

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Padrões de flutuação populacional e estrutura comunitária de afídeos
alados de cereais e seus parasitoides no Sul do Brasil**

Eduardo Engel

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Entomologia

**Piracicaba
2021**

Eduardo Engel
Engenheiro Agrônomo

Padrões de flutuação populacional e estrutura comunitária de afídeos alados de cereais e seus parasitoides no Sul do Brasil

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **WESLEY AUGUSTO CONDE GODOY**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Entomologia

Piracicaba
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Engel, Eduardo

Padrões de flutuação populacional e estrutura comunitária de afídeos alados de cereais e seus parasitoides no Sul do Brasil / Eduardo Engel. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

66 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Rhopalosiphum* 2. *Aphidius* 3. Controle biológico 4. Hospedeiro-parasitoide. 5. Séries temporais. I. Título

A Deus,
pela vida e por ter me guiado até este momento.
A minha esposa, Daniele Caroline Hörz Engel,
por todo seu amor, dedicação e companheirismo,
aos meus pais, Odair José Engel e Celestina Bandeira,
e minhas irmãs, Kauana Engel e Allana Engel,
por serem meu alicerce e estarem sempre ao meu lado.

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e bençãos que tem me concedido.

Ao professor Dr. Wesley Augusto Conde Godoy, pela oportunidade, orientação, ensinamentos e amizade, que tornaram possível a realização desta pesquisa.

Ao Dr. Douglas Lau pela orientação, amizade e ensinamentos, e, na sua pessoa, a toda equipe da Embrapa Trigo, que tornaram possível a obtenção dos dados para realização desta pesquisa.

Aos Drs. José Bruno Malaquias, Mauricio Paulo Batistella Pasini, Marcoandre Savaris, Alessandro Dal'Col Lúcio e Ana Lúcia de Paula Ribeiro, pela amizade, incentivo e auxílio ao longo desta pesquisa.

Aos meus colegas do Laboratório de Ecologia e Entomologia Florestal, pelos periódicos debates científicos, amizade e incentivo.

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo e ao Departamento de Entomologia e Acarologia, pela oportunidade de realizar meu Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES, pela bolsa de estudos.

E a todos que de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	9
Referências.....	12
2 OSCILAÇÃO, SINCRONIA E PADRÕES MULTIFATORIAIS ENTRE POPULAÇÕES DE AFÍDEOS ALADOS DE CEREAIS E SEUS PARASITOIDES NO SUL DO BRASIL	17
Resumo.....	17
2.1 Introdução.....	17
2.2 Material e Métodos.....	18
2.2.1 Área de estudo	18
2.2.2 Amostragem.....	19
2.2.3 Dados meteorológicos.....	19
2.2.4 Análise estatística.....	20
2.3 Resultados.....	21
2.4 Discussões.....	29
2.5 Conclusões.....	31
Agradecimentos.....	32
Financiamento.....	32
Referências.....	32
3 ESTRUTURA COMUNITÁRIA E FLUTUAÇÃO POPULACIONAL DE AFÍDEOS ALADOS DE CEREAIS E SEUS PARASITOIDES NO SUL DO BRASIL	39
Resumo.....	39
3.1 Introdução.....	39
3.2 Material e Métodos.....	41
3.2.1 Área de estudo.....	41
3.2.2 Amostragem e identificação.....	42
3.2.3 Análise estatística.....	42
3.2.3.1 Análise faunística.....	42
3.2.3.2 Agrupamento e ordenação de espécies.....	42
3.2.3.3 Modelagem da flutuação populacional e efeitos da temperatura e precipitação.....	43

3.3 Resultados.....	43
3.3.1 Análise faunística.....	43
3.3.2 Agrupamento e ordenação de espécies.....	45
3.3.3 Modelagem da flutuação populacional e efeitos da temperatura e precipitação.....	46
3.3.3.1 Afídeos.....	46
3.3.3.2 Parasitoides.....	48
3.4 Discussões.....	50
3.4.1 Análise faunística.....	51
3.4.2 Flutuação populacional.....	52
3.4.2.1 Afídeos.....	52
3.4.2.2 Parasitoides.....	54
3.4.2.3 Relações entre afídeos e parasitoides.....	56
3.5 Conclusões.....	56
Agradecimentos.....	57
Financiamento.....	57
Referências.....	57

RESUMO

Padrões de flutuação populacional e estrutura comunitária de afídeos alados de cereais e seus parasitoides no Sul do Brasil

Afídeos tornaram-se fator limitante para a produtividade de cereais, principalmente trigo, nas décadas de 1960 e 1970, devido a transmissão de barley yellow dwarf virus (BYDV), principalmente por *Metopolophium dirhodum* (Walker) e *Sitobion avenae* (Fabricius). Um programa de controle biológico foi implementado pela Embrapa Trigo, o Programa de Controle Biológico de Pulgões do Trigo – PCBPT. Por meio do PCBPT, foram introduzidas e multiplicadas cerca de 12 espécies de parasitoides (Hymenoptera, Braconidae) oriundos de diferentes países. Após o sucesso na supressão populacional de afídeos de cereais, poucos estudos foram conduzidos para acompanhar as populações destes insetos. Na Europa, Ásia e América do Norte, padrões de flutuação populacional e estrutura das comunidades de afídeos e parasitoides são amplamente estudados e já estabelecidos. No entanto, para o Brasil, a ausência de estudos de longo-prazo desta natureza dificulta a implementação de métodos alternativos ao manejo químico, como o controle biológico e cultural. Neste sentido, o principal objetivo deste estudo foi avaliar o padrão atual de flutuação populacional e estrutura comunitária de afídeos alados de cereais e seus parasitoides. Para tal, utilizou-se uma série temporal de oito anos de monitoramento semanal (2011-2018) por meio de armadilhas Moericke (bandeja amarela) localizada em Coxilha, RS, Brasil. O estudo foi dividido em duas seções. Na primeira, modelos estatísticos foram utilizados para determinar o padrão geral de flutuação populacional de afídeos alados e parasitoides em função de variáveis meteorológicas, e, a partir disto, avaliar o risco de semeadura da cultura do trigo. Na segunda, análises faunísticas foram utilizadas para agrupar as principais espécies. Análises multivariadas foram utilizadas para determinar os padrões de agrupamento ao longo do ano. Modelos estatísticos foram implementados para avaliar os efeitos da temperatura do ar e precipitação pluviométrica semanal acumulada para cada tribo de afídeo e espécie de parasitoide selecionada. Para afídeos, picos populacionais na transição verão-outono e inverno-primavera foram observados. Parasitoides apresentaram picos em pleno inverno e na transição inverno-primavera. Estes padrões de flutuação foram consequência da resposta de afídeos alados e parasitoides à temperatura do ar. Afídeos exploraram temperatura superiores que seus parasitoides. A menor sincronia entre os primeiros picos de afídeos alados e parasitoides denotam um maior risco para semeaduras antecipadas da cultura do trigo. Dentre as espécies de afídeos observadas, *Rhopalosiphum padi* (L.) (Aphidini) e *S. avenae* (Macrosiphini) foram dominantes. O parasitoide *Aphidius platensis* (Brèthes) foi dominante. Afídeos e parasitoides foram agrupados em função das estações do ano. Maior amplitude térmica foi observada para Aphidini. Dentre as principais espécies de parasitoides, *A. platensis* e *Diaeretiella rapae* (Mc’Intosh) tiveram menor amplitude térmica que *Aphidius uzbekistanicus* (Luzhetskii) e *Aphidius rhopalosiphii* (De Stefani). Os resultados obtidos neste estudo contribuem para compreensão dos padrões atuais de flutuação e estrutura comunitária de afídeos de cereais e parasitoides no Sul do Brasil, e podem ser utilizados em programas de MIP e previsão em cenários de mudanças globais.

Palavras-chave: *Rhopalosiphum*, *Aphidius*, Controle biológico, Hospedeiro-parasitoide, Séries temporais

ABSTRACT

Patterns of population fluctuation and community structure of winged cereal aphids and their parasitoids in Southern Brazil

Aphids became a limiting factor for the yield of cereals, mainly wheat, in the 1960s and 1970s, due to the transmission of barley yellow dwarf virus (BYDV), mainly by *Metopolophium dirhodum* (Walker) and *Sitobion avenae* (Fabricius). A biological control program was implemented by Embrapa Trigo, the Program for Biological Control of Wheat Aphids - PBCW. Through the PBCW, about 12 species of parasitoids (Hymenoptera, Braconidae) from different countries were introduced and multiplied. After success in suppressing the population of cereal aphids, few studies have been conducted to monitor populations these insects. In Europe, Asia and North America, patterns of population fluctuation and structure of aphid and parasitoid communities are widely studied and already established. However, in Brazil, the absence of long-term studies of this nature makes it difficult to implement alternative methods to chemical management, such as biological and cultural control. In this sense, the main objective of this study was to evaluate the current pattern of population fluctuation and community structure of winged cereal aphids and their parasitoids. To this purpose, an eight-year weekly monitoring series (2011-2018) using Moericke traps (yellow tray) located in Coxilha, RS, Brazil, was used. The study was divided into two sections. In the first, statistical models were used to determine the general pattern of population fluctuation of winged aphids and parasitoids as a function of meteorological variables, and, from this, assess the risk of sowing the wheat crop. In the second, faunistic analyzes were used to grouping the main species. Multivariate analyzes were used to determine clustering patterns throughout the year. Statistical models were implemented to assess the effects of air temperature and accumulated weekly rainfall for each aphid tribe and selected parasitoid species. For aphids, population peaks in the summer-autumn and winter-spring transition were observed. Parasitoids showed peaks in the middle of winter and in the winter-spring transition. These fluctuation patterns were a consequence of the response of winged and parasitoid aphids to air temperature, in which aphids had greater thermal amplitude than their parasitoids. The smaller synchrony between the first peaks of winged aphids and parasitoids denote a greater risk for early sowing of the wheat crop. Among the species of aphids observed, *Rhopalosiphum padi* (L.) (Aphidini) and *S. avenae* (Macrosiphini) were dominant. The parasitoid *Aphidius platensis* (Brèthes) was dominant. Aphids and parasitoids were grouped according to the seasons. Higher thermal amplitude was observed for Aphidini. Among the main species of parasitoids, *A. platensis* and *Diaeretiella rapae* (Mc'Intosh) had less thermal amplitude than *Aphidius uzbekistanicus* (Luzhetzki) and *Aphidius rhopalosiphi* (De Stefani). The results obtained in this study contribute to the understanding of current patterns of fluctuation and community structure of cereal aphids and parasitoids in southern Brazil, and can be used in MIP and forecasting programs in global change scenarios.

Keywords: *Rhopalosiphum*, *Aphidius*, Biological control, Host-parasitoid and Time series

1 INTRODUÇÃO GERAL

O trigo é uma das principais culturas no mundo, sendo a terceira mais cultivada dentre todas as culturas agrícolas, com produção anual superior a 700 milhões de toneladas (USDA 2021). A necessidade de aumento na produção deste cereal nos próximos anos deve-se ao crescimento populacional humano, uma vez que a cultura do trigo utilizada como alimento por grande parte população mundial (Kausar & Shahbaz 2013; Khakwani *et al.* 2012). No Brasil, a cultura do trigo possui cerca de 2 milhões de hectares cultivados, com aproximadamente 6,7 milhões de toneladas produzidas, com produtividade variando em torno 3000kg/ha. Dentre as regiões produtoras, a região Sul, constituída por Paraná e Rio Grande do Sul, destaca-se por concentrar a maior área produtiva, com cerca de 90% (De Mori *et al.* 2016).

Culturas de cereais são acometidas por uma gama de espécies de insetos-praga. Dentre estas, destacam-se os afídeos (Hemiptera, Aphididae), os quais são transmissores de patógenos e comprometem anualmente boa parte da produção de cereais no mundo (Helmut & Harrington 2017). Dentre os principais cereais cultivados que são acometidos por afídeos, destaca-se a cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) (Poaceae). No Sul do Brasil, estes afídeos são conhecidos por transmitirem barley yellow dwarf virus (BYDV) aos principais cereais cultivados (milho, trigo, aveia, cevada, centeio e triticale). As altas densidades populacionais dos afídeos tornaram-se fator limitante para a produtividade de cereais cultivados, em especial o trigo, por volta das décadas de 1960 e 1970, principalmente devido ao aumento no tamanho populacional dos afídeos *Metopolophium dirhodum* (Walker) e *Sitobion avenae* (Fabricius) transmissores do BYDV (Caetano 1968, 1978). O BYDV é causador de distúrbios fisiológicos e redução no porte da planta, ocasionando perdas na cultura do trigo em todo mundo (Trebicki *et al.* 2015). Estudos demonstram capacidade de redução variando entre 20 a 60% na produtividade da planta, a depender do genótipo da planta hospedeira, espécie de afídeo e estirpe viral do BYDV transmitida (Choudhury *et al.* 2019; Lau *et al.* 2021; Parizoto *et al.* 2013). A transmissão do BYDV é dependente diretamente da ocorrência e abundância dos seus vetores. A associação de estirpes de BYDV com espécies de afídeos vetores é tão forte que uma das formas de identificação destas estirpes pode ser realizada pela espécie do vetor (Irwin & Thresh 1990; Lucio-Zavaleta *et al.* 2001). Desta forma, conhecer a dinâmica populacional de afídeos é essencial para implementação de táticas de controle de forma sustentável.

Com o intuito de implementar um programa de controle de afídeos em cultivos de cereais, principalmente de inverno, a EMBRAPA Trigo desenvolveu o “Programa de Controle Biológico de Pulgões do Trigo” – PCBPT. Por meio do PCBPT, foram introduzidas cerca de

12 espécies de parasitoides em áreas de plantio de trigo do Rio Grande do Sul, principalmente na região do planalto médio, *Aphelinus asychis* (Walker, 1839), *Aphelinus abdominalis* (Dalman, 1820), *Aphelinus varipes* (Förster, 1841), *Aphelinus flavipes* (Forster, 1841), *Aphidius colemani* (Viereck, 1912), *Aphidius ervi* (Haliday, 1834), *Aphidius pascuorum* (Marshall, 1896), *Aphidius picipes* (Nees, 1811), *Aphidius rhopalosiphi* (De Stefani, 1902), *Aphidius uzbekistanicus* (Luzhetzbi, 1960), *Ephedrus plagiator* (Nees, 1811), *Praon volucre* (Haliday, 1833) e *Praon gallicum* (Stary, 1971) (Hymenoptera, Braconidae). Estas espécies foram introduzidas de diferentes países, sendo estes: Chile, França, Grécia, Inglaterra, Israel, Itália e Suíça (Embrapa 1979). Após introduzidos, os parasitoides foram multiplicados pela Embrapa Trigo e liberados nas principais regiões de produção de cereais de inverno no Sul do Brasil. Ao final da década de 1980, o sucesso do PCBPT permitiu a redução no uso de inseticidas para o controle de afídeos vetores de BYDV e a manutenção e aumento da produtividade de cereais cultivados, principalmente o trigo (Salvadori & Salles 2002).

A partir deste programa, poucos estudos se seguiram para acompanhar o comportamento das comunidades de afídeos, bem como dos parasitoides introduzidos e nativos. Somado a esse fato, a partir da década de 1980, o plantio direto nos campos sul-brasileiros foi intensificado, alterando o uso da terra (Kochhann & Denardin 2000). Dentre as principais alterações observadas, destaca-se o uso de cultivos outonais para cobertura do solo. Neste cenário, a introdução da cultura da aveia (*Avena* spp.) foi amplamente difundida, sendo utilizada até os dias atuais. A cultura da aveia é conhecida por hospedar diversas espécies de afídeos vetores de BYDV, bem como ter capacidade de multiplicar este vírus (Descamps & Chopra 2011; Parizoto *et al.* 2013; Sturza *et al.* 2012). Sendo assim, a intensificação no seu uso de forma outonal, precedendo cultivos de cereais de inverno como o trigo, pode ter uma elevada importância do ponto de vista de flutuação populacional e estrutura das comunidades de afídeos de cereais e seus parasitoides, podendo alterar os padrões de sazonalidade e dominância anteriormente estabelecidos, bem como o risco para transmissão de BYDV às culturas de cereais subsequentes (Lau *et al.* 2021).

Recentemente, observou-se em estudos uma possível alteração no status de espécie dominante para comunidade afídeos, passando a ser *Rhopalosiphum padi* L., e não mais *M. dirhodum* e *S. avenae* (Rebonatto *et al.* 2015). Na comunidade de parasitoides, a principal espécie ocorrente é *A. platensis* (que pertence ao grupo *A. colemani*). No entanto, não se sabe ao certo quais outras espécies introduzidas pelo PCBPT permanecem estabelecidas após a intensificação do plantio direto (Santos *et al.* 2019). Para compreender o atual cenário das comunidades de afídeos de cereais e seus parasitoides, estudos de séries temporais têm sido

amplamente utilizados, pois permitem a determinação de padrões de flutuação e dominância de nicho, os quais auxiliam na tomada de decisão em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP) (Davis *et al.* 2014; Saldaña *et al.* 2007). Entre os principais fatores que influenciam a flutuação das populações e a estrutura das comunidades de afídeos e parasitoides, estão as variáveis meteorológicas. Dentre elas, a temperatura do ar e a precipitação pluviométrica ganham destaque na compreensão dos padrões de oscilação e abundância, pois afetam questões biológicas importantes, tais como: desenvolvimento, reprodução, sobrevivência e mortalidade (Jeffs & Lewis 2013; Soares *et al.* 2020a; Tougeron *et al.* 2019; Wiest *et al.* 2020).

Mudanças climáticas afetam diretamente a composição de espécies, suas abundâncias e padrões de co-ocorrência (Ovaskainen *et al.* 2013; Walther *et al.* 2002). Em um contexto entomológico, variações climáticas em curtos intervalos de tempo podem impactar de forma significativa os padrões populacionais (sazonalidade, migração, dispersão e número de gerações por ano) de diferentes espécies em uma comunidade (Andrade *et al.* 2016; Harrington *et al.* 2007; Holloway *et al.* 2018; Moiroux *et al.* 2015).

Na região Neotropical, afídeos e parasitoides formam uma das principais redes de interações entre espécies associadas a cultura do trigo (Parizoto *et al.* 2013; Pereira 2018; Santos *et al.* 2019). Entretanto, as variações nas métricas das redes de afídeos e parasitoides bem como os fatores climáticos influenciadores delas foram pouco exploradas até o momento. Em regiões com temperaturas amenas, as populações de afídeos podem reproduzir-se durante todo o ano, porém, a sincronia destes afídeos com seus parasitoides pode ficar restrita a apenas algumas épocas do ano, pois as variáveis meteorológicas podem impactar afídeos e parasitoides em diferentes magnitudes, limitando assim zonas de sincronia (Tougeron *et al.* 2019; Van Veen *et al.* 2005; Yang *et al.* 2017).

A determinação dos efeitos de variáveis meteorológicas, associadas a mudanças ocorrentes na paisagem agrícola, e conseqüentemente na disponibilidade de recursos, podem auxiliar na compreensão das razões para as principais mudanças observadas na estrutura das comunidades de afídeos de cereais e seus parasitoides, bem como dos padrões de flutuação populacional em relação ao observado nas décadas de 1960, 1970 e 1980. Em outras regiões do mundo tais como, Europa, Ásia e América do Norte, os padrões atuais de flutuação populacional e estrutura das comunidades de afídeos e parasitoides já são bem conhecidos, por meio de estudos de longo prazo (Bell *et al.* 2015; Harrington & Clark 2010). No entanto, para o Brasil, a falta de estudos desta natureza torna-se um fator limitante para a compreensão dos mecanismos que desencadeiam os padrões observados e, conseqüentemente, para a adoção de manejo integrado, controle biológico e cultural.

Em face do exposto e da necessidade de se conhecer os atuais padrões de flutuação populacional e estrutura das comunidades de afídeos de cereais e seus parasitoides, busca-se neste estudo conhecer os padrões de flutuação populacional geral, estrutura das comunidades, co-ocorrência e flutuação das principais tribos de afídeos e espécies de parasitoides ao longo do ano em uma região no sul do Brasil. Neste sentido, esta pesquisa foi dividida em dois capítulos que abordam os temas:

- i. Oscilação, sincronia e padrões multifatoriais entre populações de afídeos alados de cereais e seus parasitoides no Sul do Brasil (Capítulo 2).
- ii. Estrutura comunitária e flutuação populacional de afídeos alados de cereais e seus parasitoides no sul do Brasil (Capítulo 3).

Os capítulos 1 e 2 desta dissertação foram escritos de acordo com as normas de submissão de artigos das revistas *Bulletin of Entomological Research* e *Annals of Applied Biology*, respectivamente.

Referências

- Andrade T.O., Krespi L., Bonnardot V., van Baaren J., Outreman Y. (2016) Impact of change in winter strategy of one parasitoid species on the diversity and function of a guild of parasitoids. *Oecologia*, **180**, 877–888.
- Bell J.R., Alderson L., Izera D., Kruger T., Parker S., Pickup J., Shortall C.R., Taylor M.S., Verrier P., Harrington R. (2015) Long-term phenological trends, species accumulation rates, aphid traits and climate: Five decades of change in migrating aphids. *Journal of Animal Ecology*, **84**, 21–34.
- Caetano V. da R. (1968) Nota prévia sobre a ocorrência de uma virose em cereais de inverno no Rio Grande do Sul. *Revista da Sociedade Brasileira de Fitopatologia*, **2**, 53–66.
- Caetano V.R. (1978) *Variações sazonais de pulgões de trigo*. Passo Fundo, RS, Brazil.: Embrapa Centro Nacional de Pesquisa de Trigo.
- Choudhury S., Larkin P., Meinke H., Hasanuzzaman M.D., Johnson P., Zhou M. (2019) Barley yellow dwarf virus infection affects physiology, morphology, grain yield and flour pasting properties of wheat. *Crop and Pasture Science*, **70**, 16–25.
- Davis T.S., Abatzoglou J.T., Bosque-Pérez N.A., Halbert S.E., Pike K., Eigenbrode S.D. (2014) Differing contributions of density dependence and climate to the population dynamics of three eruptive herbivores. *Ecological Entomology*, **39**, 566–577.

- Descamps L.R., Chopa C.S. (2011) Population growth of *Rhopalosiphum padi* L. (Homoptera: Aphididae) on different cereal crops from the semiarid Pampas of Argentina under laboratory conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, **71**, 390–394.
- Embrapa (1979) *Programa de controle biológico dos pulgões do trigo - relatório anual*. Passo Fundo, RS, Brazil.: Embrapa Centro Nacional de Pesquisa de Trigo.
- Harrington R., Clark S. (2010) Aphid Biodiversity under Environmental Change. *Aphid Biodiversity under Environmental Change*.
- Harrington R., Clark S.J., Welham S.J., Verrier P.J., Denholm C.H., Hullé M., Maurice D., Rounsevell M.D., Cocu N. (2007) Environmental change and the phenology of European aphids. *Global Change Biology*, **13**, 1550–1564.
- Helmut F. van E., Harrington R. (2017) *Aphids as crop pests* 2nd ed. Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI.
- Holloway P., Kudenko D., Bell J.R. (2018) Dynamic selection of environmental variables to improve the prediction of aphid phenology: A machine learning approach. *Ecological Indicators*, **88**, 512–521. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.032>.
- Irwin M.E., Thresh J.M. (1990) Epidemiology of barley yellow dwarf: a study in ecological complexity. *Annual review of phytopathology*. Vol. 28, 393–424.
- Jeffs C.T., Lewis O.T. (2013) Effects of climate warming on host-parasitoid interactions. *Ecological Entomology*, **38**, 209–218.
- Kausar F., Shahbaz M. (2013) Interactive effect of foliar application of nitric oxide (NO) and salinity on wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Botany*, **45**, 67–73.
- Khakwani A.A., Dennett M.D., Munir M., Abid M. (2012) Growth and yield response of wheat varieties to water stress at booting and anthesis stages of development. *Pakistan Journal of Botany*, **44**, 879–886.
- Kochhann R.A., Denardin J.E. (2000) Implantação e Manejo do Sistema Plantio Direto. *Embrapa Trigo*, 36.
- Lau D., Mar T.B., Santos C.D.R. dos, Engel E., Pereira P.R.V. da S. (2021) Advances in understanding the biology and epidemiology of barley yellow dwarf virus (BYDV), In *Achieving durable disease resistance in cereals*, p. 700. Eds R. OLIVER and J. CURTIN. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publ.
- Lucio-Zavaleta E., Smith D.M., Gray S.M. (2001) Variation in transmission efficiency among Barley yellow dwarf virus-RMV isolates and clones of the normally inefficient aphid vector, *Rhopalosiphum padi*. *Phytopathology*, **91**, 792–796.

- Moiroux J., Boivin G., Brodeur J. (2015) Temperature influences host instar selection in an aphid parasitoid: support for the relative fitness rule. *Biological Journal of the Linnean Society*, **115**, 792–801.
- De Mori C., Antunes J.M., Faé G.S., Acosta A. da S. (2016) *Trigo : o produtor pergunta, a Embrapa responde* Coleção 50. Brasília, DF: Embrapa.
- Ovaskainen O., Skorokhodova S., Yakovleva M., Sukhov A., Kutenkov A., Kutenkova N., Shcherbakov A., Meyke E., Del Mar Delgado M. (2013) Community-level phenological response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**, 13434–13439.
- Parizoto G., Rebonatto A., Schons J., Lau D. (2013) Barley yellow dwarf virus-PAV in Brazil: Seasonal fluctuation and biological characteristics. *Tropical Plant Pathology*, **38**, 11–19.
- Pereira J.W. (2018) Dinâmica da flutuação populacional de afídeos alados (Hemiptera: Aphididae) em hortas urbanas. , **13**.
- Rebonatto A., Salvadori J.R., Lau D. (2015) Temporal Changes in Cereal Aphids (Hemiptera: Aphididae) Populations in Northern Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Agricultural Science*, **7**, 71–78.
- Saldaña S., Lima M., Estay S. (2007) Northern Atlantic Oscillation effects on the temporal and spatial dynamics of green spruce aphid populations in the UK. *Journal of Animal Ecology*, **76**, 782–789.
- Salvadori J.R., Salles L.A.D. (2002) Controle Biológico de Pulgões no Trigo, In *Controle Biológico no Brasil Parasitóides e Predadores*, pp. 427–443. Ed J. R. P. Parra. São Paulo: Manoele Ltda.
- Santos C.D.R.D., Sampaio M. V., Lau D., Redaelli L.R., Jahnke S.M., Pivato J., Carvalho F.J. (2019) Taxonomic Status and Population Oscillations of *Aphidius colemani* Species Group (Hymenoptera: Braconidae) in Southern Brazil. *Neotropical Entomology*, 983–991.
- Soares J.R.S., da Silva Paes J., de Araújo V.C.R., de Araújo T.A., Ramos R.S., Picanço M.C., Zanuncio J.C. (2020) Spatiotemporal Dynamics and Natural Mortality Factors of *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) in Bell Pepper Crops. *Neotropical Entomology*, **49**, 445–455.
- Sturza V.S., Poncio S., dos Santos A.B., Lopes-da-Silva M. (2012) Infestation and natural parasitism of aphids in single and mixed pastures of black oats and ryegrass. *Revista Brasileira de Entomologia*, **56**, 363–367.
- Tougeron K., Brodeur J., Le Lann C., van Baaren J. (2019) How climate change affects the seasonal ecology of insect parasitoids. *Ecological Entomology*.

- Trebicki P., Nancarrow N., Cole E., Bosque-Pérez N.A., Constable F.E., Freeman A.J., Rodoni B., Yen A.L., Luck J.E., Fitzgerald G.J. (2015) Virus disease in wheat predicted to increase with a changing climate. *Global Change Biology*, **21**, 3511–3519.
- USDA (2021) *World agricultural supply and demand estimates (WASDE)*. Washington, D.C. Available at: <http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/>.
- Van Veen F.J.F., Van Holland P.D., Godfray H.C.J. (2005) Stable coexistence in insect communities due to density- and trait-mediated indirect effects. *Ecology*, **86**, 3182–3189.
- Walther G., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J., I O.H., Bairlein F. (2002) change. , 389–395.
- Wiest R., Salvadori J.R., Fernandes J.M.C., Lau D., Pavan W., Zanini W.R., Toebe J., Lazzaretti A.T. (2020) Population growth of *Rhopalosiphum padi* under different thermal regimes: an agent-based model approach . *Agricultural and Forest Entomology*.
- Yang F., Xu L., Wu Y.K., Wang Q., Yao Z.W., Žikić V., Tomanović Ž., Ferrer-Suay M., Selfa J., Pujade-Villar J., Traugott M., Desneux N., Lu Y.H., Guo Y.Y. (2017) Species composition and seasonal dynamics of aphid parasitoids and hyperparasitoids in wheat fields in northern China. *Scientific Reports*, **7**, 1–9.

2 OSCILAÇÃO, SINCRONIA E PADRÕES MULTIFATORIAIS ENTRE POPULAÇÕES DE AFÍDEOS ALADOS DE CEREAIS E SEUS PARASITOIDES NO SUL DO BRASIL

Resumo

Em diferentes partes do mundo, as populações de afídeos e seus inimigos naturais são influenciadas pelas paisagens e pelo clima. Na região Neotropical, poucos estudos de longo prazo foram realizados, deixando uma lacuna para a compreensão do efeito das variáveis meteorológicas nos padrões populacionais de afídeos e seus parasitoides em condições de campo. Este estudo descreve os padrões gerais de oscilação de afídeos alados de cereais e seus parasitoides, selecionando variáveis meteorológicas e avaliando seus efeitos sobre esses insetos. Afídeos exibem dois picos anuais, um na transição verão-outono e outro na transição inverno-primavera. Em parasitoides, o pico anual mais alto ocorre durante o inverno e um segundo pico ocorre na transição inverno-primavera. A temperatura foi o principal regulador meteorológico da flutuação populacional de afídeos alados e parasitoides durante o ano. A faixa de temperatura favorável não é a mesma para afídeos e parasitoides. Para afídeos, o aumento da temperatura resultou em crescimento populacional, com efeito positivo máximo a 25 ° C. A temperatura também influenciou positivamente as populações de parasitoides, mas o crescimento foi assintótico, com zona preferencial em torno dos 20 ° C. Embora a chuva não tenha mostrado função regulatória na sazonalidade dos pulgões, ela influenciou o número final de insetos ao longo do ano. A resposta de afídeos alados e parasitoides à temperatura tem implicações na compatibilidade trófica e na regulação de suas populações. Essas funções devem ser levadas em consideração em modelos preditivos.

Palavras-chave: Aphididae, Braconidae, controle biológico, dinâmica populacional, ecologia de comunidades, níveis tróficos

2.1 Introdução

As relações ecológicas existentes em ambientes agrícolas são complexas pela interatividade de múltiplos fatores. Portanto, a utilização de técnicas e ferramentas capazes de analisar ao mesmo tempo a influência multivariada dos fatores exógenos e endógenos é fundamental para a compreensão e análise desses biossistemas, assim como das possibilidades de previsão baseada em séries temporais (Jonsson *et al.* 2012; Malaquias *et al.* 2017; Tougeron *et al.* 2019).

Dentre as espécies de insetos-praga existentes, os afídeos estão entre as mais difundidas a nível mundial, sendo a cultura do trigo impactada durante todo seu ciclo (Dedryver *et al.* 2010; Parizoto *et al.* 2013; Rebonatto *et al.* 2015). Para reduzir os danos diretos e indiretos causados por afídeos em culturas de cereais, o controle biológico por parasitoides tem sido empregado (Andrade *et al.* 2016; Santos *et al.* 2019; Yang *et al.* 2017). No entanto, estudos para detectar variáveis meteorológicas que influenciam as dinâmicas populacionais em sistemas

afídeo-parasitoide em condições de campo ainda são escassos (Bell *et al.* 2015; Harrington *et al.* 2007; Honek *et al.* 2018).

Variações climáticas afetam de forma significativa variáveis ecológicas em comunidades, tais como abundância, sazonalidade e co-ocorrências (Furlong & Zalucki 2017). Estas mudanças podem ter várias consequências, como por exemplo, alterações na fenologia, riqueza e abundância de sistemas afídeo-parasitoide em respostas a variáveis como temperatura mínima e duração de eventos de geada (Tougeron *et al.* 2018). Dessa forma, compreender seu impacto é de extrema importância para o gerenciamento agrícola e ambiental (Ovaskainen *et al.* 2013).

As variáveis meteorológicas interferem na bioecologia de insetos. Em sistemas afídeo-parasitoide, as principais variáveis meteorológicas estudadas são: temperatura do ar, precipitação pluvial, umidade relativa do ar, fotoperíodo, velocidade e direção dos ventos (Bell *et al.* 2015; Meisner *et al.* 2014; Moiroux *et al.* 2015). A temperatura é um dos principais fatores que regula o desenvolvimento de insetos uma vez que estes têm termorregulação limitada (Alford *et al.* 2014).

Na Europa e Ásia, a fenologia de voo de afídeos e parasitoides, bem como suas respostas a variáveis meteorológicas foram bem estudadas até o momento (Bell *et al.* 2015; Holloway *et al.* 2018). No entanto, na região Neotropical este tema permanece praticamente inexplorado, dificultando a compreensão de padrões de oscilação populacional e seus propulsores meteorológicos, que são fatores chave para o Manejo Integrado de Pragas. Diante disso, utilizamos técnicas e ferramentas multivariadas para descrever padrões ecológicos de flutuação populacional em populações de afídeos alados e parasitoides ao longo do ano e entre anos e avaliar o efeito das variáveis meteorológicas sobre os padrões de oscilação observados.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

A amostragem foi realizada em um experimento de 5.500 m² localizado em área pertencente a Embrapa Trigo, no município de Coxilha, RS, Brasil (altitude 710 m, lat 28°11'42,8"S e long 52°19'30,6" O) durante os anos de 2011 a 2018. De acordo com Köppen e Geier, o clima da região em estudo é do tipo Cfa (Valério *et al.* 2018).

2.2.2 Amostragem

As populações de afídeos alados associados a cereais de inverno e parasitoides foram monitoradas com armadilhas Moericke (bandeja amarela, 45 cm de comprimento x 30 cm de largura x 4,5 cm de altura), preenchidas com solução (2 L) preparada com água, 40% de formalina (0,3%) e detergente (0,2%). Cada bandeja tinha três orifícios laterais (5 mm de diâmetro), próximos à borda, protegidos por uma tela fina para evitar vazamentos e perda de conteúdo sólido durante as chuvas. Quatro armadilhas foram distribuídas nas bordas de um ensaio de rotação de culturas. As armadilhas foram niveladas a aproximadamente 20 cm do chão, com tijolos. A área em rotação de culturas foi cultivada com os cereais aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), aveia branca (*Avena sativa* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) e triticales (*Triticosecale* Wittmack), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e pousio durante o inverno e no verão com soja (*Glycine max* L. Merrill), milho (*Zea mays* L.) e braquiária (*Urochloa* spp.). Nas áreas ao redor do ensaio, as culturas de aveia preta e trigo predominavam no inverno e as culturas de soja e milho no verão.

A cada 7 dias, o conteúdo sólido das bandejas foi separado da solução através da peneira e coletado. O material biológico foi conservado em frasco de vidro com álcool a 70%. No laboratório, os pulgões e os parasitoides foram separados, identificados e quantificados em um microscópio estereoscópico. A identificação dos afídeos seguiu a sistemática taxonômica de Pereira et al. (2009). Para identificar os parasitoides foram utilizadas sistemáticas taxonômicas baseadas em Pennachio (1989), Tomanović et al. (2003), Starý and Lukáš (2009), Tomanovic et al. (2014) e Tomanović et al. (2018). Os dados foram armazenados na plataforma TrapSystem (<http://gpca.passofundo.ifsul.edu.br>).

2.2.3 Dados meteorológicos

As variáveis meteorológicas foram obtidas na estação meteorológica de Passo Fundo (28° 15'S, 52° 24'O, 684 m), localizada a 10 km do local de estudo. Por meio desta, foram obtidas as variáveis diárias: temperatura mínima, máxima e média do ar, precipitação acumulada (mm), umidade relativa do ar (%) e insolação média diária (horas) (Fig. 1). A partir das variáveis meteorológicas diárias, foram calculadas as médias para o intervalo entre as coletas das armadilhas (7 dias).

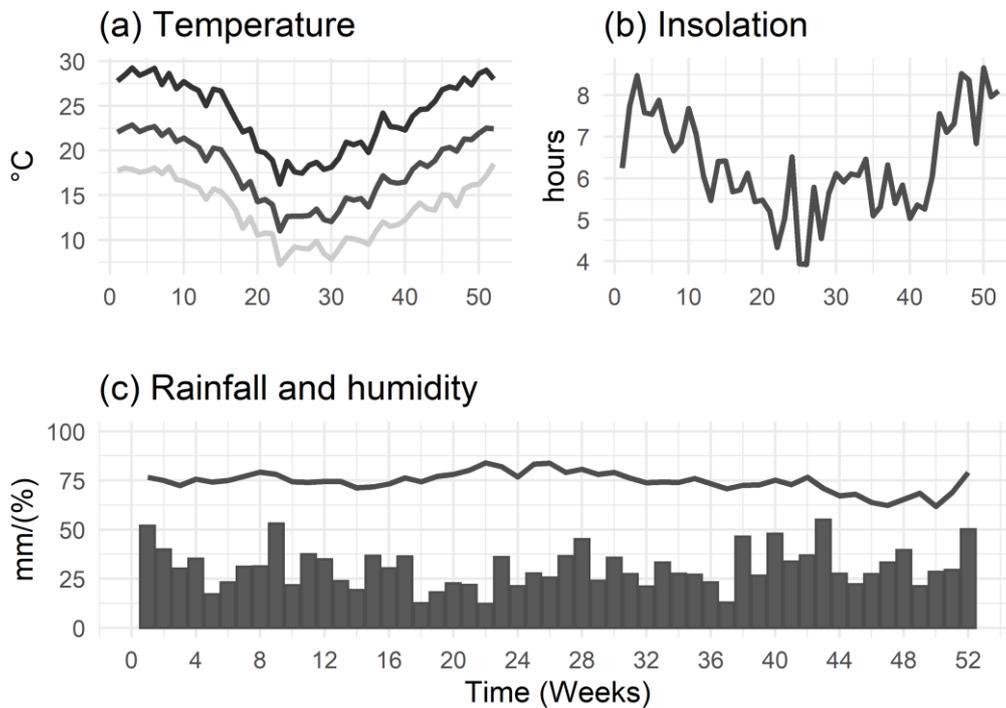


Fig 1. (a) Médias semanais para temperaturas: máxima (cinza escuro), média (cinza) e mínima (cinza claro); (b) Média semanal para insolação média diária; (c) Médias semanais para umidade relativa do ar (%) (linha) e precipitação (mm) (barras).

2.2.4 Análise estatística

Considerando os dados meteorológicos de 8 anos (416 semanas), uma Análise de Componentes Principais (PCA) tendo como base o método de correlação de Spearman (não paramétrico) foi conduzida para identificar uma correlação existente entre as variáveis por meio de matrizes vetoriais e autovetores associados (v). Na PCA, os dados foram padronizados dividindo-se a diferença entre cada ponto de dados e a média aritmética da variável de interesse pelo seu desvio padrão. Os componentes foram selecionados de acordo com os autovalores da matriz de correlação e com base na presença de componentes com autovalores maiores que 1 (Kaiser 1974) e um mínimo de 70% de variação explicada. Os componentes selecionados da PCA foram utilizados como inputs nos modelos estatísticos posteriores, pois são ortogonais, e, portanto, não correlacionados.

A abundância de afídeos e parasitoides por semana foi definida como a variável de resposta (y) em dois tipos de modelos mistos aditivos generalizados (GAMM), sendo o primeiro com erros ajustados a uma distribuição binomial negativa e o segundo ajustado a uma distribuição gaussiana. Os modelos foram parametrizados de acordo com o componente

temporal, expresso em semanas do ano (x_i); temperatura do ar e insolação média diária (x_j), expressas pelo primeiro componente principal da PCA (PC1); e precipitação pluviométrica e umidade relativa do ar (x_k), expressas pelo segundo componente principal da PCA (PC2). Além disso, duas outras variáveis, “espécies (afídeos e parasitoides)” e “anos” foram adicionadas como efeitos aleatórios (b_l e b_m , respectivamente), como escrito na equação 1. Adicionalmente, uma função de autocorrelação temporal (semanal) foi adicionada por meio da estrutura de um modelo autorregressivo (ARIMA) (ϵ_t) (Carvalho *et al.* 2020). Para o modelo gaussiano, os dados foram submetidos a transformação $\log(x + 0.5)$. O Critério de Informação de Akaike (AIC) foi usado para escolher o melhor modelo (Akaike 1973). A análise foi realizada com o pacote “*mgcv*” (Wood 2017) e o ajuste residual foi avaliado usando a função ‘*gam.check*’.

$$y_{ijkl} = \alpha + x_i + x_j + x_k + b_l + b_m + \epsilon_{ijklm} + \epsilon_t \quad \text{Equação 1}$$

Para avaliar a relação das abundâncias anuais de afídeos e parasitoides e variáveis meteorológicas, uma segunda PCA não paramétrica foi realizada, esta novamente baseada no método de correlação de Spearman. Para esta análise, foram utilizadas matrizes contendo as abundâncias globais das matrizes de afídeos e parasitoides, bem como as variáveis temperatura média do ar e precipitação pluviométrica anual acumulada para cada ano de avaliação. Ambas as PCA’s foram realizadas por meio da função ‘*prcomp*’, com biplots gerados pelo pacote “*FactomineR*” (Lê *et al.* 2008).

A partir dos padrões de oscilação populacional obtidos pelos modelos GAM selecionados, para propor um possível zoneamento de risco para semeadura da cultura do trigo para região Sul do Brasil, tais padrões foram utilizados. O zoneamento foi realizado baseado na proporção afídeo-parasitoide, levando em consideração os padrões de resposta destas comunidades a temperatura média do ar, precipitação semanal acumulada e época de semeadura do trigo recomendada para região (MAPA, 2008).

Todas as análises foram realizadas por meio do software R versão 4.0.0 (<https://www.r-project.org/>).

2.3 Resultados

Para comunidade de afídeos alados, maiores densidades populacionais concentravam-se principalmente ao final do verão, durante o outono e na transição inverno-primavera (semana 38) (Fig. 2a). Na comunidade de parasitoides, populações elevadas ocorreram principalmente durante o inverno (semanas 23 a 32), contrastando com a ocorrência de afídeos alados. Outro momento de ocorrência de parasitoides em abundância, foi na transição inverno-primavera.

Este período apresentou sincronia com a comunidade de afídeos alados (Fig. 2b). Além disso, considerando ambas comunidades, o aumento da abundância populacional também esteve atrelado a maior variabilidade nos dados, como demonstrado pela distância interquartílica no boxplot (Figs. 2 a, b).

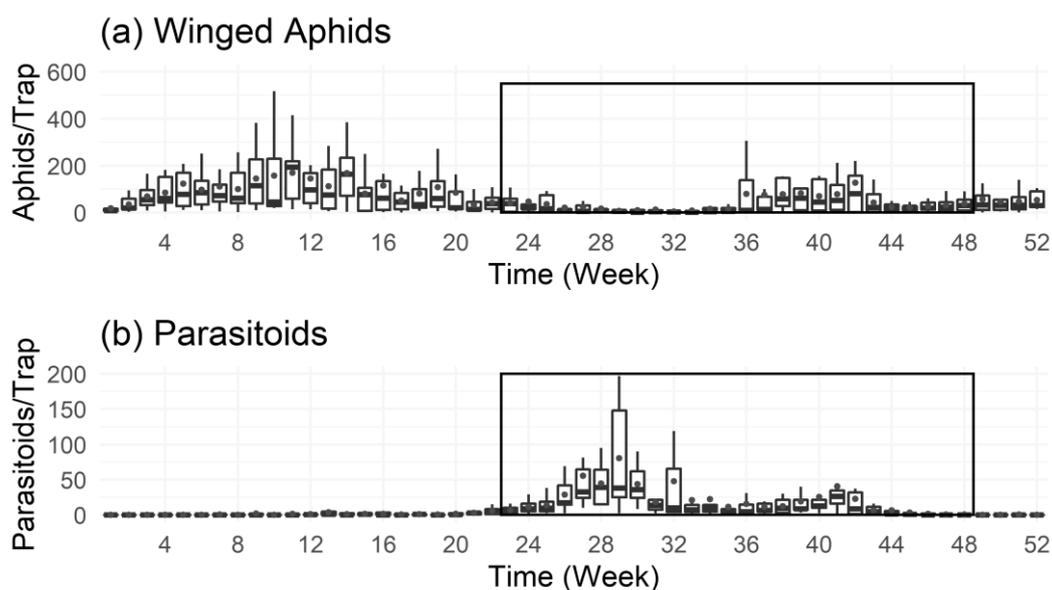


Fig 2. Boxplot da flutuação populacional de afídeos alados de cereais (a) e seus parasitoides (b) ao longo das semanas do ano durante o período de 2011 a 2018. Pontos indicam a média para cada semana. Área interna ao retângulo indica o período com a presença da cultura do trigo. Coxilha, RS, Brasil.

Foram amostradas oito espécies de afídeos alados e sete espécies de parasitoides associados a cultura do trigo. Entre as espécies de afídeos, verificou-se maior abundância de *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758). Esta espécie correspondeu a 90% da abundância total de afídeos alados capturados. Além de *R. padi*, as espécies *Sitobion avenae* (Fabricius, 1885), *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852), *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856), *Rhopalosiphum rufiabdominalis* (Sasaki, 1899) e *Metopolophium dirhodum* (Walker, 1849) tiveram abundâncias relativas acima de 1% (Tabela 1).

Para a comunidade de parasitoides, a espécie encontrada em maior abundância foi *Aphidius platensis* (Brèthes, 1913), seguida por *Diaeretiella rapae* (Mc'Intosh, 1855), *Aphidius uzbekistanicus* (Luzhetskii, 1960) e *Aphidius rhopalosiphi* (DeStefani, 1902). As espécies *Ephedrus plagiator* (Nees, 1811), *Aphidius ervi* (Haliday, 1834) e *Lysiphlebus testaceipes*

(Cresson, 1880) foram as que apresentaram as menores abundâncias relativas (<5%) (Tabela 1). Considerando a população total de afídeos e parasitoides (Tabela 1), a proporção encontrada no período de estudo foi de 5.72 afídeos alados. parasitoide⁻¹. Esta proporção foi variável ao longo do ano, de acordo com a flutuação populacional das comunidades (Fig. 2).

Tabela 1. Espécie, código, número de indivíduos (N) e abundância relativa (A) de afídeos alados de cereais e seus parasitoides. Coxilha, RS, Brasil, 2011 a 2018.

Afídeos	Código	N	A (%)
<i>Rhopalosiphum maidis</i> (Fitch, 1856)	Rm	477	1,50
<i>Rhopalosiphum padi</i> (Linnaeus, 1758)	Rp	28.824	90,00
<i>Rhopalosiphum rufiabdominalis</i> (Sasaki, 1899)	Rr	420	1,31
<i>Schizaphis graminum</i> (Rondani, 1852)	Sg	722	2,25
<i>Sipha flava</i> (Forbes, 1884)	Sf	56	0,17
<i>Sipha maydis</i> (Passerini, 1860)	Sm	38	0,12
<i>Sitobion avenae</i> (Fabricius, 1775)	Sa	1.122	3,50
<i>Metopolophium dirhodum</i> (Walker, 1849)	Md	373	1,16
Total		32.038	100,00
Parasitoides			
<i>Aphidius ervi</i> (Haliday, 1834)	Ae	87	1,55
<i>Aphidius platensis</i> (Bréthes, 1913)	Ap	3.439	61,39
<i>Aphidius rhopalosiphi</i> (DeStefani, 1902)	Ar	381	6,80
<i>Aphidius uzbekistanicus</i> (Luzhetskii, 1960)	Au	408	7,28
<i>Diaeretiella rapae</i> (McIntosh, 1855)	Dr	1.043	18,62
<i>Ephedrus plagiator</i> (Nees, 1811)	Ep	174	3,11
<i>Lysiphlebus testaceipes</i> (Cresson, 1880)	Lt	70	1,25
Total		5.602	100,00

Na PCA (Fig. 3a), constatou-se que as variáveis: mínimas [$v = 0,55$], médias [$v = 0,57$] e máximas temperaturas do ar [$v = 0,56$], bem como a insolação média diária [$v = 0,21$] tiveram maior contribuição no PC1 (49,70% da variância explicada). As variáveis precipitação pluviométrica semanal acumulada e umidade relativa média do ar tiveram maior contribuição no PC2 (30,03% da variância explicada), com autovetores $v = -0,67$ e $-0,66$, respectivamente. Além disso, a correlação de Spearman indicou uma correlação significativa entre as temperaturas do ar (mínima, média e máxima) e a insolação média diária ($r > 0,5$; p-valor $< 0,05$), e entre a umidade relativa média do ar e a precipitação pluviométrica semanal acumulada ($r > 0,5$; p-valor $< 0,05$). Assim, apenas as variáveis temperatura média do ar e precipitação

pluviométrica semanal acumulada foram mantidas para as interpretações dos PC's no modelo estatístico subsequente (Fig. 3b e c).

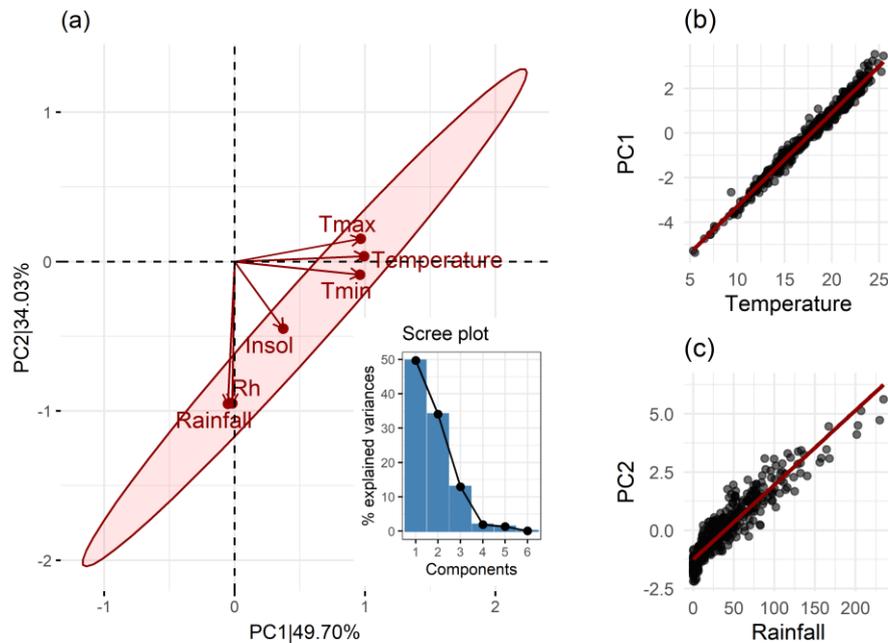


Fig 3. (a) Análise de componentes principais (PCA) particionando a variância das variáveis: temperatura média do ar (Temperature), temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura mínima do ar (Tmin), umidade relativa média do ar (Rh) e precipitação pluviométrica semanal acumulada (Rainfall). Área sombreada refere-se ao intervalo de 95% de confiança. (b) Relação entre os scores do primeiro componente principal (PC1) da PCA com os dados originais referentes a temperatura média do ar. (c) Relação entre os scores do segundo componente principal (PC2) da PCA com os dados originais referentes a precipitação pluviométrica semanal acumulada.

Para as populações de afídeos alados de cereais, o modelo gaussiano ($AIC = 7.539$) apresentou melhor desempenho que o modelo binomial negativo ($AIC = 15.141$). O aumento nos escores do PC1 (temperatura) resultou em uma elevação na abundância (em log) de afídeos alados ($edf = 1,86$; $F = 1,99$; $p < 0,001$), com uma relação aproximadamente linear (Fig. 4a), com efeito positivo máximo por volta dos 25 °C (Figs. 3b e 4a). O PC2 (precipitação pluviométrica semanal acumulada) influenciou negativamente a abundância de afídeos alados,

com uma tendência aproximadamente linear ($\text{edf} = 2,14$; $F = 7,22$; $p < 0,001$). A precipitação pluviométrica semanal acumulada registrada, foi em grande parte inferior a 100 mm, penalizando os resultados e inflando o intervalo de confiança para estimativas acima deste valor de precipitação (Figs 3c e 4b).

Para os parasitoides, novamente o modelo gaussiano ($\text{AIC} = 5.328$) apresentou melhor desempenho que o modelo binomial negativo ($\text{AIC} = 16.525$). Os efeitos suavizados do PC1 foram significativos ($\text{edf} = 2,36$; $F = 1,48$; $p < 0,001$), com o efeito positivo máximo em torno dos 20°C (Figs 3b e 4c). O efeito da temperatura sobre os parasitoides mostrou uma tendência não linear, indicando haver efeitos negativos em temperaturas acima dos 22 °C (Fig. 4c). A precipitação pluviométrica semanal acumulada também exibiu efeito negativo sobre a abundância de parasitoides ($\text{edf} = 2,48$; $F = 5,99$; $p < 0,001$). Esta relação apresentou menor linearidade em comparação com afídeos. Para chuvas acima dos 100 mm, novamente os resultados foram penalizados pela baixa frequência, inflando o intervalo de confiança (Figs. 3c e 4d).

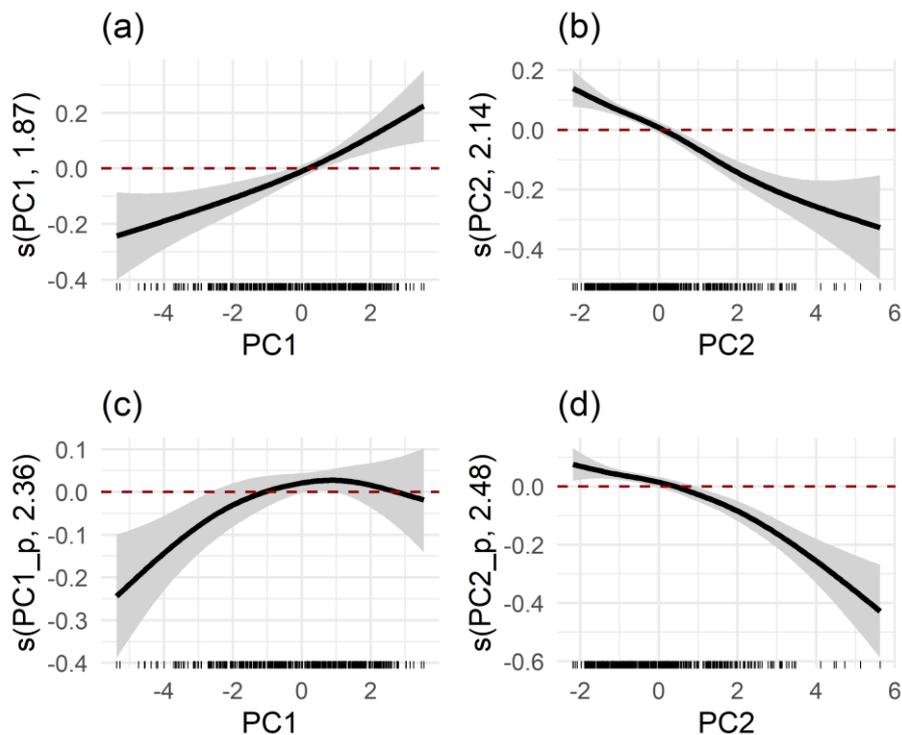


Fig 4. Splines suavizadas dos componentes lineares PC1 (temperatura média do ar) e PC2 (precipitação pluviométrica semanal acumulada) para afídeos alados de cereais (a e b) e seus parasitoides (c e d). Áreas sombreadas indicam o intervalo de confiança de 95%. Linha vermelha tracejada indica zonas marginal entre efeitos positivos e negativos das variáveis independentes sobre as populações.

O componente temporal do modelo GAMM, expresso em semanas do ano teve um efeito significativo na abundância (log) de afídeos alados ($gle = 8,40$; $F = 40,13$; $p < 0,001$). Estes apresentaram maiores populações durante o verão, outono e primavera. A redução da abundância populacional durante o inverno é devido à influência térmica. Durante esta época, há prevalência de temperaturas abaixo dos $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na primavera, embora apresente temperaturas mais altas que o inverno, proporcionando um maior número de insetos, as populações enfrentam os efeitos da maturação e da colheita do trigo, limitando o tempo de sustentação das altas populações em função dos recursos (Fig. 5a).

Na comunidade de parasitoides, o componente temporal mostrou efeito significativo sobre a abundância (log) dos insetos ($gle = 8,75$; $F = 83,81$; $p < 0,001$). Houve maior número de insetos durante o inverno e início da primavera, coincidindo com o período vegetativo e reprodutivo do trigo (Fig. 5c). Neste período, temperaturas estão oscilando por volta dos 10 a

20 °C, o que de acordo com o modelo selecionado, indica uma zona de efeitos positivos desta variável sobre as populações de parasitoides.

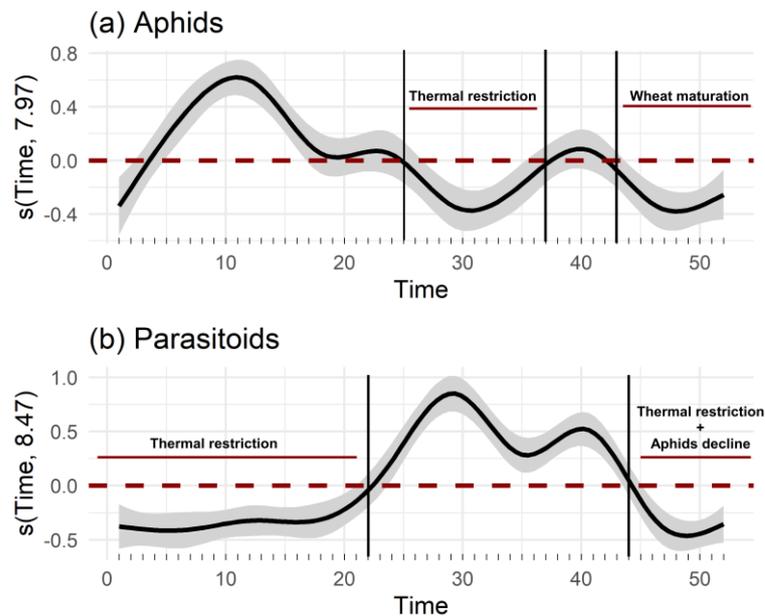


Fig 5. Splines suavizadas do componente linear temporal, expresso em semanas do ano, para afídeos alados de cereais (a) e seus parasitoides (d). Áreas sombreadas indicam o intervalo de confiança de 95%. Linha vermelha tracejada indica zonas marginal entre efeitos positivos e negativos das variáveis independentes sobre as populações.

A segunda PCA apresentou a variação nas abundâncias anuais de pulgões e parasitoides, bem como sua relação com a temperatura média do ar e precipitação anual acumulada. A variância explicada para o PC1 e PC2 foi de 88,78%, com 52,02 e 36,76% para o PC1 e PC2, respectivamente. Uma correlação positiva foi observada para as abundâncias de afídeos e parasitoides, enquanto a precipitação anual mostrou uma correlação negativa. No PC2 (36,76% da variação explicada), uma correlação positiva para abundância total de afídeos e temperatura média do ar foi observada, enquanto a abundância de parasitoides foi negativamente correlacionada. Essas relações podem ser observadas nas matrizes de vetor de Biplot na Figura 6.

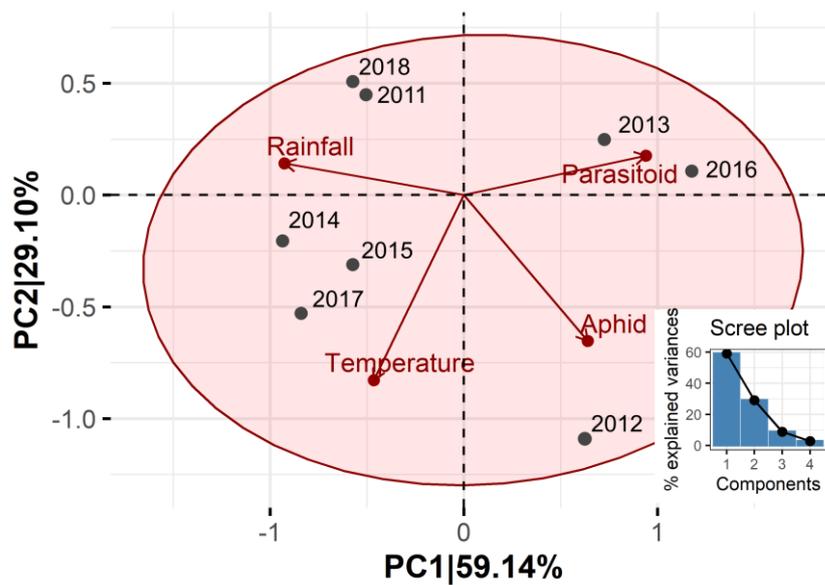


Fig. 6. Análise de componentes principais (PCA) particionando a variância das variáveis meteorológicas: Precipitação pluviométrica semanal acumulada (Rainfall), temperatura média do ar (Temperature) e as abundâncias de afídeos alados (Aphid) e seus parasitoids (Parasitoids) entre os anos de avaliação. Coxilha, RS, Brasil, 2011-2018.

De maneira prática, a resposta inversa de afídeos alados e parasitoides em relação a temperatura do ar acima dos 20 °C e abaixo dos 10 °C, reflete o padrão de oscilação destas populações na região do estudo (Fig. 7 a). Este comportamento pode ter implicações no risco de transmissão de barley yellow dwarf virus (BYDV) por afídeos em função da época de semeadura da cultura do trigo. O período de semeadura indicado para esta região vai da 22 a 29ª semana do ano (1º de junho a 20 de julho) (MAPA 2008). Dentro deste período, pode ser definido um gradiente de risco com base na proporção afídeo-parasitoide. Semeaduras no início da janela, ocorrem ainda em momento de elevada proporção de afídeos em relação aos parasitoides, constituindo épocas de maior probabilidade de transmissão do vírus (épocas de maior risco). Quanto mais tarde ocorrer a semeadura, menor se torna a proporção afídeos/parasitoides diminuindo os riscos associados à transmissão de BYDV (Fig. 7 b).

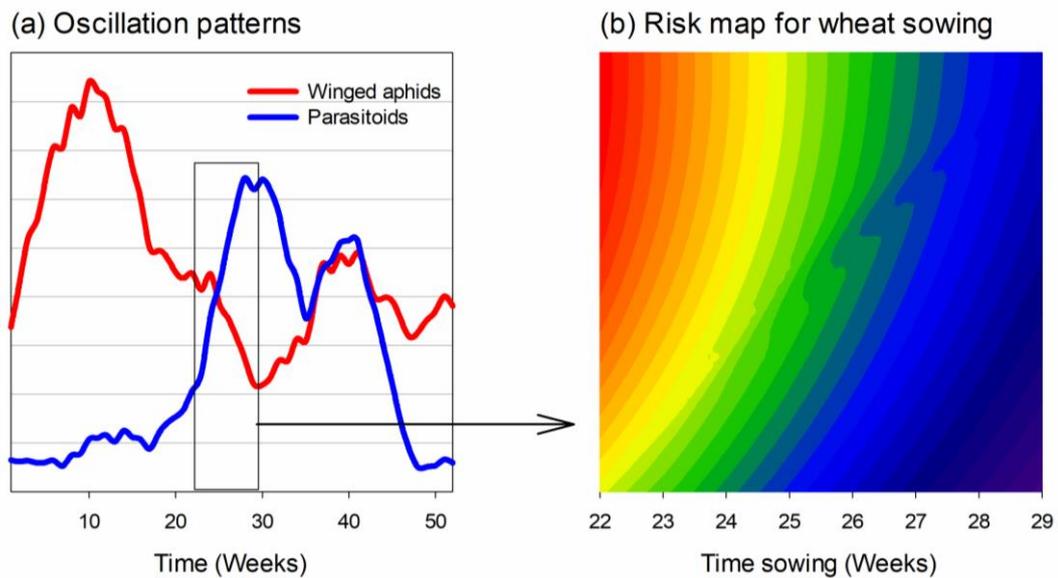


Fig 7. (a) Splines suavizadas dos modelos GAMM indicando os padrões de oscilação populacional de afídeos alados de cereais (linha vermelha) e seus parasitoides (linha azul) ao longo do ano. Retângulo indica zoneamento temporal indicado para semeadura do trigo na região de estudo de acordo com o Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2008); **(b)** Mapa de risco para semeadura de trigo baseado na proporção de afídeos alados e parasitoides capturados em armadilhas. Cores indicam níveis de risco, partindo do vermelho (maior risco) até o roxo (menor risco).

2.4 Discussões

Este é um dos primeiros estudos na região Neotropical que descreve para uma série histórica a oscilação populacional de afídeos alados de cereais e seus parasitoides. Em sua maioria, essas espécies foram introduzidas de outras regiões do planeta junto com os produtores primários desses sistemas: gramíneas cultivadas como trigo, cevada e aveia. Para regiões temperadas, sobretudo no hemisfério norte os padrões de oscilação são bem descritos (Van den Eynde *et al.* 2020). Este estudo se passa no sul do Brasil, ao sul do Trópico de Capricórnio sendo o clima considerado subtropical do tipo Cfa (Valério *et al.* 2018). Nessa região, os afídeos apresentam dois picos anuais um na transição verão-outono e outro na transição inverno-primavera. As populações de parasitoides também apresentaram um padrão bimodal, com primeiro pico em pleno inverno e o segundo na transição inverno-primavera. Assim, há uma grande assincronia entre o primeiro pico de afídeos e parasitoides. Enquanto, que o atraso temporal entre o pico de afídeos e parasitoides é menor para o segundo pico. O atraso dos parasitoides em relação aos afídeos observado no primeiro pico populacional tem particular

importância quando relacionado a época de cultivo da cultura do trigo para a região de estudo, evidenciando maior vulnerabilidade da cultura no início do seu desenvolvimento. Desta forma, se faz necessário compreender quais fatores levam ao padrão de oscilação populacional observado.

Para afídeos alados os parâmetros temperatura média do ar (°C) e precipitação acumulada (mm) impactaram as populações. Estes parâmetros estão relacionados com a taxa de desenvolvimento, reprodução e mortalidade dos afídeos, influenciando diretamente a formação de indivíduos alados e densidade populacional (Honek *et al.* 2018; Leslie *et al.* 2009; Wang *et al.* 2015). A elevação na temperatura do ar resulta em um aumento na taxa de desenvolvimento, ocasionando explosões populacionais e maior formação de morfotipos alados (Aquad *et al.* 2009; Gang & Chunsen 2010). O efeito negativo da precipitação acumulada sobre a abundância populacional de afídeos alados, corrobora resultados descritos anteriormente (Chamuene *et al.* 2018; Rebonatto *et al.* 2015; Soares *et al.* 2020a). A precipitação impacta a população de afídeos aumentando a mortalidade, tanto por afogamento quanto pelo aumento na umidade relativa do ar, propiciando um ambiente favorável para fungos entomopatogênicos (Soares *et al.* 2020a).

Considerando as populações de afídeos, este estudo não aborda outro fator chave que é a disponibilidade e qualidade de plantas hospedeiras. É sabido que as populações de afídeos são muito afetadas pelos hospedeiros (Honek *et al.* 2018). Estudos futuros que considerem a transição de hospedeiros na paisagem agrícola poderão complementar os presentes resultados adicionando fatores que auxiliam na modelagem da oscilação das populações (Finlay & Luck 2011).

Na comunidade de parasitoides, o efeito negativo da temperatura média do ar evidencia a atuação contrastante da temperatura sobre afídeos e parasitoides. A resposta de parasitoides a temperatura do ar foi primeiramente verificada por Santos *et al.* (2019). De forma geral, parasitoides do gênero *Aphidius* (gênero dominante neste estudo) apresentam maior desenvolvimento em temperaturas entre 15 e 25 °C, sendo temperaturas próximas a 20 °C consideradas como faixa ótima de crescimento populacional. Acima de 25 °C, sua taxa de reprodução tende a decrescer, juntamente com o parasitismo (Jerbi-Elayed *et al.* 2015). O parasitoide *D. rapae* (segunda espécie mais abundante) apresenta uma amplitude térmica semelhante ao gênero *Aphidius* (Basheer *et al.* 2014).

A variação interanual das abundâncias de afídeos e parasitoides refletiu os resultados observados em escala fina (semanal). O efeito do ano, geralmente agrupado como uma variável

aleatória em modelos mistos, é um importante fator a ser considerado em estudos que visam explicar abundâncias e estruturas comunitárias (Werner et al., 2020). Ao considerar os resultados obtidos, verifica-se que apesar da precipitação ser bem distribuída ao longo do ano, sua intensidade tem uma relação negativa sobre a abundância final de afídeos e parasitoides. Anos mais quentes foram positivamente associados com a abundância de afídeos alados, ao passo que anos mais frios foram benéficos para os parasitoides. Portanto, para anos quentes e secos espera-se maior abundância de afídeos, ao passo que em anos frios e secos, espera-se maior número de parasitoides, conseqüentemente maior redução na população de afídeos. Estudos em escalas temporais mais amplas, a exemplo, variações entre anos na abundância final, permitem a detecção das formas que populações de afídeos e parasitoides respondem a variações climáticas ou de paisagem agrícola (Harrington *et al.* 2007; Tougeron *et al.* 2019; Zhao & Reddy 2019). Variações inter-anuais podem ter efeitos sobre mudanças na estratégia de hibernação de parasitoides, antecipação de migração e alterações no tamanho da população de afídeos (Andrade *et al.* 2016; Bell *et al.* 2015; Tougeron *et al.* 2018).

Ao considerar os padrões oscilatórios de afídeos alados e parasitoides, verificou-se que há possibilidade de determinar zonas de semeadura para culturas de cereais de inverno, como trigo, visando a otimização dos efeitos da temperatura sobre estes organismos. Desta forma, semeadura mais tardias, em pleno inverno, tendem a favorecer parasitoides em detrimento de afídeos, reduzindo o risco de transmissão de BYDV. A quantificação do efeito das populações de parasitoides sobre afídeos é passo fundamental para o entendimento da dinâmica populacional desses últimos (Fidelis *et al.* 2019; Plantegenest *et al.* 2001). Portanto, modelos de previsão que auxiliem na tomada de decisão de manejo de afídeos e vírus transmitidos devem levar em consideração a relação afídeos-parasitoides e os efeitos da temperatura sobre estes. Tais pressuposições, com base em dados de populações aladas, precisam ser comprovadas com dados de parasitismo aferidos em condições de campo.

2.5 Conclusões

O afídeo *R. padi* foi a espécie mais abundante na comunidade de afídeos. Os parasitoides mais abundantes capturados foram *A. platensis* e *D. rapae*. Entre as variáveis meteorológicas, os resultados evidenciam a temperatura do ar como principal descritor meteorológico da flutuação sazonal de ambas as comunidades avaliadas no Sul do Brasil. A precipitação interfere

na abundância populacional, mas não dita a sazonalidade das comunidades. A variação interanual corroborou os resultados observados em escala semanal para temperatura e precipitação. Mais estudos devem ser realizados para determinar a forma das relações entre espécies e quantificar o impacto do parasitismo sobre a população de afídeos alados.

Agradecimentos

Agradecimentos são prestados a Elias do Amarante, Maria Elaine Moreira Solagna e Odirlei Dalla Costa (Embrapa Trigo) pela coleta das amostras em campo e Vânia Bianchin (Embrapa Trigo) pela preparação das amostras em laboratório e alimentação do banco de dados da plataforma Trap System.

Financiamento

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil – Processo No. 88887371811/2019-00 e projeto “Plataforma integrada para monitoramento, simulação e tomada de decisão no manejo de epidemias causadas por vírus transmitidos por insetos” Processo: No. 13.16.05.006.00.00.

Referências

- Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. (B. N. P. F. Csaki, Ed.), Budapest, Hungary CL - 2nd International Symposium on Information Theory, Tsahkadsor, Armenia, USSR, September 2-8, 1971: Akadémiai Kiadó, pp. 267–281.
- Alford, L., Andrade, T. O., Georges, R., Burel, F., & Van Baaren, J. (2014). Could behaviour and not physiological thermal tolerance determine winter survival of aphids in cereal fields? *PLoS ONE*, **9**(12), 1–16.
- Andrade, T. O., Krespi, L., Bonnardot, V., van Baaren, J., & Outreman, Y. (2016). Impact of change in winter strategy of one parasitoid species on the diversity and function of a guild of parasitoids. *Oecologia*, **180**(3), 877–888.

- Auad, A. M., Alves, S. O., Carvalho, C. A., Silva, D. M., Resende, T. T., & Veríssimo, B. A. (2009). The Impact of Temperature on Biological Aspects and Life Table of *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae) Fed with Signal Grass . *Florida Entomologist*, **92**(4), 569–577.
- Basheer, A., Aslan, L., & Asaad, R. (2014). Effect of constant temperatures on the development of the aphid parasitoid species, *diaeretiella rapae* (M'intosh) (Hymenoptera: Aphidiidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, **24**(1), 1–5.
- Bell, J. R., Alderson, L., Izera, D., ... Harrington, R. (2015). Long-term phenological trends, species accumulation rates, aphid traits and climate: Five decades of change in migrating aphids. *Journal of Animal Ecology*, **84**(1), 21–34.
- Carvalho, F. J., de Santana, D. G., & Sampaio, M. V. (2020). Modeling Overdispersion, Autocorrelation, and Zero-Inflated Count Data Via Generalized Additive Models and Bayesian Statistics in an Aphid Population Study. *Neotropical Entomology*, **49**(1), 40–51.
- Chamuene, A., Araújo, T. A., Silva, G., Costa, T. L., Berger, P. G., & Picanço, M. C. (2018). Performance of the natural mortality factors of *aphis gossypii* (hemiptera: Aphididae) as a function of cotton plant variety and phenology. *Environmental Entomology*, **47**(2), 440–447.
- Dedryver, C. A., Le Ralec, A., & Fabre, F. (2010). The conflicting relationships between aphids and men: A review of aphid damage and control strategies. *Comptes Rendus - Biologies*, **333**(6–7), 539–553.
- Fidelis, E. G., Farias, E. S., Lopes, M. C., Sousa, F. F., Zanuncio, J. C., & Picanço, M. C. (2019). Contributions of climate, plant phenology and natural enemies to the seasonal variation of aphids on cabbage. *Journal of Applied Entomology*, **143**(4), 365–370.
- Finlay, K. J., & Luck, J. E. (2011). 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 and Environment*, **144**(1), 405–421.
- Furlong, M. J., & Zalucki, M. P. (2017). Climate change and biological control: the consequences of increasing temperatures on host–parasitoid interactions. *Current Opinion in Insect Science*, **20**, 39–44.

- Gang, M., & Chunsen, M. (2010, November 26). Behavioral responses of bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi*, to temperature gradients, pp. 624–630.
- Harrington, R., Clark, S. J., Welham, S. J., ... Cocu, N. (2007). Environmental change and the phenology of European aphids. *Global Change Biology*, **13**(8), 1550–1564.
- Holloway, P., Kudenko, D., & Bell, J. R. (2018). Dynamic selection of environmental variables to improve the prediction of aphid phenology: A machine learning approach. *Ecological Indicators*, **88**(September 2017), 512–521.
- Honek, A., Martinkova, Z., Saska, P., & Dixon, A. F. G. (2018). Aphids (homoptera: Aphididae) on winter wheat: Predicting maximum abundance of *metopolophium dirhodum*. *Journal of Economic Entomology*, **111**(4), 1751–1759.
- Jerbi-Elayed, M., Lebdi-Grissa, K., Le Goff, G., & Hance, T. (2015). Influence of Temperature on Flight, Walking and Oviposition Capacities of two Aphid Parasitoid Species (Hymenoptera: Aphidiinae). *Journal of Insect Behavior*, **28**(2), 157–166.
- Jonsson, M., Buckley, H. L., Case, B. S., Wratten, S. D., Hale, R. J., & Didham, R. K. (2012). Agricultural intensification drives landscape-context effects on host-parasitoid interactions in agroecosystems. *Journal of Applied Ecology*, **49**(3), 706–714.
- Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity. *Psychometrika*, **39**(1), 31–36.
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, **25**(1), 1–18.
- Leslie, T. W., Van Der Werf, W., Bianchi, F. J. J. A., & Honěk, A. (2009). Population dynamics of cereal aphids: Influence of a shared predator and weather. *Agricultural and Forest Entomology*, **11**(1), 73–82.
- Malaquias, J. B., Ramalho, F. S., Carlos, T. D. S. D., ... Zanoncio, J. C. (2017). Multivariate approach to quantitative analysis of *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae) and their natural enemy populations at different cotton spacings. *Scientific Reports*, **7**(December 2016), 1–11.
- MAPA. (2008). Portaria nº 43/2008. Regionalização para épocas de semeadura de trigo e triticale Estado do Rio Grande do Sul.

- Meisner, M. H., Harmon, J. P., & Ives, A. R. (2014). Temperature effects on long-term population dynamics in a parasitoid-host system. *Ecological Monographs*, **84**(3), 457–476.
- Moiroux, J., Boivin, G., & Brodeur, J. (2015). Temperature influences host instar selection in an aphid parasitoid: support for the relative fitness rule. *Biological Journal of the Linnean Society*, **115**(4), 792–801.
- Ovaskainen, O., Skorokhodova, S., Yakovleva, M., ... Del Mar Delgado, M. (2013). Community-level phenological response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**(33), 13434–13439.
- Parizoto, G., Rebonatto, A., Schons, J., & Lau, D. (2013). Barley yellow dwarf virus-PAV in Brazil: Seasonal fluctuation and biological characteristics. *Tropical Plant Pathology*, **38**(1), 11–19.
- Pennachio, F. (1989). The Italian species of the genus *Aphidius* Nees (Hymenoptera, Braconidae, Aphidiinae). *Bollettino Del Laboratorio Di Entomologia Agraria "Filippo Silvestri,"* **46**, 75–106.
- Pereira, P. R. V. da S., Salvatori, J. R., & Lau, D. (2009). Identificação de adultos ápteros e alados das principais espécies de afídeos (Hemiptera: Aphididae) associadas a cereais de inverno no Brasil. *Passo Fundo: Embrapa Trigo*, (December), 17.
- Pérez, N., Seco, M. V., Valenciano, J. B., & Lorenzana, A. (2007). Use of suction-trap and moericke traps for monitoring the migration of damson-hop aphid (*Phorodon humuli*) (Hemiptera, aphididae). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, **35**(4), 455–461.
- Rebonatto, A., Salvadori, J. R., & Lau, D. (2015). Temporal Changes in Cereal Aphids (Hemiptera: Aphididae) Populations in Northern Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Agricultural Science*, **7**(10), 71–78.
- Santos, C. D. R. D., Sampaio, M. V., Lau, D., ... Carvalho, F. J. (2019). Taxonomic Status and Population Oscillations of *Aphidius colemani* Species Group (Hymenoptera: Braconidae) in Southern Brazil. *Neotropical Entomology*, 983–991.

- Soares, J. R. S., da Silva Paes, J., de Araújo, V. C. R., ... Zanuncio, J. C. (2020). Spatiotemporal Dynamics and Natural Mortality Factors of *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) in Bell Pepper Crops. *Neotropical Entomology*. doi:10.1007/s13744-020-00761-2
- Starý, P., & Lukáš, J. (2009). Aphid parasitoids and their tritrophic associations in Slovakia (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae). *Bratislava: Folia Hymenopterologica Slovaca*, **1**, 1–63.
- Tomanović, Ž., Kavallieratos, N. G., Starý, P., ... Sarlis, G. P. (2003). Aphidius Nees Aphid Parasitoids (Hymenoptera , Braconidae , Aphidiinae) in Serbia and Montenegro : Tritrophic Associations and Key. *Acta Entomologica Serbica*, **8**(1/2), 15–39.
- Tomanović, Ž., Mitrovic, M., Petrovic, A., ... Vorburgue, C. (2018). Revision of the European *Lysiphlebus* species (Hymenoptera: Braconidae: Aphidiinae) on the basis of COI and 28SD2 molecular markers and morphology. *Arthropod Systematics & Phylogeny*, **76**(2), 179–213.
- Tomanovic, Ž., Petrovic, A., Mitrovic, M., ... Ivanovic, A. (2014). Molecular and morphological variability within the *Aphidius colemani* group with redescription of *Aphidius platensis* Brethes (Hymenoptera : Braconidae : Aphidiinae), 552–565.
- Tougeron, K., Brodeur, J., Le Lann, C., & van Baaren, J. (2019). How climate change affects the seasonal ecology of insect parasitoids. *Ecological Entomology*. doi:10.1111/een.12792
- Tougeron, K., Damien, M., Lann, C. Le, Brodeur, J., & van Baaren, J. (2018). Rapid responses of winter aphid-parasitoid communities to climate warming. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **6**(OCT), 1–9.
- Valério, D. A., Tres, A., Tetto, A. F., Soares, R. V., & Wendling, W. T. (2018). Holdridge life zone classification for the southern Brazilian state ‘Rio grande do sul.’ *Ciencia Florestal*, **28**(4), 1776–1788.
- Van den Eynde, R., Van Leeuwen, T., & Haesaert, G. (2020). Identifying drivers of spatio-temporal dynamics in barley yellow dwarf virus epidemiology as a critical factor in disease control. *Pest Management Science*, (March). doi:10.1002/ps.5851

- Wang, L., Hui, C., Sandhu, H. S., Li, Z., & Zhao, Z. (2015). Population dynamics and associated factors of cereal aphids and armyworms under global change. *Scientific Reports*, **5**(July), 1–8.
- Werner, C. M., Stuble, K. L., Groves, A. M., & Young, T. P. (2020). Year effects: Interannual variation as a driver of community assembly dynamics. *Ecology*, **101**(9), 0–2.
- Yang, F., Xu, L., Wu, Y. K., ... Guo, Y. Y. (2017). Species composition and seasonal dynamics of aphid parasitoids and hyperparasitoids in wheat fields in northern China. *Scientific Reports*, **7**(1), 1–9.
- Zhao, Z. H., & Reddy, G. V. P. (2019). Semi-natural habitats mediate influence of inter-annual landscape variation on cereal aphid-parasitic wasp system in an agricultural landscape. *Biological Control*, **128**(May 2018), 17–23.

3 ESTRUTURA COMUNITÁRIA E FLUTUAÇÃO POPULACIONAL DE AFÍDEOS ALADOS DE CEREAIS E SEUS PARASITOIDES NO SUL DO BRASIL

Resumo

Alterações na abundância e flutuação de afídeos e parasitoides são relacionadas principalmente a variação no tempo meteorológico, afetando os padrões de co-ocorrência e compatibilidade trófica. Neste sentido, o objetivo do estudo foi descrever padrões de oscilação e co-ocorrência nas populações de afídeos alados de cereais e parasitoides no Sul do Brasil e através da modelagem dos efeitos da temperatura e precipitação, determinar como estes filtros abióticos refletiram nos padrões encontrados. O trabalho foi conduzido durante os anos de 2011 a 2018 na estação experimental da Embrapa Trigo, localizada no município de Coxilha, RS, Brasil. Os dados coletados semanalmente em armadilhas Moericke foram analisados por meio modelos mistos e probabilidade de co-ocorrência pareada. Os dados meteorológicos foram obtidos a partir da estação meteorológica da Embrapa Trigo, a uma distância de aproximadamente 10 km do local de amostragem. Espécies de afídeos foram agrupadas em tribos, para parasitoides, análises foram realizadas em nível de espécie. A tribo Aphidini apresentou uma tendência de oscilação diferente de Macrosiphini e Siphini, com pico populacional principal durante o outono, além de verão e primavera. Os resultados obtidos sugerem que a temperatura do ar e precipitação, juntamente com a presença de hospedeiros, ditam a sazonalidade de afídeos e parasitoides, explicando boa parte do padrão de associação e sincronia entre espécies, expresso pela co-ocorrência. Os resultados são discutidos sob o ponto de vista das variações meteorológicas e da disponibilidade de recursos na cadeia trófica.

Keywords: Aphidini, Macrosiphini, Siphini, Braconidae, Sincronia, Predador-presa

3.1 Introdução

Afídeos e parasitoides são parte de uma das principais redes de interações entre espécies associadas à cereais cultivados no mundo (Alhmedi *et al.* 2018; Andrade *et al.* 2016; Gagic *et al.* 2011; Tomanović *et al.* 2008). Culturas de cereais, como trigo, cevada, centeio, aveia, milho e arroz formam os principais ambientes agrícolas para a ocorrência destes organismos (Finlay & Luck 2011; Helmut & Harrington 2017; Rebonatto *et al.* 2015; Santos *et al.* 2019; So *et al.* 2010). Nestas culturas, padrões populacionais ecológicos em sistemas afídeo-parasitoide, tais como flutuação populacional e associação entre espécies em resposta aos efeitos de variáveis meteorológicas são importantes de serem estudados, para entender a dinâmica desses organismos nos sistemas de cultivo (Furlong & Zalucki 2017; Rebonatto *et al.* 2015).

No Sul do Brasil, os cereais cultivados como milho, aveia, trigo, cevada e centeio são acometidos por afídeos, estando sujeitas a danos diretos, ocasionados pela sucção de seiva e indiretos pela transmissão de vírus às plantas, principalmente o barley yellow dwarf virus (BYDV, Luteoviridae) (Kaddachi *et al.* 2014; Lau *et al.* 2021; Parizoto *et al.* 2013; Savaris *et al.* 2013). Nesta região, durante o século passado, as principais espécies de afídeos de cereais de inverno foram *Metopolophium dirhodum* (Walker, 1849) e *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775)

(Caetano 1978; Zúñiga-Salinas 1982). Estes eram responsáveis por transmitir o BYDV, reduzindo a produtividade e elevando custos de controle, principalmente para cultura do trigo (Caetano 1968).

Para mitigar os danos causados por estes afídeos, foi implementado em 1978 o Programa de Controle Biológico dos Pulgões do Trigo no Brasil (PCBPT) pela Embrapa Trigo (Embrapa 1979). O PCBPT introduziu para atuar no controle de afídeos-praga 13 espécies de parasitoides, *Aphelinus asychis* (Walker, 1839), *Aphelinus abdominalis* (Dalman, 1820), *Aphelinus varipes* (Förster, 1841), *Aphelinus flavipes* (Forster, 1841), *Aphidius colemani* (Viereck, 1912), *Aphidius ervi* (Haliday, 1834), *Aphidius pascuorum* (Marshall, 1896), *Aphidius picipes* (Nees, 1811), *Aphidius rhopalosiphi* (De Stefani, 1902), *Aphidius uzbekistanicus* (Luzhetskii, 1960), *Ephedrus plagiator* (Nees, 1811), *Praon volucre* (Haliday, 1833) e *Praon gallicum* (Stary, 1971) (Braconidae). Estas espécies foram introduzidas a partir de países, tais como Chile, França, Grécia, Inglaterra, Israel, Itália e Suíça (Embrapa 1979). No Brasil, os parasitoides foram multiplicados (criação massal) e liberados em áreas cultivadas com cereais da região Sul, visando, principalmente, o controle de *M. dirhodum* e *S. avenae* na cultura do trigo (Salvadori & Salles 2002).

Apesar do sucesso no controle biológico de afídeos em cereais no sul do Brasil, poucos estudos foram conduzidos, deixando uma lacuna sobre o *status quo* da comunidade de afídeos e parasitoides ao longo do tempo, sobretudo na análise de fatores que regulam padrões de flutuação populacional e sincronia entre esses organismos (Santos *et al.* 2019; Zanini *et al.* 2006). Considerando o advento de substituição do cultivo convencional pelo sistema de plantio direto, cultivos outonais com Poaceae, principalmente aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb) vêm sendo intensificados (Kochhann & Denardin 2000). A presença destes cultivos outonais pode influenciar na dinâmica das populações de afídeos-praga e, conseqüentemente, de BYDV, tornando-se uma ponte verde para outros cereais cultivados em sucessão, como o trigo, que pode sofrer perdas de até 60% na produtividade em decorrência do BYDV (Lau *et al.* 2021; Parizoto *et al.* 2013).

Além disso, a presença destes cultivos pode ter influenciado no grau de acoplamento dos parasitoides, modificando a estrutura da comunidade de parasitoides, tornando necessária sua investigação nos dias atuais. A sincronia de afídeos e parasitoides, na presença de hospedeiro, é regulada por fatores meteorológicos, principalmente temperatura do ar, fotoperíodo e precipitação pluviométrica (Beck 2012; Wetherington *et al.* 2017). A temperatura é considerada o principal fator de influência meteorológica sobre as dinâmicas populacionais de afídeos e parasitoides, podendo alterar a taxa de desenvolvimento, reprodução,

sobrevivência e migração, em diferentes escalas de tempo, com potencial de ocasionar incompatibilidade trófica entre estes organismos (Harrington & Clark, 2010; Moiroux et al., 2015; Wiest et al., 2020). Isso ocorre, em parte, pois afídeos e parasitoides podem responder de diferentes formas as variáveis meteorológicas, restringindo o alcance de serviços agroecossistêmicos por parte dos parasitoides (Rebonatto *et al.* 2015; Tougeron *et al.* 2019; Van Veen *et al.* 2005).

O objetivo deste estudo foi investigar uma série temporal de oito anos, composta por amostragens semanais, e avaliar a estrutura comunitária atual de afídeos alados de cereais e seus parasitoides no Sul do Brasil. Além disso, buscou-se determinar os padrões de flutuação populacional das principais tribos de afídeos alados e espécies de parasitoides, e avaliar os efeitos da temperatura média do ar e precipitação pluviométrica sobre estes padrões.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido na Estação Experimental II da Embrapa Trigo, no município de Coxilha, RS, Brasil ($28^{\circ}11'42.8''S$, $52^{\circ}19'30.6''W$, 710 m alt.) (Fig. 1). A amostragem dos afídeos alados foi realizada de forma semanal em uma área de 0,5 ha, cultivada em sistema de plantio direto, durante os anos de 2011 a 2018. No outono e inverno, a área foi cultivada com aveia-preta, *Avena strigosa* Schreb., aveia-branca, *Avena sativa* L., trigo *Triticum aestivum* L., triticale *Triticosecale* Wittmack, nabo-forrageiro, *Raphanus sativus* L. e pousio. Na primavera e verão, com soja, *Glycine max* (L.) Merr., milho *Zea mays* L., e braquiária *Urochloa ruziziensis* (R.Germ. & Evrard) Crins.

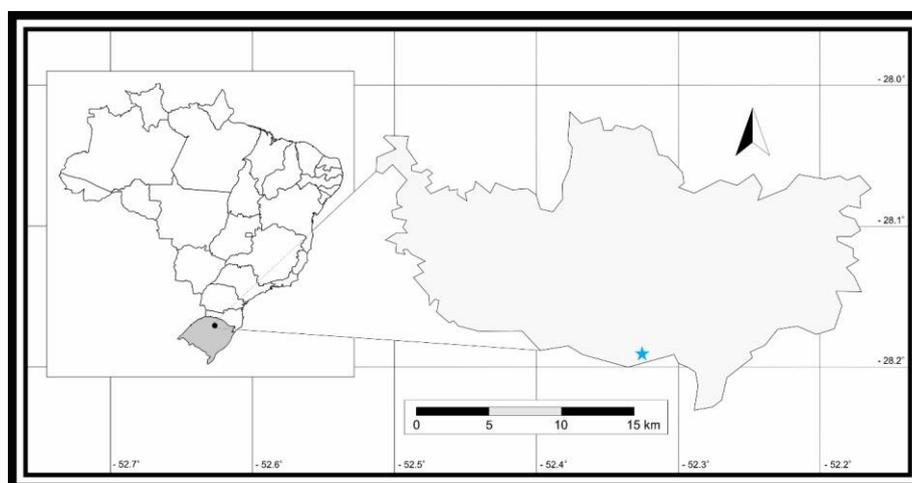


Fig 1. Mapa da localização do município de Coxilha no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, e da Área Experimental II da Embrapa Trigo (estrela azul) dentro do município de Coxilha.

3.2.2 Amostragem e identificação

As populações de afídeos alados e parasitoides foram monitoradas com armadilhas Moericke de cor amarela (45 cm de comprimento x 30 cm de largura x 4,5 cm de altura), preenchidas com dois litros de solução preparada com água (40%), formalina (0,3%) e detergente (0,2%). Quatro armadilhas foram instaladas nas bordas da área de cultivo a uma altura de 20 cm em relação ao solo. A cada 7 dias, os insetos coletados nas armadilhas foram retirados com auxílio de peneira e armazenados em frasco de vidro com álcool 70%. No laboratório, afídeos e parasitoides foram triados e contados utilizando microscópio estereoscópico. A identificação dos afídeos alados foi realizada em microscópio óptico, através da chave dicotômica de Pereira *et al.* (2009). Para identificar os parasitoides foram utilizadas chaves dicotômicas de Pennachio (1989), Tomanović *et al.* (2003), Starý & Lukáš (2009), Tomanovic *et al.* (2014) e Tomanović *et al.* (2018). Os dados foram tabulados e armazenados na plataforma TrapSystem da Embrapa Trigo (<http://gpca.passofundo.ifsul.edu.br>).

3.2.3 Análise estatística

3.2.3.1 Análise faunística

Para compreender quais eram as principais espécies de afídeos alados e parasitoides, foi realizada uma análise faunística. Esta análise classificou as espécies de acordo com os parâmetros: abundância, presença, dominância, frequência e constância. Os parâmetros faunísticos foram calculados seguindo a metodologia de Silveira Neto *et al.* (1976) por meio do software AnaFau (Moraes *et al.* 2003).

3.2.3.2 Agrupamento e ordenação de espécies

Uma análise de agrupamento hierárquico foi realizada para avaliar a co-ocorrência das principais espécies de afídeos alados e parasitoides classificadas pela análise faunística. Os dados foram transformados em 0 (ausência) e 1 (presença), sendo a matriz de similaridade gerada por meio de coeficientes de Jaccard e o agrupamento de espécies performado pelo método de Ward. A matriz dos coeficientes de Jaccard foi realizada por meio da função “vegdist(dados, method = “Jaccard”)” e o agrupamento gerado pela função “hclust(matriz, method = “Ward.D”)”, ambas funções são parte do pacote “vegan” (Oksanen *et al.* 2019). O dendograma foi gerado através do pacote “FactoMineR” (Lê *et al.* 2008).

Uma análise de componentes principais (PCA), com base na log abundância semanal de afídeos alados e parasitoides ao longo dos oito anos foi realizada para avaliar se os clusters

formados pela análise de agrupamento hierárquico estavam ordenados em função da flutuação populacional ao longo de cada ano. Os dados foram padronizados, com todos apresentando média igual a 1 e variância igual a 0. Os componentes principais foram selecionados de acordo com o método de Kaiser, sendo selecionados apenas aqueles com autovetor > 1 (Kaiser 1974). A PCA foi realizada por meio do pacote “*FactoMineR*” (Lê *et al.* 2008).

3.2.3.3 Modelagem da flutuação populacional e efeitos da temperatura e precipitação

Nesta análise, as principais espécies de afídeos alados foram agrupadas ao nível de tribo e parasitoides foram modelados ao nível de espécie. Para compreender como as tribos de afídeos e espécies de parasitoides oscilavam ao longo das semanas do ano, e qual o papel da temperatura do ar e precipitação pluviométrica como desencadeadores destes padrões, foi utilizada a estrutura de um modelo misto aditivo generalizado (GAMM) por meio do pacote “*gamm4*” (Wood 2017). Neste, as populações de afídeos alados e parasitoides foram transformadas em $\log(x+0.5)$, com erros seguindo uma distribuição gaussiana e estrutura autorregressiva do tipo ARIMA. Os modelos tiveram a seguinte estrutura:

$$Y_{ijkl} = \alpha + f1(W_i) + f2(T_j) + f3(P_i) + b_{k/l} + \epsilon_{ijkl} + \epsilon_t$$

onde Y_{ijklm} é a população média estimada de afídeos ou parasitoides; α é o intercepto; $f1(W_i)$ é o componente temporal expresso em semanas do ano; $f2(T_j)$ é o efeito suavizado da temperatura média do ar; $f3(P_i)$ é o efeito suavizado da precipitação pluviométrica; $b_{k/l}$ refere-se aos efeitos aleatórios das variáveis “semanas” e “anos” alinhados, respectivamente; ϵ_{ijkl} é o erro residual; e ϵ_t é o componente autorregressivo do tipo ARIMA, considerando a correlação das variáveis observadas na semana anterior com a semana seguinte.

A qualidade do ajuste dos modelos GAMM foi verificada por meio de análise gráfica dos resíduos e histogramas gerados pela função “*gam.check*”. Todas as análises foram realizadas através do software R v. 4.0.2 (<http://gpca.passofundo.ifsul.edu.br>).

3.3 Resultados

3.3.1 Análise faunística

Ao final do período de oito anos de avaliação, foram observadas oito espécies de afídeos alados de cereais, pertencentes as tribos Aphidini, Macrosiphini e Siphini. Em Aphidini, ocorreram as espécies *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (n = 28.824), *Rhopalosiphum*

rufiabdominalis (Sasaki, 1899) (n = 420), *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (n = 477) e *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (n = 722). Para Macrosiphini, foram observadas as espécies *M. dirhodum* (n = 373) e *S. avenae* (n = 1122) e para Siphini as espécies *Sipha flava* (Forbes, 1884) (n = 56) e *Sipha maydis* (Passerini, 1860) (n = 38) (Tabela 1).

Para comunidade de parasitoides, foram observadas somente espécies pertencentes a família Braconidae, subfamília Aphidiinae. As espécies identificadas foram *Aphidius platensis* (Brèthes, 1913) (n = 3441), *A. uzbekistanicus* (n = 410), *A. ervi* (n = 87), *A. rhopalosiphi* (n = 381), *Diaeretiella rapae* (Mc'Intosh, 1855) (n = 1043), *E. plagiator* (n = 174) e *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (n = 70) (Tabela 1).

Por meio da análise faunística, os afídeos alados *R. padi* e *S. avenae* foram as espécies com maior abundância, ao passo que *S. flava* e *S. maydis* foram menos frequentes, sendo classificados como espécies de ocorrência acidental (Tabela 1). Na comunidade de parasitoides, *A. platensis* foi classificada como espécie predominante e *E. plagiator*, *A. ervi* e *L. testaceipes* classificados como espécies acidentais. Tanto para afídeos alados quanto para seus parasitoides, o restante das espécies capturadas foi classificado como espécies acessórias. Espécies de ocorrência acidental foram desconsideradas para o restante das análises, pois apresentavam alta variabilidade e baixa frequência de ocorrência, penalizando excessivamente os modelos estatísticos, resultando em estimativas que podem ser interpretadas de forma errônea.

Tabela 1. Análise faunística da comunidade de afídeos alados de cereais e seus parasitoides capturados em armadilhas Moericke, Coxilha, RS, 2011-2018.

Species	N	RA%	Presence	Dominance ¹	Abundance	Frequency	Constance
Aphids							
<i>Rhopalosiphum padi</i> *	28.824	90,00	354	sd	sa	sf	w
<i>Sitobion avenae</i> *	1.122	3,50	219	d	ma	mf	w
<i>Schizaphis graminum</i>	722	2,25	73	d	c	f	y
<i>Rhopalosiphum maidis</i>	477	1,50	118	d	c	f	y
<i>Rhopalosiphum rufiabdominalis</i>	420	1,31	118	d	c	f	y
<i>Metopolophium dirhodum</i>	373	1,16	104	d	c	f	Y
<i>Sipha flava</i>	56	0,17	35	d	r	pf	z
<i>Sipha maydis</i>	38	0,12	31	d	r	pf	z
Total	32.038	100,00					
Parasitoids							
<i>Aphidius platensis</i> * ⁺	3.441	61,38	187	sd	sa	sf	w
<i>Diaretiella rapae</i>	1.043	18,61	81	d	ma	mf	y
<i>Aphidius uzbekistanicus</i> ⁺	410	7,31	91	d	c	f	y
<i>Aphidius rhopalosiphii</i> ⁺	381	6,80	73	d	c	f	y
<i>Ephedrus plagiator</i> ⁺	174	3,10	39	d	c	f	z
<i>Aphidius ervi</i> ⁺	87	1,55	40	d	c	f	z
<i>Lysiphlebus testaceipes</i>	70	1,25	39	d	c	f	z
Total	5.606	100,00					

¹Dominância com base no método de Kato (1952). RA% = Abundância relativa. Presença: número de amostras com ocorrência da espécie ao longo da série histórica. Dominância = d: dominante; nd: não dominante; Abundância = ma: muito abundante; c: comum; d: dispersa; r: rara; Frequência = mf: muito frequente; f: frequente; pf: pouco frequente; Constância = w: constante; y: acessória; z: acidental. *Espécies indicadoras (predominantes), consideradas as que obtiveram os maiores índices faunísticos. ⁺Parasitoide introduzido pelo PCBPT na década de 1970 para controle biológico de afídeos em cereais.

3.3.2 Agrupamento e ordenação de espécies

Considerando as principais espécies de afídeos alados e parasitoides, um dendograma baseado no coeficiente de Jaccard foi implementado para verificar como espécies estavam agrupadas com base na co-ocorrência. Formaram-se dois grandes grupos (Figura 2 a). O primeiro grupo foi formado somente por parasitoides, ao passo que o segundo pelos afídeos.

Nos subgrupos formados para os parasitoides, *D. rapae* apresentou menor similaridade com as espécies do gênero *Aphidius* (*A. rhopalosiphii*, *A. uzbekistanicus* e *A. platensis*). Para os afídeos, houve maior similaridade entre *R. rufiabdominalis* e *R. maidis* que formam um cluster basal. As espécies *R. padi*, *S. avenae*, *S. graminum* e *M. dirhodum* formam um cluster onde *R. padi* e *S. avenae* apresentaram maior similaridade em relação as demais espécies.

A PCA baseada na abundância logarítmica de cada espécie ao longo das semanas do ano indicou que o agrupamento anteriormente descrito foi explicada em grande parte pela variação sazonal das populações (Fig. 2 b). Em maiores detalhes, o primeiro componente principal (PC1) explicou 48,97% da variação existente. Neste, a partir do arranjo vetorial, verificou-se que os afídeos alados das espécies *R. maidis* e *R. rufiabdominalis* ocorreram no início do verão, ao passo que *R. padi* e *S. avenae* tiveram maiores populações de alados ao final do verão e início de outono, já *S. graminum* teve populações concentradas majoritariamente no outono. Entre os parasitoides, verificou-se maior ocorrência destes no segundo semestre do ano,

com *D. rapae* e *A. platensis* tendo maiores populações em pleno inverno, já *A. uzbekisticus* e *A. rhopalosiphii* tiveram maiores populações ao final do inverno e início de primavera. O PC2 (22,13% de variação explicada) indicou que o afídeo *M. dirhodum* teve populações concentradas principalmente na primavera

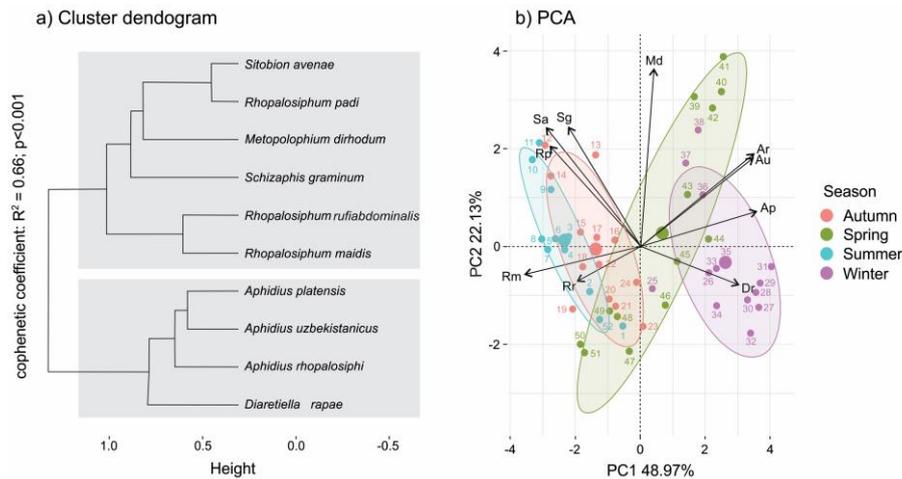


Fig 2. (a) Dendrograma de agrupamento de afídeos alados de cereais e parasitoides baseado na similaridade de Jaccard. **(b)** Análise de componentes principais (PCA) particionando a variância nas log-abundâncias de afídeos alados de cereais e parasitoides em função das semanas do ano e estações.

3.3.3 Modelagem da flutuação populacional e efeitos da temperatura e precipitação

3.3.3.1 Afídeos

Em relação as variáveis meteorológicas temperatura do ar e precipitação pluviométrica, verificou-se efeito significativo destas variáveis sobre a abundância de afídeos alados capturados nas armadilhas Moericke (Tabela 2). Para temperatura do ar, foi observado uma tendência de crescimento populacional de adultos alados praticamente linear para Aphidini e Macrosiphini, no entanto, acima dos 20 °C, os efeitos positivos foram superiores para Aphidini (Fig. 3 a, d). Para a precipitação pluviométrica média, foram encontrados efeitos similares para ambas as tribos, com maior número médio estimado em momentos de ausência de precipitação (Fig. 3 b, e).

Para modelar os padrões de flutuação populacional e compreender os papéis da temperatura média do ar e da precipitação pluviométrica sobre estes padrões, espécies de

afídeos foram agrupadas ao nível de tribo, a fim de simplificar a análise, uma vez que já foi previamente observado o particionamento das abundâncias em função das semanas do ano ao nível de espécie (Fig. 2 b). As populações de afídeos alados das tribos Aphidini e Macrosiphini apresentaram efeitos significativos do componente temporal, expresso pelas semanas ao longo do ano (Tabela 2), sugerindo um padrão de oscilação com picos populacionais ocorrentes no verão e primavera (Fig. 3 c, f). Entretanto, verificou-se que populações de afídeos alados pertencentes a Aphidini apresentaram declínio de forma mais lenta na abundância em comparação com Macrosiphini. Outro aspecto a ser considerado foi a discrepância entre picos. Para Aphidini, o primeiro pico populacional (verão) foi significativamente superior ao segundo (primavera), ao passo que para Macrosiphini foi verificada menor amplitude entre os picos.

Avaliando as splines suavizadas estimadas pelos modelos GAMM em conjunto com os resultados obtidos pela PCA (Fig. 2 b), verifica-se que para tribo Aphidini, o primeiro pico populacional deve-se a ocorrência conjunta de *R. maidis*, *R. rufiabdominalis* e *R. padi*, no entanto, o declínio outonal das populações ocorre em uma menor taxa em comparação com Macrosiphini. Isso ocorre em virtude de indivíduos alados de *R. padi* e *S. graminum* ainda apresentaram populações elevadas durante o outono (Fig. 3 c). Para tribo Macrosiphini, verifica-se que o primeiro pico populacional foi reflexo direto da ocorrência de *S. avenae*, ao passo que o segundo pico apresentou maior contribuição de *M. dirhodum* (Fig. 3 f).

Tabela 2. Coeficientes estimados pelos modelos GAMM para afídeos alados das tribos Aphidini e Macrosiphini capturados em armadilhas Moericke, Coxilha, RS, 2011-2018.

Parâmetros	Gle	Glr	Fc	p-valor
Aphidini				
Temperatura do ar	1,512	9,000	0,515	0,002
Precipitação pluviométrica	1,546	9,000	0,946	< 0,001
Semanas	7,393	9,000	3,671	<0,001
Macrosiphini				
Temperatura do ar	1,101	9,000	0,358	0,041
Precipitação pluviométrica	1,249	9,000	0,572	0,013
Semanas	7,880	9,000	8,683	< 0,001

Gle: graus liberdade efetivos; Glr: graus de liberdade referência; Fc: valor de F calculado.

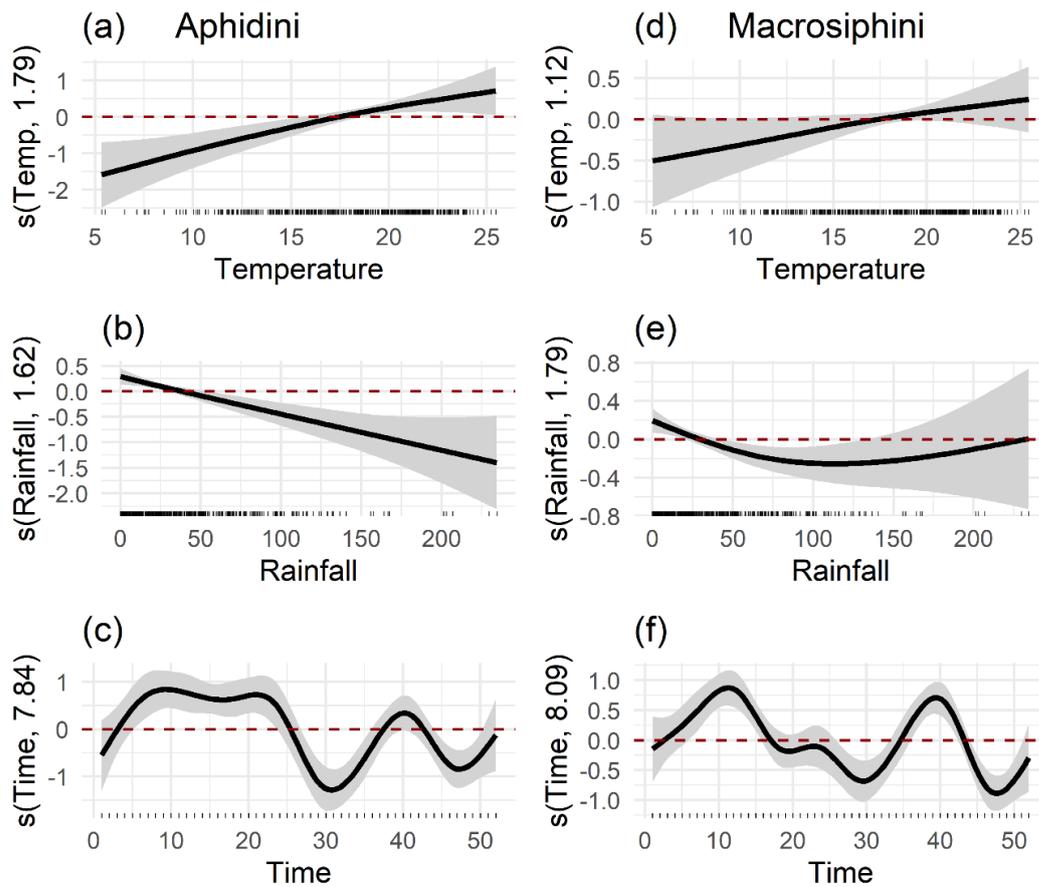


Fig 3. Splines suavizadas estimadas pelo modelo GAMM para os componentes lineares temperatura média do ar, precipitação pluviométrica e tempo para afídeos alados de cereais das tribos Aphidini (a, b, c) e Macrosiphini (d, e, f). Linha tracejada vermelhada indica o limite central entre efeitos positivos e negativos dos componentes lineares sobre a abundância de afídeos alados. Área sombreada indica o intervalo de confiança de 95%.

3.3.3.2 Parasitoides

A flutuação populacional estimada pelos modelos GAMM denotam variações na sazonalidade das espécies de parasitoides, com *A. platensis* e *D. rapae* apresentando picos populacionais em pleno inverno, ao passo que *A. uzbekistanicus* e *A. rhopalosiphi* apresentaram picos ao final do inverno e início da primavera (Fig. 4a, d, g, j). Entre as espécies de parasitoides, foram observadas variações na exploração do nicho térmico dentro da amplitude de 5 a 20 °C. Os parasitoides *A. platensis* e *D. rapae* tiveram maior média estimada em temperaturas por volta dos 5 a 10 °C. Já, *A. uzbekistanicus* e *A. rhopalosiphi* exploraram janelas de temperatura entre 10 e 20 °C (Fig. 4b, e, h, k). Não foram observados efeitos diretos da precipitação pluviométrica sobre a abundância dos parasitoides avaliados, apesar disto, as tendências sugerem potenciais efeitos negativos desta variável sobre a abundância dos parasitoides avaliados (Fig. 4c, f, i, l). Os coeficientes estimados pelos modelos GAMM para as espécies de parasitoides avaliadas podem ser observados pela Tabela 3.

Tabela 3. Coeficiente estimados pelos modelos GAMM para as principais espécies de parasitoides de afídeos de cereais capturados em armadilhas Moericke, Coxilha, RS, 2011-2018.

Parâmetros	Gle	Glr	Fc	p-valor
<i>Aphidius platensis</i>				
Temperatura do ar	2,876	9,000	12,338	< 0,001
Precipitação pluviométrica	0,638	9,000	0,114	0,144
Semanas	8,721	9,000	83,940	< 0,001
<i>Diaeretiella rapae</i>				
Temperatura do ar	2,434	9,000	8,444	< 0,001
Precipitação pluviométrica	0,879	9,000	0,274	0,0748
Semanas	4,716	9,000	33,54	< 0,001
<i>Aphidius uzbekistanicus</i>				
Temperatura do ar	2,831	9,000	5,206	< 0,001
Precipitação pluviométrica	0,133	9,000	0,018	0,286
Semanas	8,393	9,000	40,890	< 0,001
<i>Aphidius rhopalosiphi</i>				
Temperatura do ar	2,431	9,000	5,072	< 0,001
Precipitação pluviométrica	0,747	9,000	0,280	0,096
Semanas	7,635	9,000	30,46	< 0,001

Gle: graus de liberdade efetivos; Glr: graus de liberdade de referência; Fc: valor de F calculado.

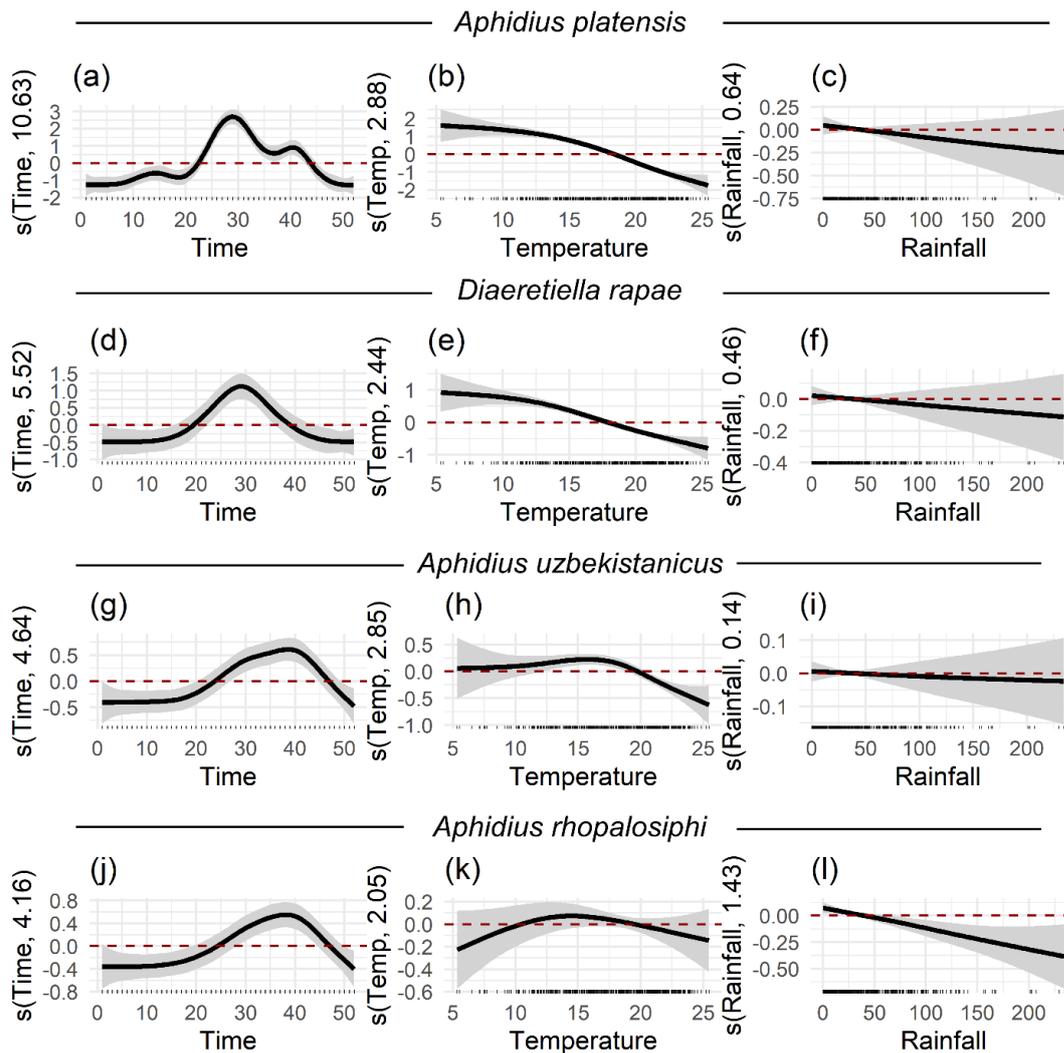


Fig 4. Splines suavizadas estimadas pelo modelo GAMM para os componentes lineares temperatura do ar, precipitação pluviométrica e tempo sobre *Aphidius platensis* (a, b, c), *Diaeretiella rapae* (d, e, f), *Aphidius uzbekistanicus* (g, h, i) e *Aphidius rhopalosiphi* (j, k, l). Linha tracejada vermelha indica o limite central entre efeitos negativos e positivos dos componentes lineares sobre a abundância de parasitoides. Área sombreada indica o intervalo de confiança de 95%.

3.4 Discussões

3.4.1 Análise faunística

Esta análise indicou que as espécies de afídeos alados mais abundantes em cultivos de cereais foram *R. padi* e *S. avenae*. Os alados de *R. maidis*, *R. rufiabdominalis*, *S. graminum* e *M. dirhodum* foram classificadas como espécies acessórias. As espécies *S. flava* e *S. maydis* foram classificadas como espécies raras e de ocorrência acidental, em função da baixa abundância. A dominância de *R. padi* e *S. avenae* no atual cenário contrapõe resultados verificados durante o século passado, os quais denotavam *M. dirhodum* como principal espécie

de afídeo-praga ocorrente em cereais no Sul do Brasil (Caetano 1968, 1978). Esta variação na dominância das espécies pode ser atribuída às alterações na forma de manejo do cultivo de cereais na região. A introdução do sistema de plantio direto e o manejo do solo através do uso de plantas de cobertura outonal, como a aveia-preta, hospedeira do pulgão-da-aveia, *R. padi* e do pulgão-da-espiga, *S. avenae* pode ter facilitado o estabelecimento e maior abundância dessas espécies atualmente (Rebonatto *et al.* 2015).

Para a comunidade de parasitoides, a espécie *A. platensis* foi classificada como dominante. As espécies *A. uzbekistanicus*, *A. rhopalosiphi* e *D. rapae* foram classificadas como acessórias, ao passo que *E. plagiator*, *A. ervi* e *L. testaceipes* foram considerados parasitoides de ocorrência accidental. O parasitoide *A. platensis* é considerado um dos principais agentes de controle biológico de afídeos-praga de cereais no mundo (Alvarez-baca *et al.* 2020; Santos *et al.* 2019), sendo classificado como generalista, parasitando afídeos pertencentes as tribos Aphidini e Macrosiphini (Starý *et al.* 2007). De outra forma, *A. uzbekistanicus* e *A. rhopalosiphi* são considerados parasitoides especializados, atacando afídeos pertencentes a tribo Macrosiphini (Starý *et al.* 2007). A raridade dos parasitoides *A. ervi*, *L. testaceipes* e *E. plagiator*, pode, entre outros fatores (bióticos e abióticos), estar relacionada ao método de coleta utilizado neste estudo e/ou as espécies de afídeos-pragas de cereais cultivados no Sul do Brasil, que podem não serem hospedeiras principais dessas espécies de parasitoides.

Quanto a espécie mais abundante de parasitoide em cultivos de cereais do Sul do Brasil, *A. platensis* (Tabela 1), em estudo taxonômico, Santos *et al.* (2019) verificaram que os exemplares coletados durante o período do PCBPT, previamente identificados como *Aphidius colemani* (Viereck, 1912) (Zúñiga-Salinas 1982), são espécimes de *A. platensis*. Apesar disso, registros de *A. platensis* no período anterior ao PCBPT indicam a ocorrência desta espécie no Sul do Brasil (Starý *et al.* 2007). Neste cenário, a introdução de *A. colemani* segue questionável, não sendo possível determinar exatamente quais espécies deste grupo foram introduzidas durante o PCBPT (Santos *et al.* 2019).

De maneira geral, das 13 espécies de parasitoides introduzidas pelo PCBPT na década de 1970, apenas cinco (apenas *A. platensis*, *A. uzbekistanicus*, *A. rhopalosiphi*, *A. ervi* e *E. plagiator*) ainda seguem presentes na região Sul do Brasil. Este resultado respalda a teoria da filtragem ambiental, a qual denota que uma espécie, ao adentrar em um novo local, deve transpor diversas barreiras ambientais (filtros) ao longo do tempo, para então poder ser considerada como estabelecida (Hajek *et al.* 2016; Outreman *et al.* 2018).

3.4.2 Flutuação populacional

3.4.2.1 Afídeos alados

Verificou-se que o agrupamento das espécies de afídeos alados foi explicado pelo padrão de flutuação populacional ao longo das semanas do ano. Com exceção de *M. dirhodum*, todas as demais espécies de afídeos alados foram agrupadas em função da maior abundância durante as semanas iniciais do ano, correspondente ao verão e outono. Neste período, a temperatura média do ar foi entre 20 a 25 °C, ideal para o desenvolvimento de afídeos, principalmente da tribo Aphidini (Auad *et al.* 2009; Dean 1974; Wiest *et al.* 2020). Além disso, a ausência de parasitoides neste período sugere poucas restrições para elevação das abundâncias e, conseqüente, migração por meio de formação de indivíduos alados. O afídeo *M. dirhodum* teve populações concentradas no período correspondente ao final do inverno e início da primavera, mesmo padrão dos anos 1970, só que atualmente com uma densidade populacional inferior (Rebonatto *et al.* 2015; Zúñiga-Salinas 1982). A flutuação populacional de afídeos alados no curto prazo (semanal) pode ser considerada reflexo da presença de hospedeiros na paisagem agrícola somada aos efeitos de variáveis meteorológicas (Bell *et al.* 2015; Tougeron *et al.* 2018).

Neste cenário, os modelos GAMM indicaram picos populacionais na transição verão/outono ocorrendo para ambas as tribos avaliadas. Apesar disso, verificou-se que Aphidini atingiu pico populacional com cerca de 4 semanas de antecedência em relação a Macrosiphini. Este padrão é decorrente da presença de *R. maidis* e *R. padi*, os quais ocorreram em maior abundância desde o início do verão, tendo as culturas do milho e braquiária, além de outras gramíneas espontâneas, como hospedeiros nesta época (Auad *et al.* 2009; Rebonatto *et al.* 2015; So *et al.* 2010). A partir do outono, tanto Aphidini quanto Macrosiphini tiveram declínio populacional de indivíduos alados, com menor abundância estimada durante pleno inverno. No entanto, a taxa de declínio populacional durante o outono foi superior para Macrosiphini em comparação à Aphidini. A razão disto deve-se ao melhor desenvolvimento da tribo Aphidini (principalmente *R. padi*) em comparação com Macrosiphini em aveia cultivada de forma outonal na região subtropical do Brasil, além de gramíneas de ocorrência natural como azevém (*Lolium multiflorum* L.) nesta época (Descamps & Chopa 2011; Sturza *et al.* 2012; Vasicek *et al.* 2010).

Ao considerar os efeitos da temperatura do ar sobre a flutuação populacional de afídeos alados, verificou-se ocorrência destes em uma amplitude térmica de 10 a 25 °C. Ambas as tribos foram beneficiadas pelo aumento da temperatura média do ar, atingindo ápice populacional

quando chegaram aos 25 °C. A maior amplitude térmica de Aphidini permitiu a ocorrência de indivíduos alados ao longo do outono, reduzindo sua taxa de declínio nesta época. Tais padrões de resposta à temperatura do ar para as principais espécies de afídeos destas tribos haviam sido previamente verificados por Dean (1974) que encontrou maiores limiares térmicos superiores para Aphidini em detrimento de Macrosiphini. Dentre as espécies avaliadas, os afídeos *R. maidis*, *R. rufiabdominalis*, *R. padi*, *S. graminum* (Aphidini) e *S. avenae* (Macrosiphini) tem maior tolerância a temperaturas médias elevadas em comparação com *M. dirhodum* (Macrosiphini), o que permitiu a ocorrência de alados destas espécies durante a metade inicial do ano (verão e outono), e explicou a concentração de *M. dirhodum* na primavera (Dean 1974).

Além da favorabilidade térmica, a ocorrência precoce destas espécies em relação a *M. dirhodum*, está relacionada com a presença de cultivos de milho em fase de pendoamento ao final do verão (hospedeiro de *R. maidis*) e aveia ao final do verão e grande parte do outono, os quais configuram-se como hospedeiros adequados para *R. rufiabdominalis*, *R. padi*, *S. graminum* e *S. avenae*, permitindo o crescimento populacional e formação de alados destas espécies. Em trigo, as principais espécies ocorrentes são *R. padi*, *S. graminum*, *S. avenae* e *M. dirhodum* (Helmut & Harrington 2017; Rebonatto *et al.* 2015). Estas espécies aumentam suas populações ápteras desde o perfilhamento (junho/julho – pleno inverno) até o espigamento (setembro/outubro – final do inverno e parte da primavera) (CONAB 2017; Salvadori & Tonet 2001). Durante o inverno, cereais como trigo, cevada, centeio e triticale estão em pleno desenvolvimento vegetativo no sul do Brasil, e normalmente as colônias das espécies de afídeos encontradas nas plantas, não possuem indivíduos alados, possivelmente pela abundância de recursos nutricionais nesse período (CONAB 2017; Junges *et al.* 2013; Parry 2013). Normalmente o surgimento de adultos alados nas colônias de afídeos, se dá em função da falta de recursos devido ao rápido crescimento populacional destes indivíduos (Morgan 2000; Parry 2013). Durante a primavera (fase de espigamento da cultura e posterior maturação), o crescimento populacional destas espécies é acelerado devido ao aumento da temperatura do ar (Dean 1974; Kuroli 2000; Parry 2013). Este fator, somado a crescente escassez de recursos decorrente da maturação fisiológica do trigo, tende a dar início a formação de indivíduos alados primaveris de ambas as tribos, conforme demonstrado pelos resultados obtidos neste estudo.

De maneira geral, o aumento na precipitação pluviométrica média semanal causou uma redução no número de afídeos alados estimados para ambas as tribos, contudo, não se verificou efeito desta variável sobre o padrão de flutuação das espécies. A precipitação pode impactar na abundância populacional de afídeos, agindo de maneira direta, via impacto das gotas e afogamento dos adultos, ou indireta, por meio da ação de fungos entomopatogênicos em

momentos de elevada umidade relativa do ar (Rebonatto *et al.* 2015; Soares *et al.* 2020b; Wang *et al.* 2015).

As implicações dos padrões de flutuação populacional encontrados para afídeos alados e os efeitos de variáveis meteorológicas sobre estes, relacionam-se diretamente ao risco de multiplicação e transmissão de BYDV em cultivos de aveia e trigo, respectivamente. Atualmente, BYDV é um dos principais vírus ocorrentes em cereais de inverno (aveia, trigo, cevada, centeio, triticale...) no mundo, sendo *R. padi* seu principal transmissor (Helmut & Harrington 2017). Na cultura do trigo, BYDV pode ocasionar redução de até 60% na produtividade da cultura, a depender da tolerância do genótipo de trigo e época de inoculação do vírus pelo vetor (Cezare *et al.* 2011). Sendo assim, a multiplicação de BYDV transmitido por *R. padi* em aveia-preta podem causar um efeito direto sobre o trigo cultivado em sucessão (Parizoto *et al.* 2013).

3.4.2.2. Parasitoides

De maneira geral, as espécies de parasitoides capturadas nas armadilhas e avaliadas foram agrupadas na segunda metade do ano. Neste período, verificou-se que parasitoides generalistas (*A. platensis* e *D. rapae*) tiveram populações concentradas em pleno inverno, ao passo que espécies mais especializadas (*A. uzbekistanicus* e *A. rhopalosiphi*) tiveram maiores populações na transição inverno-primavera (Fig. 4). Este padrão de flutuação é reflexo do acoplamento dos parasitoides com seus hospedeiros preferenciais e requerimentos térmicos. O uso de hospedeiros por parasitoides generalistas como *A. platensis* e *D. rapae* é modulado em função da abundância de hospedeiros, a qual foi representada em 89,9% por *R. padi* (Aphidini) (Tabela 1); em contrapartida, a utilização do hospedeiro de especialistas como, *A. uzbekistanicus* e *A. rhopalosiphi* é modulada pela presença, disponibilidade e abundância do grupo ou espécie específica, neste caso, a tribo Macrosiphini (Gilchrist 1995; Tougeron *et al.* 2019; Wetherington *et al.* 2017).

Os efeitos da temperatura do ar sobre parasitoides ocorrem de maneira indireta, através das implicações desta variável sobre seus hospedeiros, e direta, impactando sobre sua taxa de desenvolvimento (Bannerman & Roitberg 2014; Jerbi-Elayed *et al.* 2015; Langer *et al.* 2004; Leslie *et al.* 2009; Meisner *et al.* 2014; Wang *et al.* 2015). Neste cenário, verificou-se uma amplitude térmica geral de 0 a 20 °C para parasitoides. No entanto, os resultados obtidos sugerem um particionamento deste nicho térmico entre as espécies generalistas e especialistas. Para os generalistas (*A. platensis* e *D. rapae*), maiores populações foram estimadas em uma

amplitude de temperatura que foi de 0 a 10 °C, ao passo que os especialistas (*A. uzbekistanicus* e *A. rhopalosiphi*) tiveram maiores populações estimadas na faixa de temperatura dos 10 a 20 °C. Esse cenário segue a flutuação populacional das espécies de afídeos associados aos cereais de inverno cultivados na região, especialmente para a cultura de trigo, onde a semeadura se inicia na primeira quinzena de junho (MAPA 2008). O afídeo *R. padi* é a espécie mais abundante atualmente em cereais de inverno no sul do Brasil (Rebonatto *et al.* 2015; Savaris *et al.* 2013; Vasicek *et al.* 2010). Esta espécie prefere atacar as folhas e colmos (Salvadori & Tonet 2001), aumentando a população no período de desenvolvimento vegetativo das culturas (pleno inverno), que se dá entre julho e agosto, período onde temperaturas mais baixas (entre 10 e 15 °C) são registradas na região estudada. Desta forma, aumento da abundância dos parasitoides *A. platensis* e *D. rapae* no inverno pode estar relacionada a maior população áptera de *R. padi* nesse período do ano.

Os afídeos *M. dirhodum* e *S. avenae* tem preferência por atacar a folha bandeira e a espiga do trigo, respectivamente (Porrás *et al.* 2020; Salvadori & Tonet 2001). As fases de emborrachamento, antese e espigamento ocorrem no início da primavera (setembro/outubro) coincidindo com o aumento gradual das temperaturas (entre 15 a 20 °C) e aumento da abundância destes afídeos. Esses fatores podem estar relacionados com a maior ocorrência dos parasitoides especialistas *A. uzbekistanicus* e *A. rhopalosiphi* nesse período.

A variação no padrão de resposta a temperatura do ar entre espécies de parasitoides simpátricas permite que estas coexistam na mesma área, evitando a exclusão competitiva ou hiperparasitismo, além de melhorar a taxa de encontro com seus hospedeiros preferenciais (Andrade *et al.* 2016; Foray *et al.* 2011; Hance *et al.* 2007; Outreman *et al.* 2018). Isso ocorre devido a teoria da filtragem ambiental, em que os filtros internos (processos dentro da comunidade, como: competição, parasitismo e predação intraguilda) e externos (clima, paisagem e disponibilidade de recursos) induzem a convergência dos fenótipos no nível comunitário, resultando na coexistência estável de espécies sob recursos limitantes (Violle *et al.* 2012).

Os resultados obtidos para precipitação pluviométrica demonstram não haver um padrão de resposta definido das populações de parasitoides capturados em armadilhas Moericke. De maneira geral, esta variável pode influenciar indiretamente, através da regulação das abundâncias de afídeos, podendo influenciar a disponibilidade de recursos (Rebonatto *et al.* 2015; Soares *et al.* 2020b; Wang *et al.* 2015).

3.4.2.3 Relações entre afídeos e parasitoides

Os resultados demonstraram maior sincronia dos parasitoides *A. uzbekistanicus* e *A. rhopalosiphum* com o afídeo *M. dirhodum*. Estes parasitoides foram introduzidos pelo PCBPT, realizado no Sul do Brasil durante a década de 1970, tendo *M. dirhodum* e *S. avenae* como principais alvos a serem controlados (Salvadori & Salles 2002). Desta forma, a introdução desses parasitoides, pode ter impactado significativamente as populações de *M. dirhodum*, a ponto de alterar seu status de praga principal dos cereais, passando a ser atualmente *R. padi* e *S. avenae* (Parizoto *et al.* 2013; Rebonatto *et al.* 2015; Zúñiga-Salinas 1982).

Com relação a Aphidini, os resultados indicaram um desacoplamento dos parasitoides generalistas *A. platensis* e *D. rapae* na metade inicial do ano. Tal desacoplamento é reflexo da limitação térmica destes parasitoides em relação aos seus hospedeiros. Este resultado é importante em termos de controle biológico, principalmente para *R. padi* e *S. avenae* ocorrentes em cultivos outonais, com possíveis efeitos sobre trigo durante o inverno e primavera. Estes afídeos são os principais vetores de BYDV, e a multiplicação deste vírus em cereais outonais (ex: aveia) ocasiona sérios riscos para a cultura do trigo, cultivado em sucessão (Parizoto *et al.* 2013; Rebonatto *et al.* 2015).

Considerando cenários de mudanças climáticas, os padrões de resposta à temperatura do ar de afídeos alados e parasitoides sugerem que a elevação na temperatura média do ar, no atual sistema de cultivo de cereais, poderá gerar um desacoplamento das populações de parasitoides em relação aos seus hospedeiros. Esta tendência já foi indicada para diferentes sistemas hospedeiro-parasitoide, tendo maior probabilidade de surtos populacionais por parte dos afídeos como um dos principais reflexos (Bannerman & Roitberg 2014; Harrington & Clark 2010; Meisner *et al.* 2014; Tougeron *et al.* 2019).

A partir dos resultados obtidos, nota-se que a temperatura do ar é a principal variável meteorológica influente sobre os padrões de flutuação populacional e sincronia de afídeos alados de cereais e seus parasitoides no Sul do Brasil. Compreender os padrões de flutuação populacional de insetos-praga e inimigos naturais, bem como seus fatores influentes é essencial para determinação de períodos de maior ou menor risco às plantas cultivadas, permitindo assim a implementação de estratégias sustentáveis de Manejo Integrado de Pragas para mitigar possíveis danos às plantas cultivadas (Bell *et al.* 2015; Enders *et al.* 2018).

3.5 Conclusões

No atual cenário, *R. padi* e *S. avenae* são as principais espécies de afídeos de cereais no Sul do Brasil. Entre os parasitoides, verificou-se que *A. platensis* foi a espécie dominante e mais

abundante. Das 13 espécies de parasitoides de afídeos introduzidas pelo PCBPT no século passado (1978), apenas o grupo *A. colemani* (= *A. platensis*) e as espécies *A. uzbekistanicus*, *A. rhopalosiphi*, *A. ervi* e *E. plagiator* ainda são ocorrentes.

O desacoplamento de *R. padi* (Aphidini) com os parasitoides *A. platensis* e *D. rapae* durante o outono pode acarretar a multiplicação de BYDV em culturas como aveia-preta, utilizadas no manejo do solo, como cobertura e também como alimento para animais, com potencial efeito cascata para a cultura do trigo cultivada em sucessão. De maneira geral, a elevação na temperatura média do ar ocasionou um maior número de afídeos alados capturados pelas armadilhas. Para parasitoides, verificou-se que generalistas exploraram limiares inferiores de temperatura, ao passo que especialistas exploraram limiares superiores.

Os resultados obtidos nesse estudo podem servir de base para futuros trabalhos que visam avaliar a sincronia de afídeos e parasitoides em nível de espécie, taxa de parasitismo em programas de Manejo Integrado de Pragas, competição interespecífica e projeções de cenários futuros considerando as mudanças climáticas.

Agradecimentos

Agradecimentos são prestados a Elias do Amarante, Maria Elaine Moreira Solagna e Odirlei Dalla Costa (Embrapa Trigo) pela coleta das amostras em campo e Vânia Bianchin (Embrapa Trigo) pela preparação das amostras em laboratório e alimentação do banco de dados da plataforma Trap System.

Financiamento

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil – Processo No. 88887371811/2019-00 e projeto “Plataforma integrada para monitoramento, simulação e tomada de decisão no manejo de epidemias causadas por vírus transmitidos por insetos” Processo: No. 13.16.05.006.00.00.

Referências

Alhmedi A., Raymaekers S., Tomanović Ž., Bylemans D., Beliën T. (2018) Food web structure of aphids and their parasitoids in Belgian fruit agroecosystems. *Entomological Science*, **21**, 279–291.

- Alvarez-baca J.K., Alfaro-tapia A., Lavandero B., Lann L. (2020) Suitability and Profitability of a Cereal Aphid for the Parasitoid *Aphidius platensis* in the Context of Conservation Biological Control of *Myzus persicae* in Orchards. *Insects*, **11**, 1–17.
- Andrade T.O., Krespi L., Bonnardot V., van Baaren J., Outreman Y. (2016) Impact of change in winter strategy of one parasitoid species on the diversity and function of a guild of parasitoids. *Oecologia*, **180**, 877–888.
- Auad A.M., Alves S.O., Carvalho C.A., Silva D.M., Resende T.T., Veríssimo B.A. (2009) The Impact of Temperature on Biological Aspects and Life Table of *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae) Fed with Signal Grass. *Florida Entomologist*, **92**, 569–577.
- Bannerman J.A., Roitberg B.D. (2014) Impact of extreme and fluctuating temperatures on aphid-parasitoid dynamics. *Oikos*, **123**, 89–98.
- Beck S.D. (2012) *Insect Photoperiodism* 2nd ed. New York, NY, USA: Academic Press.
- Bell J.R., Alderson L., Izera D., Kruger T., Parker S., Pickup J., Shortall C.R., Taylor M.S., Verrier P., Harrington R. (2015) Long-term phenological trends, species accumulation rates, aphid traits and climate: Five decades of change in migrating aphids. *Journal of Animal Ecology*, **84**, 21–34.
- Caetano V. da R. (1968) Nota prévia sobre a ocorrência de uma virose em cereais de inverno no Rio Grande do Sul. *Revista da Sociedade Brasileira de Fitopatologia*, **2**, 53–66.
- Caetano V.R. (1978) *Variações sazonais de pulgões de trigo*. Passo Fundo, RS, Brazil.: Embrapa Centro Nacional de Pesquisa de Trigo.
- Cezare D.G., Schons J., Lau D. (2011) Análise da resistência/tolerância da cultivar de trigo BRS Timbaúva ao Barley yellow dwarf virus - PAV. *Tropical Plant Pathology*, **36**, 249–255.

- CONAB C.N. de A. (2017) *A Cultura do Trigo*.
- Dean G.J. (1974) Effect of temperature on the cereal aphids *Metopolophium dirhodum* (Wlk.), *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Macrosiphum avenae* (F.) (Hem., Aphididae). *Bulletin of Entomological Research*, **63**, 401–409.
- Descamps L.R., Chopa C.S. (2011) Population growth of *Rhopalosiphum padi* L. (Homoptera: Aphididae) on different cereal crops from the semiarid Pampas of Argentina under laboratory conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, **71**, 390–394.
- Embrapa (1979) *Programa de controle biológico dos pulgões do trigo - relatório anual*. Passo Fundo, RS, Brazil.: Embrapa Centro Nacional de Pesquisa de Trigo.
- Enders L.S., Hefley T.J., Girvin J.J., Whitworth R.J., Smith C.M. (2018) Spatiotemporal Distribution and Environmental Drivers of Barley yellow dwarf virus and Vector Abundance in Kansas. *Phytopathology*, **108**, 1196–1205.
- Finlay K.J., Luck J.E. (2011) 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 and Environment*, **144**, 405–421. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.011>.
- Foray V., Gibert P., Desouhant E. (2011) Differential thermal performance curves in response to different habitats in the parasitoid *Venturia canescens*. *Naturwissenschaften*, **98**, 683–691.
- Furlong M.J., Zalucki M.P. (2017) Climate change and biological control: the consequences of increasing temperatures on host–parasitoid interactions. *Current Opinion in Insect Science*, **20**, 39–44. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cois.2017.03.006>.

- Gagic V., Tschamntke T., Dormann C.F., Gruber B., Wilstermann A., Thies C. (2011) Food web structure and biocontrol in a four-trophic level system across a landscape complexity gradient. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **278**, 2946–2953.
- Gilchrist G.W. (1995) Specialists and generalists in changing environments. I. Fitness landscapes of thermal sensitivity. *American Naturalist*, **146**, 252–270.
- Hajek A.E., Hurley B.P., Kenis M., Garnas J.R., Bush S.J., Wingfield M.J., van Lenteren J.C., Cock M.J.W. (2016) Exotic biological control agents: A solution or contribution to arthropod invasions? *Biological Invasions*, **18**, 953–969.
- Hance T., Van Baaren J., Vernon P., Boivin G. (2007) Impact of extreme temperatures on parasitoids in a climate change perspective. *Annual Review of Entomology*, **52**, 107–126.
- Harrington R., Clark S. (2010) Aphid Biodiversity under Environmental Change. *Aphid Biodiversity under Environmental Change*.
- Helmuth F. van E., Harrington R. (2017) *Aphids as crop pests* 2nd ed. Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI.
- Jerbi-Elayed M., Lebdi-Grissa K., Le Goff G., Hance T. (2015) Influence of Temperature on Flight, Walking and Oviposition Capacities of two Aphid Parasitoid Species (Hymenoptera: Aphidiinae). *Journal of Insect Behavior*, **28**, 157–166.
- Junges A.H., Fontana D.C., Pinto D.G. (2013) Identification of croplands of winter cereals in rio grande do sul state, Brazil, through unsupervised classification of normalized difference vegetation index images. *Engenharia Agricola*, **33**, 883–895.

- Kaddachi I., Souiden Y., Achouri D., Chéour F. (2014) Barley Yellow Dwarf Virus (Bydv): Characteristics, Hosts, Vectors, Disease Symptoms and Diagnosis. *International Journal of Phytopathology*, **03**, 155–160. Available at: <http://www.escijournals.net/phytopathology>.
- Kaiser H.F. (1974) An index of factorial simplicity. *Psychometrika*, **39**, 31–36.
- Kochhann R.A., Denardin J.E. (2000) Implantação e Manejo do Sistema Plantio Direto. *Embrapa Trigo*, 36.
- Kuroli G. (2000) Aphid flight and change in abundance of winter wheat pests. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, **33**, 361–373.
- Langer A., Boivin G., Hance T. (2004) Oviposition, flight and walking capacity at low temperatures of four aphid parasitoid species (Hymenoptera: Aphidiinae). *European Journal of Entomology*, **101**, 473–479.
- Lau D., Mar T.B., Santos C.D.R. dos, Engel E., Pereira P.R.V. da S. (2021) Advances in understanding the biology and epidemiology of barley yellow dwarf virus (BYDV), In *Achieving durable disease resistance in cereals*, p. 700. Eds R. Oliver and J. Curtin. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publ.
- Lê S., Josse J., Husson F. (2008) FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, **25**, 1–18.
- Leslie T.W., Van Der Werf W., Bianchi F.J.J.A., Honěk A. (2009) Population dynamics of cereal aphids: Influence of a shared predator and weather. *Agricultural and Forest Entomology*, **11**, 73–82.
- MAPA (2008) Portaria nº 43/2008. Regionalização para épocas de semeadura de trigo e triticales Estado do Rio Grande do Sul.

- Meisner M.H., Harmon J.P., Ives A.R. (2014) Temperature effects on long-term population dynamics in a parasitoid-host system. *Ecological Monographs*, **84**, 457–476.
- Moraes R.C.B., Haddad M.L., Silveira Neto S., Reyes A.E.L. (2003) *Software para análise faunística*. São Pedro-SP: Siconbiol.
- Morgan D. (2000) Population dynamics of the bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.), during the autumn and winter: A modelling approach. *Agricultural and Forest Entomology*, **2**, 297–304.
- Oksanen J., F. Guillaume Blanchet R.K., Legendre P., Minchin P.R., O’Hara R.B., Simpson G.L., Solymos P., M. Henry H. Stevens H.W. (2019) Package ‘vegan.’ *R package version 3.4.0*.
- Outreman Y., Andrade T.O., Louâpre P., Krespi L., Violle C., van Baaren J. (2018) Multi-scale and antagonist selection on life-history traits in parasitoids: A community ecology perspective. *Functional Ecology*, **32**, 736–751.
- Parizoto G., Rebonatto A., Schons J., Lau D. (2013) Barley yellow dwarf virus-PAV in Brazil: Seasonal fluctuation and biological characteristics. *Tropical Plant Pathology*, **38**, 11–19.
- Parry H.R. (2013) Cereal aphid movement: General principles and simulation modelling. *Movement Ecology*, **1**.
- Pennachio F. (1989) The Italian species of the genus *Aphidius* Nees (Hymenoptera, Braconidae, Aphidiinae). *Bollettino del Laboratorio di Entomologia Agraria “Filippo Silvestri”*, **46**, 75–106.
- Pereira P.R.V. da S., Salvatori J.R., Lau D. (2009) Identificação de adultos ápteros e alados das principais espécies de afídeos (Hemiptera: Aphididae) associadas a cereais de inverno no Brasil. *Passo Fundo: Embrapa Trigo*, 17.

- Porras M.F., Navas C.A., Marden J.H., Mescher M.C., De Moraes C.M., Pincebourde S., Sandoval-Mojica A., Raygoza-Garay J.A., Holguin G.A., Rajotte E.G., Carlo T.A. (2020) Enhanced heat tolerance of viral-infected aphids leads to niche expansion and reduced interspecific competition. *Nature Communications*, **11**, 1–9. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-14953-2>.
- Rebonatto A., Salvadori J.R., Lau D. (2015) Temporal Changes in Cereal Aphids (Hemiptera: Aphididae) Populations in Northern Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Agricultural Science*, **7**, 71–78.
- Salvadori J.R., Salles L.A.D. (2002) Controle Biológico de Pulgões no Trigo, In *Controle Biológico no Brasil Parasitóides e Predadores*, pp. 427–443. Ed J. R. P. Parra. São Paulo: Manoele Ltda.
- Salvadori J.R., Tonet G.E.L. (2001) Manejo integrado dos pulgões de trigo. *Embrapa Trigo/ Documentos*, **34**, 52.
- Santos C.D.R.D., Sampaio M. V., Lau D., Redaelli L.R., Jahnke S.M., Pivato J., Carvalho F.J. (2019) Taxonomic Status and Population Oscillations of *Aphidius colemani* Species Group (Hymenoptera: Braconidae) in Southern Brazil. *Neotropical Entomology*, 983–991.
- Savaris M., Lampert S., Salvadori J.R., Lau D., Pereira P.R.V.S., Smaniotto M.A. (2013) Population Growth and Damage Caused by *Rhopalosiphum padi* (L .) (Hemiptera , Aphididae) on Different Cultivars and Phenological Stages of Wheat. , 539–543.
- Silveira Neto S., Nakano O., Barbin D., Villa Nova N. (1976) *Manual de ecologia dos insetos*. Piracicaba, São Paulo: Agronômica Ceres.
- So Y.S., Ji H.C., Brewbaker J.L. (2010) Resistance to corn leaf aphid (*Rhopalosiphum maidis* Fitch) in tropical corn (*Zea mays* L.). *Euphytica*, **172**, 373–381.

- Soares J.R.S., da Silva Paes J., de Araújo V.C.R., de Araújo T.A., Ramos R.S., Picanço M.C., Zanon J.C. (2020) Spatiotemporal Dynamics and Natural Mortality Factors of *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) in Bell Pepper Crops. *Neotropical Entomology*.
- Starý P., Lukáš J. (2009) Aphid parasitoids and their tritrophic associations in Slovakia (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae). *Bratislava: Folia Hymenopterologica Slovaca*, **1**, 1–63.
- Starý P., Sampaio M.V., Bueno V.H.P. (2007) Aphid parasitoids (Hymenoptera, Braconidae, Aphidiinae) and their associations related to biological control in Brazil. *Revista Brasileira de Entomologia*, **51**, 107–118.
- Sturza V.S., Poncio S., dos Santos A.B., Lopes-da-Silva M. (2012) Infestation and natural parasitism of aphids in single and mixed pastures of black oats and ryegrass. *Revista Brasileira de Entomologia*, **56**, 363–367.
- Tomanović Ž., Kavallieratos N.G., Starý P., Athanassiou C.G., Žikić V., Petrović-Obradović O., Sarlis G.P. (2003) *Aphidius* Nees Aphid Parasitoids (Hymenoptera , Braconidae , Aphidiinae) in Serbia and Montenegro : Tritrophic Associations and Key. *Acta entomologica serbica*, **8**, 15–39.
- Tomanović Ž., Kavallieratos N.G., Starý P., Petrović-Obradović O., Athanassiou C.G., Stanisa Vljević L.Ž. (2008) Cereal aphids (Hemiptera: Aphidoidea) in Serbia: Seasonal dynamics and natural enemies. *European Journal of Entomology*, **105**, 495–501.
- Tomanović Ž., Mitrovic M., Petrovic A., Kavallieratos N.G., Žikić V., Ivanovic A., Ehsan R., Starý P., Vorburgue C. (2018) Revision of the European *Lysiphlebus* species (Hymenoptera: Braconidae: Aphidiinae) on the basis of COI and 28SD2 molecular markers and morphology. *Arthropod Systematics & Phylogeny*, **76**, 179–213.

- Tomanovic Ž., Petrovic A., Mitrovic M., Kavallieratos N.G., Starý P., Rakhshani E., Shukshuk A.H., Rakhshanipour M., Popovic A., Ivanovic A. (2014) Molecular and morphological variability within the *Aphidius colemani* group with redescription of *Aphidius platensis* Brethes (Hymenoptera : Braconidae : Aphidiinae). , 552–565.
- Tougeron K., Brodeur J., Le Lann C., van Baaren J. (2019) How climate change affects the seasonal ecology of insect parasitoids. *Ecological Entomology*.
- Tougeron K., Damien M., Lann C. Le, Brodeur J., van Baaren J. (2018) Rapid responses of winter aphid-parasitoid communities to climate warming. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **6**, 1–9.
- Vasicek A., Rossa F. La, Paglioni A., López M.C. (2010) Estadísticos biológicos y demográficos de. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, **46**, 591–596.
- Van Veen F.J.F., Van Holland P.D., Godfray H.C.J. (2005) Stable coexistence in insect communities due to density- and trait-mediated indirect effects. *Ecology*, **86**, 3182–3189.
- Violle C., Enquist B.J., McGill B.J., Jiang L., Albert C.H., Hulshof C., Jung V., Messier J. (2012) The return of the variance: Intraspecific variability in community ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, **27**, 244–252.
- Wang L., Hui C., Sandhu H.S., Li Z., Zhao Z. (2015) Population dynamics and associated factors of cereal aphids and armyworms under global change. *Scientific Reports*, **5**, 1–8.
- Wetherington M.T., Jennings D.E., Shrewsbury P.M., Duan J.J. (2017) Climate variation alters the synchrony of host–parasitoid interactions. *Ecology and Evolution*, **7**, 8578–8587.
- Wiest R., Salvadori J.R., Fernandes J.M.C., Lau D., Pavan W., Zanini W.R., Toebe J., Lazzaretti A.T. (2020) Population growth of *Rhopalosiphum padi* under different thermal regimes: an agent-based model approach . *Agricultural and Forest Entomology*.

Wood S.N. (2017) *Generalized Additive Models: An Introduction with R* 2nd ed. Boca Raton.

Zanini A., Alves L.F.A., Menezes Júnior A.D.O., Prestes T.M.V. (2006) Aspectos ecológicos de *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera: Aphidiidae) sobre a população de *Sitobion avenae* (Fabricius) (Hemiptera: Aphidiidae) na cultura de trigo em Medianeira, PR. *Semina: Ciências Agrárias*, **27**, 185.

Zúñiga-Salinas E. (1982) *Controle biológico de afídeos do trigo (Homoptera: Aphididae) por meio de parasitóides no Planalto Médio do Rio Grande do Sul*. UFPR. Curitiba.