar novas fontes de recurso (SIMON, 2018). Esta diferenciação nas colônias pode ser resultante de superpopulações (BAHLAI et al., 2014), mudanças na qualidade nutritiva da planta hospedeira (RÍOS MARTÍNEZ; COSTAMAGNA, 2018), presença de inimigos naturais (BALOG; MEHRPARVAR; WEISSER, 2013; COSTAMAGNA; MCCORNACK; RAGSDALE, 2013) e temperatura (CIVIDANES; SANTOS-CIVIDANES, 2010).

O movimento dos afídeos do seu ponto de origem em direção a outro lugar pode ocorrer de maneira “involuntária”, impulsionado por correntes de ar, força do impacto ou gravidade, ou de forma “intencional” induzido por forças intrínsecas governadas pela genética do organismo ou por perturbações extrínsecas como reações a estímulos detectados no ambiente. A atividade de vôo dos afídeos através do deslocamento intencional pode ser caracterizada de duas formas: migração, de longo alcance, ou “*appetitive dispersal*”, de curto alcance (dispersão secundária) (FERERES; IRWIN; KAMPMEIER, 2017 p. 197).

O aparelho bucal dos afídeos é do tipo sugador labial tetraqueta. O rostro de origem labial contém quatro estiletos (duas maxilas e duas mandíbulas). Os estiletos justapostos permitem a formação de dois canais internos: um por onde passa a saliva e outro onde passa o alimento líquido. Os pulgões introduzem estes estiletos

intercelularmente, passando pela epiderme e parênquima até atingir o floema (GULLAN; CRANSTON, 2017; FOOTITT; MAW, 2017). Durante a alimentação, os afídeos injetam na planta dois tipos de saliva. A primeira, denominada gelatinosa, é secretada durante o movimento dos estiletes levando à formação de uma bainha salivar sólida que isola os tecidos vegetais das peças bucais para facilitar a penetração e selar os locais de punção na célula. O outro tipo de saliva é aquosa, secretada durante a penetração dos estiletes e ingestão celular a fim de neutralizar os mecanismos de defesa da planta (WILL et al., 2013; WILL; VILCINSKAS, 2015).

2.2 Afídeos associados à cultura do trigo

Com variações quanto a espécies e época de ocorrência, os afídeos são comuns em todas as regiões tritícolas brasileiras, colonizando também outras gramíneas, cultivadas ou não, principalmente outros cereais de inverno como cevada, triticale e aveia, além de poáceas de verão como arroz, milho e sorgo. As espécies de pulgões mais comuns, e economicamente importantes, associadas ao trigo no Brasil são *Metopolophium dirhodum* (Walker, 1849), *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758), *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) e *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775) (SALVADORI; TONET, 2001).

Os centros de origem dos pulgões do trigo são a Ásia e Europa, regiões de onde provavelmente foram introduzidos nas Américas (GASSEN, 1984). No Brasil, até 1970, *S. graminum* era a espécie mais frequente, porém, naquela década, aliado à expansão das áreas de trigo no país, ocorreram surtos populacionais dos afídeos *M. dirhodum* e *S. avenae*, os quais por mais de dez anos constituíram-se como as espécies mais limitantes à produção nas regiões tritícolas de clima mais frio (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e sul do Paraná) (CAETANO; CAETANO, 1978; SALVADORI; TONET, 2001). Levantamentos populacionais feitos por ZÚÑIGA-SALINAS (1982) apontavam *M. dirhodum* e *S. avenae* como as espécies de afídeos com maior frequência de coleta nas regiões do Planalto Médio, do Alto Uruguai e das Missões no estado do Rio Grande do Sul.

Mais recentemente, estudos conduzidos nos anos de 2007 e 2008 indicaram mudança do perfil da população de pulgões de trigo em relação as décadas de 70 e 80. A prevalência de *M. dirhodum* foi reduzida enquanto outras espécies, como *R. padi*, tornaram-se mais comuns nas condições brasileiras (LAU et al., 2008; LAU et al., 2009). Atualmente, *R. padi* tem sido a mais frequente das espécies (57,6 – 68,6 % da população coletada em armadilhas Moericke) situação diferente à daquela época na qual sua presença na cultura representava menos de 1% do total dos afídeos (PARIZOTO et al., 2013; REBONATTO; SALVADORI.; LAU, 2015).

Esta espécie pode ter sido beneficiada pelas mudanças ocorridas no sistema de produção agrícola e seu aumento associado à capacidade de colonizar outras culturas que se tornaram mais importantes desde aquele período (REBONATTO; SALVADORI; LAU et al., 2015). Durante a década de 80, a sucessão soja-trigo era predominante nas principais regiões produtoras do Brasil. No entanto, na década de 1990, devido a razões socioeconômicas, houve decréscimo na área cultivada com trigo sendo o espaço anteriormente destinado a esta cultura ocupado pela aveia-preta em decorrência da implantação do sistema plantio direto (SANTOS et al., 2010), onde é usada como cultura de cobertura e para alimentação animal.

2.2.1 *Rhopalosiphum padi*

R. padi, denominado popularmente de pulgão-do-colmo ou pulgão-da-aveia, é capaz de colonizar o trigo em todos os estádios fenológicos e, embora seja frequentemente encontrado no colmo, pode ser observado em qualquer parte da planta. Sua forma áptera apresenta corpo ovalado com ampla variação de coloração, destacando-se mancha vermelha na base dos sifúnculos, os quais são de cor mais escura que o corpo. A forma alada possui abdômen marrom claro a verde escuro (PEREIRA, 2009; SALVADORI; TONET, 2001).

Em locais com inverno ameno, associado à escassez de determinadas espécies de cerejeira (*Prunus padus* na Europa, *Prunus virginiana* e *Prunus pennsylvanica* na América do Norte), que são plantas hospedeiras primárias de *R. padi*, este afídeo

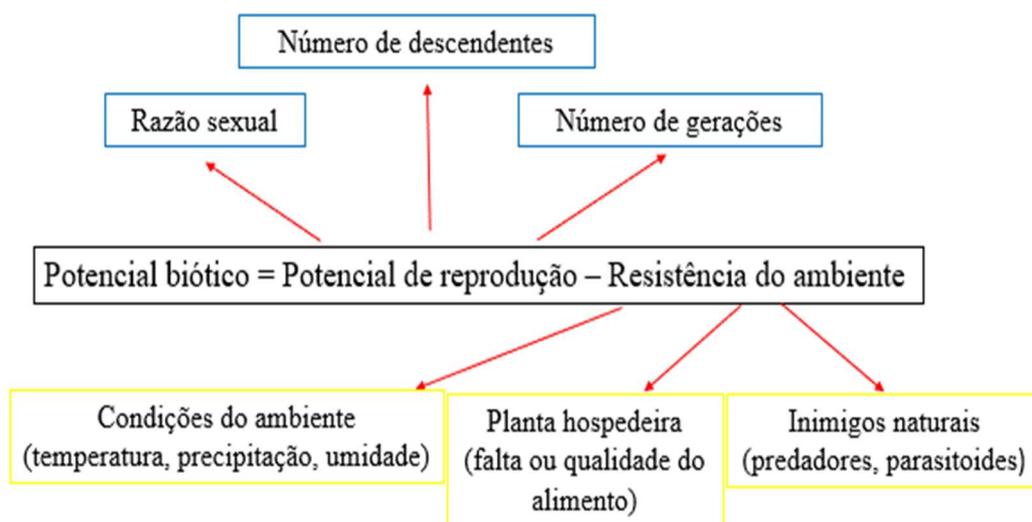
reproduz-se exclusivamente por partenogênese. Esta situação ocorre em regiões tropicais e subtropicais, como o Brasil, nas quais as formas aladas movem-se das culturas de cereais no outono e inverno para poáceas cultivadas na primavera e verão ou espontâneas (FINLAY; LUCK, 2011).

Esta espécie de afídeo ataca todas as principais culturas da família Poaceae, caracterizando-se como uma das mais importantes pragas de cereais em escala mundial. Além do trigo, *R. padi* utiliza como plantas hospedeiras, entre outras, aveia, cevada, triticale e centeio (BLACKMAN; EASTOP, 2017 p. 22; PEREIRA et al., 2016). No caso do trigo, a presença desta espécie afeta o número e peso de grãos, com perdas de produtividade resultantes podendo variar de 17 até 32 % dependendo da cultivar e do estágio de infestação das plantas (SAVARIS et al., 2013). Entre as espécies que ocorrem nos cereais, *R. padi* é considerada como o principal vetor de barley yellow dwarf virus (BYDV), em razão da sua eficiência de transmissão e por ser o vetor mais comumente encontrado em plantas hospedeiras (PARIZOTO et al., 2013).

2.3 Aspectos populacionais dos afídeos

Os afídeos possuem elevado potencial biótico, que é definido como a capacidade que qualquer espécie tem de se reproduzir e sobreviver. Trata-se de uma característica intrínseca e específica que representa o número máximo de indivíduos que a espécie pode produzir em condições ideais de ambiente. O crescimento populacional é determinado pelo potencial de reprodução, que se refere à velocidade com que o inseto se reproduz, e pela resistência do ambiente resultante de fatores físicos e biológicos que atuam contra o crescimento populacional (Figura 1). Quando os fatores favoráveis se sobressaem em relação aos desfavoráveis a população aumenta, caso contrário ela diminui (GALLO et al., 2002 p. 209).

Figura 1 - Fatores relacionados a determinação do potencial biótico dos insetos. Fonte: Autora, 2021. Adaptado de GALLO et al. (2002 p. 209).



As flutuações espaciais e temporais (sazonais e anuais) das populações de afídeos são influenciadas simultaneamente por fatores bióticos e abióticos (LESLIE et al., 2009). O desenvolvimento, sobrevivência, dispersão e a abundância das populações de herbívoros, de maneira geral, são determinados diretamente pelas condições climáticas e indiretamente por mudanças mediadas pela planta hospedeira, a nível de fisiologia até a perspectiva de paisagem (BALE et al., 2002). Adicionalmente, em agroecossistemas, parasitoides e predadores têm determinado a densidade populacional de várias espécies de afídeos (SCHMIDT et al., 2004).

Os afídeos estão no centro de um sistema que inclui as suas plantas hospedeiras e uma variedade de inimigos naturais que dependem deles para se alimentar. Todos esses organismos também estão sujeitos aos efeitos das condições meteorológicas e podem reagir de forma diferente às mudanças de temperatura resultando, por exemplo, em diferentes interações tróficas (HULLE et al., 2010; HARRINGTON et al., 1999).

2.3.1 Condições meteorológicas

Os insetos são ectotérmicos, o que significa que a temperatura corporal está correlacionada à temperatura do ambiente externo, sendo altamente sensíveis a variações deste fator. Consequentemente, a temperatura é o principal fator abiótico que regula o metabolismo, o crescimento, a movimentação e a reprodução dos insetos. A partir de uma temperatura basal, em que o desenvolvimento do inseto é nulo, a taxa de desenvolvimento aumenta com o aumento da temperatura até atingir a temperatura ótima. Além da temperatura ótima, rapidamente ocorre uma queda abrupta nas taxas de desenvolvimento até atingir temperaturas letais. Portanto, em ambientes com temperaturas próximas às ótimas, as taxas de desenvolvimento dos insetos são aceleradas, aumentando o número de gerações alcançadas em um intervalo de tempo (CASTEX et al., 2018; DAMOS; SAVOPOULOU-SOULTANI, 2012; FURLONG et al., 2017).

Para os afídeos, as temperaturas ótimas são variáveis entre as espécies, mas geralmente se encontram, na faixa de 20 a 25 °C (HULLE et al., 2010). No caso de *R. padi*, para a população do sul do Brasil, temperaturas constantes de 25 °C resultaram em maior taxa média de fecundidade e maior número final de afídeos (WIEST et al., 2021). A temperatura ainda influencia tanto o número de indivíduos alados produzidos quanto a sua capacidade de voar sendo que o aumento deste fator favorece a mobilidade dos insetos dentro de limites mais baixos, geralmente em torno de 13 a 16 °C e limite superior em torno de 31 °C (IRWIN; KAMPMEIER; WEISSER, 2007).

A influência da precipitação pluviométrica nas populações de afídeos está relacionada ao efeito mecânico sobre os insetos, que pode fazer com que os mesmos caiam ou até mesmo sejam eliminados da cultura (KARLEY et al., 2004). Com isso, altos níveis de precipitação acumulada e chuvas fortes são limitantes para o crescimento populacional dos afídeos (LESLIE et al., 2009). As espécies de afídeos que colonizam as partes superiores das folhas são mais atingidas pela chuva do que aquelas que preferem se alojar nas partes inferiores da planta (WALKER et al., 1984).

2.3.2 Sucessão de culturas dentro da paisagem agrícola

A população de afídeos no campo é mediada pelos efeitos diretos da paisagem sobre o próprio inseto e indiretamente por meio do efeito do contexto espacial nos inimigos naturais (MAISONHAUTE et al., 2017). Em sistemas de sucessão de culturas, ao longo do ano, as pragas se movem de uma cultura para outra. Para as espécies altamente móveis e polífagas, a paisagem agrícola representa um mosaico em constante mudança de recursos e habitats que, em certos pontos no tempo, pode resultar em uma alta densidade populacional da praga (MACFADYEN et al., 2015 a).

De maneira geral, espera-se uma relação positiva entre as culturas agrícolas e a abundância das pragas, mais especificamente quando uma praga especializada e seu hospedeiro específico são considerados. Por outro lado, em habitats não cultivados (não simplificados) a abundância destas pragas pode ser reduzida através da mortalidade causada por inimigos naturais que são favorecidos nestas situações (VERES et al., 2013). A dinâmica das pragas e dos inimigos naturais pode ser impactada pela heterogeneidade da paisagem dentro de dois aspectos: composicional (número e proporção dos diferentes tipos de cobertura) e configuracional (arranjo espacial dos diferentes tipos de cobertura) (FAHRIG et al., 2011).

Os inimigos naturais necessitam de uma infraestrutura ecológica adequada dentro da paisagem agrícola que forneça recursos como alimento para os adultos, presas ou hospedeiros alternativos e abrigo contra condições adversas. Nesse sentido, os habitats naturais ou seminaturais, como florestas, margens de campos cultivados e pastagens permanentes, são considerados como de extrema importância para os inimigos naturais (LANDIS et al., 2000). Porém durante a intensificação agrícola, a complexidade geral da paisagem é reduzida e os habitats naturais fragmentados, resultando em implicações importantes para a biodiversidade e função do ecossistema (BENTON et al., 2003; TSCHARNTKE et al., 2002).

Como alternativa às paisagens onde os recursos não agrícolas são escassos, a ação dos inimigos naturais no sistema pode ser sustentada através de uma abordagem que

indica o cultivo de plantas entre as estações da cultura principal ou mistura de diferentes espécies de plantas cultivadas, tanto em escala espacial quanto temporal, para diminuir o período de tempo em que os inimigos naturais enfrentariam condições de solo descoberto pela ausência do cultivo agrícola (SNYDER, 2019). Então, conectar as culturas agrícolas em diferentes estações a fim de implementar um habitat sequencial pode beneficiar os inimigos naturais através de intervalos de dispersão mais curtos (HAAN et al., 2020).

O movimento dos insetos através dos diferentes habitats, incluindo entre manchas manejadas e semi-naturais, é algo comum sendo este fator responsável por influenciar a estrutura da comunidade (MACFADYEN; MULLER, 2013; MACFADYEN et al., 2015 b) além de poder aumentar ou interromper importantes serviços ecossistêmicos, como a regulação populacional de pragas (RUSCH et al., 2013). Diante disso, a fim de facilitar o movimento dos inimigos naturais, o ideal seria projetar paisagens agrícolas para suprimir as populações de pragas nos sistemas agrícolas através da conectividade espacial de recursos (SCHELLHORN et al., 2015).

2.3.3 Inimigos naturais

Entre os fatores bióticos que proporcionam a regulação da população de afídeos, tem-se como principais os parasitoides e os predadores (SINGH; SINGH, 2016). Estes inimigos naturais, abrangem algumas espécies especialistas e outras generalistas em seus hábitos alimentares, mas que de qualquer forma desempenham um papel importante na retenção do crescimento populacional de afídeos (KÖK et al., 2020). Em geral, o impacto do inimigo natural na dinâmica dos afídeos depende de vários fatores. Dentre estes a localização do alvo é fundamental e, uma vez encontrada a colônia de afídeos, a voracidade potencial de um predador ou a fecundidade potencial de um parasitoide são determinantes na sua contribuição para a redução dos danos causados pela praga (BRODEUR et al., 2017).

Os parasitoides de afídeos, em sua grande maioria, são himenópteros pertencentes às famílias Braconidae (subfamília Aphidiinae) e Aphelinidae (BOIVIN; HANCE; BRODEUR, 2012). Aphidiinae é uma subfamília monofilética de Braconidae

especializada em afídeos, a qual inclui os gêneros *Aphidius*, *Praon*, *Diaeretiella*, *Trioxys* e *Ephedrus* como os mais abundantes e mais usados no controle biológico destas pragas (KAMBHAMPATI; VÖLKL; MACKAUER, 2000; WEI et al., 2005). Estes parasitoides são solitários (apenas um indivíduo completa seu desenvolvimento dentro do hospedeiro) e coinobiontes (a larva do parasitoide se desenvolve no hospedeiro que continua a se alimentar e crescer) (SINGH; SINGH, 2016).

O parasitismo se inicia quando a fêmea deposita seu ovo dentro do afídeo. A larva eclode e consome o conteúdo interior do hospedeiro e, no último ínstar, forma um casulo dentro ou sob o exoesqueleto vazio do afídeo, que morre pouco antes da pupação do parasitoide. O exoesqueleto enrijecido do afídeo, que recebe o nome de “múmia”, protege o parasitoide até a emergência do adulto (SINGH; SINGH, 2016). No processo de oviposição, os parasitoides possuem o comportamento de, primeiramente, localizar o habitat do hospedeiro para depois, dar sequência às etapas de localização, reconhecimento e aceitação do hospedeiro (VINSON, 1998).

Quanto aos predadores responsáveis por contribuir com a regulação na densidade de afídeos, destacam-se, entre outros, larvas e adultos de coccinelídeos (Coleoptera, Coccinellidae) e larvas de sirfídeos (Diptera: Syrphidae) e de crisopídeos (Neuroptera: Chrysopidae) (SALVADORI; TONET, 2001; BRODEUR et al., 2017).

Os besouros da família Coccinellidae, comumente chamados de joaninhas, compreendem quase 6.000 espécies descritas em todo o mundo (SEAGO et al., 2011). Os hábitos alimentares das joaninhas são geralmente reconhecidos em três categorias principais: predação (zoofagia), alimentação de plantas (fitofagia) e alimentação de fungos (micofagia). A maioria dos coccinelídeos preda os insetos produtores de melada (substância espessa rica em açúcares) de hemípteros da subordem Sternorrhyncha, predominantemente afídeos, sendo os gêneros de joaninhas mais comuns: *Adalia*, *Adonia*, *Brumoides*, *Coccinella*, *Cheilomenes*, *Exochomus*, *Hippodamia*, *Oenopia*, *Micraspis*, *Scymnus* (GIORGI et al., 2009; SINGH; SINGH, 2016).

Muitas espécies de coccinelídeos predadores apresentam uma amplitude alimentar que faz com que eles utilizem fontes alimentares alternativas na ausência de suas preferidas e que são essenciais para completar seu desenvolvimento larval e oviposição dos adultos. A exploração de espécies de presas secundárias ou menos favoráveis, além de melada, pólen, seiva, néctar e vários fungos são fontes alternativas de alimento utilizada por predadores de afídeos (LUNDGREN, 2009; GIORGI et al., 2009).

O papel dos coccinelídeos na contenção de afídeos nos sistemas agrícolas pode variar de um papel menor a reduções significativas na população destas pragas. Estes insetos benéficos, apesar de raramente desempenharem um papel de regulação a longo prazo na dinâmica populacional das espécies de afídeos nos agroecossistemas, são considerados como predadores eficazes por reduzirem as densidades dentro da estação de cultivo. Então, a conservação de joaninhas através da presença de presas de afídeos não - alvo resulta em redução confiável da espécie de afídeo a qual é objeto de controle em culturas de cereais (OBRYCKI et al., 2009).

Sirfídeos representam uma das maiores famílias de dípteros. Cerca de um terço das espécies fazem parte da subfamília Syrphinae, sendo os estágios imaturos (larvas) destes insetos predadores de afídeos. Os adultos de sirfídeos se parecem com abelhas e vespas e são visitantes diurnos ativos das flores, alimentando-se de pólen e néctar. As larvas se alimentam perfurando a cutícula do afídeo e sorvendo o conteúdo interior do mesmo. Estes insetos passam por três estádios larvais e, no último, empupa dentro de um pupário, o qual geralmente localiza-se na planta em que houve o consumo da última presa. Os tempos de desenvolvimento variam entre as espécies e são influenciados pelas presas e pela temperatura (BRODEUR et al., 2017; RODRÍGUEZ-GASOL et al., 2020).

As fêmeas adultas de sirfídeos geralmente ovipositam perto das suas presas pois as larvas neonatas possuem capacidade de dispersão limitada. Vários fatores são determinantes na escolha do local mais adequado para oviposição então a seleção de manchas de afídeos deve refletir o valor nutricional, o risco de predação e a pressão de competição a fim de beneficiar o desenvolvimento da prole (ALMOHAMAD et al., 2009). Além disso, os sirfídeos estão entre os predadores de afídeos mais abundantes em

muitos sistemas agrícolas (TENHUMBERG; POEHLING, 1995; GARDINER et al., 2010) e diferente de muitos outros insetos afidófagos eles têm a capacidade de localizar as colônias de afídeos precocemente durante a temporada (DIB et al., 2010). Essas características tornam os sirfídeos um dos mais eficazes agentes regulatórios das populações de afídeos (DIB et al., 2010; HATT et al., 2017; SCHMIDT et al., 2004).

A contenção do crescimento populacional das pragas se torna mais eficiente quando os inimigos naturais têm um ciclo de vida que é estritamente sincronizado com o hospedeiro, como é o caso dos parasitoides. Já os predadores, por serem mais generalistas, conseguem alimentar-se de presas alternativas podendo, desta forma, estar presentes na área antes da ocorrência da praga constituindo-se como a primeira forma de controle (GONTIJO; BEERS; SNYDER, 2015). Nesse sentido, é possível afirmar que a maior biodiversidade de inimigos naturais fortalece o controle biológico ao permitir que diferentes espécies se complementem através do uso de nichos ecológicos ou recursos diferenciados (STRAUB; FINKE; SNYDER, 2008).

Deve-se considerar também que estes inimigos naturais, por competirem pelo mesmo recurso, no caso os afídeos, podem se envolverem em interações predatórias. Este processo pode ser desencadeado frequentemente por necessidades nutritivas, tais como períodos de escassez de presas alternativas ou menor valor nutritivo do alimento em questão. Ainda, assume-se que à medida que aumenta a densidade das presas, a predação intraguilda diminui (KHAN; YOLDAS, 2018). Quando este fato ocorre entre predadores e parasitoides, estes últimos são sempre considerados como presas e, em consequência, o controle da praga por estas espécies é negativamente afetado (FRAGO, 2016).

2.4 Controle biológico de afídeos do trigo no Brasil

Na década de 1970, o parasitismo natural em afídeos, que ocorria na região sul do Brasil, por algumas poucas espécies aí já presentes era considerado ineficaz em termos de controle biológico, pois ocorriam surtos populacionais o que resultava no uso intensivo de inseticidas. Os produtos químicos eram utilizados sem muitos critérios e, desta forma, além de atingir os afídeos acabavam afetando também os poucos inimigos naturais

endêmicos presentes no sistema (PIMENTA; SMITH, 1976; SALVADORI; SALLES, 2002, p. 431).

Devido a essa problemática, em 1978 a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária por meio do Centro Nacional de Pesquisa de Trigo (Embrapa Trigo), juntamente com a FAO, desenvolveu o projeto denominado Controle Biológico dos Pulgões de Trigo, o qual encontrava-se inserido no Programa de Controle Integrado dos Pulgões do Trigo. Então, por meio do método clássico de controle biológico, foi realizada a introdução de inimigos naturais exóticos destas pragas, sendo que até 1982 haviam sido introduzidas 12 espécies de himenópteros parasitoides e duas espécies de coccinelídeos predadores (GASSEN; TAMBASCO, 1983; SALVADORI; SALLES, 2002, p. 435).

Os parasitoides foram multiplicados no insetário da Embrapa Trigo e liberados em diferentes regiões. No começo do programa as liberações foram sistemáticas e dirigidas para a região do Planalto Sul-Riograndense através de integrantes do programa em áreas com trigo de 2 a 3 hectares, quando as lavouras apresentavam densidade mínima de três pulgões por afilho. Posteriormente, as liberações foram realizadas de forma esporádica em diversas regiões de Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso do Sul (SALVADORI; SALLES, 2002, p. 438).

A meta proposta inicialmente pelo programa era atingir uma porcentagem de parasitismo que viesse a contribuir com 10 a 15% na mortalidade dos pulgões, porém, este objetivo foi ultrapassado resultando em uma ampla redução no uso de inseticidas em 90 % das lavouras do Rio Grande do Sul. No Paraná, onde foram liberados poucos parasitoides, a utilização de inseticidas químicos para controle dos afídeos manteve-se elevada (GASSEN; TAMBASCO, 1983). O programa focou no controle biológico através dos parasitoides visto que seriam o melhor complemento em relação aos outros agentes que já existiam no país como os predadores, entomopatógenos e os parasitoides endêmicos (SALVADORI; SALLES, 2002, p. 443).

2.5 Modelos de simulação

Modelos são caracterizados como uma representação abstrata e simplificada de alguma realidade, elaborados para explicar fenômenos observados ou prever futuros fenômenos. Já a simulação, através de um programa de computador, se traduz na representação desse modelo. Logo, um modelo de simulação está relacionado aos algoritmos da computação, expressões matemáticas e equações que enquadram o comportamento e desempenho de um sistema real (ABAR et al., 2017).

Os modelos de simulação são representações que incorporam o tempo e as mudanças que ocorrem ao longo do tempo (CARSON, 2005). Sua utilização torna possível a simplificação de vários processos biológicos até suas partes constituintes, as quais podem interagir dentro de uma estrutura de sistemas maiores. A partir disso, o impacto de determinada praga no sistema poderá ser avaliado de maneira prática e auxiliar na criação de ferramentas para tomada de decisão de controle (DUFFY; FEALY; FEALY, 2017).

Um dos primeiros modelos de simulação de afídeos foi desenvolvido por Hughes; Gilbert (1968) e mais tarde Gilbert; Hughes (1971), que focaram nas inter-relações da espécie *Brevicoryne brassicae* (L.) e seus inimigos naturais. Os autores mostraram como as várias relações ecológicas, separadamente observadas, podem ser montadas para construir um modelo biológico que se aproxime ao máximo dos eventos populacionais observados no campo. O crescimento populacional do afídeo *S. avenae* também foi descrito através de um modelo de simulação, baseado na linguagem Fortran, que levou em consideração o desenvolvimento da cultura e os efeitos de coccinelídeos, parasitoides e entomopatógenos (CARTER, 1985).

Outro modelo de simulação, denominado BYDV PREDICTOR, foi elaborado com a finalidade de prever a propagação da virose do nanismo amarelo da cevada, no sudoeste da Austrália. Neste caso, o modelo foi desenvolvido através do *software* Stella baseando-se em dados de pesquisas publicadas, refinadas com dados de campo de diferentes locais e de experimentos conduzidos em ambiente controlado. Este modelo foi

incorporado a um sistema de suporte a tomada de decisão no direcionamento do controle químico dos afídeos utilizado por fazendeiros para prevenir a propagação do vírus no outono e inverno (THACKRAY et al., 2009).

2.5.1 Modelo Baseado em Agentes

Os Modelos Baseados em Agentes (MBA) incluem uma classe de modelos computacionais os quais são utilizados na simulação de ações e interações de agentes independentes, considerando seus efeitos no sistema como um todo (RAO; GEORGEFF, 1991). Neste caso, constitui-se um paradigma onde os seres humanos ou animais são modelados como agentes que interagem com alguns de seus pares e o ambiente. Assim, a modelagem baseada em agentes é definida como a representação de um sistema real (BONABEAU, 2002; CHAKRABORTI et al., 2011).

Um “agente” deve se destacar no ambiente devido ao seu estado espacial, temporal ou atributo funcional, ou seja, deve ter uma identidade própria. Além disso, deve ter autonomia que também se aplica as ações resultantes do seu comportamento, o que possibilita o seu envolvimento em tarefas e atividades sem controle externo direto (TOEBE, 2014). Desde organismos simples até seres vivos complexos podem ser representados como agentes (SHALIZI, 2006).

Os benefícios de utilizar a abordagem de modelos baseados em agentes se dá por três razões principais: capacidade de capturar fenômenos emergentes, que ocorrem como possíveis resultados das interações dos elementos individuais do sistema; fornece uma descrição natural do sistema, o que faz com que o modelo se pareça mais com a realidade; e sua característica de flexibilidade, ou seja, apresenta facilidade em adicionar mais agentes ao modelo, ajustar a complexidade dos agentes ou ainda alterar os níveis de descrição e agregação (BONABEAU, 2002).

Um modelo baseado em agentes para simular a dinâmica de pragas agrícolas foi proposto por Toebe (2014) e modificado por Wiest (2019), passando a ser denominado de *framework* ABISM- *Agent Based Insect Simulation Model*, parametrizado para avaliar

o crescimento populacional do afídeo *R. padi*. ABISM é caracterizado por ser um modelo genérico, expansível e parametrizável, desenvolvido na linguagem de programação Java. Para fornecer ao usuário uma interface gráfica na *web* foi desenvolvido o ABISM-GUI (*Agente Based Insect Simulation Model- Graphical User Interface*), no qual é possível realizar simulações inserindo dados em diferentes menus, sendo eles (WIEEST, 2019):

1) Dados iniciais (*Initial data*) - responsável por armazenar informações referentes ao local do experimento (*local*), datas de semeadura (*Date of sowing*), início (*Date of infestation*) e término (*Date of harvest*) da simulação e duração do experimento (*Duration of the experiment*).

2) Dados meteorológicos (*Weather data*) - é possível escolher entre três regimes térmicos (*Thermal regime*): fixo (*Fix*), sem variação de temperatura; flutuante (*Flut*), onde é necessário inserir manualmente a temperatura mínima (*Minimum temperature*) e máxima (*Maximum temperature*); e variável (*VarAPI*), o qual deve-se selecionar entre as opções qual a estação meteorológica (*Weather station*) será utilizada.

3) Dados de campo (*Tillage data*) - neste menu é possível registrar os dados relacionados ao número de linhas de plantio (*Rows*), número de plantas por linha (*Plants/row*), número total de plantas (*Total plants*), a planta inicial que receberá ou na qual foi observada a infestação (*Initial plant*), a cultura (*Crop*), cultivar (*Grow crop*) e a variável que irá controlar a capacidade de suporte de cada planta no sistema de simulação (*Amount of aphids/cm²*).

4) Dados iniciais da praga (*Initial pest data*) - é referente às informações do primeiro afídeo que colonizou o sistema. Deve ser inserida a fase inicial, se adulto ou ninfa (*Initial Phase*), se a forma inicial é alada ou áptera (*Initial Shape*), o estágio de desenvolvimento (*Initial Stage Development*), temperatura inicial acumulada (*Initial Accumulated Temperature*), dias de vida (*Initial Days Alive*) e quantidade inicial de pragas (*Amount Of Starting Pests*)

5) Índices de desenvolvimento (*Development thresholds*) – apresenta uma ponderação de graus dias de uma ninfa (*Nymph Index*), adulto (*Adult Index*) e o fim da vida do inseto (*Dead Index*) além de estabelecer os limiares da fase pré-reprodutiva (*Pre-Repro Index*), reprodutiva (*Repro Index*) e pós-reprodutiva (*Pos-Repro Index*).

6) Controle de mortalidade (*Mortality control*) – abrange os fatores bióticos e abióticos que podem resultar no fim da vida do inseto. Aqui é possível habilitar a mortalidade por parasitismo (*Mortality from parasitism*), predação (*Mortality from predation*), chuva (*Rainfall mortality*) e baixa temperatura (*Low temperature mortality*).

A interface ABISM-GUI além de ser utilizada para estudos de modelagem pode ser aproveitada como uma ferramenta de investigação da dinâmica populacional de afídeos, onde através da alteração dos parâmetros de cada menu é possível avaliar as consequências resultantes (WIEST, 2019).

3 CAPÍTULO I

Influência de parasitoides e predadores sobre o crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi* ao longo do sistema de sucessão trigo, milho, aveia-preta.

3.1 Resumo

Afídeos são importantes pragas para a cultura do trigo, e *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) é uma das principais espécies. Devido à alta taxa reprodutiva e ao curto ciclo de vida, as populações de afídeos podem atingir rapidamente níveis que causam danos à produção de grãos. O crescimento das populações de afídeos é reduzido por inimigos naturais (IN), embora esse efeito não seja constante ao longo do tempo. Este estudo descreve essas variações avaliando o efeito de parasitoides e predadores no crescimento populacional de *R. padi* ao longo do ciclo das safras de trigo, milho e aveia preta durante um ano (agosto/2019 a julho/2020) no norte do Rio Grande do Sul, Brasil. Bandejas com plantas de trigo infestadas com *R. padi* foram seletivamente submetidas ao efeito de IN em gaiolas com diferentes malhas de tecido. As populações de afídeos desenvolvidas na ausência de IN apresentaram densidades significativamente maiores do que as populações sob a ação de parasitoides e predadores. Ao longo de um ano, a redução populacional exercida por parasitoides foi de 98,1 % e por parasitoides mais predadores de 99,3%. Houve variação no crescimento populacional de *R. padi* e da ação de inimigos naturais ao longo do período amostrado. Na ausência de inimigos naturais o maior número de afídeos ocorreu em janeiro. O maior número de afídeos e, conseqüentemente, a menor redução populacional foram observados para o sistema de restrição nos meses de março e abril e para o sistema aberto no mês de maio. As espécies de parasitoides *Aphidius platensis*, *Aphidius uzbekistanicus* e *Aphidius rhopalosiphi* foram abundantes durante o desenvolvimento da cultura do trigo (agosto a novembro). Foram constatadas apenas duas espécies de sirfídeos coletadas em armadilha amarela: *Toxomerus duplicatus* e *Allograpta exotica*. Quanto aos coccinelídeos, as espécies observadas em maior quantidade durante todo o período de monitoramento foram *Harmonia axyridis*, *Hippodamia convergens* e *Eriopis connexa*. A contenção do crescimento populacional de *R. padi* como resultado da ação de parasitoides e predadores, apesar das variações observadas, foi efetiva durante todo o período de monitoramento.

Palavras-chave: 1. Controle biológico. 2. Populações de afídeos. 3. Manejo Integrado de Pragas. 4. Inimigos naturais. 5. Sistemas de produção agrícola.

3.2 Introdução

O Manejo Integrado de Pragas (MIP) tem como princípio o controle sustentável das pragas agrícolas (RICUPERO et al., 2020). O controle sustentável requer a utilização de várias medidas de manejo, sobretudo aquelas que restauram o equilíbrio das cadeias

tróficas envolvidas nos sistemas produtivos. O controle biológico, que é um meio de suprimir as populações de pragas através de organismos vivos (VAN DRIESCHE; HODDLE, 2009), tem sido pouco empregado nos sistemas de cultivo, conseqüentemente o uso de inseticidas é a medida mais utilizada no manejo de pragas (NARANJO; ELLSWORTH; FRISVOLD, 2015). Para a implementação do controle biológico dentro do MIP, é necessário demonstrar a regulação exercida por inimigos naturais sobre a população de pragas (GILES et al., 2017).

Entre as pragas agrícolas, destacam-se os afídeos (Hemiptera: Aphididae). Esses insetos devem ter controle adequado a fim de evitar danos diretos devido à sucção de seiva do floema das plantas e, principalmente, a transmissão de fitovírus (DEDRYVER; LE RALEC; FABRE, 2010). Nesse sentido, o controle biológico precisa ser considerado na tomada de decisão no manejo de afídeos, procurando minimizar o uso de inseticidas químicos no sistema (JOSHI; RABINDRA; RAJENDRAN, 2010). Para tanto, o conhecimento do efeito dos inimigos naturais sobre o crescimento populacional destes insetos, assim como sua variação ao longo do tempo são importantes para estabelecer ações de controle suplementares quando necessário a fim de reduzir os danos causados por afídeos.

Os afídeos constituem-se como as principais pragas para a cultura do trigo (SALVADORI; TONET, 2001). *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) é uma das espécies de maior importância para os cereais em escala mundial (BLACKMAN; EASTOP, 2017). Para a região norte do Rio Grande do Sul, entre as espécies de afídeos associadas a cereais de inverno, *R. padi* é predominante (REBONATTO; SALVADORI; LAU, 2015), além de ser caracterizado como o principal e mais eficiente vetor de barley yellow dwarf virus (BYDV) (PARIZOTO et al., 2013). Estes insetos possuem elevado potencial biótico devido à sua prolificidade e ao curto ciclo de vida, podendo ocorrer explosões populacionais em condições favoráveis (WIEST et al., 2021). Nos sistemas de cultivo, a densidade populacional das pragas é afetada por fatores abióticos, como condições meteorológicas, e bióticos, como inimigos naturais (SILVA et al., 2017).

A ação dos inimigos naturais caracteriza o controle biológico, onde organismos benéficos, como parasitoides, predadores e patógenos proporcionam a regulação da população de pragas e mantêm o equilíbrio do agroecossistema (PARRA, 2014; SINGH; SINGH, 2016). No Brasil, o projeto “Controle Biológico dos Pulgões de Trigo” foi desenvolvido, em 1978, pela Embrapa Trigo e parceiros, sendo doze espécies de parasitoides e duas espécies de coccinelídeos predadores introduzidas e liberadas nas regiões produtoras de trigo no sul do país (GASSEN; TAMBASCO, 1983). Esse projeto foi muito exitoso, resultando em redução das populações de afídeos (ZUNIGA-SALINAS, 1982). Subsequentemente, alterações das paisagens agrícolas também contribuíram com alteração na predominância das espécies de afídeos (REBONATTO; SALVADORI; LAU et al., 2015).

A grande maioria dos parasitoides de afídeos é de himenópteros pertencentes às famílias Braconidae (subfamília Aphidiinae) e Aphelinidae. O parasitismo inicia-se quando a fêmea deposita seu ovo dentro do afídeo e, a partir disso, ocorre o crescimento larval e morte do hospedeiro pouco antes da pupação, resultando no desenvolvimento de uma cutícula enrijecida, denominada de múmia (BOIVIN; HANCE; BRODEUR, 2012). Predadores matam suas presas, alimentando-se delas e incluem, entre outros, larvas e adultos de coccinelídeos (Coleoptera, Coccinellidae), larvas de crisopídeos (Neuroptera: Chrysopidae) e sirfídeos (Diptera: Syrphidae) (BRODEUR et al., 2017).

Estes dois grupos de inimigos naturais apresentam diferenças. Os parasitoides comumente apresentam maior especificidade em relação a praga, além da busca pelo hospedeiro ser mais apurada (GERVASSIO et al., 2019). Os predadores são, normalmente, generalistas em seus hábitos alimentares, isto é, atacam uma ampla variedade de espécies de insetos (SINGH; SINGH, 2016). Esses dois grupos de inimigos naturais coexistem em comunidades naturais e são potencialmente envolvidos em interações que podem ocasionar diferentes resultados relacionados a regulação populacional do inseto (LETOURNEAU et al., 2009).

Uma forma de estudar os efeitos de inimigos naturais em condições de campo é por meio de métodos que permitam avaliar separadamente suas ações. A exclusão de

predadores voadores como sirfídeos e parasitoides levou a uma população 94% maior de *R. padi* em relação à testemunha com a presença de inimigos naturais (SCHMIDT et al., 2004). Predadores reduziram em 88% o número de afídeos de cereais em comparação com situações em que nenhum destes agentes de controle estavam presentes (HOLLAND et al., 2012). No norte da China, a ação de inimigos naturais em gaiolas de campo aberto, onde tanto parasitoides quanto predadores eram encontrados, foi responsável por reduzir a densidade de afídeos a níveis de 98; 53,8 e 59,3%, em três anos consecutivos de estudo, respectivamente (ALI et al., 2018). Todos estes estudos avaliaram o efeito de inimigos naturais apenas em uma safra, no caso na da cultura de interesse.

Variáveis meteorológicas como temperatura e precipitação, além do padrão de cultivo, podem afetar a dinâmica e a diversidade populacional de inimigos naturais que atacam espécies de afídeos contribuindo com efeitos mais fortes ou fracos destes agentes de controle (DIEHL et al., 2013). Levando isso em consideração, Ali et al. (2018) apontaram a necessidade de avaliar a dinâmica populacional e efeito dos inimigos naturais nos diferentes cultivos em sistema de sucessão associados à cultura do trigo, para estabelecer estratégias de manejo integrado que sejam abrangentes.

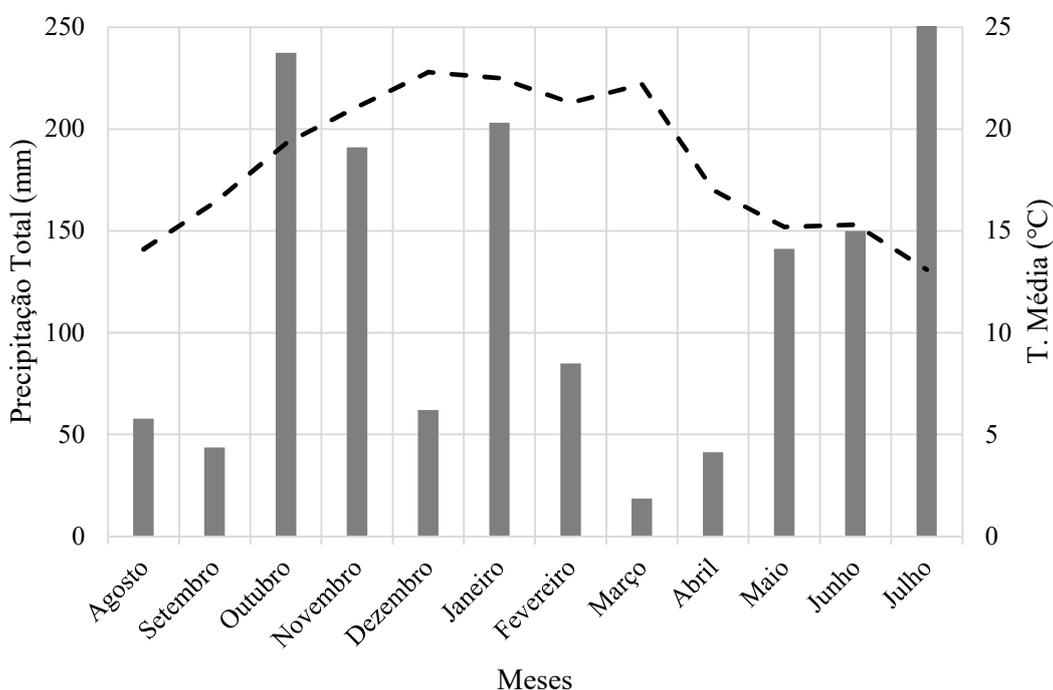
Para descrever as oscilações de populações de afídeos é necessário considerar, primeiramente, seu potencial de crescimento populacional para o clima e condições meteorológicas do local. O passo seguinte é adicionar os produtores primários do sistema (culturas hospedeiras que compõem a paisagem agrícola, suas sucessões, seus estádios de desenvolvimento). A seguir, adicionar o efeito de organismos cujo ciclo de vida é ligado aos afídeos, como patógenos, predadores e parasitoides. Para o norte do Rio Grande do Sul, sul do Brasil, o impacto de parasitoides e predadores sobre a população final de *R. padi* ainda não foi quantificado, porém espera-se que a regulação resultante da ação destes inimigos naturais seja variável ao longo do ano.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo quantificar o efeito de parasitoides e predadores sobre o crescimento populacional de *R. padi*, relacionando-o à variação populacional destes inimigos naturais, durante o desenvolvimento das culturas de trigo, milho e aveia-preta, no norte do Rio Grande do Sul, Brasil.

3.3 Material e métodos

O experimento foi realizado em área experimental de aproximadamente 5.000 m² da Embrapa Trigo (Passo Fundo, RS, 28° 15' S, 52° 24' O), de agosto de 2019 a julho de 2020. Segundo a classificação de Köppen, o clima local é descrito como subtropical úmido (Cfa) com chuvas bem distribuídas durante todo o ano e temperatura média superior a 22 °C no mês mais quente (ALVARES et al., 2013). A precipitação total e a temperatura média para cada um dos períodos amostrais podem ser observadas na Figura 2. O estudo foi conduzido em campo manejado sob sistema de plantio direto, com a sucessão de safras: trigo (*Triticum aestivum* L.) (agosto - novembro, 2019), milho (*Zea mays* L.) (dezembro, 2019 - março, 2020) e aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) (abril - julho, 2020).

Figura 2 - Precipitação total e temperatura média mensal durante o período de agosto de 2019 a julho de 2020 para Passo Fundo, RS, Brasil. Barras correspondem a precipitação total e linhas tracejadas representam a temperatura média. Passo Fundo, 2021

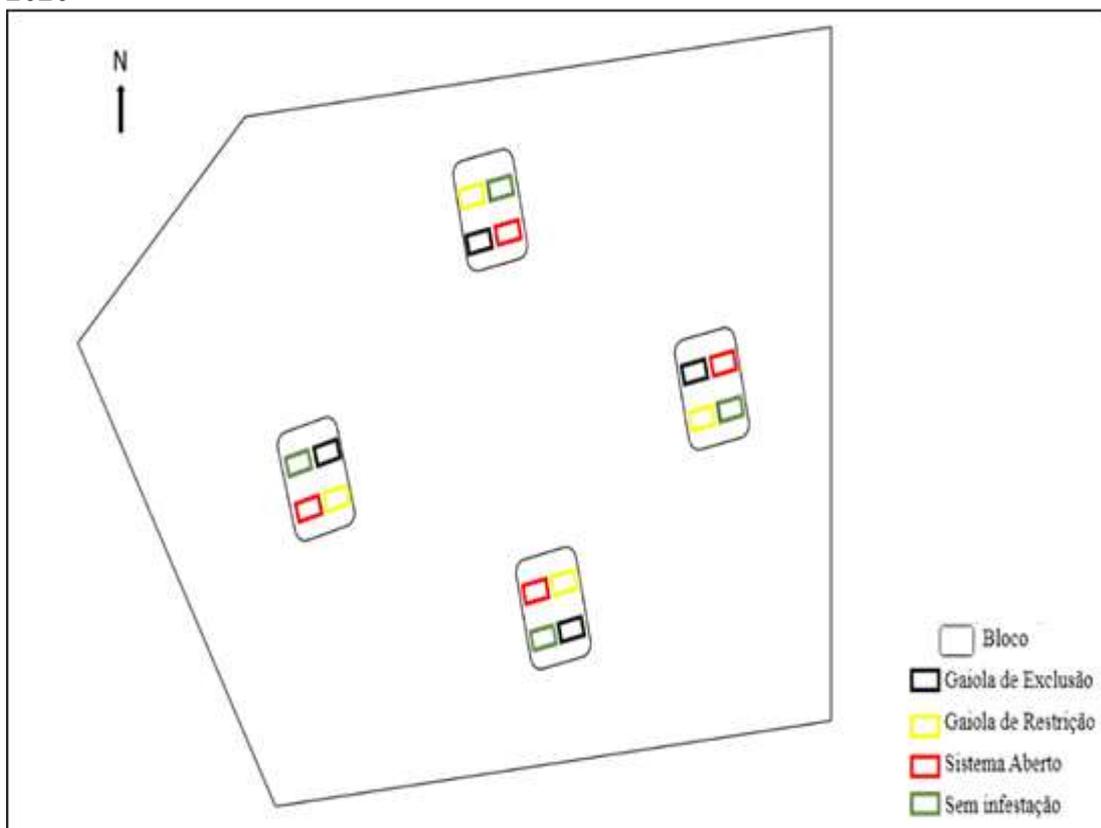


Três diferentes níveis de restrição ao acesso de inimigos naturais à plantas de trigo infestadas com afídeos da espécie *R. padi*, foram avaliados: a) sistema de exclusão, plantas sob gaiolas fechadas com tecido do tipo “voil” que não permitiram a entrada de nenhum predador ou parasitoide, protegendo os afídeos deste efeito; b) sistema de restrição, plantas sob gaiolas fechadas com tecido com abertura de malha de 2×2 mm que permitiram a entrada somente de parasitoides, excluindo predadores e; c) sistema aberto, plantas de trigo sem nenhum tipo de gaiola possibilitando o livre acesso de inimigos naturais. Um quarto sistema, aberto como o descrito anteriormente (c), porém sem a infestação artificial de afídeos, sujeito apenas à infestação natural, foi estabelecido para avaliar a população de afídeos migrantes.

Para cada sistema foram colocadas quatro unidades experimentais que consistiram de bandejas (65 cm de comprimento x 40 cm de largura), semeadas com trigo, da cultivar Embrapa 16, em 4 linhas de semeadura igualmente espaçadas. Após a emergência, foram mantidas 22 plantas por linha, totalizando 88 plantas por bandeja, com o propósito de reproduzir a densidade e distribuição das plantas adotadas em lavouras comerciais. No estágio de duas a três folhas expandidas, as plantas dos três primeiros tratamentos foram infestadas com exemplares avirulíferos de *R. padi* em estágio pré-reprodutivo. Para obtenção desses afídeos, matrizes provenientes de criação massal da Embrapa Trigo eram selecionadas e transferidas para vasos com trigo, alocadas em uma gaiola de madeira fechada de forma a impedir a entrada e a saída dos afídeos, mantida em câmara climatizada com temperatura constante de 25 °C. Vinte e quatro horas após, as matrizes eram retiradas da planta, deixando-se apenas as suas ninfas. Quatro dias após a retirada das matrizes, as ninfas eram utilizadas para a infestação das plantas nas bandejas. Cada bandeja era infestada com 18 afídeos, transferidos com a ajuda de um pincel e distribuídos aleatoriamente nas plantas. Os afídeos eram aclimatados por aproximadamente 72 horas em câmara a 23 °C e fotoperíodo de 12 horas. Após esse período, as bandejas eram levadas para o campo. Quatro bandejas (uma de cada tratamento) eram colocadas embaixo de uma estrutura de ferro com telhado de propileno ondulado translúcido a fim de evitar o efeito da chuva sobre os afídeos, constituindo um bloco (Figura 3).

A exposição dos sistemas em campo foi feita a partir de todo o começo de mês, de agosto de 2019 a julho de 2020, totalizando 12 períodos de avaliação, em cada um dos quais os afídeos ficavam expostos no campo durante 28 dias, com exceção dos meses de dezembro (31 dias), maio (30 dias) e junho (25 dias). Durante a exposição as plantas de trigo das bandejas eram irrigadas com o auxílio de um regador conforme a necessidade. Após esse período, as bandejas eram recolhidas, todas as 88 plantas de cada tratamento cortadas e acondicionadas em potes a fim de realizar a triagem do material. Em cada período e para cada bandeja foi feita a contagem do número final de afídeos (ninfas, adultos ápteros e adultos alados), utilizando o *software* AphidCV (LINS et al., 2020). O parasitismo foi avaliado através da presença de múmias, as quais eram contabilizadas e separadas. Os parasitoides emergidos das múmias foram devidamente identificados. Também era feita a identificação e contagem de predadores no sistema aberto.

Figura 3 - Distribuição dos blocos e tratamentos na área experimental. Passo Fundo, 2020



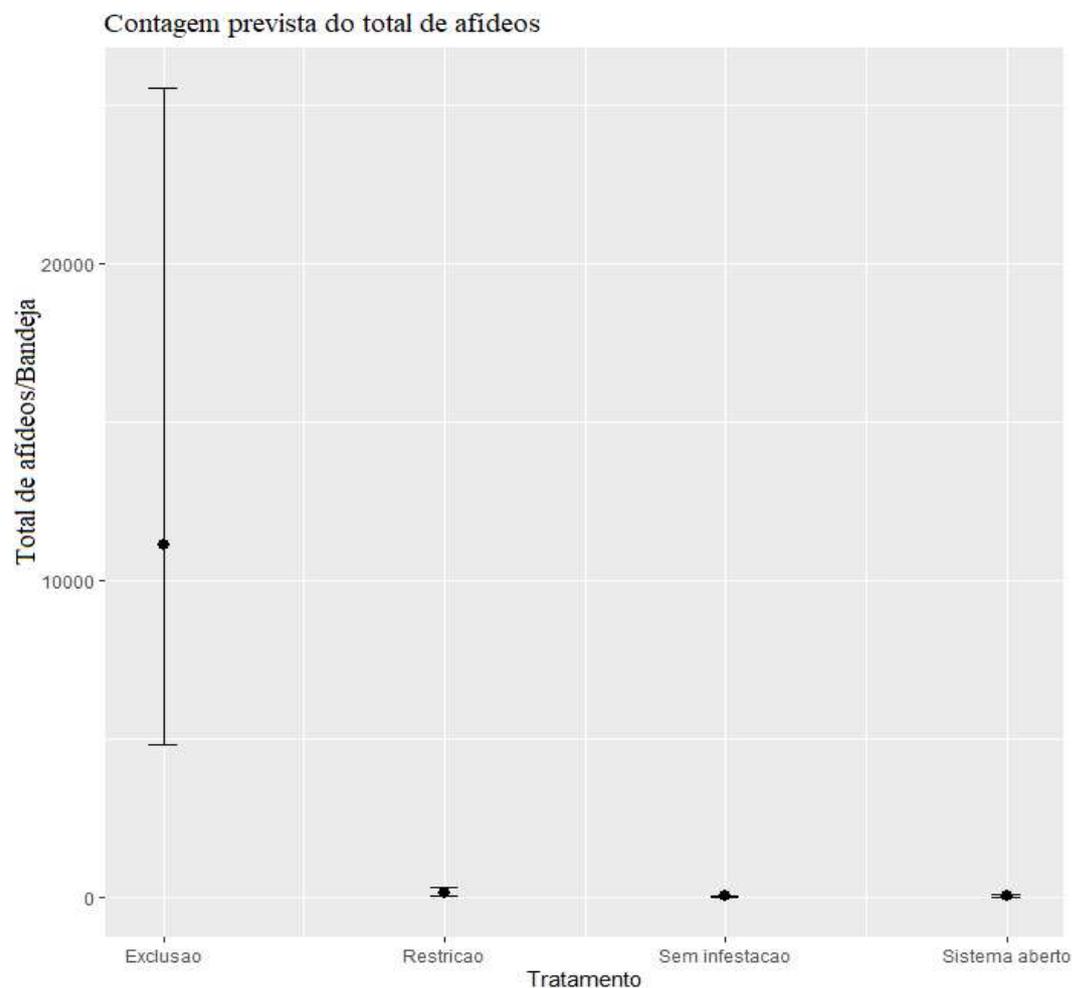
Foi instalada, no centro da área experimental, uma armadilha do tipo Möericke, constituída por uma bandeja de alumínio (45 cm de comprimento x 30 cm de largura x 5 cm de profundidade) pintada de amarelo e preenchida com solução aquosa (proporção de 1 L de água + 1 ml de formol 40% + 2 ml de detergente neutro). Semanalmente, a armadilha era vistoriada e os insetos coletados transferidos para frascos de vidro e levados para laboratório onde era feita a separação, a identificação e a contagem dos inimigos naturais e afídeos.

Os dados foram analisados em delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro tratamentos (sistemas ou níveis de restrição à inimigos naturais) e quatro repetições (bandejas). A variável dependente foi o número final de afídeos por bandeja. Para análise e comparação de efeitos, foram utilizados modelos mistos generalizados com estrutura de erro da distribuição de Poisson. O modelo escolhido incluiu tratamentos e blocos como efeitos fixos mais variação aleatória no intercepto entre os tratamentos dentro de meses. A adequação do modelo foi avaliada por análise de resíduos. As análises foram feitas através do *software* estatístico R (R CORE TEAM, 2019) utilizando o pacote lme4, função 'glmer' (BATES et al., 2015).

3.4 Resultados

Durante as três estações de cultivo (trigo, milho e aveia-preta), no sistema de exclusão (ausência de inimigos naturais) a densidade média de *R. padi*, de 16.140 afídeos/bandeja, foi significativamente maior do que no sistema de restrição (ação apenas de parasitoides), com população média final de 302 afídeos/bandeja, e no sistema aberto (ação conjunta de parasitoides e de predadores), com 69 afídeos/bandeja, e no sistema sem infestação, com 51 afídeos/bandeja (Figura 4). Os tratamentos com a ação dos inimigos naturais não apresentaram diferença entre si.

Figura 4 - Número de afídeos nos tratamentos (efeito fixo dentro do modelo) de exclusão (sem inimigos naturais), de restrição (parasitoides), aberto (com inimigos naturais) e aberto sem infestação de afídeos (predador+parasitoide), de agosto de 2019 a julho de 2020. Passo Fundo, 2021



Houve variação no crescimento populacional de *R. padi* e da ação de inimigos naturais ao longo do período amostrado, evidenciada pela interação entre tratamento (ação de inimigos naturais) e mês quando analisada a variável população total de afídeos. No sistema de exclusão, a partir do primeiro mês de monitoramento (agosto), com 5.466 afídeos/bandeja, a população apresentou aumento a cada mês atingindo o ápice em janeiro, com 35.018 afídeos/bandeja. Os dados do mês de fevereiro não alcançaram os valores esperados, provavelmente porque o sistema se tornou saturado com elevada população de afídeos conduzindo ao declínio da qualidade e à morte de plantas, o que

afetou negativamente estes insetos. Após uma estabilidade em março e abril, a partir de maio a população reduziu até o final do monitoramento, alcançando os patamares mais baixos nos meses de junho e julho nos quais foram contabilizados 1.554 e 1.780 afídeos/bandeja, respectivamente (Figuras 3 e 4).

Para o sistema de restrição, em agosto foram contabilizados 134 afídeos/bandeja. No mês seguinte houve uma queda para 11 afídeos/bandeja, sendo setembro o período de população mais baixa para este tratamento. A maior população foi observada nos meses de dezembro, janeiro, março e abril, este último com o maior número médio de afídeos (681 afídeos/bandeja). A partir de maio até julho, a população apresentou queda em relação aos meses anteriores (Figuras 3 e 4).

O sistema aberto, em agosto, apresentou 96 afídeos/bandeja, reduzindo em setembro para 10 afídeos/bandeja. A população se manteve baixa até dezembro. A partir do mês de janeiro, apresentou aumento, com 70 afídeos/bandeja, sendo que essa tendência de crescimento populacional se manteve até maio, quando foi alcançado o número máximo de 200 afídeos/bandeja. O sistema sem infestação seguiu praticamente os mesmos padrões que o sistema aberto (Figuras 5 e 6).

Comparando a proporção de afídeos contabilizados nos sistemas com a presença de inimigos naturais em relação ao sistema de exclusão e a redução populacional (%) exercida por estes inimigos naturais, quando houve ação dos parasitoides os afídeos alcançaram, em média, apenas 1,9 % do seu potencial, ou seja, redução populacional de 98,1%. No sistema aberto, com efeito de predadores e parasitoides, o crescimento populacional dos afídeos foi de 0,7 % do seu potencial, ou seja, a redução populacional exercida por esta guilda de inimigos naturais em conjunto foi de 99,3 %. A maior redução populacional para ambos os sistemas foi de 99,9 % nos meses de setembro e novembro. A menor redução populacional para o tratamento de restrição foi de 95 % durante os meses de março e abril e no tratamento aberto de 98,1 % durante maio (Figuras 7 e 8).

Figura 5 - Número de afídeos contabilizados após cada mês de exposição para os sistemas de exclusão (A) (sem inimigos naturais), restrição (B) (parasitoides), aberto (C) e aberto sem infestação de afídeos (D) (predador+parasitoide) de agosto de 2019 a julho de 2020. Passo Fundo, 2021

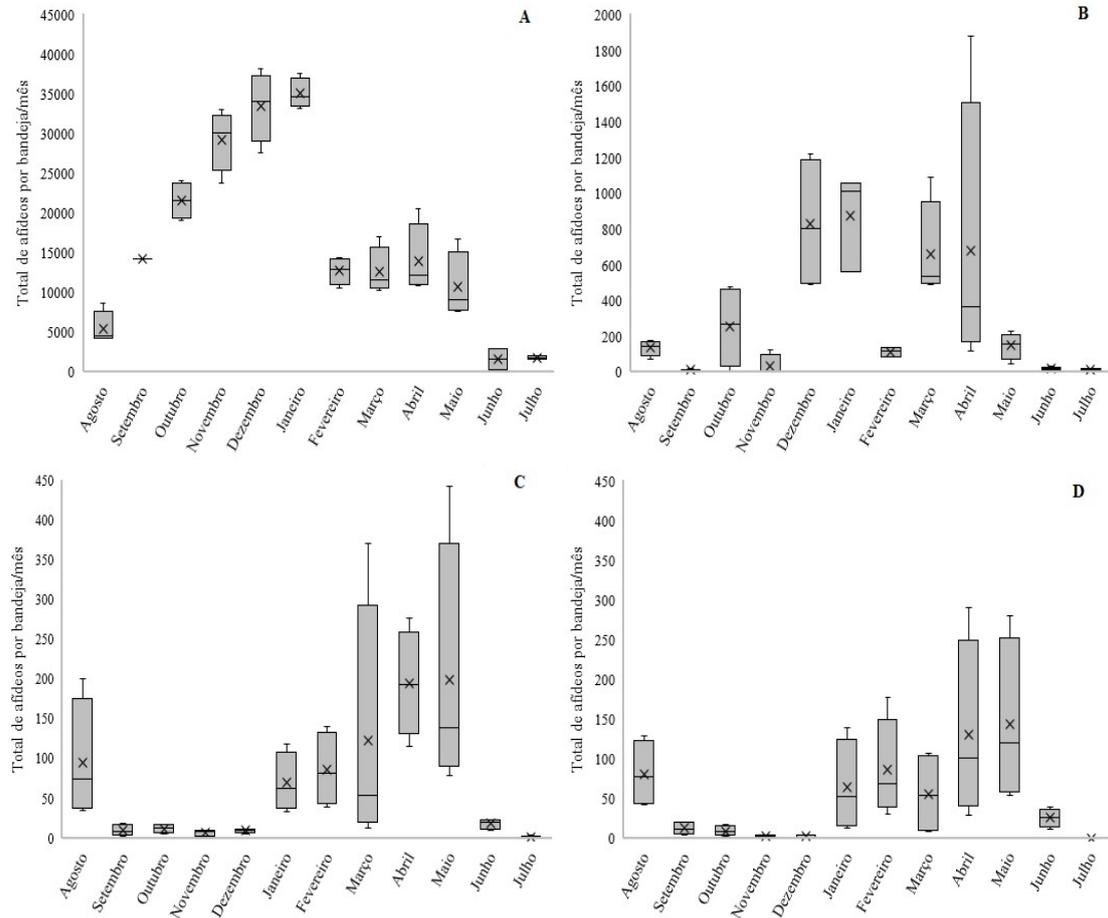


Figura 6 - Variação dos interceptos entre os tratamentos para cada mês considerando a interação como efeito aleatório dentro do modelo misto generalizado. Passo Fundo, 2021

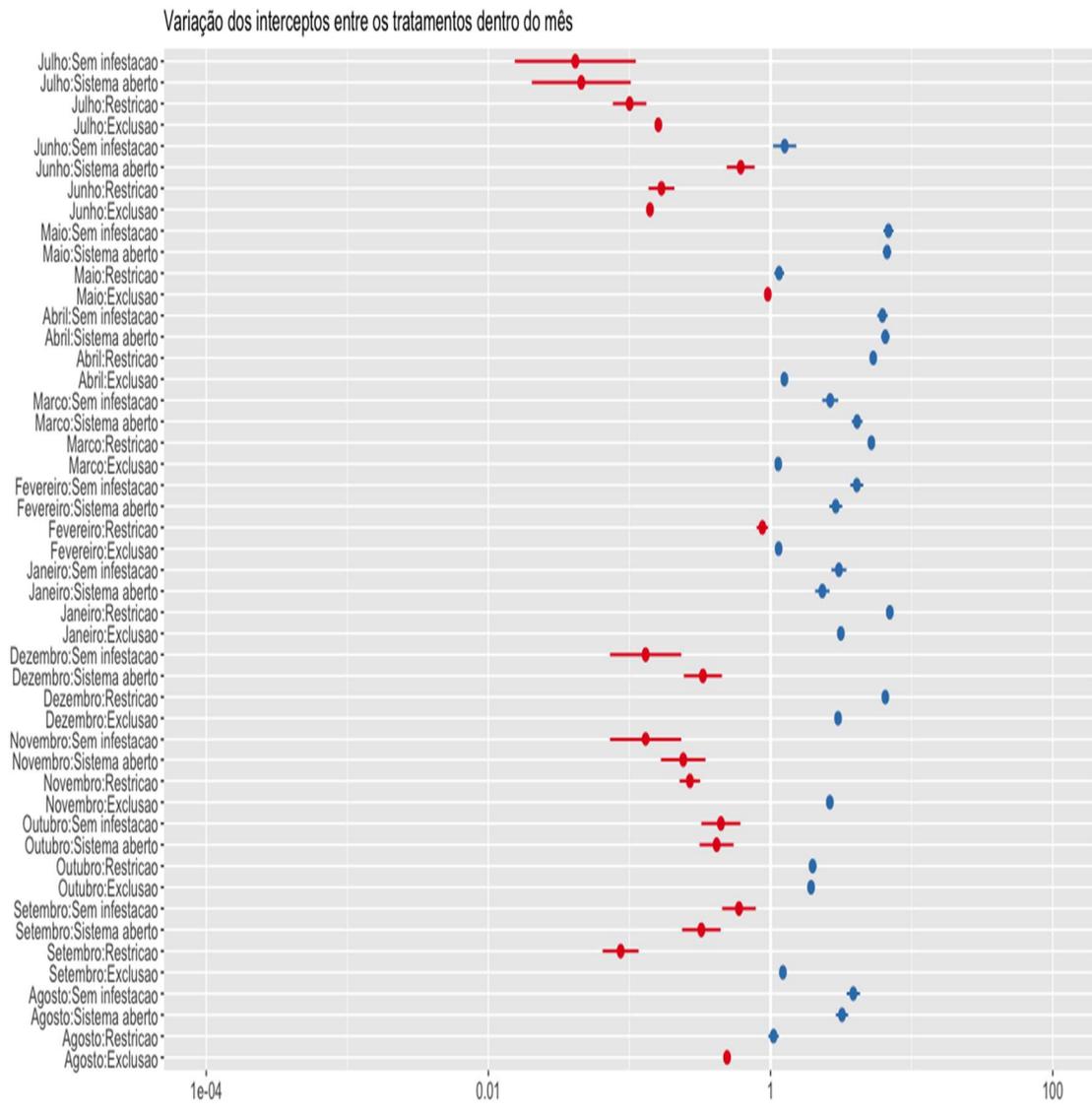


Figura 7 - Proporção de áfidos atingidos através do efeito isolado de parasitoides (restrição) e ação conjunta de parasitoides e predadores (aberto e sem infestação) em relação ao crescimento populacional obtido no sistema sem ação de inimigos naturais (exclusão), para cada mês de exposição, de agosto de 2019 a julho de 2020. Passo Fundo, 2021

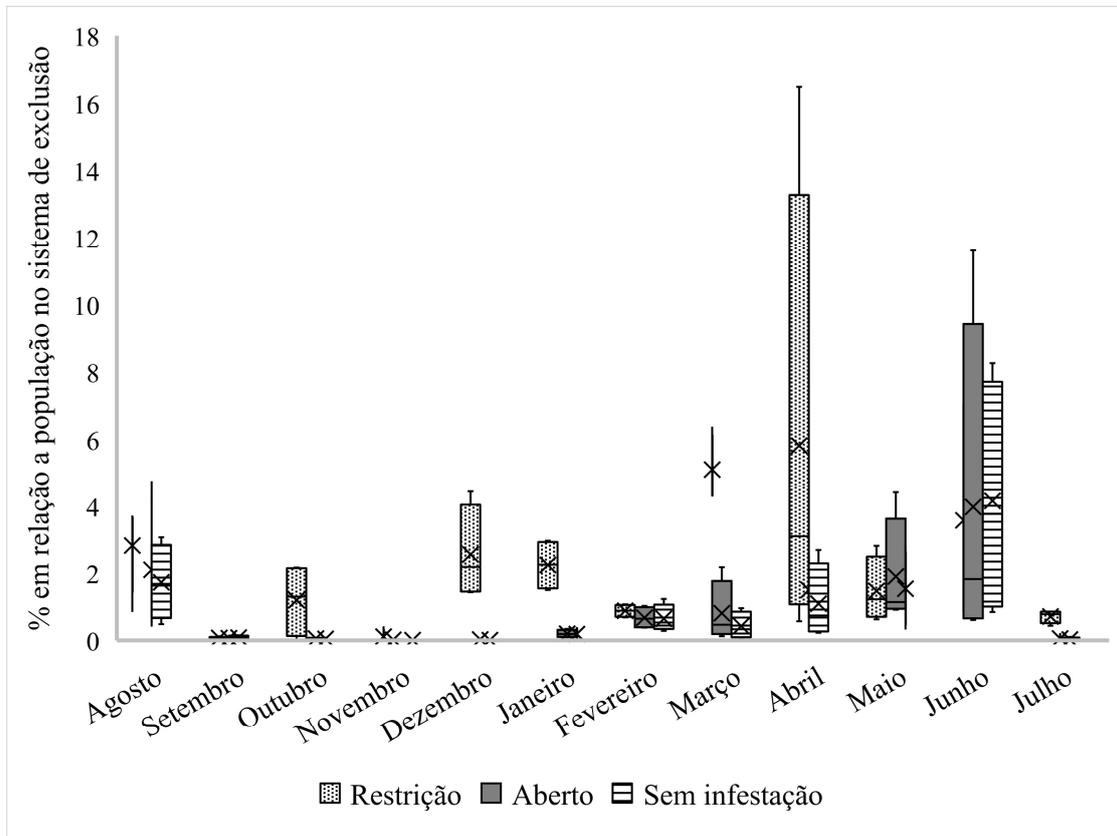
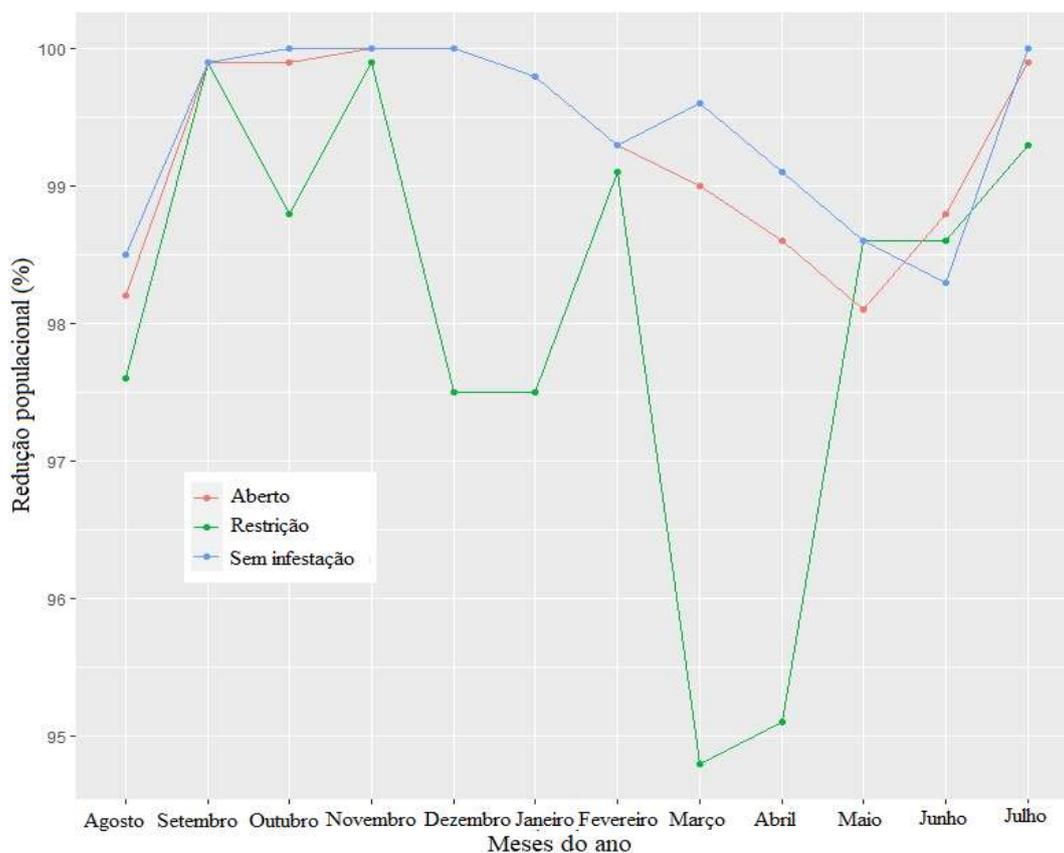


Figura 8 - Redução populacional (%) obtida através do efeito isolado de parasitoides (restrição) e ação conjunta de parasitoides e predadores (aberto e sem infestação), para cada mês de exposição, de agosto de 2019 a julho de 2020. Passo Fundo, 2021



As populações de parasitoides associadas a afídeos de cereais oscilaram ao longo do período amostral. A maior contagem de parasitoides nas armadilhas amarelas, 251 exemplares, ocorreu durante o período de cultivo de trigo. Nessas armadilhas, no mês de agosto foram detectados 6 indivíduos. Esse número aumentou para 132 indivíduos em setembro, sendo este o pico de parasitoides/armadilhas/mês. Em outubro, as populações ainda foram numerosas (113 parasitoides/armadilha/mês). A partir de novembro, não foram mais detectados parasitoides nas armadilhas o que perdurou até março. Parasitoides voltaram a ser capturados em abril (1 parasitoide/armadilha/mês), apresentando leve aumento em maio (6 parasitoide/armadilha/mês) e voltando a reduzir em junho (4 parasitoide/armadilha/mês) e julho (2 parasitoide/armadilha/mês) (Figura 9; Tabela 1). Nas coletas de múmias no sistema de restrição, as maiores quantidades foram encontradas

durante os meses de dezembro a abril, alcançando o máximo de em média 2.188 múmias/parcela coletadas no mês de janeiro (Figura 10).

Figura 9 - Flutuação populacional de inimigos naturais coletados em armadilha amarela durante o desenvolvimento das culturas do trigo (agosto-setembro), milho (dezembro-março) e aveia-preta (abril-julho), em 2019/20. Passo Fundo, 2021

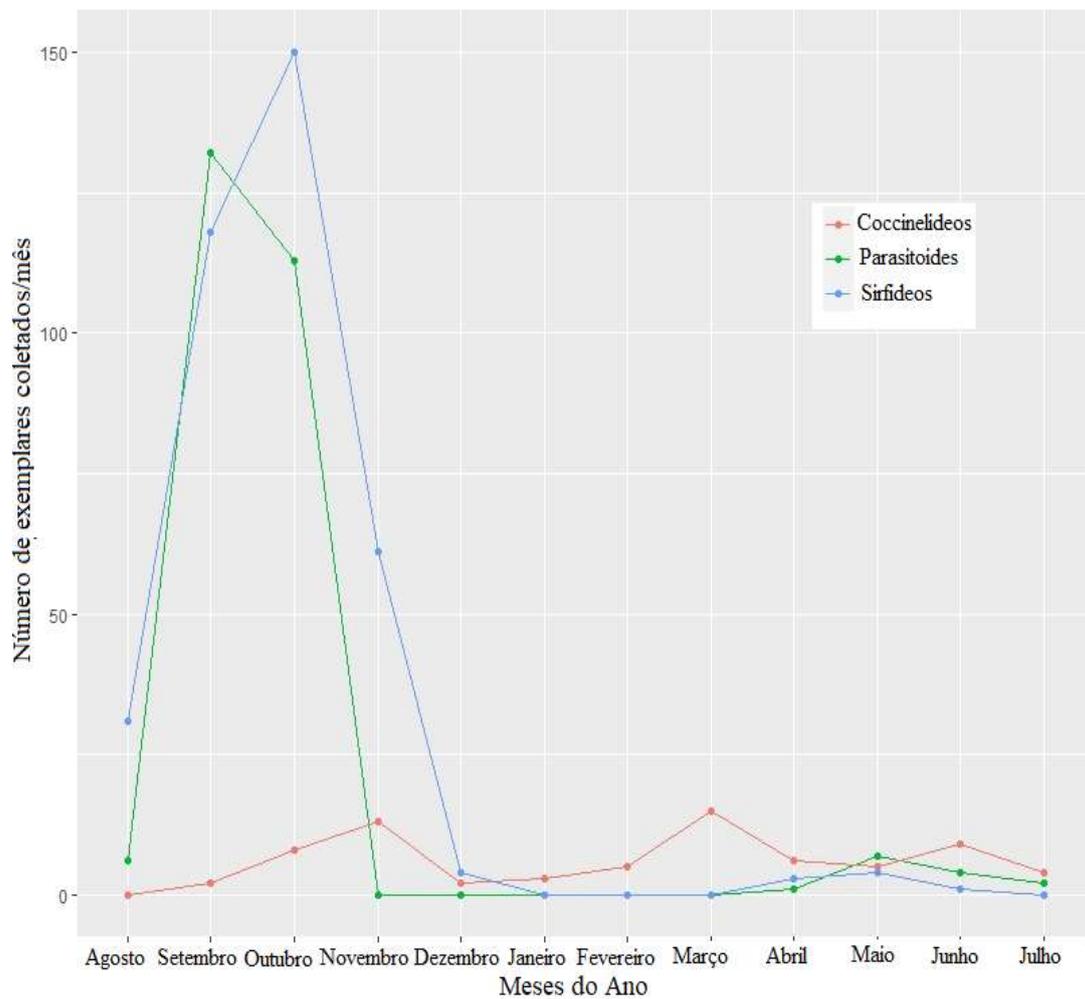
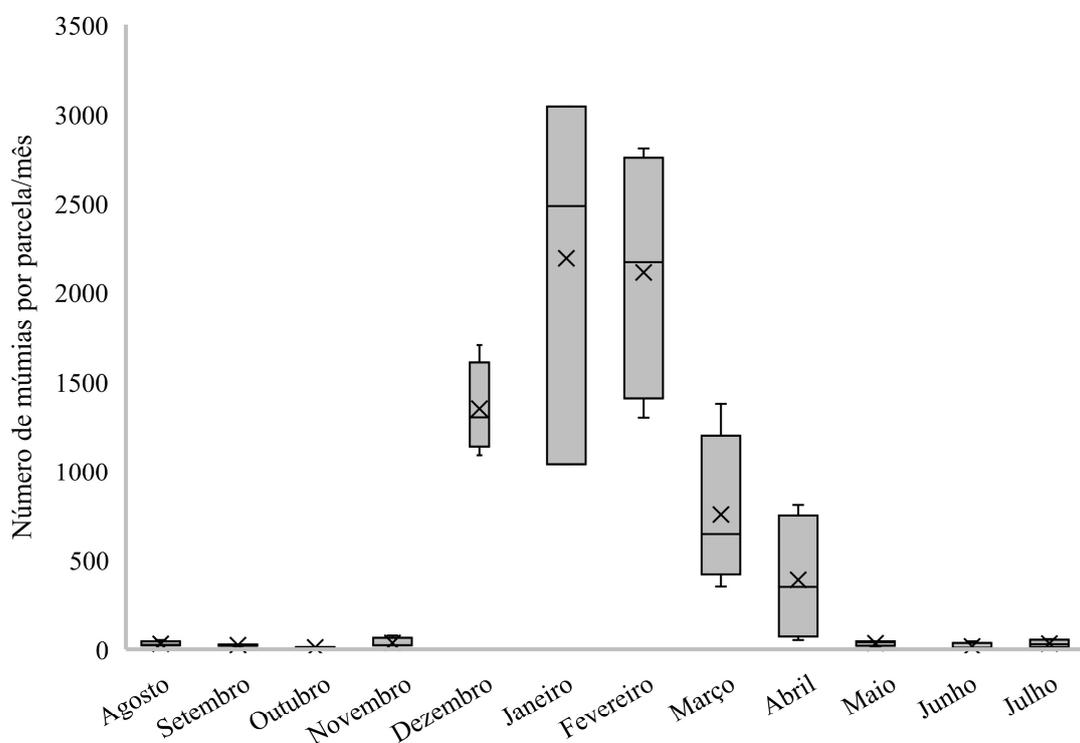


Figura 10 - Número médio de múmias coletadas no sistema de restrição durante o desenvolvimento das culturas do trigo (agosto-novembro), milho (dezembro-março) e aveia-preta (abril-julho), em 2019/20. Passo Fundo, 2021



As espécies de parasitoides predominantes também variaram ao longo dos meses e, também, entre o que foi capturado na armadilha amarela e o que ocorreu nas bandejas com *R. padi*. Na armadilha, de agosto a novembro foram abundantes as espécies *Aphidius platensis* Brèthes, 1913, *Aphidius uzbekistanicus* Luzhetskii, 1960 e *Aphidius rhopalosiphi* DeStefani-Perez, 1902. Nenhum exemplar foi coletado de novembro a março e o reaparecimento se deu, principalmente com poucos indivíduos de *A. platensis* e *A. rhopalosiphi*, de abril a julho (Tabela 2).

Nas bandejas com afídeos, *A. platensis* e *A. rhopalosiphi* emergiram das múmias formadas em agosto. Depois de uma lacuna em setembro, outubro e novembro, as múmias formadas nos meses de verão foram sobretudo de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) e em menor número de *A. platensis* e *A. rhopalosiphi*. A população de *L. testaceipes* atingiu o pico em fevereiro com 920 parasitoides emergidos, decaindo de março (64) a maio (1). Contraditoriamente, esta espécie não foi capturada em nenhum momento, nas

armadilhas amarelas. Os meses de março a julho também marcaram o reaparecimento de *A. platensis* e, em menor número, de *A. rhopalosiphi*. Outras espécies como *Aphidius ervi* Haliday, 1834 (setembro e outubro) e *Diaeretiella rapae* (M'Intosh, 1855) (maio) foram detectadas em baixa quantidade (Tabela 2).

Em relação aos predadores, foram encontrados sirfídeos e coccinelídeos. Analisando as coletas de armadilha amarela, os sirfídeos foram predominantes durante o período correspondente à cultura do trigo, representando 56,8 % do total de exemplares coletados entre todos os grupos de inimigos naturais. Nas estações seguintes, a quantidade total de sirfídeos diminuiu significativamente em relação ao período de cultivo de trigo, totalizando 4 e 8 exemplares na cultura do milho e aveia-preta, respectivamente. O pico deste grupo de predadores ocorreu no mês de outubro, sendo que a população começou a diminuir a partir de dezembro, voltando a ser coletado apenas no mês de abril (Tabela 1; Figura 9). No sistema aberto, no momento da coleta, o mês em que mais sirfídeos foram encontrados foi abril.

Para os exemplares de sirfídeos associados a afídeos de cereais coletados em armadilha amarela foram identificadas apenas duas espécies: *Toxomerus duplicatus* (Wiedemann, 1830) e *Allograpta exotica* (Wiedemann, 1830). A espécie *T. duplicatus* foi predominante durante os meses de agosto a outubro, reduziu no mês de novembro e não foi mais observada nas coletas de armadilha até o final do estudo. Já *A. exotica* foi a única observada durante os meses de abril a junho, além de estar presente em menor quantidade em setembro, novembro e dezembro. Entre os meses de dezembro e março não foi coletado nenhum exemplar de sirfídeo (Tabela 3).

Os coccinelídeos foram predominantes durante o cultivo do milho e aveia-preta, representando respectivamente 86,3 % e 52,2 % dos exemplares de todos os inimigos naturais coletados em armadilha amarela. A dinâmica populacional deste grupo de predadores foi caracterizada por dois picos populacionais, um no mês de novembro e outro no mês de março (Tabela 1; Figura 9). Em bandejas, março foi o mês com a maior presença de joaninhas, tanto adultos quanto larvas. As espécies observadas em maior quantidade durante todo o período de monitoramento foram *Harmonia axyridis* (Pallas,

1773), *Hippodamia convergens* (Guerin-Meneville, 1842) e *Eriopis connexa* (Germar, 1824). Durante setembro, outubro e novembro, *H. convergens* foi predominante e *H. axyridis* predominou de dezembro a julho (Tabela 3).

Tabela 1 – Número total e porcentagem para cada grupo de inimigos naturais coletados em armadilha amarela durante o cultivo de trigo (agosto-novembro), milho (dezembro-março) e aveia-preta (abril-julho). Passo Fundo, 2019-2020

Inimigos naturais	Número total			Porcentagem dentro do grupo (%)		
	Trigo	Milho	Aveia-preta	Trigo	Milho	Aveia-preta
Parasitoides	251	0	14	39,6	0	30,4
Coccinelídeos	23	25	24	3,6	86,2	52,2
Sirfídeos	360	4	8	56,8	13,8	17,2

Fonte: Dados da Autora

Tabela 2 - Número de parasitoides total e por espécie emergidos nas bandejas e coletados em armadilha amarela. Passo Fundo, 2019-2020

Mês	Parasitoides emergidos nas bandejas		Parasitoides coletados em armadilha amarela	
	Nº total	Espécie (Nº de exemplares)	Nº total	Espécie (Nº de exemplares)
Agosto	18	<i>Aphidius platensis</i> (14) <i>Aphidius rhopalosiphi</i> (4)	6	<i>Aphidius rhopalosiphi</i> (4) <i>Aphidius uzbekistanicus</i> (2)
Setembro	0	-----	132	<i>Aphidius platensis</i> (62) <i>Aphidius rhopalosiphi</i> (30) <i>Aphidius uzbekistanicus</i> (37) <i>Aphidius ervi</i> (3)
Outubro	0	-----	113	<i>Aphidius platensis</i> (68) <i>Aphidius rhopalosiphi</i> (15) <i>Aphidius uzbekistanicus</i> (25) <i>Aphidius ervi</i> (5)
Novembro	0	-----	0	-----
Dezembro	418	<i>Lysiphlebus testaceipes</i> (397) <i>Aphidius rhopalosiphi</i> (21)	0	-----
Janeiro	575	<i>Lysiphlebus testaceipes</i> (575)	0	-----
Fevereiro	920	<i>Lysiphlebus testaceipes</i> (920)	0	-----
Março	115	<i>Lysiphlebus testaceipes</i> (64) <i>Aphidius platensis</i> (51)	0	-----
Abril	128	<i>Lysiphlebus testaceipes</i> (41) <i>Aphidius platensis</i> (67)	1	<i>Aphidius platensis</i> (1)
Maió	19	<i>Aphidius platensis</i> (14) <i>Lysiphlebus testaceipes</i> (1) <i>Diaeretiella rapae</i> (4)	6	<i>Aphidius platensis</i> (4) <i>Aphidius rhopalosiphi</i> (2)
Junho	8	<i>Aphidius platensis</i> (7) <i>Aphidius rhopalosiphi</i> (1)	4	<i>Aphidius platensis</i> (3) <i>Aphidius rhopalosiphi</i> (1)
Julho	5	<i>Aphidius platensis</i> (4) <i>Aphidius rhopalosiphi</i> (1)	2	<i>Aphidius platensis</i> (2)

Tabela 3 - Número de sirfídeos e de coccinelídeos por espécie coletados em armadilha amarela. Passo Fundo, 2019-2020 * Observação de sirfídeos e coccinelídeos realizada no momento da coleta das bandejas. Passo Fundo, 2019-2020

Mês	Sirfídeos			Coccinelídeos		
	Nº total	Espécie (Nº de exemplares)	Obs.*	Nº total	Espécie (Nº de exemplares)	Obs.*
Agosto	31	<i>Toxomerus duplicatus</i> (31)	Ausentes	0	-----	Ausentes
Setembro	118	<i>Toxomerus duplicatus</i> (115) <i>Allograpta exotica</i> (3)	1 larva/bandeja	2	<i>Hippodamia convergens</i> (2)	Ausentes
Outubro	150	<i>Toxomerus duplicatus</i> (150)	2 larvas /bandeja	8	<i>Hippodamia convergens</i> (6) <i>Eriopis connexa</i> (2)	1 adulto/bandeja
Novembro	61	<i>Toxomerus duplicatus</i> (60) <i>Allograpta exotica</i> (1)	Ausentes	13	<i>Hippodamia convergens</i> (2) <i>Eriopis connexa</i> (10) <i>Coleomegilla quadrifasciata</i> (1)	1 adulto/bandeja
Dezembro	4	<i>Toxomerus duplicatus</i> (1) <i>Allograpta exotica</i> (3)	2 larvas/bandeja	2	<i>Hippodamia convergens</i> (2)	Ausentes
Janeiro	0	-----	2 larvas/bandeja	3	<i>Harmonia axyridis</i> (3)	Ausentes
Fevereiro	0	-----	2 larvas/bandeja	5	<i>Harmonia axyridis</i> (2) <i>Hippodamia convergens</i> (1) <i>Cycloneda sanguinea</i> (2)	1 adulto/bandeja Presença de massa de ovos
Março	0	-----	Ausentes	15	<i>Harmonia axyridis</i> (10) <i>Cycloneda sanguinea</i> (3) <i>Eriopis connexa</i> (1) <i>Psyllobora vigintiduopunctata</i> (1)	1 adulto/bandeja 1 larva/bandeja Presença de massa de ovos
Abril	3	<i>Allograpta exotica</i> (3)	22 larvas/bandeja	6	<i>Harmonia axyridis</i> (4) <i>Cycloneda sanguinea</i> (1) <i>Eriopis connexa</i> (1)	1 adulto/bandeja Presença de massa de ovos
Maió	4	<i>Allograpta exotica</i> (4)	1 larva/bandeja	5	<i>Harmonia axyridis</i> (5)	Ausentes
Junho	1	<i>Allograpta exotica</i> (1)	Ausentes	9	<i>Harmonia axyridis</i> (5) <i>Hippodamia convergens</i> (3) <i>Eriopis connexa</i> (1)	Ausentes
Julho	0	-----	Ausentes	4	<i>Harmonia axyridis</i> (4)	Ausentes

3.5 Discussão

A dinâmica populacional das pragas fitófagas resulta da disponibilidade de plantas hospedeiras para sua alimentação e da favorabilidade das condições ambiente para sua multiplicação e sobrevivência. A sucessão de culturas e sua diversidade e estádios de desenvolvimento no espaço e no tempo compõe o substrato fértil no qual as pragas se estabelecem e as taxas de desenvolvimento e crescimento dependem do tempo meteorológico regido por oscilações sazonais de temperatura características de cada clima. Sobreposta a essa oscilação, em um efeito densidade dependente, ocorre a ação dos inimigos naturais. Da mesma forma, as populações da comunidade de inimigos naturais tendem a crescer na medida em que há alimento disponível e que as condições de ambiente lhes são favoráveis. Assim, é esperado maior efeito negativo sobre a praga quando suas populações estão mais elevadas e quando as condições de ambiente favorecem à sua biologia. Com isso, o método de avaliação adotado nesse trabalho tende a medir o *status* populacional dos inimigos naturais e seu efeito de contenção naquele momento.

A população de *R. padi* foi crescente de agosto a janeiro em evidente relação com o aumento da temperatura média mensal. Após o auge no verão, a população final foi progressivamente menor até atingir patamar mínimo em junho e julho. Estes resultados são coincidentes com os relatados por Wiest et al. (2021), também utilizando o mesmo tipo de unidade experimental aqui descrito. Segundo esses autores, a temperatura ótima para *R. padi* do sul do Brasil é de 25°C, o que é coincidente com a literatura mundial, embora existam variações populacionais (DEAN, 1974; PARK et al., 2016, 2017). Isso significa que as temperaturas médias máximas da região em estudo não são prejudiciais ao desenvolvimento de *R. padi*, pelo contrário, como aqui demonstrado, nos meses de temperatura média mais elevada foram obtidos os maiores níveis populacionais. A pergunta fundamental cuja resposta se buscou nesse trabalho é como as populações de inimigos naturais interfeririam nessa curva de crescimento populacional de *R. padi* e se haveriam variações sazonais nesse efeito.

Tanto a ação isolada de parasitoides, quanto a ação conjunta de parasitoides e predadores, foram eficazes na redução do crescimento populacional de *R. padi*. Ao longo

de um ano, a população de afídeos foi de apenas 1,9 % do total potencial no sistema com ação de parasitoides e apenas 0,7 % no caso do sistema aberto com ação conjunta de parasitoides e predadores. Ainda, deve-se considerar nesse caso que houve algum nível de migração, pois os patamares populacionais nas bandejas em sistemas abertos com e sem infestação de afídeos foram similares.

A hipótese de que o efeito exercido por parasitoides e predadores sobre o crescimento populacional de *R. padi* fosse de no mínimo 50 % durante todo o período estudado foi confirmada e com valores muito acima dos esperados. Ao longo de um ano, a redução do crescimento populacional dos afídeos exercido por parasitoides foi de 98,1 % e por parasitoides mais predadores de 99,3%. Avaliações do efeito de inimigos naturais sobre as populações de afídeos conduzidas em outros locais do mundo obtiveram níveis de mortalidade próximos aos apresentados nesse trabalho (HOLLAND et al., 2012; SCHMIDT et al., 2004). Também foi verificado que esse efeito de inimigos naturais não foi constante ao longo do ano. Esse estudo ainda não permite concluir sobre sazonalidade dos efeitos, o que precisa ser demonstrado por séries temporais maiores, porém dados de armadilhas da região tem demonstrado a sazonalidade nas populações de afídeos e parasitoides (LAU et al., 2015; REBONATTO; SALVADORI; SANTOS et al., 2019).

Mesmo com as variações temporais, de acordo com os resultados deste monitoramento de um ano na região norte do Rio Grande do Sul, ficou evidenciado comparativamente ao potencial de crescimento de *R. padi*, que tanto o efeito isolado de parasitoides como a ação conjunta de predadores e parasitoides foram suficientemente capazes de reduzir significativamente a população dos afídeos.

Snyder e Alves (2003), ao avaliarem a interação entre parasitoides e predadores no controle do pulgão da ervilha (*Acyrtosiphon pisum*) observaram que o impacto dos dois grupos foi aditivo, o que resultou em efeito mais forte sobre a praga do que cada grupo separadamente. A maior diversidade de inimigos naturais fortalece o controle biológico ao permitir que diferentes espécies se complementem através do uso de nichos ecológicos ou recursos diferenciados (STRAUB; FINKE; SNYDER., 2008). De outra forma, estudo conduzido na Alemanha em condições de campo, apontou a ação de

parasitoides na regulação das populações de afídeos de cereais como mais importante do que predadores generalistas residentes no solo, mas que os efeitos de ambos os grupos são complementares (SCHMIDT et al., 2003).

Houve variação populacional dos inimigos naturais ao longo do ano como demonstrado pelas coletas de armadilha amarela, assim como os dados das próprias bandejas onde o efeito dos mesmos sobre a população de *R. padi* foi estimado. Estas variações do efeito dos inimigos naturais ao longo do ano (interação significativa entre tratamentos e meses) observadas neste trabalho são explicadas pelo contexto no qual o experimento estava inserido, relacionando-se com as variações sazonais de temperatura, bem como com a disponibilidade de hospedeiros (afídeos) e presas (afídeos e outros insetos no caso de predadores).

A temperatura tem uma influência direta em vários componentes essenciais da biologia dos inimigos naturais como a taxa de alimentação, produção de ovos, respostas funcionais e taxas de busca (WELLINGS; DIXON, 1987). No caso dos parasitoides, a sua atividade como agentes de controle de afídeos foi mais efetiva nos meses de temperatura média mais baixa e menor ação nos meses mais quentes. Para o parasitoide *Aphidius colemani*, a temperatura de 22°C é a mais adequada para seu desenvolvimento, sendo que a formação de múmias, emergência e sobrevivência dos adultos foram altas até 25°C e diminuíram a 28°C (SAMPAIO et al., 2007). Com isso, as temperaturas dos meses mais quentes se constituem como limítrofes para os parasitoides ao passo que para os afídeos apresentam-se como próximas a temperatura ótima de desenvolvimento. Portanto, é esperado que as populações de afídeos reguladas sobretudo por parasitoides alcancem seu auge nos meses de verão devido a seu crescimento populacional mais rápido e ao desempenho dos parasitoides mais baixo.

Resultados de monitoramento em armadilhas na região demonstram que os picos de parasitoides ocorrem nos meses de julho, pico principal para *A. platensis* (SANTOS et al., 2019) com um segundo pico primaveril com várias espécies do gênero *Aphidius*, sendo este coincidente com o pico de afídeos alados na primavera (ENGEL et al., no prelo). Esses monitoramentos demonstram também uma redução da população de

parasitoides nos meses de verão e outono. Assim, era esperada uma ação principal de parasitoides na primavera, reduzindo após a safra de trigo (que na região costuma ser colhido em novembro). Os resultados aqui obtidos estão de acordo com essa hipótese, visto que entre os meses de agosto a novembro o efeito de controle dos parasitoides foi elevado começando a diminuir a partir do mês de dezembro, mantendo-se em níveis menores até maio. Porém, ressalta-se que mesmo no período de população de parasitoides mais baixa (pelos dados de armadilha), a redução populacional resultante pode ser considerada alta, como ocorreu nos meses de março e abril os quais atingiram os menores valores durante o período avaliado: 94,8 % e 95,1 %, respectivamente.

As maiores reduções populacionais exercidas por parasitoides foram coincidentes com as épocas em que populações mais numerosas foram capturadas em armadilhas. Nesses períodos, logo após a exposição das bandejas a campo, os parasitoides presentes no ambiente iniciavam sua ação impedindo rapidamente o crescimento populacional de *R. padi*. Na presença de hospedeiro, a espécie *A. colemani* tem a capacidade de depositar a maior parte dos seus ovos nos dois ou três primeiros dias (TORRES et al., 2007).

Nos meses em que o controle por parasitoides foi menor, as populações no ambiente eram baixas (conforme dados da armadilha). Consequentemente, a população de *R. padi* dispunha de um período para livre crescimento até que o parasitismo iniciasse. A partir, de então se formavam várias múmias. Nesse caso, também deve-se considerar que nas bandejas foi coletada a espécie *L. testaceipes* (não capturada em armadilha), predominante durante o desenvolvimento da cultura do milho (dezembro a março). Esta espécie possui bom desempenho à temperatura de 25°C (RODRIGUES et al., 2004). Esta característica foi corroborada nesse trabalho, pois *L. testaceipes* começou a ser encontrado parasitando *R. padi* quando a temperatura média aumentou (meses com temperatura média acima de 20°C) e, quando esta começou a cair novamente, a espécie não foi mais coletada.

Em termos de predadores não havia dados prévios quantificados para supor como estes afetariam a curva de crescimento dos afídeos, mas com base em observações de campo era esperada que sua ação se mantivesse no verão. O controle por esta guilda de

inimigos naturais ocorreu durante todo o período avaliado, porém a predação foi menor nos meses mais frios. Fato em acordo com a temperatura ideal para desenvolvimento de coccinelídeos, por exemplo, que está ao redor de 26,7 ° e 29,4 ° C, dependendo da espécie (OBRYCKI; TAUBE, 1981).

Os sirfídeos foram o grupo de predadores mais encontrados durante a cultura do trigo no monitoramento com armadilha amarela. O forte papel de sirfídeos em campos de trigo pode estar associado a capacidade de forrageamento das fêmeas que realizam a oviposição perto das colônias de afídeos, a fim de beneficiar a sua prole que tem capacidade de dispersão limitada (VERHEGGEN et al., 2008). Os parâmetros até agora estudados por influenciar nessa capacidade de forrageamento se relacionam a espécies de afídeos, características físicas e químicas das plantas hospedeiras da praga (ALMOHAMAD et al., 2009) e tamanho da colônia de afídeos (SUTHERLAND; SULLIVAN; POPPY, 2001).

Coccinelídeos foram importantes na contenção de *R. padi*, sendo o grupo de inimigos naturais predominante em coletas de armadilha, durante o desenvolvimento das culturas do milho e aveia-preta, preenchendo lacuna sazonal importante nessas estações de crescimento entre o cultivo do trigo. Joaninhas são caracterizadas por diferirem no uso do habitat e nos seus padrões de atividades sazonais (SNYDER, 2009). Logo, a conservação de recursos no sistema pode favorecer a ação de coccinelídeos no início da safra de cereais (OBRYCKI et al., 2009). Assim, essas diferenças espaço-temporais resultam em impactos complementares sobre o controle das presas, como observado no presente estudo.

Neste estudo trabalhou-se com a sucessão de culturas de cereais (trigo - milho – aveia-preta) hospedeiros de *R. padi*, os quais no campo poderiam alternar as plantas hospedeiras sazonalmente, disponibilizando presa primária aos predadores e hospedeiros aos parasitoides. Porém, exclusivamente adultos de sirfídeos e parcialmente adultos de coccinelídeos e de parasitoides dependem de alimentos que não são afídeos, como pólen e néctar que fornecem os recursos necessários para estes insetos (HATT et al., 2017; LU et al., 2014). Nesse sentido, habitats naturais ou seminaturais são importantes para

inimigos naturais das pragas, pois além de fornecer presas alternativas, servem como locais para hibernação e refúgio (LANDIS et al., 2000). Assim, durante o período de desenvolvimento deste experimento, a dinâmica populacional dos inimigos naturais também pode ter sido influenciada por mudanças espaciais e temporais nos recursos alimentares disponíveis no ambiente circundante.

A maior contenção na população de afídeos no sistema de restrição se relacionou com o período em que mais foram coletados parasitoides nas armadilhas, correspondente principalmente ao mês de setembro. Da mesma forma para o sistema aberto, o maior controle de *R. padi* se relacionou ao período de maior abundância de predadores, com maior destaque para sirfídeos, coletados em armadilha.

3.6 Conclusões

Predadores e parasitoides de ocorrência natural reduziram significativamente a população final de *R. padi*. O crescimento populacional de afídeos, assim como o efeito de parasitoides e predadores sobre essa praga variam em função da época do ano. Os principais inimigos naturais foram coccinelídeos, sirfídeos e parasitoides.

A quantificação e a demonstração experimental da eficiência do controle biológico vão auxiliar na valorização desta ferramenta de controle e a sua adoção no contexto de manejo integrado dos afídeos, principalmente nos sistemas agrícolas onde o trigo é cultivado. Além disso, o progressivo aumento da compreensão sobre o papel dos inimigos naturais na população de afídeos poderá contribuir com o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na tomada de decisão.

4 CAPÍTULO II

Variação das taxas de mortalidade por inimigos naturais e sua influência na oscilação da população de *Rhopalosiphum padi*: uma abordagem por meio de modelo baseado em agente

4.1 Resumo

A população de consumidores primários como afídeos é regulada pela disponibilidade de plantas hospedeiras (alimento) e densidade populacional de consumidores secundários (predadores e parasitoides), todos estes sob influência das condições do ambiente. Nos sistemas agrícolas, a tomada de decisão em relação ao controle de pragas deve estar associada ao manejo integrado. A utilização de ferramentas práticas e adequadas que facilitem esse processo como modelos de simulação é cada vez mais importante. Modelos baseados em agentes podem ser utilizados para simular processos biológicos de insetos envolvidos em processos complexos e inserido em um ambiente heterogêneo. Este trabalho estima as taxas de mortalidade por parasitoides e inimigos naturais (parasitoides + predadores) na população de *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae) por meio de um modelo baseado em agentes denominado ABISM. Os dados observados foram provenientes de experimento de campo conduzido na Embrapa Trigo (Passo Fundo, Rio Grande do Sul) no período de agosto de 2019 a julho de 2020. Para avaliar o crescimento populacional do afídeo sob o efeito de inimigos naturais, foram utilizadas gaiolas que permitiam a passagem seletiva, criando sistemas com diferentes níveis de restrição de acesso destes inimigos. Um sistema sem efeito de inimigos naturais foi utilizado para permitir o cálculo do crescimento populacional proporcional. As simulações das taxas de mortalidade de afídeos foram realizadas no modelo ABISM (<http://200.132.58.15:6538/ABISM/>), obtendo-se um bom ajuste do modelo entre os dados observados e simulados. As taxas de mortalidade ajustadas foram variáveis para cada um dos 12 meses do período avaliado. As taxas diárias de parasitismo variaram entre 3,2 % (abril) e 7% (fevereiro) e de inimigos naturais (predadores + parasitoides) entre 4,5% (maio) e 7,8% (junho). O modelo é uma ferramenta dinâmica e apropriada na simulação do crescimento populacional de afídeos possibilitando estimar o efeito da ação de inimigos naturais ao longo do tempo e as eventuais consequências no manejo desta praga dentro do sistema agrícola.

Palavras-chave: 1. Dinâmica populacional. 2. Manejo de afídeos. 3. Predadores. 4. Parasitoides. 5. Modelos de simulação.

4.2 Introdução

Rhopalosiphum padi (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae), comumente denominado pulgão-da-aveia ou pulgão-do-colmo do trigo, é uma das pragas de cereais de maior importância agrícola a nível mundial (BLACKMAN; EASTOP, 2017). Devido a sua capacidade de reprodução e curto ciclo de vida, em situações favoráveis de desenvolvimento e disponibilidade de plantas hospedeiras, nas condições de clima subtropical úmido do sul do Brasil, *R. padi* pode atingir uma grande população e causar prejuízos expressivos caso não seja controlado (WIEST et al., 2021).

Esta espécie de afídeo quando em infestações elevadas possui a capacidade de causar danos diretos como resultado da sucção de seiva do floema (SAVARIS et al., 2013), porém, atualmente, as maiores perdas que causa resultam da sua eficiência como vetor de barley yellow dwarf virus (BYDV) agente causal do nanismo-amarelo (PARIZOTO et al., 2013). Essa é a virose de maior importância econômica mundial para os cereais (POCSAI, 2002; WALLS; RAJOTTE; ROSA, 2019), ocasionando perdas quantitativas e qualitativas que podem reduzir de 5% a 80% o rendimento destas culturas (LAU et al., 2011; MCNAMARA et al., 2020). Diante disso, é necessário que estes insetos tenham controle adequado para que os possíveis danos sejam evitados (DEDRYVER; LE RALEC; FABRE, 2010).

Os níveis populacionais de insetos são influenciados por fatores abióticos como condições meteorológicas (temperatura e precipitação, por exemplo) e bióticos, como o efeito de inimigos naturais (SILVA et al., 2017). Entre os insetos potencialmente importantes na regulação da população de afídeos destacam-se dois grupos principais: os parasitoides e predadores (SINGH; SINGH, 2016). A maior parte dos parasitoides são himenópteros pertencentes às famílias Braconidae (subfamília Aphidiinae) e Aphelinidae (BOIVIN; HANCE; BRODEUR, 2012). E entre os predadores destacam-se larvas e adultos de coccinelídeos (Coleoptera, Coccinellidae) e larvas de sirfídeos (Diptera: Syrphidae) e crisopídeos (Neuroptera: Chrysopidae) (BRODEUR et al., 2017; SALVADORI; TONET, 2001).

É reconhecido o papel que os inimigos naturais exercem no controle da densidade de afídeos nos sistemas de cultivo (ALI et al., 2018; HAN; NIU; DESNEUX, 2014; SCHMIDT et al., 2004). Porém, estes insetos afído-fágos, predadores e parasitoides, também são influenciados diretamente por fatores abióticos e indiretamente através do efeito que essas condições exercem sobre a praga ou planta hospedeira, em um efeito denominado de “*bottom-up*” (DYER et al., 2013; ROSENBLATT; SCHMITZ, 2016). Com isso, é esperado que as taxas de mortalidade resultantes da ação destes agentes de controle sejam variáveis ao longo de determinado período de tempo como resultado da sua dinâmica populacional e interações tróficas.

Aliado a necessidade da adoção de técnicas de manejo integrado de pragas (MIP), o uso de ferramentas que contribuam com a tomada de decisão é de extrema importância no contexto atual. Nesse sentido, diversos problemas da área entomológica têm sido representados através de sistemas de simulação (PARRY, 2013; PEREZ; DRAGICEVIC, 2010). A modelagem baseada em agente é uma abordagem que pode ser utilizada a fim de reproduzir os padrões espaço-temporais em processos ecológicos, representando a dinâmica individual e as interações entre os agentes e o ambiente, operacionalizando um sistema complexo (ANDERSON; DRAGIĆEVIĆ, 2015).

Um modelo baseado em agente chamado de ABISM (*Agent Based Insect Simulation Model*), parametrizado para o afídeo *R. padi*, foi desenvolvido por Toebe (2014), o qual simula processos biológicos como desenvolvimento, reprodução, alimentação, movimento e morte. Para estes modelos complexos, os valores dos parâmetros estabelecidos são um dos principais determinantes do seu poder preditivo, por isso a correta parametrização é fundamental para uma reprodução precisa dos processos que ocorrem no campo (WIEST et al., 2021).

A tomada de decisão em relação a necessidade de ações de manejo suplementares como o controle químico, devem ser baseadas no conhecimento de como os fatores de mortalidade atuam sobre a densidade de afídeos, através da redução do seu potencial biótico e as variações resultantes ao longo do tempo. O controle por mortalidade é um dos parâmetros inclusos no modelo ABISM. Este estudo teve por objetivo avaliar as

variações nas taxas de mortalidade causadas por parasitoides e parasitoide + predadores sobre a população de *R. padi* ao longo de um ano por meio do modelo baseado em agentes proposto por Toebe (2014).

4.3 Material e métodos

Os dados observados foram obtidos através de experimento conduzido em campo da Embrapa Trigo no município de Passo Fundo, RS (28° 15' S, 52° 24' O). Para avaliar o efeito isolado dos parasitoides na população de *R. padi* foram utilizadas gaiolas fechadas com tela com abertura de malha de 2 × 2 mm que permitia somente a entrada dos parasitoides excluindo predadores (sistema de restrição). Para avaliar o efeito conjunto de parasitoides mais predadores nenhum tipo de gaiola foi posto no sistema possibilitando acesso completo dos inimigos naturais aos afídeos (sistema aberto). Ainda era mantido um sistema para avaliar o crescimento populacional de *R. padi*, onde as gaiolas eram fechadas com tecido do tipo “voil”, que impedia a entrada de qualquer inimigo natural (sistema de exclusão).

Para cada sistema avaliado, foram colocadas quatro unidades experimentais representadas por bandejas (65 cm de comprimento x 40 cm de largura), semeadas com a cultivar de trigo Embrapa 16, em 4 linhas de semeadura igualmente espaçadas. Após a emergência, mantiveram-se 22 plantas por linha totalizando 88 plantas por bandeja. No estágio de duas a três folhas expandidas, as plantas eram infestadas com exemplares avirulíferos de *R. padi* em estágio pré-reprodutivo. Cada bandeja era infestada com 18 afídeos, distribuídos aleatoriamente nas plantas. Os afídeos eram aclimatados por aproximadamente 72 horas em câmara a 23°C e fotoperíodo de 12 horas. Após esse período, as bandejas eram levadas para o campo e colocadas embaixo de uma estrutura de ferro com telhado de propileno ondulado translúcido a fim de evitar o efeito da chuva sobre os afídeos, constituindo um bloco.

As exposições foram feitas todo começo de mês, de agosto de 2019 a julho de 2020, totalizando 12 períodos amostrados (Tabela 4). Para todos os experimentos a duração de exposição foi de 28 dias, com exceção dos meses de dezembro (31 dias), maio

(30 dias) e junho (25 dias). No final de cada exposição, todas as 88 plantas eram cortadas, alocadas dentro de potes e levadas para o laboratório a fim de realizar a contagem dos afídeos por meio do *software* AphidCV (LINS et al., 2020).

Tabela 4 - Data de semeadura nas bandejas, data de infestação e data de colheita para os 12 períodos amostrados no campo. Passo Fundo, 2019-2020

Mês de exposição	Data de semeadura	Data de infestação	Data de colheita
Agosto	09/07/2019	05/08/2019	02/09/2019
Setembro	08/08/2019	02/09/2019	30/09/2019
Outubro	12/09/2019	30/09/2019	28/10/2019
Novembro	10/10/2019	28/10/2019	25/11/2019
Dezembro	18/11/2019	02/12/2019	02/01/2020
Janeiro	16/12/2019	06/01/2020	03/02/2020
Fevereiro	20/01/2020	03/02/2020	02/03/2020
Março	13/02/2020	02/03/2020	30/03/2020
Abril	16/03/2020	30/03/2020	27/04/2020
Mai	10/04/2020	27/04/2020	27/05/2020
Junho	14/05/2020	01/06/2020	26/06/2020
Julho	15/06/2020	01/07/2020	29/07/2020

Fonte: Dados da Autora.

Através de um processo iterativo foi feita a estimativa da taxa de mortalidade diária para cada mês. A taxa de mortalidade mais ajustada foi aquela que permitiu o menor desvio entre a população final observada e a população simulada. A simulação do número final de afídeos foi realizada no modelo ABISM (<http://200.132.58.15:6538/ABISM/>). Na página inicial, as simulações foram feitas na tela: “New simulation > Normal”, que contém um menu com diferentes módulos que foram preenchidos de acordo com os dados do experimento (Figura 11). No módulo dados iniciais (“*Initial data*”) foi colocado o local (Passo Fundo), data de semeadura, de infestação e de colheita. Este campo foi preenchido de acordo com as datas correspondentes de cada um dos 12 períodos amostrados no experimento, sendo a data de infestação correspondente ao dia em que as bandejas foram expostas no campo e a data de colheita o dia em que as mesmas foram retiradas do campo (Tabela 4).

Figura 11 - Página Web do ABISM para simulação normal com os respectivos menus: dados iniciais (a) meteorológicos (b) área (c) praga inicial (d) índices de desenvolvimento (e) controle de mortalidade

The screenshot displays the ABISM web interface with the following configuration details:

- (a) Initial data:**
 - Local: Passo Fundo (RS)
 - Date of sowing: 2019-07-09
 - Date of infestation: 2019-08-05
 - Date of harvest: 2019-09-02
 - Duration of the experiment (days): 28
- (b) Weather data:**
 - Thermal regime: VarAPI
 - Weather station: Passo Fundo (RS)
 - Minimum temperature: 5
 - Maximum temperature: 5
- (c) Tillage data:**
 - Rows: 4
 - Plants/row: 22
 - Total plants: 88
 - Initial plant: 54
 - Crop: Wheat
 - Grow crop: Embrepa16
 - Amount of aphids/cm2: 1
- (d) Initial pest data:**
 - Initial Phase: Adult
 - Initial Shape: Apterae
 - Initial Stage Development: PreRepro
 - Initial Accumulated Temperature: 1,1
 - Initial Days Alive: 5
 - Amount Of Starting Pests: 18
- (e) Development thresholds:**
 - Nymph Index (<=): 1,1
 - Adult Index (>= and <=): 1,1
 - Dead Index (>): 2,6
 - Pre-Repro Index (>= and <=): 1,1
 - Repro Index (>= and <=): 1,18
 - Post-Repro Index (>=): 2,3
- (f) Mortality control:**
 - Mortality from parasitism? True
 - Mortality rate due to parasitism: 2,0
 - Mortality from predation? True
 - Mortality rate due to predation: 3,0
 - Rainfall mortality? False
 - Rainfall mortality index (mm): 10
 - Low temperature mortality? False
 - Low temperature mortality index (°C): 3

Fonte: ABISM-GUI, 2021.

No módulo dados meteorológicos (“*Weather data*”), em regime térmico selecionou-se a opção variável (VarAPI) que busca as temperaturas mínimas, médias máximas da estação meteorológica indicada, no caso Passo Fundo. No menu de dados de campo (“*Tillage data*”) nenhum dos parâmetros foi alterado, uma vez que nesse estudo foi utilizada a mesma unidade experimental definida por Wiest et al. (2021), mantendo-se o número de linhas, de plantas por linha, total de plantas, cultura e cultivar. Em dados de praga inicial (“*Initial pest data*”) o único item modificado foi a quantidade de pragas iniciais, passando de um para 18 afídeos. Todos os indivíduos utilizados na infestação eram adultos ápteros em período pré-reprodutivo. Os índices de desenvolvimento (“*Development thresholds*”) foram os mesmos definidos por Wiest et al. (2021).

No módulo controle de mortalidade (“*Mortality control*”), as simulações foram realizadas primeiramente selecionando-se como verdadeiro somente a mortalidade por parasitismo para comparação do efeito isolado de parasitoides provenientes do

experimento de campo (sistema de restrição) e após, para comparar com o sistema aberto, foram feitas simulações ativando como verdadeiro a mortalidade tanto por parasitismo quanto por predação.

A fim de monitorar a flutuação populacional de parasitoides e predadores, durante todo o período de estudo, foi mantida na área experimental uma armadilha do tipo Möericke (ou armadilha amarela), constituída por uma bandeja de alumínio (45 cm de comprimento, 30 cm de largura e profundidade 5 cm) pintada de amarelo. Essa armadilha foi preenchida com solução aquosa (proporção de 1 L de água; 1 ml de formol 40%; 2 ml de detergente neutro). Os insetos capturados eram semanalmente coletados e levados até o laboratório para contagem e identificação. Os dados de número de parasitoides e predadores coletados em armadilha amarela foram comparados as taxas de mortalidade por parasitismo ajustadas ao modelo de simulação para o mês correspondente.

O ajuste das taxas de mortalidade foi analisado computando as discrepâncias entre o tamanho da população final observada e simulada tanto para efeito de parasitoides e parasitoides mais predadores. O modelo foi avaliado através da regressão dos valores observados no eixo y contra os simulados no eixo x (PIÑEIRO; PERELMAN; PARUELO, 2008). O erro médio absoluto (MAE), erro médio quadrático (MSE) e raiz quadrada média do erro (RMSE) foram as medidas de desvio. As análises foram feitas através do *software* estatístico R (R CORE TEAM, 2019) utilizando o pacote qualV (JACHNER; VAN DEN BOOGAART; PETZOLDT, 2007).

4.4 Resultados

No menu da versão anterior da interface gráfica do ABISM, não era possível definir taxas de mortalidade diárias variáveis de acordo com o período amostrado, ou seja, no modelo um único valor de mortalidade, de 10 %, estava pré-definido. Através da simulação nesta versão, o número final de áfidos foi zero para os 12 períodos simulados. Para corrigir essa limitação foi adicionado ao menu, a opção de modificar as taxas de mortalidade diária. A fim de testar a hipótese de taxas constantes ao longo do ano, primeiramente, foram estabelecidas, para todos os meses, taxas fixas inferiores a 10% de

2, 5 e 7 % de mortalidade por parasitismo e após para inimigos naturais (taxa de mortalidade final igual a soma da taxa de mortalidade por parasitismo e predação).

Para as taxas fixas de mortalidade diária por parasitismo, nenhum dos valores escolhidos apresentou ajuste adequado aos valores observados, porém as menores medidas de desvios foram resultado das simulações com mortalidade de 7 % (MAE= 10232,2; MSE= 205469225,8; RMSE= 14334,2). É importante avaliar que uma mudança de 2% entre as taxas teve grande impacto na população final (Tabela 5).

Tabela 5 - Número final de afídeos observado e simulado no modelo ABISM com valores fixos de 2, 5 e 7 % para as taxas de mortalidade diária por parasitismo ao longo do período estudado. MAE, erro médio absoluto; MSE, erro médio quadrático; RMSE, raiz quadrada média do erro. Passo Fundo, 2019-2020

Mês	Observado	Mortalidade 2%	Mortalidade 5%	Mortalidade 7%
Agosto	134	1521	60	0
Setembro	11	1890	132	0
Outubro	253	5047	729	0
Novembro	34	21753	2039	0
Dezembro	829	19756	688	0
Janeiro	877	25333	2492	38
Fevereiro	111	27839	1964	88
Março	660	15783	1817	0
Abril	681	2399	99	0
Maio	146	1538	64	0
Junho	21	1891	314	10
Julho	12	1806	230	0
MAE	-	10232.2	718.1	302.8
MSE	-	205469225.8	1012158.6	199656.2
RMSE	-	14334.2	1006.1	446.8

Fonte: Dados da autora.

Da mesma forma, para as taxas fixas de mortalidade diária por inimigos naturais (parasitismo + predação), os valores simulados foram discrepantes em relação aos dados

observados para cada um dos meses avaliados. Porém, a mortalidade de 7% foi a que obteve as menores medidas de desvio (MAE=90,5; MSE= 15297; RMSE= 123,7) (Tabela 6).

Tabela 6 - Número final de afídeos observado e simulado no modelo ABISM com valores fixos de 2, 5 e 7% para as taxas de mortalidade diária por inimigos naturais ao longo do período estudado. MAE, erro médio absoluto; MSE, erro médio quadrático; RMSE, raiz quadrada média do erro. Passo Fundo, 2019-2020

Mês	Observado	Mortalidade 2%	Mortalidade 5%	Mortalidade 7%
Agosto	96	1734	141	0
Setembro	9	2506	156	0
Outubro	12	5586	973	6
Novembro	7	23517	2042	0
Dezembro	10	20999	1114	0
Janeiro	69	30003	2712	330
Fevereiro	86	29929	2142	176
Março	122	17323	2510	0
Abril	194	2680	143	0
Mai	200	1766	127	0
Junho	18	2236	332	88
Julho	1	2136	242	22
MAE	-	11632.6	1004.3	90.5
MSE	-	261156621.4	1948911	15297
RMSE	-	16160.3	1396.1	123.7

Fonte: Dados da autora.

Consequentemente foi necessário estabelecer, através de um processo iterativo, taxas de mortalidade diárias variáveis para os diferentes meses, a fim de encontrar os valores que mais se adequassem aos dados observados no experimento de campo. Então, durante o processo de simulação, diferentes valores para as taxas de mortalidade por

parasitismo e predação foram testados a fim de encontrar aqueles que resultassem em menor desvio entre os dados observados e simulados.

Houve variação no efeito de parasitoides sobre a população de *R. padi* ao longo do período amostrado. Através das estimativas de mortalidade por parasitismo, o maior número absoluto de afídeos foi obtido no mês de janeiro, com 877 afídeos observados e 906 afídeos simulados por parcela, seguido dos meses de dezembro, março e abril. Em contraposição, o menor número absoluto de afídeos encontrado foi no mês de setembro, com 11 afídeos observados e 15 afídeos simulados por parcela, seguido dos meses de novembro, junho e julho (Figura 12a). O efeito de parasitoides em condições de campo pôde ser avaliado através da variação proporcional, obtida pela comparação do número de afídeos do sistema com a ação de parasitoides em relação ao sistema de exclusão (sem ação de inimigos naturais). A maior ação de parasitoides foi alcançada em setembro e novembro, meses os quais a população de afídeos foi de 0,1 % do seu potencial. O menor efeito de parasitoides foi observado nos meses de março e abril, onde os afídeos atingiram 5,2 e 4,9 % do seu potencial (Figura 13a).

As taxas estimadas de mortalidade por parasitismo foram variáveis ao longo dos 12 meses. Em agosto, o melhor valor ajustado ao modelo foi de 4,6 %. Nos meses de setembro, outubro e novembro a mortalidade aumentou para 5,8, 5,7 e 6,2 %, respectivamente. Em dezembro, este valor reduziu para 5 %, aumentando em janeiro para 5,6 %. A maior taxa (7%) foi estimada para o mês de fevereiro. A partir de março, os valores ajustados foram reduzindo novamente, passando para 5,7% em março e alcançando a menor mortalidade em abril, de 3,2 %. Em junho, a taxa aumentou para 6,9 %, reduzindo em julho para 5,8 % (Figura 12a).

Quanto aos valores obtidos considerando o efeito de inimigos naturais no sistema (predadores + parasitoides), o padrão de variação em relação ao número absoluto de afídeos se estabeleceu de maneira diferente do que o efeito isolado de parasitoides. Os maiores números absolutos de afídeos foram encontrados em abril (194 afídeos observados e simulados por parcela) e maio (200 afídeos observados e 188 simulados por parcela). O mês de julho resultou no menor número absoluto de afídeos, com 1 afídeo

observado e 0 simulado por parcela. Durante os meses de setembro, outubro, novembro, dezembro e junho a população também se manteve baixa não ultrapassando o número de 22 afídeos por parcela (Figura 12b). O efeito de inimigos naturais também pôde ser avaliado através da população proporcional, obtida pela comparação do número de afídeos do sistema com a ação de parasitoides e predadores em relação ao sistema de exclusão (sem ação de inimigos naturais). Entre os meses de setembro a janeiro e no mês de julho foram os períodos de maior ação de inimigos naturais nos quais a população de afídeos não atingiu mais de 0,2 % do seu potencial. O menor efeito de inimigos naturais foi observado em maio, onde os afídeos atingiram 1,9 % do seu potencial (Figura 13b).

Nesse sistema as taxas de mortalidade também foram diferentes para cada mês monitorado. No mês de agosto, o valor de mortalidade ajustado ao modelo foi de 5 %, durante os meses de setembro, outubro e novembro esta taxa aumentou mantendo-se em torno de 6,5 %. Para dezembro foi ajustada uma mortalidade mais baixa, de 5,7 %, sendo que nos meses seguintes, janeiro e fevereiro os valores aumentaram para 7,1 e 7,3 %, respectivamente. A partir de março, os valores de mortalidade ajustados foram menores, alcançando o mínimo no mês de abril (4,8 %). Em seguida, no mês de junho, foi atingindo o valor mais alto de mortalidade por inimigos naturais, de 7,8 %, o qual manteve-se alto durante julho (7,6 %) (Figura 13b).

Para a mortalidade por parasitismo o ajuste do modelo foi bom (MAE= 27,5; MSE = 2082,5; RMSE= 45,6), sendo que com exceção do mês de dezembro a maior parte dos dados ficaram perto da linha apresentando uma relação de 1:1 entre os valores simulados e observados (Figura 14a). Da mesma forma, os valores simulados também foram adequados para a mortalidade por inimigos naturais (parasitismo + predação) (MAE= 4,2; MSE= 33,8; RMSE= 5,8) o que indica que as taxas estimadas permitiram ao modelo obter um número final de afídeos próximo ao observado (Figura 14b). Entre os dois fatores de mortalidade propostos, o efeito de inimigos naturais apresentou os menores erros na comparação entre os dados simulados e observados para a população final de afídeos.

Comparando a proporção de afídeos observados nos sistemas com o efeito de inimigos naturais em relação ao sistema de exclusão e a sua relação com as taxas de

mortalidade ajustadas ao modelo de simulação ABISM, é possível analisar que para ambos os sistemas, a população proporcional alcançou os menores valores quando a mortalidade estimada aumenta, ou seja, as taxas de mortalidade mais altas refletem o maior controle por inimigos naturais. O efeito isolado de parasitoides foi maior entre setembro e novembro, refletindo em taxas ajustadas de mortalidade por parasitismo altas. Os efeitos de parasitoides em março e abril, resultaram em taxas ajustadas de parasitismo mais baixas, sendo o menor valor de mortalidade obtido em abril (Figura 13a). O maior efeito de inimigos naturais, entre setembro a janeiro e após no mês de julho quando a menor população proporcional de afídeos foi observada, relacionou-se as taxas de mortalidades mais altas para o período avaliado. Os meses de abril e maio com as maiores populações proporcionais observadas tiveram as menores taxas de mortalidade por inimigos naturais ajustadas nas simulações (Figura 13b).

Analisando a relação entre o número de parasitoides coletados em armadilha amarela e as taxas de mortalidade por parasitismo ajustadas ao modelo de simulação, para os meses de setembro e outubro, em que os maiores números de parasitoides foram encontrados, 132 e 113 respectivamente, não corresponderam ao período em que os maiores valores de parasitismo foram ajustados no ABISM (meses de fevereiro e junho). A mesma tendência ocorreu para o número de inimigos naturais que inclui parasitoides e predadores e as taxas de mortalidade correspondentes para cada mês, sendo que nos meses de setembro, outubro e novembro que apresentaram o maior número coletado destes insetos, não foi correspondente aos maiores valores de mortalidade ajustados ao modelo (meses de junho e julho) (Figura 15).

Figura 12 - Comparação entre o número final de afídeos observado e simulado e as respectivas taxas de mortalidade por: a) parasitismo e b) inimigos naturais (parasitismo + predação), entre os meses de agosto de 2019 a julho de 2020. Passo Fundo, 2021

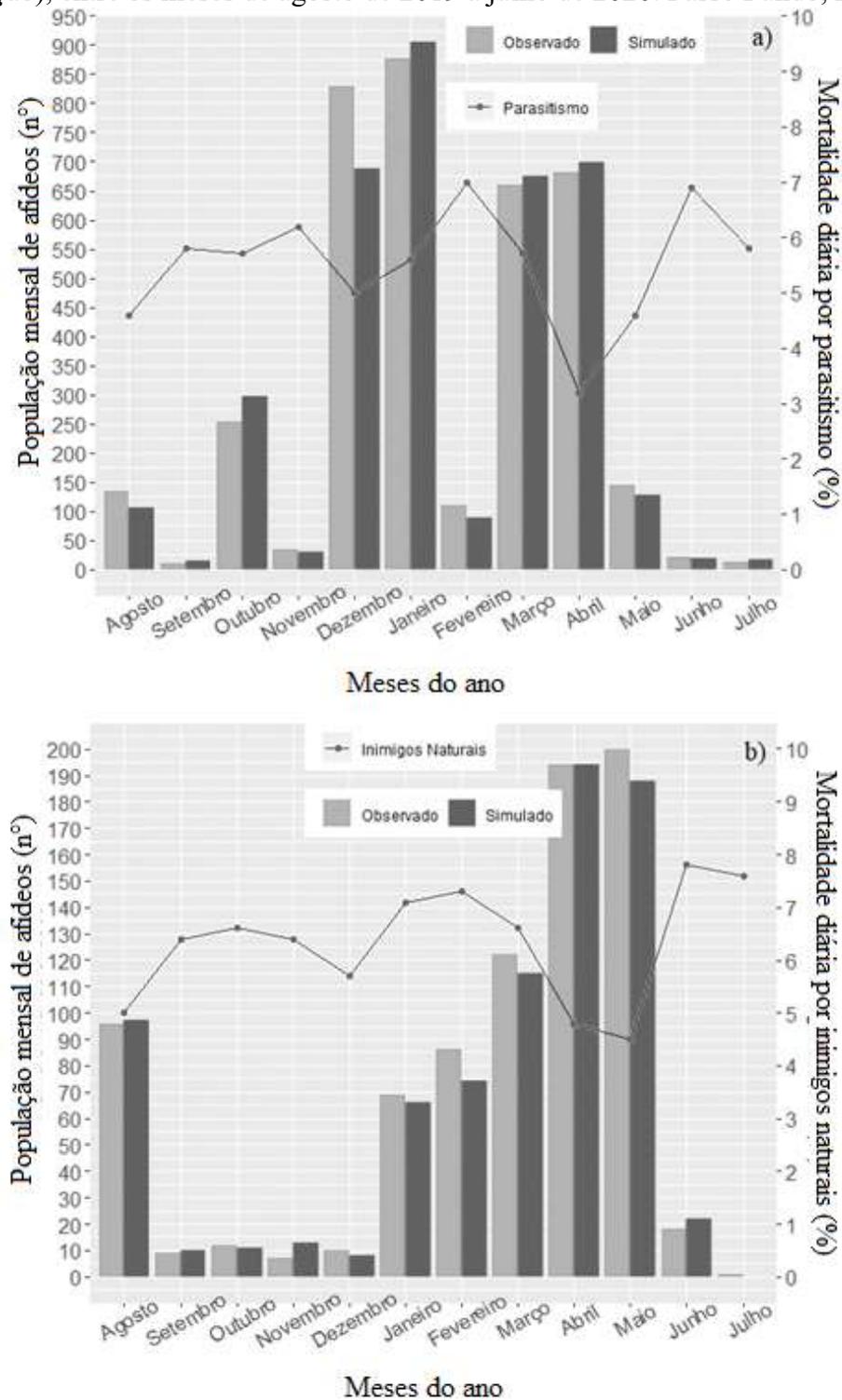


Figura 13 - População final proporcional do número de afídeos em relação ao sistema de exclusão e as respectivas taxas de mortalidade ajustadas no modelo ABISM para cada mês avaliado para: a) sistema de restrição (parasitoides) e taxas de mortalidade por parasitismo e b) sistema aberto (parasitoides + predadores) e taxas de mortalidade por inimigos naturais. Passo Fundo, 2021

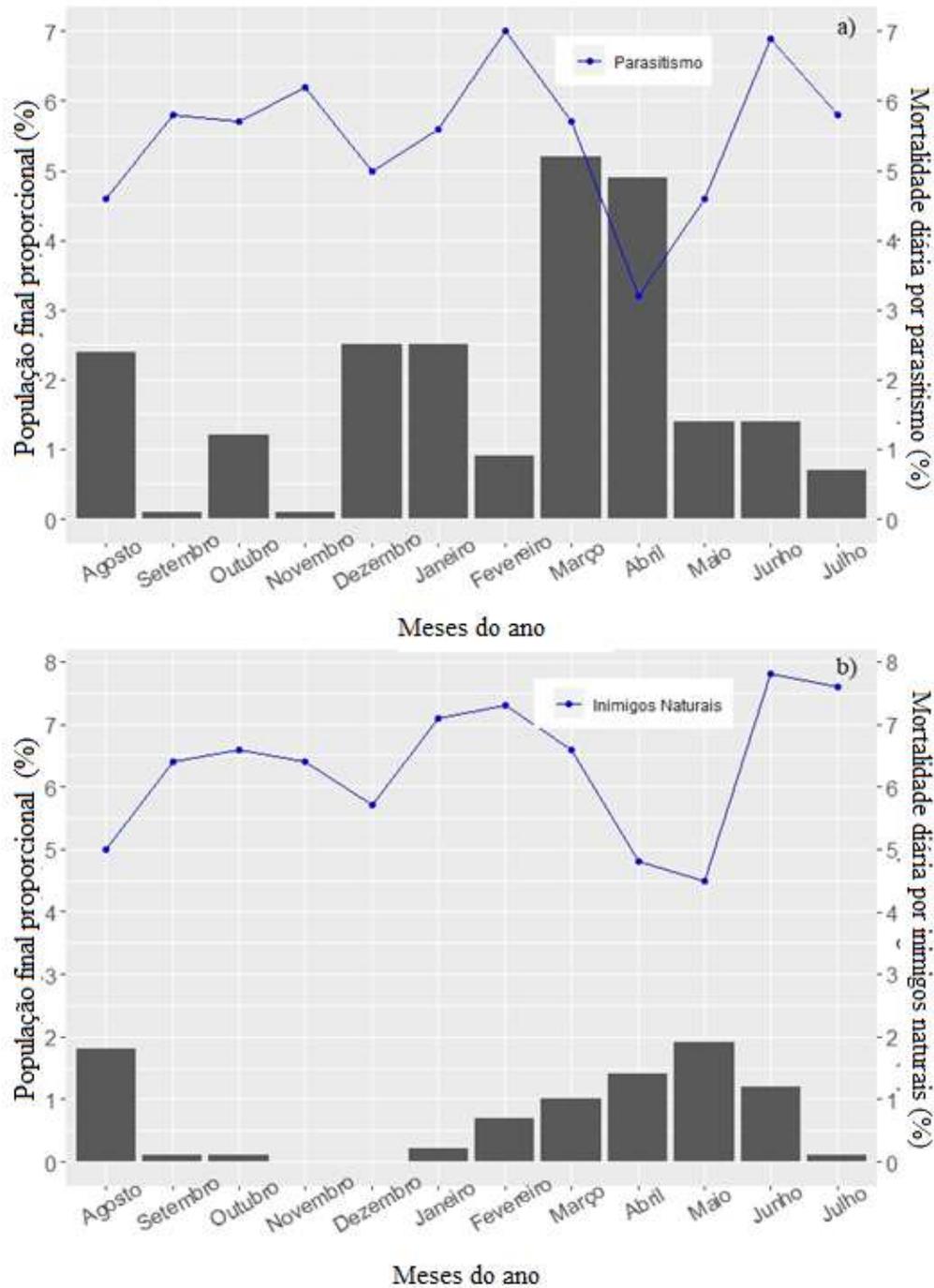


Figura 14 - Comparação entre a população de *Rhopalosiphum padi* observada e simulada e medidas de erro sob o efeito de mortalidade de a) parasitoides e b) inimigos naturais (predadores + parasitoides). MAE, erro médio absoluto; MSE, erro médio quadrático; RMSE, raiz quadrada média do erro. Passo Fundo, 2021

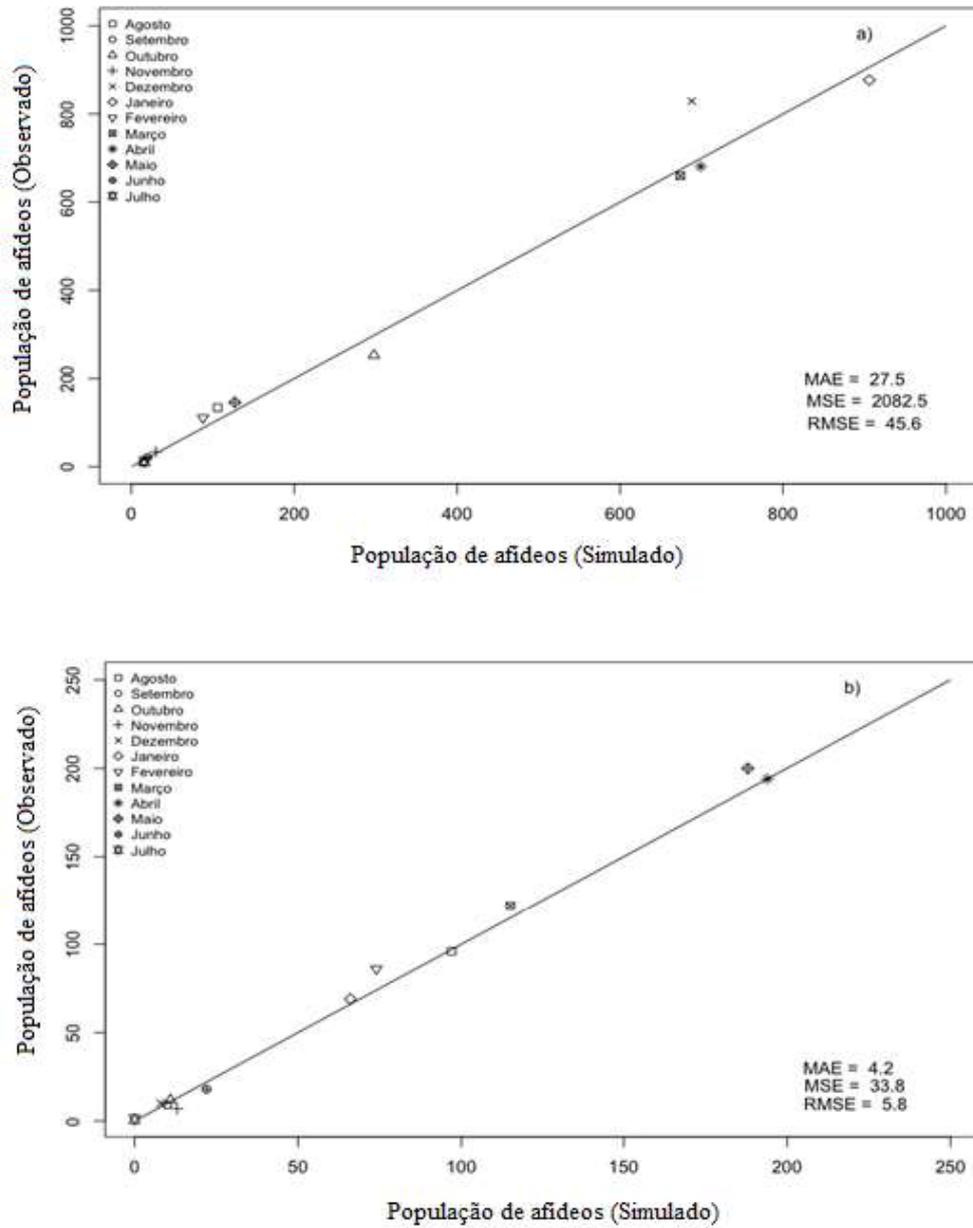
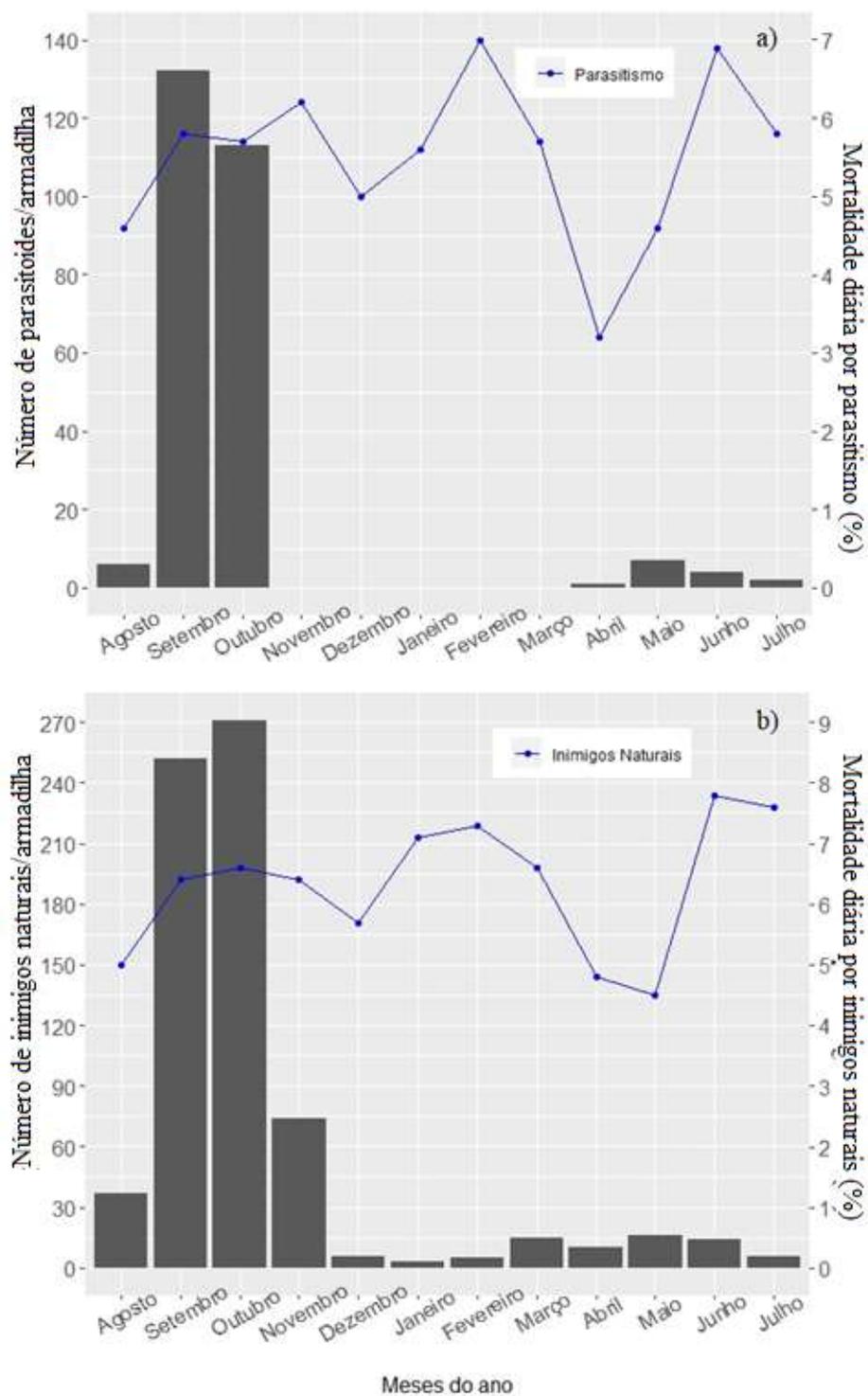


Figura 15 - Número de a) parasitoides e b) inimigos naturais (parasitoides + predadores) coletados em armadilha amarela para cada mês avaliado e a relação com as respectivas taxas de mortalidade. Passo Fundo, 2021



4.5 Discussão

As taxas de mortalidade por parasitismo e predação na população de *R. padi* foram variáveis ao longo de um ano. Por meio do processo iterativo de ajustes das taxas de mortalidade no modelo ABISM as taxas de mortalidade tanto por parasitoides quanto por inimigos naturais em conjunto, não foram fixas para os diferentes meses ao longo de um ano. Após a estimativa de taxas variáveis para cada período avaliado foi possível alcançar um bom ajuste entre os valores simulados e observados de densidade populacional de *R. padi*. Em termos práticos, a fim de parametrizar o modelo, uma opção seria assumir que as variações encontradas neste trabalho ocorrem anualmente e utilizar os valores mensais obtidos como padrão. Outra forma de parametrização seria considerar os fatores que podem influenciar na definição destas taxas de mortalidade, as quais orientariam o ajuste deste parâmetro para o período em simulação, como por exemplo dados atualizados da flutuação populacional dos inimigos naturais e/ou fatores meteorológicos como a temperatura.

A população de insetos é estruturada por forças ascendentes, o chamado efeito “*botton-up*” o qual é baseado em recursos (planta hospedeira) e descendentes, o efeito “*top-down*”, baseado na ação de inimigos naturais (HUNTER; PRICE, 1992; RICHARDS; COLEY, 2007). Para insetos herbívoros, através da condução de uma meta-análise que considerou vários preditores os quais podem modificar estes efeitos, foi concluído que, de maneira geral, as forças de cima para baixo são mais fortes do que as de baixo para cima, tanto em ambientes naturais quanto controlados, ou seja, o efeito dos agentes que estão acima na cadeia trófica como predadores são os principais responsáveis por atuar na regulação das populações dos insetos herbívoros (VIDAL; MURPHY, 2018). Os resultados encontrados neste trabalho estão de acordo com esta afirmação, dado o efeito predominante dos inimigos naturais na regulação do crescimento populacional dos afídeos, partindo da perspectiva que foram fornecidas aos afídeos plantas hospedeiras de qualidade nas bandejas utilizadas para a realização do experimento, então este não foi um fator crítico na estruturação da população destes insetos.

Ainda, os inimigos naturais, além de serem controlados pelo efeito direto das condições do ambiente, principalmente temperatura, também são influenciados indiretamente através do impacto que estes têm sobre os afídeos e planta hospedeira, ou seja, aqui as forças de baixo para cima se aplicam da mesma forma na regulação das populações destes insetos afidófagos (CORCOS et al., 2018; HOOVER; NEWMAN 2004). Desta forma, além de avaliar as faixas ótimas de temperatura para o desenvolvimento de cada um dos possíveis inimigos naturais é necessário considerar a influência dos fatores do ambiente sobre a presa ou hospedeiro e a cultura em questão e as consequências indiretas na dinâmica populacional de parasitoides e predadores.

Então, a temperatura poderia ser utilizada como um dos fatores determinantes na parametrização das taxas de mortalidade por inimigos naturais. Existe uma faixa de temperatura ótima para o desenvolvimento dos afídeos e uma faixa de temperatura ótima para cada inimigo natural. Em termos de regulação da população, o número de afídeos tende a reduzir na medida em que se afasta da sua temperatura ótima e se aproxima da temperatura ótima para o predador ou parasitoide. Em tese, um inimigo natural muito especializado, como o caso dos parasitoides (DESNEUX et al., 2009), deve manter a sua faixa de temperatura ótima próxima a do seu hospedeiro ou presa, já um organismo mais generalista teria menos necessidade disso. No caso da espécie *R. padi*, temperaturas em torno de 25°C são caracterizadas como as mais favoráveis para o seu desenvolvimento (WIEST et al., 2021). Parasitoides do gênero *Aphidius*, dominantes no norte do Rio Grande do Sul, tem seu crescimento populacional ótimo associado à temperatura média do ar inferior a 25 °C (SAMPAIO et al., 2005; SANTOS et al., 2019).

A abundância e dinâmica temporal dos inimigos naturais difere entre os contextos de paisagens sendo observada geralmente uma relação positiva entre sua complexidade e a diversidade destes insetos (CHAPLIN-KRAMER et al., 2011). A colonização dos inimigos naturais na cultura do trigo ocorre mais cedo em paisagens estruturalmente mais complexas podendo facilitar o controle no início da safra (LAVANDERO, 2015; RAYMOND; ORTIZ-MARTÍNEZ). Neste trabalho, a população final de afídeos observada foi obtida em um experimento de campo conduzido em uma área manejada através da sucessão de cereais (trigo-milho-aveia preta). Esse fator associado as outras

características locais da paisagem podem ter influenciado a população de afídeos pelo seu efeito na dinâmica dos inimigos naturais, afetando conseqüentemente as taxas de mortalidade aqui estabelecidas.

As taxas de mortalidade diárias ajustadas ao modelo ABISM neste estudo não se relacionaram diretamente aos dados de armadilha amarela para cada mês correspondente, visto que as maiores taxas de mortalidade as quais são relativas as menores densidades populacionais de afídeos não corresponderam ao maior número de inimigos naturais coletados durante o período avaliado. A duração de cada período amostrado nesse estudo foi de em média 28 dias, dentro desse tempo a entrada dos inimigos naturais no sistema pode ter ocorrido logo no início, no meio ou final das exposições. Se o parasitismo ou predação ocorrerem na primeira semana da exposição é esperado maior controle visto que a multiplicação do afídeo será rapidamente freada. Ao contrário, se a ocorrência destes insetos benéficos se relacionar ao período final de avaliação, maior número de afídeos será encontrado, principalmente em relação ao sistema em que a ação isolada de parasitoides é avaliada. Uma opção, não realizada neste trabalho, seria considerar a densidade populacional de parasitoides e predadores nas duas primeiras semanas de exposição como parâmetro da estimativa da mortalidade.

Neste trabalho as taxas de mortalidade por inimigos naturais incluíram o efeito conjunto de parasitoides e predadores, ou seja, o número final de afídeos encontrado foi o resultado da combinação do efeito de ambos os grupos, cada qual com um valor de mortalidade. Nas condições de campo, esse diverso conjunto de inimigos naturais é governado por interações tróficas que podem resultar em diferentes conseqüências em relação ao controle exercido sobre as populações da praga. Como resultado, as respostas podem ser antagônicas (predação intraguildd), neutras (redundância funcional) ou aditivas (partição de nicho) (STRAUB; FINKE; SNYDER., 2008; TYLIANAKIS; ROMO, 2010). O conhecimento das características funcionais de cada espécie de inimigo natural, irá contribuir para a compreensão sobre o papel específico de cada um destes sobre as populações de afídeos e as possíveis interações resultantes ao longo do tempo.

Como citado, existem diversos fatores que influenciam o estabelecimento das taxas de mortalidade por inimigos naturais. Com este trabalho foi possível dar um passo inicial na parametrização para o módulo de mortalidade por estes agentes de controle, estabelecendo que estas taxas não são as mesmas ao longo do tempo. Ficam como questões a serem abordadas, a definição dos principais fatores que irão determinar os diferentes valores de mortalidade para parasitismo e predação, buscando aproximar-se ao máximo das condições encontradas nos sistemas agrícolas dos quais a cultura do trigo faz parte.

O resultado das simulações no ABISM de maneira prática está relacionado a sua utilização como uma ferramenta para tomada de decisão no controle de afídeos dentro da abordagem do manejo integrado de pragas. Cada vez mais o papel dos inimigos naturais na redução do potencial biótico das populações de afídeos vem sendo reconhecido, e diante disso o agricultor terá a possibilidade de prever possíveis surtos da praga, baseado em um modelo que leva os fatores de mortalidade ocasionados por estes insetos benéficos em consideração, parametrizado de acordo com dados observados no campo. Diante disso, a margem de lucro obtida com o cultivo do trigo poderá ser incrementada com o uso deste modelo de simulação aliado a outras plataformas de monitoramento, as quais poderão contribuir com um manejo assertivo que leva em consideração a contribuição do controle biológico no sistema.

4.6 Conclusões

As taxas de mortalidade ajustadas por ação de parasitoides e por ação conjunta de parasitoides e predadores foram variáveis ao longo do ano. A parametrização do modelo não pode adotar taxas de mortalidade fixas para os diferentes meses do ano. Os valores de mortalidade adicionados as simulações realizadas neste trabalho resultaram em número final de afídeos muito próximo ao observado no campo após o efeito de parasitoides e predadores e, por isso, poderiam ser utilizadas como padrão para o modelo.

O modelo mostrou-se adequado para simular a população de afídeos após o efeito de mortalidade por parasitismo e predação. A interface gráfica do ABISM pode ser

utilizada facilmente como uma ferramenta prática e dinâmica para estudos que visam compreender os fatores que afetam a dinâmica populacional de afídeos alterando parâmetros e visualizando os resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, ao longo de um ano, cobrindo os cultivos de trigo (agosto a novembro de 2019), milho (dezembro de 2019 a fevereiro de 2020) e aveia-preta (março a julho de 2020), foi avaliado o efeito isolado de parasitoides e o efeito conjunto de parasitoide e predadores sobre o crescimento populacional de *R. padi*, tendo como comparação um grupo deste afídeo que se desenvolveu na ausência de inimigos naturais. Também foram identificados os principais inimigos naturais associados ao controle biológico de afídeos, sua flutuação populacional e a relação com o impacto negativo no crescimento populacional da praga estudada.

O crescimento populacional de *R. padi* na ausência de inimigos naturais variou em função da temperatura ambiental no período do experimento, sendo menor no inverno e com ápice no verão. Sob ação dos inimigos naturais, a população de afídeos foi reduzida a proporções muito baixas em relação ao seu potencial. Portanto, as forças exercidas de cima para baixo dentro da cadeia trófica foram determinantes na regulação do crescimento populacional de *R. padi*.

Mesmo com algumas variações ao longo do ano, o efeito isolado de parasitoides se mostrou eficiente da mesma forma que o efeito adicional de predadores, o que indica que as diferentes espécies de inimigos naturais, incluindo as introduzidas em 1978 pelo Programa de Controle Biológico dos Pulgões do Trigo, estão atuando de forma eficiente no sistema.

As taxas de mortalidade por ação de inimigos naturais variaram ao longo do ano. Essa variação reflete as flutuações populacionais observadas para parasitoides e predadores, os quais são influenciados por condições do ambiente, como a temperatura, além de todo o contexto de paisagem tanto espacial quanto temporal.

As espécies de parasitoides *Aphidius platensis*, *Aphidius uzbekistanicus* e *Aphidius rhopalosiphi*, foram as mais abundantes na redução populacional de *R.padi* durante o desenvolvimento da cultura do trigo (agosto a novembro de 2019). Durante o desenvolvimento da cultura do milho, nenhum parasitoide foi coletado nas armadilhas amarelas, porém das múmias formadas nas bandejas, a espécie *L. testaceipes* foi a que mais se destacou. Os meses de março a julho, quando a cultura da aveia estava presente na área, marcaram o reaparecimento de *A. platensis*. Coccinelídeos e sirfídeos foram os grupos de predadores associados ao controle de *R. padi*. As únicas espécies de sirfídeos identificadas foram *T. duplicatus* e *A. exotica*. As espécies de coccinelídeos encontradas em maior quantidade foram *H. axyridis*, *H. convergens* e *E. connexa*,

O efeito isolado de predadores sobre a população de afídeos, devido às restrições do método empregado, não foi determinado. Para melhor compreender o papel destes inimigos naturais, é necessário que estudos que resolvam estas limitações sejam conduzidos.

As taxas de mortalidade por parasitismo e predação foram parametrizadas no modelo ABISM permitindo um bom ajuste aos valores observados. O modelo é uma ferramenta eficiente para representar e estudar a dinâmica populacional de afídeos observada em condições de campo.

6 CONCLUSÃO GERAL

A ação dos inimigos naturais é determinante na regulação da população de *R. padi*. O efeito exercido por estes insetos benéficos, apesar de variável, ocorreu ao longo de todo o período estudado. O manejo destas pragas nos sistemas agrícolas deve considerar o potencial de controle dos inimigos naturais e a dinâmica populacional de cada grupo destes insetos benéficos para cada um dos meses do ano. Aliado a essa necessidade, o uso do modelo ABISM constitui-se como uma ferramenta adequada para simular o crescimento populacional de *R. padi* e prever possíveis surtos da praga considerando inclusive a mortalidade por parasitismo e predação.

REFERÊNCIAS

ABAR, S.; THEODOROPOULOS, G. K.; LEMARINIER, P.; O'HARE, G. M. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. **Computer Science Review**, v. 24, p. 13-33, 2017.

ALI, A.; DESNEUX, N.; LU, Y.; WU, K. Key aphid natural enemies showing positive effects on wheat yield through biocontrol services in northern China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 226, n.1, p. 1-9, 2018.

ALMOHAMAD, R.; VERHEGGEN, F.; HAUBRUGE, É. Searching and oviposition behavior of aphidophagous hoverflies (Diptera: Syrphidae): a review. **Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement**, v. 13, n. 3, p. 467-481, 2009.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 711-728, 2013.

ANDERSON, T.; DRAGIĆEVIĆ, S. An agent-based modeling approach to represent infestation dynamics of the emerald ash borer beetle. **Ecological Informatics**, v. 30, p. 97-109, 2015.

BAHLAI, C. A.; SCHAAFSMA, A. W.; LAGOS, D.; VOEGTLIN, D.; SMITH, J. L.; ANDREW WELSMAN, J.; XUE, Y.; DIFONZO, C.; HALLETT, R. H. Factors associated with winged forms of soybean aphid and an examination of North American spatial dynamics of this species in the context of migratory behaviour. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 16, n. 3, p. 240-250, 2014.

BALE, J. S.; MASTERS, G. J.; HODKINSON, I. D.; AWMACK, C.; BEZEMER, T. M.; BROWN, V. K.; BUTTERFIELD, J.; BUSE, A.; COULSON, J. C.; FARRAR, J.; GOOD, J. E. G.; HARRINGTON, R.; HARTLEY, S.; JONES, T. H.; LINDROTH, R. L.; PRESS, M. C.; SYMRNIODIS, I.; WATT, A. D.; WHITTAKER, J. B. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. **Global Change Biology**, v. 8, n. 1, p. 1-16, 2002.

BALOG, A.; MEHRPARVAR, M.; WEISSER, W. W. Polyphagous predatory rove beetles (Coleoptera: Staphylinidae) induce winged morphs in the pea aphid *Acyrtosiphon pisum* (Hemiptera: Aphididae). **European Journal of Entomology**, v. 110, n. 1, p. 153–157, 2013.

BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n.1, p. 1-48, 2015.

BENTON, T. G.; VICKERY, J. A.; WILSON, J. D. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? **Trends in Ecology & Evolution**, v. 18, n. 4, p. 182-188, 2003.

BLACKMAN, R. L.; EASTOP, V. F. Taxonomic issues. 1-29. In: VAN EMDEN, H. F.; HARRINGTON, R. **Aphids as crop pests**. 2 ed. Oxford: CAB International, 2017. p. 1-36.

BOIVIN, G.; HANCE, T.; BRODEUR, J. Aphid parasitoids in biological control. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 92, n. 1, p. 1-12, 2012.

BONABEAU, E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 99, n. suppl 3, p. 7280-7287, 2002.

BRISSON, J. A.; JAQUIERY, J.; LEGEAI, F.; LE TRIONNAIRE, G.; TAGU, D. Genomics of phenotypic plasticity in aphids. In: **Management of Insect Pests to Agriculture**. Springer, Cham, 2016. p. 65-96.

BRODEUR, J.; HAJEK, A. E.; HEIMPEL, G. E.; SLOGGETT, J. J.; MACKAUER, M.; PELL, J. K. VÖLKL, W. Predators, parasitoids and pathogens. In: EMDEN, H. van; HARRINGTON, R. (Ed.). **Aphids as crop pests**. Oxford: CAB International, 2017. p. 225-249.

CAETANO, V. da R.; CAETANO, V. da R. Variações sazonais de pulgões de trigo. In: Reunião Anual Conjunta de Pesquisa de Trigo. 10., 1978, Porto Alegre. **Anais...** Passo Fundo: Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, v. 2, 1978. p. 102-114.

CARSON, J. S. Introduction to modeling and simulation. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, IEEE, 2005. p. 8.

CARTER, N. Simulation modelling of the population dynamics of cereal aphids. **Biosystems**, v. 18, n. 1, p. 111-119, 1985.

CASTEX, V.; BENISTON, M.; CALANCA, P.; FLEURY, D.; MOREAU, J. Pest management under climate change: The importance of understanding tritrophic relations. **Science of the Total Environment**, v. 616, p. 397-407, 2018.

CHAKRABORTI, A.; TOKE, I. M.; PATRIARCA, M.; ABERGEL, F. Econophysics review: II. Agent-based models. **Quantitative Finance**, v. 11, n. 7, p. 1013-1041, 2011.

CHAPLIN-KRAMER, R.; O'ROURKE, M. E.; BLITZER, E. J.; KREMEN, C. A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. **Ecology Letters**, v. 14, n. 9, p. 922-932, 2011.

CIVIDANES, F. J.; SANTOS-CIVIDANES, T. M. dos. Occurrence of alate aphids and their relationship with meteorological factors and host plants. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 1, p. 7-15, 2010.

CORCOS, D.; CERRETTI, P.; MEI, M.; TAGLIANTI, A. V.; PANICCIA, D.; SANTOIEMMA, G.; BIASE, A.; MARINI, L. Predator and parasitoid insects along elevational gradients: role of temperature and habitat diversity. **Oecologia**, v. 188, n. 1, p. 193-202, 2018.

COSTAMAGNA, A. C.; MCCORNACK, B. P.; RAGSDALE D. W. Alate immigration disrupts soybean aphid suppression by predators. **Journal of Applied Entomology**, v. 137, n. 4, p. 317-320, 2013.

DAMOS, P.; SAVOPOULOU-SOULTANI, M. Temperature-driven models for insect development and vital thermal requirements. **Psyche**, v. 2012, 2012.

DEAN, G. J. Effect of temperature on the cereal aphids *Metopolophium dirhodum* (Wlk.), *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Macrosiphum avenae* (F.) (Hem., Aphididae). **Bulletin of Entomological Research**, v. 63, n. 3, p. 401-409, 1974.

DEDRYVER, C. A.; BONHOMME, J.; LE GALLIC, J. F.; SIMON, J. C. Differences in egg hatching time between cyclical and obligate parthenogenetic lineages of aphids. **Insect Science**, v. 26, n. 1, p. 135-141, 2019.

DEDRYVER, C. A.; LE RALEC, A.; FABRE, F. The conflicting relationships between aphids and men: a review of aphid damage and control strategies. **Comptes Rendus Biologies**, v. 333, n. 6-7, p. 539-553, 2010.

DESNEUX, N.; BARTA, R. J.; HOELMER, K. A.; HOPPER, K. R.; HEIMPEL, G. E. Multifaceted determinants of host specificity in an aphid parasitoid. **Oecologia**, v. 160, n. 2, p. 387-398, 2009.

DIB, H.; SIMON, S.; SAUPHANOR, B.; CAPOWIEZ, Y. The role of natural enemies on the population dynamics of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) in organic apple orchards in south-eastern France. **Biological Control**, v. 55, n. 2, p. 97-109, 2010.

DIEHL, E.; SEREDA, E.; WOLTERS, V.; BIRKHOFFER, K. Effects of predator specialization, host plant and climate on biological control of aphids by natural enemies: a meta-analysis. **Journal of Applied Ecology**, v. 50, n.1, p. 262-270, 2013.

DUAN, X. L.; PENG, X.; QIAO, X. F.; CHEN, M. H. Life cycle and population genetics of bird cherry-oat aphids *Rhopalosiphum padi* in China: an important pest on wheat crops. **Journal of Pest Science**, v. 90, n. 1, p. 103–116, 2017.

DUFFY, C.; FEALY, R.; FEALY, R. M. An improved simulation model to describe the temperature-dependent population dynamics of the grain aphid, *Sitobion avenae*. **Ecological Modelling**, v. 354, p. 140-171, 2017.

DYER, L. A.; RICHARDS, L. A.; SHORT, S. A.; DODSON, C. D. Effects of CO₂ and temperature on tritrophic interactions. **PLoS One**, v. 8, n. 4, p. e62528, 2013.

ENGEL, E.; LAU, D.; GODOY, W. A. C.; PASINI, M. P. B.; MALAQUIAS, J. B.; SANTOS, C. D. R.; PIVATO, J.; PEREIRA, P. R. V. da S. Oscillation, synchrony and multi-factor patterns between cereal aphids and parasitoid populations in southern Brazil. No prelo, 2021.

FAHRIG, L.; BAUDRY, J.; BROTONS, L.; BUREL, F. G.; CRIST, T. O.; FULLER, R. J.; SIRAMI, C.; SIRIWARDENA, G. M.; MARTIN, J. L. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. **Ecology Letters**, v. 14, n. 2, p.101-112, 2011.

FERERES, A.; IRWIN, M. E.; KAMPMEIER, G. E. Aphid movement: Process and consequences. In: EMDEN, H. F. van; HARRINGTON, R. **Aphids as crop pests**. 2. ed. Oxford: CAB International, 2017. p. 196-216.

FINLAY, K. J.; LUCK, J. E. Response of the bird cherry-oat aphid (*Rhopalosiphum padi*) to climate change in relation to its pest status, vectoring potential and function in a crop–vector–virus pathosystem. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 144, n. 1, p. 405-421, 2011.

FOOTTIT, R. G.; MAW, H. E. L. Insects – Aphids. **Reference Module in Life Sciences**, Elsevier, p. 1-6, 2017.

FRAGO, E. Interactions between parasitoids and higher order natural enemies: intraguild predation and hyperparasitoids. **Current Opinion in Insect Science**, v. 14, p. 81-86, 2016.

FURLONG, M. J.; ZALUCKI, M. P. Climate change and biological control: the consequences of increasing temperatures on host–parasitoid interactions. **Current Opinion in Insect Science**, v. 20, p. 39-44, 2017.

GALLO, D.; NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R. L.; BATISTA, G. D.; BERTI FILHO, E. **Manual de Entomologia Agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, v. 10, 2002.

GARDINER, M. A.; TUELL, J. K.; ISAACS, R.; GIBBS, J.; ASCHER, J. S.; LANDIS, D. A. Implications of three biofuel crops for beneficial arthropods in agricultural landscapes. **BioEnergy Research**, v. 3, n. 1, p. 6-19, 2010.

GASSEN, D. N. **Insetos associados a cultura do trigo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1984. (Circular Técnica).

GASSEN, D. N.; TAMBASCO, F. J. Controle biológico dos pulgões do trigo no Brasil. **Informe Agropecuário**, v. 9, p. 49-51, 1983.

GERVASSIO, N. G. S.; AQUINO, D.; VALLINA, C.; BIONDI, A.; LUNA, M. G. A re-examination of *Tuta absoluta* parasitoids in South America for optimized biological control. **Journal of Pest Science**, v. 92, n. 4, p. 1343-1357, 2019.

GILBERT, N.; HUGHES, R. D. A model of an aphid population--three adventures. **The Journal of Animal Ecology**, p. 525-534, 1971.

GILES, K. L.; MCCORNACK, B. P.; ROYER, T. A.; ELLIOTT, N. C. Incorporating biological control into IPM decision making. **Current Opinion in Insect Science**, v. 20, p. 84-89, 2017.

GIORGI, J. A.; VANDENBERG, N. J.; MCHUGH, J. V.; FORRESTER, J. A.; ŚLIPÍŃSKI, S. A.; MILLER, K. B.; SHAPIRO, L. R.; M. F. The evolution of food preferences in Coccinellidae. **Biological Control**, v. 51, n. 2, p. 215-231, 2009.

GONTIJO, L. M.; BEERS, E. H.; SNYDER, W. E. Complementary suppression of aphids by predators and parasitoids. **Biological Control**, v. 90, p. 83-91, 2015.

GULLAN, P. J.; CRANSTON, P. S. **Insetos: fundamentos da entomologia**. 5. ed. Barcelona: Editorial ROCA, 2017.

HAAN, N. L.; ZHANG, Y.; LANDIS, D. A. Predicting landscape configuration effects on agricultural pest suppression. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 35, n. 2, p. 175-186, 2020.

HAN, P.; NIU, C.; DESNEUX, N. Identification of top-down forces regulating cotton aphid population growth in transgenic Bt cotton in central China. **PloSone**, v. 9, n. 8, p. e102980, 2014.

HARRINGTON, R.; WOIWOD, I.; SPARKS, T. Climate change and trophic interactions. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 14, n. 4, p. 146-150, 1999.

HATT, S.; LOPES, T., BOERAEVE, F.; CHEN, J.; FRANCIS, F. Pest regulation and support of natural enemies in agriculture: experimental evidence of within field wildflower strips. **Ecological Engineering**, v. 98, p. 240-245, 2017.

HOLLAND, J. M.; OATEN, H., MOREBY, S.; BIRKETT, T.; SIMPER, J.; SOUTHWAY, S.; SMITH, B. M. Agri-environment scheme enhancing ecosystem services: a demonstration of improved biological control in cereal crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 155, p. 147-152, 2012.

HOOVER, J. K.; NEWMAN, J. A. Tritrophic interactions in the context of climate change: a model of grasses, cereal aphids and their parasitoids. **Global Change Biology**, v. 10, n. 7, p. 1197-1208, 2004.

HUGHES, R. D.; GILBERT, N. A model of an aphid population--a general statement. **The Journal of Animal Ecology**, p. 553-563, 1968.

HULLE, M.; D'ACIER, A. C.; BANKHEAD-DRONNET, S.; HARRINGTON, R. Aphids in the face of global changes. **Comptes Rendus Biologies**, v. 333, n. 6-7, p. 497-503, 2010.

HUNTER, M. D.; PRICE, P. W. Playing chutes and ladders: heterogeneity and the relative roles of bottom-up and top-down forces in natural communities. **Ecology**, p. 724-732, 1992

IRWIN, M. E.; KAMPMEIER, G. E.; WEISSER, W. W. Aphid movement: process and consequences. In: EMDEN, H. F. van; HARRINGTON, R. (Eds.). **Aphids as Crop Pests**. Boston: CABI, 2007. p. 153-186.

JACHNER, S.; BOOGAART, K. G. van den; PETZOLDT, T. Statistical methods for the qualitative assessment of dynamic models with time delay (R package qualV). **Journal of Statistical Software**, v. 22, p. 1-30, 2007.

JOSHI, S. U. N. I. L.; RABINDRA, R. J.; RAJENDRAN, T. P. Biological control of aphids. **Journal of Biological Control**, v. 24, n. 3, p. 185-202, 2010.

KAMBHAMPATI, S.; VÖLKL, W.; MACKAUER, M. Phylogenetic relationships among genera of Aphidiinae (Hymenoptera: Braconidae) based on DNA sequence of the mitochondrial 16S rRNA gene. **Systematic Entomology**, v. 25, n. 4, p. 437-445, 2000.

KARLEY, A. J.; PARKER, W. E.; PITCHFORD, J. W.; DOUGLAS, A. E. The mid-season crash in aphid populations: why and how does it occur? **Ecological Entomology**, v. 29, n. 4, p. 383-388, 2004.

KHAN, M. H.; YOLDAS, Z. Intraguild predation between two aphidophagous coccinellids, *Hippodamia variegata* (G.) and *Coccinella septempunctata* L. (Coleoptera: Coccinellidae). **Biological Control**, v. 126, p. 7-14, 2018.

KÖK, Ş.; TOMANOVIĆ, Ž.; NEDELJKOVIĆ, Z.; ŞENAL, D.; KASAP, İ. Biodiversity of the natural enemies of aphids (Hemiptera: Aphididae) in Northwest Turkey. **Phytoparasitica**, v. 48, n. 1, p. 51-61, 2020.

LANDIS, D. A.; WRATTEN, S. D.; GURR, G. M. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. **Annual Review of Entomology**, v. 45, n. 1, p. 175-201, 2000.

LAU, D.; COSTAMILAN, L. M.; LIMA, M. I. P.; MACIEL, J. L. N.; CHAVES, M. S.; SANTANA, F. M. **Nanismo-Amarelo-da-Cevada**. 2008. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia35/AG01/arvore/AG01_82_259200616453.html>. Acesso em: 22 maio 2020.

LAU, D.; PEREIRA, P. R. V. da S.; SALVADORI, J. R.; SCHONS, J.; PARIZOTO, G.; MAR, T. B. **Ocorrência do Barley/Cereal yellow dwarf virus e seus vetores em cereais de inverno no Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso do Sul em 2008**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. (Embrapa Trigo. Comunicado Técnico online, 256). Disponível em :< <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPT-2010/40746/1/p-co256.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

LAU, D.; SCHONS, J.; LAU, E. Y.; PEREIRA, P. R. V. da S.; SALVADORI, J. R.; PARIZOTO, G.; MAR, T. B. **Ocorrência do Barley/Cereal yellow dwarf virus e seus vetores em cereais de inverno no Rio Grande do Sul em 2007**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. (Embrapa Trigo. Comunicado técnico online, 236). Disponível em:< <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPT-2010/40601/1/p-co236.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

LAU, D.; SANTANA, F. M.; MACIEL, J. L. N.; FERNANDES, J. M. C.; COSTAMILAN, L. M.; CHAVES, M. S.; LIMA, M. I. P. M. Doenças de trigo no Brasil. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. (Eds.). **Trigo no Brasil: Bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. p. 283-324. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/128300/1/2011-LVtrigonobrasil-cap12.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2021

LESLIE, T. W.; VAN DER WERF, W.; BIANCHI, F. J. J. A.; HONĚK, A. Population dynamics of cereal aphids: influence of a shared predator and weather. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 11, n. 1, p. 73-82, 2009.

LETOURNEAU, D. K.; JEDLICKA, J. A.; BOTHWELL, S. G.; MORENO, C. R. Effects of natural enemy biodiversity on the suppression of arthropod herbivores in terrestrial ecosystems. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 40, p. 573-592, 2009

LINS, E. A., RODRIGUEZ, J. P. M., SCOLOSKI, S. I., PIVATO, J., LIMA, M. B., FERNANDES, J. M. C.; PEREIRA, P. R. V. DA S.; Lau, D.; RIEDER, R. A method for counting and classifying aphids using computer vision. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 169, p. 105200, 2020.

LU, Z. X.; ZHU, P. Y.; GURR, G. M.; ZHENG, X. S.; READ, D. M.; HEONG, K. L.; YANG, Y.J.; XU, H. X. Mechanisms for flowering plants to benefit arthropod natural enemies of insect pests: prospects for enhanced use in agriculture. **Insect Science**, v. 21, n.1, p. 1-12, 2014.

LUNDGREN, J. G. Nutritional aspects of non-prey foods in the life histories of predaceous Coccinellidae. **Biological Control**, v. 51, n. 2, p. 294-305, 2009.

MACFADYEN, S.; KRAMER, E. A.; PARRY, H. R.; SCHELLHORN, N. A. Temporal change in vegetation productivity in grain production landscapes: linking landscape complexity with pest and natural enemy communities. **Ecological Entomology**, v. 40, p. 56-69, 2015a.

MACFADYEN, S.; HOPKINSON, J.; PARRY, H.; NEAVE, M.J.; BIANCHI, F.J.J.A.; ZALUCKI, M. P.; SCHELLHORN, N.A. Early-season movement dynamics of phytophagous pest and natural enemies across a native vegetation-crop ecotone." **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 200, p. 110-118, 2015b.

MACFADYEN, S.; MULLER, W. Edges in agricultural landscapes: species interactions and movement of natural enemies. **PloS ONE**, v. 8, n. 3, p. e59659, 2013.

MAISONHAUTE, J. E.; LABRIE, G.; LUCAS, E. Direct and indirect effects of the spatial context on the natural biocontrol of an invasive crop pest. **Biological Control**, v. 106, p. 64-76, 2017.

MC NAMARA, L.; L.; GAUTHIER, K.; WALSH, L.; THÉBAUD, G.; GAFFNEY, M.; JACQUOT, E. Management of yellow dwarf disease in Europe in a post-neonicotinoid agriculture. **Pest Management Science**, 2020.

NARANJO, S. E.; ELLSWORTH, P. C.; FRISVOLD, G. B. Economic value of biological control in integrated pest management of managed plant systems. **Annual Review of Entomology**, v. 60, 2015.

OBRYCKI, J. J.; TAUBER, M. J. Phenology of three coccinellid species: thermal requirements for development. **Annals of the Entomological Society of America**, v. 74, n. 1, p. 31-36, 1981.

OBRYCKI, J. J.; HARWOOD, J. D.; KRING, T. J.; O'NEIL, R. J. Aphidophagy by Coccinellidae: application of biological control in agroecosystems. **Biological Control**, v. 51, n. 2, p. 244-254, 2009

OGAWA, K.; MIURA, T. Aphid polyphenisms: trans-generational developmental regulation through viviparity. **Frontiers in Physiology**, v. 5, p. 1-11, 2014.

PARIZOTO, G.; REBONATTO, A.; SCHONS, J.; LAU, D. Barley yellow dwarf virus-PAV in Brazil: seasonal fluctuation and biological characteristics. **Tropical Plant Pathology**, v. 38, n. 1, p. 11-19, 2013.

PARK, C. G.; CHOI, B. R.; CHO, J. R.; KIM, J. H.; AHN, J. J. Thermal effects on the development, fecundity and life table parameters of *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus) (Hemiptera: Aphididae) on barley. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, v. 20, p. 767-775, 2017.

PARK, J. H.; KWON, S. H.; KIM, T. O.; OH, S. O.; KIM, D. S. Temperature-dependent development and fecundity of *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera: Aphididae) on corns. **Korean Journal of Applied Entomology**, v. 55, n. 2, p.149-160, 2016.

PARRA, J. R. P. Biological control in Brazil: an overview. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 5, p. 420-429, 2014.

PARRY, H. R. Cereal aphid movement: general principles and simulation modelling. **Movement Ecology**, v. 1, n. 1, p. 14, 2013.

PEREIRA, P. D. S.; DOSSA, C. C. K.; DOSSA, A. A.; LAU, D. **Longevidade e prolificidade de *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera: Aphididae) em duas cultivares de trigo sob diferentes temperaturas.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2016. (Comunicado Técnico. Infoteca-E).

PEREIRA, P. R. V. da S.; SALVADORI, J. R.; LAU, D. **Identificação de adultos ápteros e alados das principais espécies de afídeos (Hemiptera: Aphididae) associadas a cereais de inverno no Brasil.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. (Comunicado Técnico. Infoteca-E).

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

PIÑEIRO, G.; PERELMAN, S.; PARUELO, J. M. How to evaluate models: observed vs. predicted or predicted vs. observed? **Ecological Modelling**, v. 216, p. 316–322, 2008.

POCSAI, E. Incidence of Barley Yellow Dwarf Viruses in Symptom-Exhibiting Cereal Species. In: HENRY, M.; MCNAB, A. **Barley yellow dwarf disease: recent advances and future strategies.** Texcoco, Mexico: CIMMYT, 2002. p. 45-49.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 29 out. 2020.

RAO, A. S.; GEORGEFF, M. P. Modeling rational agents within a BDI-architecture. **KR**, v. 91, p. 473-484, 1991.

RAYMOND, L.; ORTIZ-MARTÍNEZ, S. A.; LAVANDERO, B. Temporal variability of aphid biological control in contrasting landscape contexts. **Biological Control**, v. 90, p. 148-156, 2015.

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**, v. 7, n. 10, p. 71-78, 2015.

RICHARDS, L. A.; COLEY, P. D. Seasonal and habitat differences affect the impact of food and predation on herbivores: a comparison between gaps and understory of a tropical forest. **Oikos**, v. 116, n. 1, p. 31-40, 2007

RICUPERO, M.; DESNEUX, N.; ZAPPALÀ, L.; BIONDI, A. Target and non-target impact of systemic insecticides on a polyphagous aphid pest and its parasitoid. **Chemosphere**, v. 247, p. 125728, 2020.

RÍOS MARTÍNEZ, A. F.; COSTAMAGNA, A. C. Effects of crowding and host plant quality on morph determination in the soybean aphid, *Aphis glycines*. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 166, n. 1, p. 53-62, 2018.

SILVA, N. R.; CAMPOS, S. de O.; FARIAS, E. S. de; SOUZA, T. C. de; MARTINS, J. C.; PIKANÇO, M. C. Relative importance of natural enemies and abiotic factors as sources of regulation of mealybugs (Hemiptera: Pseudococcidae) in Brazilian coffee plantations. **Annals Of Applied Biology**, v. 171, n. 3, p. 303-315, 2017.

RODRIGUES, S. M.; BUENO, V. H.; SAMPAIO, M. V.; SOGLIA, M. C. D. M. Influência da temperatura no desenvolvimento e parasitismo de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae) em *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, v. 33, n. 3, p. 341-346, 2004.

RODRÍGUEZ-GASOL, N.; ALINS, G.; VERONESI, E.; WRATTEN, S. The ecology of predatory hoverflies as ecosystem-service providers in agricultural systems. **Biological Control**, p. 104405, 2020.

ROSENBLATT, A. E.; SCHMITZ, O. J. Climate change, nutrition, and bottom-up and top-down food web processes. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 31, n. 12, p. 965-975, 2016.

RUSCH, A.; BOMMARCO, R.; JONSSON, M.; SMITH, H. G.; EKBOM, B. Flow and stability of natural pest control services depend on complexity and crop rotation at the landscape scale. **Journal of Applied Ecology**, v. 50, n. 2, p. 345-354, 2013.

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

SALVADORI, J. R.; SALLES, L. A. B. Controle Biológico dos pulgões do trigo. In: PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. (Ed.). **Controle biológico no Brasil: Parasitoides e Predadores**. São Paulo: FEALQ; Manole, 2002. p. 427-443.

SAMPAIO, M. V.; BUENO, V. H.; RODRIGUES, S. M.; SOGLIA, M.; CONTI, B. F. D. Desenvolvimento de *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae) e alterações causadas pelo parasitismo no hospedeiro

Aphis gossypii Glover (Hemiptera: Aphididae) em diferentes temperaturas. **Neotropical Entomology**, v. 36, n. 3, p. 436-444, 2007.

SAMPAIO, M. V.; BUENO, V. H. P.; RODRIGUES, S. M. M.; SOGLIA, M. D. C. D. M. Resposta à temperatura de *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera, Braconidae, Aphidiinae) originário de três regiões climáticas de Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 49, n. 1, p. 141-147, 2005.

SANTOS, C. D. R. D.; SAMPAIO, M. V.; LAU, D.; REDAELLI, L. R.; JAHNKE, S. M.; PIVATO, J.; CARVALHO, F. J. Taxonomic Status and Population Oscillations of *Aphidius colemani* Species Group (Hymenoptera: Braconidae) in Southern Brazil. **Neotropical Entomology**, v. 48, n. 6, p. 983-991, 2019.

SANTOS, H. P.; FONTANELLI, R. S.; SPERA, S. T. A importância dos cereais de inverno para os sistemas agrícolas. In: SANTOS, H. P.; FONTANELLI, R. S.; SPERA, S. T. (Ed.). **Sistemas de produção para cereais de inverno sob plantio direto no sul do Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2010. cap 1, p. 19-41.

SAVARIS, M.; LAMPERT, S.; SALVADORI, J. R.; LAU, D.; PEREIRA, P. D. 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**, v. 42, n. 5, p. 85, 2013.

SCHELLHORN, N. A.; PARRY, H. R.; MACFADYEN, S.; WANG, Y.; ZALUCKI, M. P. Connecting scales: Achieving in-field pest control from areawide and landscape ecology studies. **Insect science**, v. 22, n. 1, p.35-51, 2015.

SCHMIDT, M. H.; LAUER, A.; PURTAUF, T.; THIES, C.; SCHAEFER, M.; TSCHARNTKE, T. Relative importance of predators and parasitoids for cereal aphid control. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 270, n. 1527, p. 1905-1909, 2003.

SCHMIDT, M. H.; THEWES, U.; THIES, C.; TSCHARNTKE, T. Aphid suppression by natural enemies in mulched cereals. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 113, n. 2, p. 87-93, 2004.

SEAGO, A. E.; GIORGI, J. A.; LI, J.; ŚLIPIŃSKI, A. Phylogeny, classification and evolution of ladybird beetles (Coleoptera: Coccinellidae) based on simultaneous analysis of molecular and morphological data. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 60, n. 1, p. 137-151, 2011.

SHALIZI, C. R. Methods and techniques of complex systems science: An overview. In: DEISBOECK, T.; KRESH, J. Y. **Complex Systems Science in Biomedicine**. Boston: Springer, 2006. p. 33-114.

SIMON, J. C.; PECCOUD, J. Rapid evolution of aphid pests in agricultural environments. **Current Opinion in Insect Science**, v. 26, p. 17-24, 2018.

SINGH, R.; SINGH, G. Aphids and Their Biocontrol. **Ecofriendly Pest Management for Food Security**, p. 63-108, 2016.

SNYDER, W. E. Coccinellids in diverse communities: which niche fits?. **Biological Control**, v. 51, n. 2, p. 323-335, 2009

SNYDER, W. E. Give predators a complement: conserving natural enemy biodiversity to improve biocontrol. **Biological Control**, v. 135, p. 73-82, 2019.

SNYDER, W. E.; IVES, A. R. Interactions between specialist and generalist natural enemies: parasitoids, predators, and pea aphid biocontrol. **Ecology**, v. 84, n. 1, p. 91-107, 2003.

STRAUB, C. S.; FINKE, D. L.; SNYDER, W. E. Are the conservation of natural enemy biodiversity and biological control compatible goals?. **Biological Control**, v. 45, n. 2, p. 225-237, 2008.

SUTHERLAND, J. P.; SULLIVAN, M. S.; POPPY, G. M. Oviposition behaviour and host colony size discrimination in *Episyrphus balteatus* (Diptera: Syrphidae). **Bulletin of Entomological Research**, v. 91, n. 5, p. 411, 2001.

TENHUMBERG, B.; POEHLING, H. M. Syrphids as natural enemies of cereal aphids in Germany: aspects of their biology and efficacy in different years and regions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 52, n. 1, p. 39-43, 1995.

THACKRAY, D. J.; DIGGLE, A. J.; JONES, R. A. C. BYDV PREDICTOR: a simulation model to predict aphid arrival, epidemics of Barley yellow dwarf virus and yield losses in wheat crops in a Mediterranean-type environment. **Plant Pathology**, v. 58, n. 1, p. 186-202, 2009

TOEBE, J. **Um modelo baseado em agentes para o ciclo de vida dos insetos: aplicação na interação afídeo-planta-vírus**. 2014. 167 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

TORRES, A. D. F.; BUENO, V. H.; SAMPAIO, M. V.; CONTI, B. F. de. Fertility life table of *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae) on *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, v. 36, n. 4, p. 532-536, 2007.

TSCHARNTKE, T.; STEFFAN-DEWENTER, I.; KRUESS, A.; THIES, C. Contribution of small habitat fragments to conservation of insect communities of grassland–cropland landscapes. **Ecological Applications**, v. 12, n. 2, p. 354- 363, 2002

TYLIANAKIS, J. M.; ROMO, C. M. Natural enemy diversity and biological control: making sense of the context-dependency. **Basic and Applied Ecology**, v. 11, n. 8, p. 657-668, 2010.

VAN DRIESCHE, R.; HODDLE, M. Control of pests and weeds by natural enemies: an introduction to biological control. **John Wiley & Sons**, 2009.

VERES, A.; PETIT, S.; CONORD, C.; LAVIGNE, C. Does landscape composition affect pest abundance and their control by natural enemies? A review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 166, p. 110-117, 2013.

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**, v. 34, n. 3, p. 301-307, 2008.

VIDAL, M. C.; MURPHY, S. M. Bottom-up vs. top-down effects on terrestrial insect herbivores: a meta-analysis. **Ecology Letters**, v. 21, n. 1, p. 138-150, 2018.

VINSON, S. B. The general host selection behavior of parasitoid Hymenoptera and a comparison of initial strategies utilized by larvaphagous and oophagous species. **Biological Control**, v. 11, n. 2, p. 79-96, 1998.

WALKER, G. P.; NAULT, L. R.; SIMONET, D. E. Natural Mortality Factors Acting on Potato Aphid (*Macrosiphum euphorbiae*) Populations in Processing-Tomato Fields in Ohio. **Environmental Entomology**, v. 13, n. 3, p. 724–732, 1984.

WALLS, J., III; RAJOTTE, E.; ROSA, C. The Past, Present, and Future of Barley Yellow Dwarf Management. **Agriculture**, v. 9, n. 1, p. 23, 2019.

WEI, J. N.; BAI, B. B.; YIN, T. S.; WANG, Y.; YANG, Y.; ZHAO, L. H.; KUANG, R.P.; XIANG, R. J. Development and use of parasitoids (Hymenoptera: Aphidiidae & Aphelinidae) for biological control of aphids in China. **Biocontrol Science and Technology**, v. 15, n. 6, p. 533-551, 2005.

WELLINGS, P. W.; DIXON, A. F. G. The role of weather and natural enemies in determining aphid outbreaks. In: BARBOSA, P.; SCHULTZ, J. C. (Eds.). **Insect Outbreaks**. San Diego, USA: Academic Press, 1987. p. 313–346.

WIEST, R. **Crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae) em trigo: uma aproximação por simulação**. 2019. 122 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2019.

WIEST, R., SALVADORI, J.R., FERNANDES, J.M., LAU, D., PAVAN, W., ZANINI, W.R., TOEBE, J. AND LAZZARETTI, A.T. Population growth of *Rhopalosiphum padi* under different thermal regimes: an agent-based model approach. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 23, p. 59-69, 2021.

WILL, T.; FURCH, A. C. U; ZIMMERMANN, M. R. How phloem-feeding insects face the challenge of phloem-located defenses. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 336, 2013.

WILL, T.; VILCINSKAS, A. The structural sheath protein of aphids is required for phloem feeding. **Insect Biochemistry and Molecular Biology**, v. 57, p. 34-40, 2015.

ZUÑIGA-SALINAS, E. S. **Controle biológico dos afídeos do trigo (Homoptera: Aphididae) por meio de parasitoides no planalto médio do Rio Grande do Sul, Brasil**. 1982. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná do Paraná, Curitiba, 1982.

APÊNDICE

APÊNDICE I - A) Estrutura que protege as gaiolas contra o impacto das gotas de chuva e B) gaiolas utilizadas para avaliar o crescimento populacional de áfidos (sistema de exclusão, à esquerda) e o efeito de parasitoides (sistema de restrição, à direita). Passo Fundo, 2019-2020



Fonte: Imagens da autora.



PPGAgro
Programa de Pós-Graduação
em Agronomia