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

**Modelo computacional para determinação de estratégia de liberação de
Telenomus podisi Ashmead, 1893 (Hymenoptera: Scelionidae) para o
controle de *Euschistus heros* (Fabricius, 1974) (Heteroptera: Pentatomidae)**

Igor Daniel Weber

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

**Piracicaba
2021**

Igor Daniel Weber
Bacharel em Agronomia

**Modelo computacional para determinação de estratégia de liberação de *Telenomus podisi* Ashmead, 1893 (Hymenoptera: Scelionidae) para o controle de *Euschistus heros* (Fabricius, 1974) (Heteroptera: Pentatomidae) –
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

Weber, Igor Daniel

Modelo computacional para determinação de estratégia de liberação de *Telenomus podisi* Ashmead, 1893 (Hymenoptera: Scelionidae) para o controle de *Euschistus heros* (Fabricius, 1974) (Heteroptera: Pentatomidae) / Igor Daniel Weber. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

56 p.

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

1. Parasitoide de ovos 2. Controle biológico 3. Modelo baseado em indivíduo 4. Autômato celular I. Título

DEDICATÓRIA

Ao Deus de amor e sabedoria, à ciência, à minha família e amigos, e à minha amada Kevyllen, dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todo o conhecimento, sabedoria e força concedidos a mim durante minha jornada acadêmica. Agradeço por todas as oportunidades que tive e pelo caminho que trilhei. Tu és o meu Deus.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, por me apoiarem por completo durante este período. Sem eles eu não conseguiria chegar onde estou e ser a pessoa que me tornei. Muito obrigado aos meus irmãos que me deram força e estiveram sempre comigo ao longo desta jornada. Sou imensamente grato por tudo o que têm feito por mim, por tudo o que são e que representam em minha vida. Amo todos vocês.

Agradeço à minha amada Kevyllen por todo o carinho, confiança, apoio e força passada a mim durante este tempo em que estamos juntos. Você é meu conforto, meu lugar de descanso, meu ponto de equilíbrio, minha alegria, meu amor. Muito obrigado pela paciência e por me dar força durante os períodos difíceis que passamos, e por se alegrar e sorrir comigo durante os ótimos dias que tivemos também. Te amo.

Agradeço aos amigos que fiz durante esta fase da vida, com quem pude compartilhar muitos momentos de felicidade, mas também preocupações e frustrações. Vou guardar ótimas lembranças deste tempo, e levar amigos para o resto da vida. Em especial, gostaria de agradecer aos amigos Larine, Maysa, Isabella, Mayara, Kamila, Gabriel, Pedro e Liz, pelos ótimos momentos que tivemos e por serem uma família para mim. Amo vocês, menos a Maysa e a Larine.

Agradeço aos professores e pós graduandos com quem pude trabalhar e que me deram a oportunidade aprender mais com seus conhecimentos e experiências. Em especial, agradeço ao meu orientador Wesley, que foi um amigo muito importante, me deu muita força nos momentos difíceis, e também que me deu muitas oportunidades ao longo de todo o mestrado. Você é uma pessoa de Deus, uma benção para todos os seus orientados e pessoas ao seu redor, muito obrigado por tudo. Agradeço, também, ao Adriano, que foi uma pessoa e um amigo essencial para meu crescimento como pesquisador e como pessoa. Sem você este trabalho não seria possível. Você foi uma inspiração e um professor para mim, muito obrigado pelas oportunidades e por sua amizade. Muito obrigado, Wesley e Adriano, por todas as orientações, conversas, dicas e momentos que pude ter com vocês. Sou muito grato à vocês!

Gostaria de agradecer à ESALQ pelo ensino e pela estrutura fornecida aos alunos, e pelo maravilhoso câmpus, uma segunda casa para nós estudantes. Agradeço, também, à CAPES pela bolsa de mestrado concedida à mim, que permitiu que eu me dedicasse a este projeto e conseguisse concluí-lo com êxito. Sou grato, ainda, à Pós-Graduação da Entomologia pela oportunidade de realizar este curso de mestrado em Entomologia.

A todos, meus sinceros agradecimentos!

EPÍGRAFE

“Por isso recomendo que se desfrute a vida, porque debaixo do sol não há nada melhor para o homem do que comer, beber e alegrar-se. Sejam esses os seus companheiros no seu duro trabalho durante todos os dias da vida que Deus lhe der debaixo do sol!”

Eclesiastes 8:15

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. MATERIAL E MÉTODOS	19
2.1. Modelagem computacional	19
2.1.1. Dinâmica populacional de <i>Euschistus heros</i>	19
2.1.2. Dinâmica populacional de <i>Telenomus podisi</i>	21
2.2. Simulações	23
2.2.1. Estratégias de liberação de <i>Telenomus podisi</i>	23
2.2.2. Sensibilidade do modelo	24
2.2.3. Níveis de parasitismo e de infestação de <i>Euschistus heros</i>	25
2.2.4. Capacidade de dispersão do parasitoide e espaçamento de liberação	26
2.3. Análise dos dados	26
3. RESULTADOS	29
3.1. Estratégias de liberação	29
3.2. Sensibilidade do modelo	34
3.3. Níveis de parasitismo e de infestação de <i>Euschistus heros</i>	36
3.4. Capacidade de dispersão do parasitoide e espaçamento de liberação	37
4. DISCUSSÃO	41
5. CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	49
ANEXOS	56

RESUMO

Modelo computacional para determinação de estratégia de liberação de *Telenomus podisi* Ashmead, 1893 (Hymenoptera: Scelionidae) para o controle de *Euschistus heros* (Fabricius, 1974) (Heteroptera: Pentatomidae)

Telenomus podisi é um parasitoide de ovos quase-gregário que tem recebido significativa importância como agente de controle biológico de uma das principais pragas da soja no Brasil, *Euschistus heros*. Este parasitoide vem sendo utilizado em liberações inundativas em aproximadamente 20.000 hectares de soja na América do Sul para o manejo de percevejos. Contudo, ainda não existem estudos conclusivos na literatura que estabeleçam efetivamente estratégias de liberação de *T. podisi*. Dentre as ferramentas capazes de investigar estas estratégias estão os modelos computacionais baseado em indivíduos e espacialmente estruturados (autômato celular). Apesar desta abordagem poder levar à escolha de um plano de liberação mais eficaz do que o frequente método empírico de tentativa e erro, há ainda poucos programas de controle biológico empregando ferramentas que utilizam algoritmos computacionais desta natureza para auxiliar no método de escolha da forma de controle. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo computacional empregando autômatos celulares para investigar estratégias de liberação de *T. podisi* em cultivos de soja de modo a otimizar sua utilização no manejo do percevejo *E. heros*. Foi desenvolvido um modelo computacional utilizando autômatos celulares empregando a linguagem de programação C, assumindo-se um grid bidimensional (lattice) de 204 x 204 células correspondente a uma área de cultivo de soja. A dinâmica biológica do percevejo e do parasitoide de ovos foram representadas computacionalmente. Foram investigados os seguintes parâmetros das estratégias de liberação de *T. podisi*: *modo de liberação* (em faixas ou em pontos ao longo da área), *número de liberações* (de 1 a 4 liberações ao longo do ciclo da soja), *número de parasitoides* por hectare por liberação (3.000, 5.000, 7.000 e 10.000 fêmeas) e *espaçamento* entre pontos ou faixas de liberação (5, 10, 25 e 50 metros). Realizou-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros de liberação do parasitoide e dos parâmetros de dispersão das fases de ninfa e adulto de *E. heros*, e dos adultos de *T. podisi*. Além disso, avaliou-se o efeito de diferentes valores constantes de parasitismo de ovos sobre os variados tamanhos populacionais de percevejos assumidos, e o efeito do espaçamento de liberação de parasitoides de ovos com diferentes capacidades de dispersão diária sobre a eficiência na supressão da população de percevejos. As estratégias de liberação capazes de manter a população de *E. heros* abaixo do nível de controle, de acordo com o modelo computacional, foram aquelas que liberaram pelo menos 15.000 parasitoides fêmeas por hectare ao todo, seguindo a configuração de três a quatro liberações de 5.000 ou mais fêmeas de *T. podisi* por hectare. Recomenda-se a utilização do espaçamento de 25 metros entre pontos ou faixas de liberação. Os modos de liberação avaliados apresentaram eficiências semelhantes entre si para a maioria das estratégias estudadas. Espera-se que os resultados teóricos produzidos pelo modelo orientem futuros estudos em campo para o aprimoramento dos planos de liberação de *T. podisi* para o manejo do percevejo-marrom na soja.

Palavras-chave: Parasitoide de ovos, Controle biológico, Modelo baseado em indivíduo, Autômato celular

ABSTRACT

Computational model for determining the release strategy of *Telenomus podisi*

Ashmead, 1893 (Hymenoptera: Scelionidae) for the control of *Euschistus heros*

(Fabricius, 1974) (Heteroptera: Pentatomidae)

Telenomus podisi is a quasi-gregarious egg parasitoid that has received significant attention as a biological control agent for one of the most important soybean pests in Brazil, *Euschistus heros*. This parasitoid has been used in flood releases on approximately 20,000 hectares of soybean in South America to manage stink bugs. However, there are still no conclusive studies in the literature that effectively establish strategies for the release of *T. podisi*. Among the available tools capable of investigating these strategies are spatially structured individual based models (cellular automata). Although this approach may lead to the choice of a release plan that is more effective than the frequent empirical trial and error method, there are still few biological control programs employing tools that use computational algorithms of this nature to assist in the method of choosing the method of control. Therefore, the objective of this work was to develop a computational model employing cellular automata to investigate releasing strategies of *T. podisi* in soybean crops in order to optimize its use in the management of the stink bug *E. heros*. A computational model was developed using cellular automata in C programming language, assuming a two-dimensional grid (lattice) of 204 x 204 cells corresponding to a soybean cultivation area. The biological dynamics of stink bugs and the egg parasitoid were programmed. The following parameters of the *T. podisi* release strategies were investigated: *release mode* (in strips or at points along the area), *number of releases* (from 1 to 4 releases over the soybean cycle), *number of parasitoids* per hectare per release (3,000, 5,000, 7,000 and 10,000 adult females) and *spacing* between release points or strips (5, 10, 25 and 50 meters). A sensitivity analysis of the parasitoid release parameters and the movement parameters of the nymph and adult phases of *E. heros*, and of the adults of *T. podisi* was performed. In addition, the effect of different constant percentages of egg parasitism on different population sizes of stink bugs was evaluated, and the effect of release spacing of egg parasitoids with different daily movement capacity on the efficiency in suppressing the stink bug population. The release strategies capable of keeping *E. heros* population below the control level, according to the computational model, were those that released a total of at least 15,000 female parasitoids per hectare, following the configuration of three to four releases of 5,000 or more adult females of *T. podisi* per hectare. It is recommended to use the 25-meter spacing between release points or strips. The *release modes* evaluated had similar efficiency for most of the studied strategies. The theoretical results produced by the computational model are expected to guide future field studies for the improvement of *T. podisi* release plans for the management of *E. heros* in soybean.

Keywords: Egg parasitoids, Biological control, Individual based model, Cellular automata

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. A – Configuração espacial dos pontos e faixas de liberação de *Telenomus podisi* em função do espaçamento entre pontos e faixas definido segundo as estratégias de liberação. B – Representação bidimensional do lattice (e sua borda em preto), da área de liberação de *Euschistus heros* para colonização do lattice no tempo 0, e da área virtual de liberação de *T. podisi* (dentro da qual os pontos ou faixas de liberação foram distribuídos, segundo as configurações ilustradas em A)..... 24
- Figura 2. Número médio de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula das 100 x 100 células centrais do lattice (A), e população total média de ovos, ninfas e adultos (B) de *Euschistus heros* ao longo de 90 passos de tempo (dias) na cultura da soja quando não realizada liberação de *Telenomus podisi*. Linha tracejada na figura da esquerda indica o nível de controle do percevejo definido para a cultura. 29
- Figura 3. População de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo em função das estratégias de liberação de *Telenomus podisi*, para o modo de liberação em pontos, considerando o parasitismo da prole dos parasitoides liberados. Parâmetros de liberação representados: *espaçamento* entre pontos (valores indicados na parte superior), *número de liberações* (linhas, valores indicados no canto direito) e *número de parasitoides* por hectare (cores indicadas na legenda). Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja. 30
- Figura 4. População de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo em função das estratégias de liberação de *Telenomus podisi*, para o modo de liberação em faixas, considerando o parasitismo da prole dos parasitoides liberados. Parâmetros de liberação representados: *espaçamento* entre faixas (valores indicados na parte superior), *número de liberações* (linhas, valores indicados no canto direito) e *número de parasitoides* por hectare (cores indicadas na legenda). Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja. 31
- Figura 5. População de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo em função das estratégias de liberação de *Telenomus podisi*, para o modo de liberação em pontos, considerando apenas o parasitismo realizado pelas fêmeas liberadas (as proles dos parasitoides foram eliminada ao emergirem). Parâmetros de liberação representados: *espaçamento* entre pontos (valores indicados na parte superior), *número de liberações* (linhas, valores indicados no canto direito) e *número de parasitoides* por hectare (cores indicadas na legenda). Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja..... 32
- Figura 6. População de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo em função das estratégias de liberação de *Telenomus podisi*, para o modo de liberação em faixas, considerando apenas o parasitismo realizado pelas fêmeas liberadas (as proles dos parasitoides foram eliminada ao emergirem). Parâmetros de liberação representados: *espaçamento* entre faixas (valores indicados na parte superior), *número de liberações* (linhas, valores indicados no canto direito) e *número de parasitoides* por hectare (cores indicadas na legenda). Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja..... 33
- Figura 7. Agrupamento aglomerativo hierárquico das 128 estratégias de liberação de *Telenomus podisi* mais a testemunha (ramo à esquerda) em função da média do número de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula (classes de valores indicados na legenda A) no último passo de tempo das simulações de cada estratégia. Pontos coloridos descrevem a configuração de cada parâmetro (linhas B ao F) que compõem as estratégias de liberação do parasitoide, cujos valores estão descritos nas legendas. Linha tracejada utilizada para separação dos grupos de estratégias mais semelhantes entre si. Retângulo vermelho indica o grupo que melhor controlaram a população de *Euschistus heros*, cuja estratégias estão descritas no box inferior [modo de liberação (p – pontos; f – faixas): número de liberações: número de parasitoides por liberação: espaçamento entre pontos ou faixas]. 34
- Figura 8. Número de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula no passo de tempo 89 em função do número total de fêmeas de *Telenomus podisi* liberadas (produto do *número de liberações* pelo *número de parasitoides* por hectare) de acordo com suas diferentes estratégias de liberação. Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja. 35

Figura 9. Sensibilidade do modelo à variação dos valores dos parâmetros de liberação de *Telenomus podisi* sobre a população de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo simulados. Linhas vermelhas: liberação em pontos (superior esquerdo); uma liberação (superior direito); 3.000 parasitoides por hectare por liberação (inferior esquerdo); e 5 metros de espaçamento entre faixas (inferior direito). Linhas azuis: liberação em faixas (superior esquerdo); quatro liberações (superior direito); 10.000 parasitoides por hectare por liberação (inferior esquerdo); e 50 metros de espaçamento entre faixas (inferior direito).36

Figura 10. Sensibilidade do modelo à variação dos valores dos parâmetros de dispersão dos adultos de *Telenomus podisi* (linhas vermelha e azul correspondem aos raios de dispersão de 16 e 4 metros, respectivamente), ninfas e adultos de *Euschistus heros* (linhas vermelha e azul correspondem à capacidade de dispersão de 1,0 e 0,25 metros, respectivamente, para ambos os estágios de desenvolvimento) sobre a população média de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ou m^237

Figura 11. População de percevejos *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo do ciclo de soja (parte superior), cujos ovos foram submetidos a diferentes níveis de parasitismo constantes, assumindo três níveis de infestação iniciais do lattice com fêmeas adultas de *E. heros*. Os pontos (parte inferior) representam os números de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) do último passo de tempo destas simulações, e as regressões em função da porcentagem de ovos predados ou parasitados ajustadas para cada nível de infestação inicial de adultos. Linha pontilhada no gráfico inferior indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja.38

Figura 12. Efeito do espaçamento de liberação de parasitoides de ovos com diferentes capacidades de dispersão diária (indicados no topo dos gráficos) sobre o número de percevejos *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula do lattice ao longo dos passos de tempo da simulação. Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja.39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores dos parâmetros utilizados no modelo, e suas respectivas referências na literatura.....	21
Tabela 2. Número médio ($\pm$ erro padrão) de percevejos <i>Euschistus heros</i> ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula no passo de tempo 89 em função do espaçamento de liberação entre pontos de parasitoides de ovos com diferentes capacidades de dispersão diária. Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes entre colunas, e minúsculas diferentes entre colunas, diferem significativamente entre si ($p\text{-valor} \leq 0,05$) pelo teste de Tukey ou Wilcoxon pareado.	39

1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é afetada por diversos insetos-praga responsáveis por reduzir seu potencial produtivo e dificultar a obtenção de melhores rendimentos do grão (BORTOLOTTTO et al., 2016). Dentre eles, os percevejos fitófagos da família Pentatomidae (Heteroptera) são considerados o grupo mais importante para a cultura no Brasil (PERES; CORRÊA-FERREIRA, 2004). Os percevejos atacam principalmente no período reprodutivo da soja, ocasião em que se alimentam diretamente das sementes, causando danos diretos ao produto e reduzindo sua qualidade para comercialização (BORTOLOTTTO et al., 2015). Dentre as pragas mais importantes desta família, destaca-se *Euschistus heros* (Fabricius, 1974) (BORTOLOTTTO et al., 2015), conhecido vulgarmente como percevejo-marrom, considerado praga-chave da cultura.

Euschistus heros era encontrado em baixas abundâncias no Centro-Oeste brasileiro no passado, adaptado às regiões de temperaturas mais elevadas (CIVIDANES, 1992; PANIZZI, 2015). Atualmente, o percevejo é considerado um dos insetos mais abundantes na soja e em outras grandes culturas no Brasil, sendo encontrado desde as regiões de temperaturas amenas do estado do Rio Grande do Sul, até a região norte e nordeste com temperaturas mais elevadas, acompanhando a distribuição da cultura da soja (PANIZZI, 2015). Soares et al. (2018) recentemente constataram a existência de duas linhagens de *E. heros*, uma localizada ao norte e nordeste do país, e outra ao sul do Brasil e no Paraguai, que agora se misturam nas áreas de agricultura intensiva no Cerrado brasileiro, podendo estar compartilhando suas adaptações às diferentes condições ambientais e agrícolas das duas regiões.

De modo geral, os adultos do percevejo-marrom iniciam a colonização da cultura da soja no fim da fase vegetativa e durante o florescimento, reproduzindo-se no período inicial de formação das vagens, aumentando a população do inseto durante esta fase da cultura (CORRÊA-FERREIRA; PANIZZI, 1999). Inicialmente, os adultos ocupam as bordas da área de cultivo, direcionando-se para a região interna gradativamente à medida que se multiplicam na lavoura.

A população de percevejos cresce até o final do período de enchimento de grãos, atinge seu máximo pico populacional, decresce a partir do período de maturação fisiológica da soja, dispersando-se para plantas hospedeiras alternativas e, posteriormente, para os nichos de quiescência onde permanece durante o inverno (CORRÊA-FERREIRA; PANIZZI, 1999). Neste período, o percevejo-marrom permanece debaixo de folhas mortas no solo em estado de hibernação parcial, acumulando lipídios, o que permite sua sobrevivência durante a escassez de

alimento, aguardando condições favoráveis para iniciar sua reprodução (PANIZZI; NIVA, 1994).

Em cultivos agrícolas é comum o uso de inseticidas químicos como método de controle de *E. heros*, muitas vezes empregado de maneira abusiva, sem verificar se o nível de infestação na cultura exige algum controle da praga. Desta forma, apesar dos produtos químicos constituírem ainda importante ferramenta para a agricultura, seu uso desmedido pode trazer consequências indesejadas, como a rápida seleção de populações resistentes aos inseticidas utilizados, ressurgência da praga, mortalidade e redução da atuação dos agentes de controle biológico natural do percevejo, contaminação do meio ambiente e aumento no custo de produção da cultura (BUENO et al., 2021). Além disso, a crescente demanda da sociedade por alimentos livres de resíduos de agrotóxicos, produzidos de maneira mais sustentável e a conscientização sobre os malefícios do uso abusivo de agrotóxicos ao meio ambiente, contribuem para aumentar o interesse pela utilização de outras estratégias de manejo destes insetos-praga.

Dentre os diversos agentes de controle biológico dos percevejos da família Pentatomidae, destacam-se os parasitoides de ovos como grupo mais importante de inimigos naturais (PACHECO; CORRÊA-FERREIRA, 2000). Deste grupo, a espécie mais relevante, atualmente, é *Telenomus podisi* Ashmead, 1893 (Hymenoptera: Scelionidae), que tem recebido significativa atenção em função do seu elevado potencial como agente de controle biológico de *E. heros*, sendo utilizado em liberações inundativas em aproximadamente 20.000 hectares de soja na América do Sul (SILVA et al., 2008; BUENO, V. H. P. et al., 2020).

Telenomus podisi é um parasitoide de ovos que se encontra distribuído, no Brasil, desde o Centro-Oeste até o extremo sul brasileiro. O inseto é parasitoide de diversas espécies hospedeiras, incluindo herbívoros e predadores (QUEIROZ et al., 2017; MARGARÍA; LOIÁCONO; LANTERI, 2009; MEDEIROS et al., 1998; MOREIRA; BECKER, 1986), o que evidencia sua adaptação a diferentes hospedeiros e condições climáticas (TORRES; PRATISSOLI; ZANUNCIO, 1997). Apesar de seu hábito polífago nos cultivos de soja, sua presença está fortemente associada à ocorrência do hospedeiro *E. heros* (PACHECO; CORRÊA-FERREIRA, 2000).

O emprego de *T. podisi* como agente de controle biológico nos cultivos agrícolas fundamenta-se em conhecimentos detalhados da biologia e das relações ecológicas entre este parasitoide, seu hospedeiro e o ambiente (LAHIRI et al., 2017; NAKAMA; FOERSTER, 2001; PERES; CORRÊA-FERREIRA, 2004; ROCHA, 2016; SILVA et al., 2008; SILVA et al., 2018; YEARGAN, 1982). Baseado nestes conhecimentos, pode-se determinar a distribuição e as

quantidades adequadas de indivíduos a serem liberados na área de cultivo, de modo a formular estratégias viáveis e eficazes para a utilização do inimigo natural. Ainda não existem estudos conclusivos na literatura que estabeleçam efetivamente estratégias de liberação de *T. podisi* no controle biológico de *E. heros*. Contudo, recentemente, Bueno, A. F. et al. (2020) contribuíram para o avanço do conhecimento sobre a utilização em campo de *T. podisi* ao avaliar a eficiência de duas tecnologias de liberação e diferentes momentos de aplicação do parasitoide sobre a supressão de populações de campo de *E. heros* em relação ao controle por inseticidas químicos.

Dentre as ferramentas capazes de investigar as estratégias de liberação de *T. podisi* estão os modelos computacionais. Assim como em diversas outras áreas do conhecimento, a modelagem se tornou importante ferramenta no estudo de sistemas ecológicos e na escolha das melhores estratégias de manejo do ponto de vista econômico e ambiental (GARCIA et al., 2018; JACKSON; TREBITZ; COTTINGHAM, 2000). Modelos podem ser compreendidos essencialmente como caricaturas de sistemas e, particularmente no âmbito biológico, levam em conta a essência estrutural do sistema alvo de estudo, visando a compreensão de sua dinâmica influenciada por parâmetros específicos (LIMA; FERREIRA; GODOY, 2009). O interesse no efeito da heterogeneidade espacial e temporal sobre a distribuição dos ataques de inimigos naturais tem aumentado, o que tem motivado o desenvolvimento de modelos de simulação baseados em indivíduos (PLOUVIER; WAJNBERG, 2018).

Diferente dos modelos populacionais clássicos, que são descritos em termos de parâmetros estabelecidos para a população (como as taxas de natalidade e mortalidade), modelos baseados em indivíduo são estabelecidos a nível do indivíduo, de modo que o comportamento da população emerge das interações entre os indivíduos autônomos e seu ambiente abiótico (DEANGELIS; GRIMM, 2014). Este tipo de modelo simula populações ou sistemas de populações como uma composição individual de organismos discretos, em que cada indivíduo tem um conjunto de variáveis ou atributos e comportamentos (DEANGELIS; GRIMM, 2014). Valoriza-se, desta forma, as características individuais, as interações entre indivíduos e do indivíduo com o ambiente, de maneira que o conjunto destas relações representem e caracterizem a população. Busca-se considerar a variabilidade das características individuais entre os insetos, algumas vezes cruciais para a dinâmica e evolução do ecossistema, permitindo uma representação mais realística da população (GARCIA et al., 2018; JORGENSEN; CHON, 2009).

Dentre os modelos baseados em indivíduos destacam-se os autômatos celulares, sistemas discretos e dinâmicos em que o espaço é representado como um grid de células que assume diferentes estados ao longo dos passos de tempo (GARCIA; GODOY, 2016). O estado

das células é atualizado em passos de tempo discreto de acordo com as regras locais de evolução, que são função do estado da própria célula e de sua vizinhança (JORGENSEN; CHON, 2009). As regras que regem o estado das células podem representar processos estocásticos ou determinísticos (GARCIA; GODOY, 2016), dependendo do modo como são implementadas no modelo. Segundo Ross (2014), a maioria dos processos de dinâmica populacional, se não todos, são estocásticos, ou seja, sujeitos a resultados caracterizados por probabilidade de ocorrência. Os indivíduos normalmente apresentam uma chance de morrer ou gerar outro indivíduo e dificilmente têm um tempo predestinado de reprodução ou morte. Assim, atribuir estocasticidade aos modelos é importante por conseguir representar, de certa forma, a aleatoriedade característica de sistemas biológicos.

Segundo Garcia et al. (2016), a natureza discreta dos modelos de autômato celular permite representar a presença ou ausência de diferentes estágios do inseto-praga em uma posição específica do lattice. A representação se dá por meio de variáveis binárias cujo estado pode variar ao longo do tempo através de regras estocásticas simples, que objetivam descrever o ciclo de vida do inseto (GARCIA et al., 2016). Adicionalmente, a combinação entre o autômato celular e um modelo baseado em indivíduo pode fornecer um estudo realístico de movimento (GARCIA et al., 2016), uma vez que o primeiro prima pela conformação espacial das variáveis através de regras de transições, enquanto os modelos baseados em indivíduo enfatizam a variabilidade das características individuais (JORGENSEN; CHON, 2009). Ambas as abordagens são habitualmente utilizadas na expressão de processos ecológicos em muitos sentidos, especialmente elucidando os processos locais de um domínio espacial de maneira explícita, e as dinâmicas complexas que residem nas relações entre indivíduo e população (JORGENSEN; CHON, 2009).

Dada a facilidade de implementação e a capacidade de simular padrões espaciais, os autômatos celulares têm sido amplamente aplicados a problemas ecológicos relacionados a processos espaciais em paisagens agrícolas, com ênfase em espécies de pragas polífagas, tais como *Diabrotica speciosa* (Germar, 1824) (Coleoptera: Chrysomelidae) e *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae). Nesse sentido, Garcia et al. (2014) desenvolveram um modelo de autômato celular para analisar os efeitos da manipulação do habitat no crescimento e dispersão populacional de *D. speciosa*, a partir da alternância de padrões de mosaicos de uma paisagem agrícola. Malaquias et al. (2017) utilizaram o modelo espacial para entender o efeito de diferentes taxas de movimentação larval, afetadas por custo adaptativo associado com a resistência de *S. frugiperda* às culturas transgênicas, na distribuição espacial de sua população. Garcia et al. (2018) desenvolveram um modelo computacional capaz

de representar as dinâmicas espaço-temporais de *S. frugiperda* em paisagens agrícolas compostas por áreas de cultivo Bt e não-Bt (refúgio). Assim, foi possível otimizar a distribuição das áreas de refúgio de modo a favorecer o desenvolvimento de populações de *S. frugiperda* heterozigotas e homozigotas recessivas, em detrimento das homozigotas dominantes para o gene de resistência ao Bt.

O processo de determinação das estratégias de liberação de parasitoides para supressão da praga pode ser bastante demorado e custoso, por ser frequentemente realizado por tentativa e erro, investigando-se diferentes quantidades de parasitoides a serem liberados, o número de liberações necessárias e o momento ideal para realizar o manejo. Além disso, é essencial determinar a forma de liberação, além de serem necessárias repetições destes estudos em safras e propriedades diferentes a fim de melhorar a precisão experimental (BUENO, A. F. et al., 2020; POMARI et al., 2013). Modelos computacionais como o desenvolvido neste trabalho podem auxiliar no direcionamento dos estudos de liberação de parasitoides em campo, indicando quais as estratégias mais promissoras a serem testadas com base nos resultados teóricos obtidos, reduzindo o esforço experimental e financeiro e acelerando o processo de desenvolvimento e implementação da ferramenta de controle pelos produtores (PLOUVIER; WAJNBERG, 2018).

O desenvolvimento de um modelo computacional para avaliar diferentes estratégias de liberação de parasitoides neste sistema pode orientar novas pesquisas à campo para implementação das estratégias de liberação de *T. posidi*. Espera-se, ainda, contribuir para uma maior eficiência na utilização deste parasitoide como agente de controle biológico de *E. heros* nos cultivos de soja do país. Portanto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo computacional empregando autômatos celulares para investigar estratégias de liberação de *T. podisi* em cultivos de soja de modo a otimizar sua utilização na supressão da população do percevejo *E. heros*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Modelagem computacional

Foi desenvolvido um modelo computacional utilizando autômatos celulares empregando a linguagem de programação C. Para tanto, criou-se um grid bidimensional (lattice) de 204 x 204 células correspondente a uma área de cultivo de soja, tamanho necessário para evitar que os insetos atingissem as bordas do lattice durante as simulações. Considerou-se quatro linhas e colunas ($i = \{1, 2, 203, 204\}$ e $j = \{1, 2, 203, 204\}$) como bordas fixas durante toda a simulação, resultando em uma área disponível para a ocupação dos insetos de 200 x 200 células, representando 4ha de cultivo. Cada célula corresponde a um metro quadrado contendo aproximadamente 30 plantas de soja, considerando um espaçamento de 0,5 m entre linhas e 6,7 cm entre plantas dentro da linha, totalizando 300.000 plantas por hectare, quantidade regularmente utilizada em campos agrícolas brasileiros. Cada célula pode estar ocupada por múltiplos estágios de vida do inseto simultaneamente e cada passo de tempo corresponde a um dia. Assumiu-se que o estudo da dinâmica entre as populações de percevejo e do parasitoide se deu entre o fim do período vegetativo, quando há a colonização da área por *E. heros*, até a maturação da cultura, correspondendo a um período de aproximadamente 90 dias. Assim, cada simulação apresentou 90 passos de tempo (t), cada passo equivalendo a um dia. A dinâmica de desenvolvimento da cultura não foi representada no modelo, assumindo-se que as plantas de soja estavam na fase adequada para receber populações de *E. heros* e disponibilizar alimento de forma ilimitada ao longo de toda a simulação.

2.1.1. Dinâmica populacional de *Euschistus heros*

Foram representadas as fases de desenvolvimento de ovo, ninfa e adulto de *Euschistus heros* separadamente no modelo. Nas fases de ninfa e adulta foram simuladas apenas as populações de fêmeas, por serem as responsáveis pela produção de prole. A cada passo de tempo adultos e ninfas tiveram valores probabilísticos determinantes de morte segundo a equação proposta por Garcia et al. (2014):

$$M(e) = 1 - \sqrt[d]{v_e} \quad (1)$$

onde $M(e)$ é a probabilidade diária de morte do estágio de desenvolvimento (e), d é a duração do estágio de desenvolvimento e v_e é sua viabilidade (Tabela 1). A mortalidade dos adultos foi

definida com base na viabilidade dos indivíduos até o fim do seu período fértil. Posteriormente, as ninfas a partir do segundo instar (acima de cinco dias de idade) e os adultos são capazes de se mover dentro de um raio de 3 metros ou permanecer parados. A movimentação foi estabelecida segundo probabilidades estabelecidas pela distribuição binomial negativa, com valores dos expoentes de agregação ninfal (k_n) e de adultos (k_a) iguais a 2,9171 e 3,1001, respectivamente, segundo estudo realizado por Souza et al. (2018). Assumiu-se o valor da dispersão média diária estimada pela distribuição binomial negativa como 0,5 para ambos os estágios de desenvolvimento, visto que pentatomídeos pouco se deslocam quando encontram alimento (PANIZZI et al., 1980; SOUZA et al., 2013). Cada indivíduo pode se movimentar para qualquer célula vizinha, desde que haja disponibilidade de espaço e capacidade suporte K para o respectivo estágio de desenvolvimento. A capacidade suporte do sistema foi representada pelo número máximo de massas de ovos, de adultos e ninfas capazes de ocupar uma mesma planta, de modo que, quando atingida, não era possível a entrada de novos indivíduos do respectivo estágio de desenvolvimento até que fosse liberado espaço. As capacidades suporte de ninfas ($K_n = 500$) e adultos ($K_a = 300$) de percevejos foram definidas a partir da quantidade de ovos totais comportada por uma célula do lattice e de testes preliminares, a fim de definir valores máximos para não limitar o crescimento populacional de percevejos mínimos o bastante para reduzir o esforço computacional do modelo.

Após a movimentação, cada fêmea sexualmente madura (idade igual ou superior a 13 dias após emergência) tem uma probabilidade diária de 70% de ovipositar na vizinhança de Moore de 3x3 células, a cada passo de tempo, ovipositando uma massa de 11 ovos (POSSEBOM et al., 2020). Cada célula do lattice poderia comportar até 60 massas de ovos (K_o), o equivalente a duas massas por planta. Foi assumido um período fértil para as fêmeas de 24 dias (AZAMBUJA; DEGRANDE; PEREIRA, 2013; MICHEREFF et al., 2019), de modo que, após esta idade as fêmeas não mais ovipositam e, por isso, são retiradas do sistema. Desta forma, a longevidade máxima atribuída às fêmeas de *E. heros* dura 36 passos de tempo (dias) após sua emergência. Com isso, cada fêmea pode ovipositar em média 13 massas de ovos totalizando 143 ovos, aproximando-se das quantidades médias observadas durante o estudo da biologia do percevejo realizado por Possebom (2020).

Todos os ovos de uma mesma postura apresentam a mesma idade. Assumiu-se um período embrionário de 5 dias, quando eram eliminados os ovos inviáveis (aproximadamente 37,10%) e aqueles que dariam origem a indivíduos machos, a partir da razão sexual de 0,50 (AZAMBUJA; DEGRANDE; PEREIRA, 2013; MENDOZA; ROCHA; PARRA, 2016;

MICHEREFF et al., 2019). Dos ovos restantes eclodem as ninfas, que ao atingirem 30 dias após a eclosão dão origem aos adultos, reiniciando o ciclo de desenvolvimento do percevejo.

Tabela 1. Valores dos parâmetros utilizados no modelo, e suas respectivas referências na literatura.

Parâmetros	Valor	Referência ¹
<i>Telenomus podisi</i>		
Viabilidade do período fértil	23,33%	9
Viabilidade da fase imatura	82,42%	9
Duração da fase imatura	14,7 dias	9
Período fértil	25 dias	-
Longevidade máxima	26 dias	9
Razão sexual	0,7	2
Curva de oviposição	Equação (2)	8
Raio de dispersão e forrageamento	8 metros	7
<i>Euschistus heros</i>		
Viabilidade do período fértil	70,00%	6
Viabilidade das ninfas	65,28%	1 e 6
Viabilidade de ovos	62,90%	1 e 5
Duração da fase ninfal	30 dias	3 e 6
Duração do período embrionário	5 dias	5
Idade de início da dispersão de ninfas	5 dias	3
Maturidade sexual	12 dias	1, 5 e 6
Período fértil	24 dias	1 e 5
Longevidade máxima	36 dias	-
Razão sexual	0,5	4
Probabilidade de oviposição	70,00%	6
Número total médio de massas de ovos por fêmea	12,7 massas	6
Número total médio de ovos por fêmea	141,3 ovos	6
Número médio de ovos por massa de ovos	11 ovos	6
Expoente de agregação de ninfas k_n	2,9171	10
Expoente de agregação de adultos k_a	3,1001	10
Dispersão média diária de ninfas e adultos	0,5m	-

¹ 1 – Azambuja et al. (2013); 2 – Castellanos et al. (2019); 3 – Costa et al. (1998); 4 – Mendonza et al. (2016); 5 – Michereff et al. (2019); 6 – Possebon et al. (2020); 7 – Ramos (2020); 8 – Rocha (2016); 9 – Silva et al. (2018); 10 – Souza et al. (2018).

2.1.2. Dinâmica populacional de *Telenomus podisi*

A dinâmica populacional de *T. podisi* foi investigada considerando duas fases de vida, imatura (estágios de ovo, larva e pupa) e adulta, sendo considerado apenas as fêmeas no modelo. A cada passo de tempo os adultos e imaturos tinham probabilidades de morrer determinadas pela Equação (1), de acordo com suas respectivas viabilidades. A viabilidade dos adultos foi definida com base no estudo realizado por Silva et al. (2018) relativo ao período fértil assumido no modelo. Apenas os adultos eram capazes de se movimentar, visto que a fase imatura do parasitoide se passa no interior dos ovos de seu hospedeiro. A mecânica de movimentação das

fêmeas de *T. podisi* no modelo está diretamente associada ao forrageio de ovos de percevejos para parasitar. Desta forma, assumiu-se que as fêmeas são capazes de direcionar sua movimentação para células contendo ovos de *E. heros* disponíveis, considerando um raio de dispersão máximo do parasitoide de oito metros, definido com base no estudo realizado por Ramos (2020). Assim, em cada passo de tempo, cada fêmea procura em um raio de oito metros ao redor de sua posição atual, uma célula com ovos não parasitados de percevejo para onde possam se mover e ovipositar, caso esta célula tenha espaço disponível para o parasitoide (com capacidade suporte K_t disponível de parasitoides adultos). Quando não encontradas células com ovos de *E. heros* dentro do raio de dispersão diário, as fêmeas se movem aleatoriamente para uma das células deste raio. A capacidade suporte de adultos de *T. podisi* ($K_t = 550$) foi definida a partir da quantidade total de imaturos do parasitoide comportada por uma célula do lattice, equivalente à capacidade suporte de ovos de percevejos, e de testes preliminares, seguindo o mesmo critério daquele utilizado para os percevejos.

Assumiu-se que as fêmeas só começam a ovipositar no segundo dia após sua emergência. Depois de sua movimentação, cada fêmea pode parasitar um número limitado de ovos de percevejo por dia em um raio de 1 metro de sua posição, em função da idade do adulto, segundo a equação estimada de Rocha (2016):

$$\begin{cases} \theta(i) = 13,62737 + e^{(-0,10221i)}, & \text{se } i \leq 25; \\ \theta(i) = 0, & \text{se } i > 25. \end{cases} \quad (2)$$

onde $\theta(i)$ é o número de ovos que o parasitoide pode colocar neste passo de tempo e i é sua idade atual menos um. Cada fêmea produz apenas um ovo por ovo do hospedeiro. Assumiu-se um período fértil de 25 dias, visto que o número de ovos diários colocados por cada fêmea após este período é inferior a 1, segundo a equação estimada. Quando atingida idade superior ao período fértil, as fêmeas de *T. podisi* são retiradas do modelo. Considerou-se que todos os ovos de *E. heros* parasitados são inviabilizados, mesmo que a fase imatura do parasitoide não complete seu desenvolvimento.

A idade de cada indivíduo imaturo de *T. podisi* de uma mesma massa de ovos parasitados corresponde à média das idades dos imaturos desta massa de ovos. Quando os imaturos atingem a idade de 14 passos de tempo (dias), os machos são eliminados segundo a razão sexual de 0,7 (CASTELLANOS et al., 2019) e as fêmeas emergem.

2.2. Simulações

2.2.1. Estratégias de liberação de *Telenomus podisi*

Esta simulação teve por objetivo avaliar a eficiência de diferentes estratégias de liberação de *T. podisi* na supressão da população de *E. heros*. As estratégias variaram segundo quatro parâmetros: *modo de liberação* (em faixas, simulando a liberação por drones, e em pontos), *número de liberações* ao longo dos passos de tempo (1, 2, 3 ou 4 liberações), *número de parasitoides* fêmeas por liberação (3.000, 5.000, 7.000 e 10.000 por hectare) e o *espaçamento* entre faixas ou pontos de liberação (5, 10, 25 e 50 metros, correspondendo a 20, 10, 4 e 2 faixas por hectare ou 400, 100, 16 e 4 pontos por hectare, respectivamente) (Figura 1A). Os valores dos parâmetros de liberação testados foram estabelecidos com base na especificação de referência para utilização do *T. podisi* (BRASIL, 2019), que recomenda a realização de três liberações de 6.500 adultos (machos e fêmeas) por hectare, em intervalos de 7 dias, distribuídos em 32 pontos equidistantes (espaçamento entre pontos de aproximadamente 18 metros). Além disso, levou-se em consideração informações interpessoais obtidas de profissionais e produtores que implementam e utilizam o parasitoide em campo. As liberações do parasitoide foram configuradas com base na área de 100 x 100 células centrais do lattice (representando um hectare de cultivo), de modo a sobrepor a área de ocupação dos percevejos (Figura 1B). Assim, foram simulados $2 \times 4 \times 4 \times 4 = 128$ diferentes estratégias de liberação de *T. podisi*, além da testemunha (sem liberação), sendo realizadas 15 repetições para cada cenário.

O grid de células foi colonizado por adultos do percevejo de forma aleatória nas 80 x 80 células centrais (Figura 1B), no início da simulação. Realizou-se a liberação de 8.000 fêmeas com idades entre 1 e 13 dias (idade em que atinge a maturidade sexual e inicia a oviposição) ao longo dos 10 primeiros passos de tempo (800 adultos liberados por passo de tempo), simulando a entrada de percevejos no lattice. Esta configuração de colonização do lattice foi estabelecida com base em testes previamente realizados, a fim de estabelecer significativa infestação de pragas e disponibilizar ovos ao longo de toda a simulação. Os parasitoides eram liberados no quinto dias após a colonização por *E. heros*, e as demais liberações, quando realizadas, ocorriam em intervalos de sete dias após a liberação anterior (BRASIL, 2019).

Figura 1. A – Configuração espacial dos pontos e faixas de liberação de *Telenomus podisi* em função do espaçamento entre pontos e faixas definido segundo as estratégias de liberação. B – Representação bidimensional do lattice (e sua borda em preto), da área de liberação de *Euschistus heros* para colonização do lattice no tempo 0, e da área virtual de liberação de *T. podisi* (dentro da qual os pontos ou faixas de liberação foram distribuídos, segundo as configurações ilustradas em A).

Realizou-se as simulações assumindo duas configurações da dinâmica biológica de *T. podisi*: considerando o desenvolvimento das proles do parasitoide e a emergência de seus adultos, enquanto a segunda configuração considerava que a prole dos parasitoides eram eliminadas ao emergirem. Esta segunda configuração tem por objetivo conferir uma avaliação exclusivamente dos parasitoides liberados sob diferentes estratégias, assemelhando-se ao controle por inseticidas químicos, visto que a primeira configuração não permite uma clara avaliação do efeito das estratégias de liberação devido ao aumento expressivo de parasitoides.

2.2.2. Sensibilidade do modelo

A análise de sensibilidade teve por objetivo investigar a importância de cada parâmetro de liberação de *T. podisi* sobre a eficiência de supressão da população de *E. heros*, de acordo com o modelo desenvolvido. Para isso, fixou-se os valores de três dos quatro parâmetros de liberação (de acordo com os seguintes valores: modo de liberação em faixas, duas liberações, 7.000 parasitoides por liberação e espaçamento de 25 metros entre faixas, arbitrariamente definido) e variou-se o valor do parâmetro remanente, e avaliou-se a variação da população de *E. heros* ao longo dos passos de tempo. Foram produzidas 15 repetições. Para o parâmetro *modo de liberação*, comparou-se a liberação em faixas com a liberação em pontos, enquanto os demais parâmetros foram mantidos fixos de acordo com o cenário base escolhido. Para o parâmetro *número de liberações*, comparou-se as respostas do modelo quando realizadas 1 e 4 liberações. Para *número de parasitoides* por liberação, comparou-se a liberação de 3.000 parasitoides em relação à 10.000 parasitoides, e para o *espaçamento* entre faixas, comparou-se

o espaçamento de 5 metros com o de 50 metros, sempre considerando os demais parâmetros do cenário base. A colonização do lattice por percevejos foi configurada como descrito no tópico 2.2.1, levando-se em conta a estrutura dinâmica dos parasitoides em que a prole é eliminada na emergência dos adultos.

Além disso, avaliou-se a sensibilidade do modelo à variação da *capacidade de dispersão* das fases adulta e imatura de *E. heros* e dos adultos de *T. podisi* sobre a população de percevejos ao longo dos passos de tempo. Variou-se o valor da dispersão média diária dos imaturos e adultos de *E. heros* entre 0,25 e 1,0 metros, e o valor do raio de dispersão de *T. podisi* entre 4 e 16 metros. A configuração base de liberação de parasitoides foi a mesma que descrita anteriormente, assim como a colonização do lattice e a configuração da dinâmica dos parasitoides. Como foram simuladas maiores dispersões para ambas as espécies, assumiu-se um lattice de 254 x 254 células para evitar que os insetos atingissem as bordas. Foram produzidas 15 repetições.

2.2.3. Níveis de parasitismo e de infestação de *Euschistus heros*

Buscou-se entender quais os níveis mínimos de parasitismo de ovos de percevejos seriam necessários para manter populações de *E. heros* abaixo do nível de controle durante toda a simulação, considerando diferentes níveis de infestação inicial de percevejos. Para isso, retirou-se a dinâmica biológica de *T. podisi* para estas simulações e assumiu-se probabilidades constantes de parasitismo dos ovos de *E. heros*, de modo que, a cada passo de tempo, cada ovo tivesse a probabilidade diária P de ser inviabilizado por inimigo natural, definida com base na Equação 1, em que $d = 4$ dias (visto que no quinto dia as ninfas eclodem) e $\mu_e = 1$ –parasitismo ao longo de toda a fase de ovo. As porcentagens consideradas foram 0%, 20%, 40% e 80%, e os níveis de infestação iniciais de *E. heros* foram 4.000, 6.000 e 8.000 fêmeas adultas entre 1 e 13 dias de idade, liberadas ao longo dos 10 primeiros passos de tempo nas 80 x 80 células centrais. A configuração do grid de células foi de 204 x 204 células, sendo quatro linhas e colunas ($i = \{1, 2, 203, 204\}$ e $j = \{1, 2, 203, 204\}$) consideradas como bordas fixas durante toda a simulação.

2.2.4. Capacidade de dispersão do parasitoide e espaçamento de liberação

Objetivou-se neste estudo analisar o efeito da variação no espaçamento entre pontos de liberação de parasitoides de ovos com diferentes capacidades de dispersão sobre a eficiência de supressão da população de percevejos. Assim, os espaçamentos ideais para as diferentes capacidades de dispersão dos parasitoides identificados a partir das simulações do modelo, foram comparados com as estimativas da metodologia tradicional, que define o número de pontos por hectare e o espaçamento entre pontos a partir da razão entre a área de controle e a área de dispersão média do parasitoide (POMARI-FERNANDES et al., 2018). A configuração base de liberação assumida foram duas liberações em pontos e 7.000 parasitoides por liberação por hectare. Os espaçamentos entre pontos testados foram 5, 10, 25, 50 e 100 metros, e as capacidades de dispersão de parasitoides analisados foram 4, 8 e 16 metros. O grid foi configurado com 304 x 304 células, sendo quatro linhas e colunas ($i = \{1, 2, 303, 304\}$ e $j = \{1, 2, 303, 304\}$) consideradas como bordas fixas durante toda a simulação. A colonização por percevejos foi realizada aleatoriamente nas 180 x 180 células centrais por 25.920 fêmeas adultas com idades entre 1 e 13 dias ao longo dos 10 primeiros passos de tempo (2.592 adultos liberados por passo de tempo), mesma proporção de adultos por células considerada nas simulações anteriores (1,25 adultos por célula no total). Os parasitoides foram liberados em relação a área de 200 x 200 células centrais (4ha). As mudanças no tamanho do lattice foram realizadas a fim de permitir avaliar o espaçamento de 100 metros entre pontos. Foram realizadas 15 repetições para cada combinação dos fatores capacidade média de dispersão (três níveis) e espaçamento entre pontos (cinco níveis).

2.3. Análise dos dados

Foram produzidos dados do número total de ovos, ninfas e adultos de *E. heros*, e da fase imatura e de adultos de *T. podisi*, ao longo dos 90 passos de tempo de cada simulação. As avaliações e análises foram realizadas com base na contagem de percevejos iguais ou maiores que 0,5cm por célula da área de liberação dos parasitoides de ovos (100 x 100 células centrais, exceto para as simulações do tópico 2.2.4, que foram das 200 x 200 células centrais), para observar as estratégias de liberação e simulações que contribuíram para manter a população de percevejos abaixo do nível de controle estabelecido para a cultura, de 2 percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$ ou a partir do terceiro instar) por metro linear (BUENO et al., 2015), equivalente a 2 percevejos fêmeas (ninfas ≥ 20 dias de idade e adultos) por célula do modelo (m^2).

Foi utilizada a técnica de agrupamento hierárquico para identificar similaridades entre as 128 estratégias de liberação de *T. podisi* mais a testemunha, com base nos dados estandarizados da média do número de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula de cada estratégia no último passo de tempo. A matriz de dissimilaridade foi calculada pelo método euclidiano, e o agrupamento aglomerativo hierárquico foi realizado pelo método de mínima variância de Ward (1963), que apresentou maior valor de coeficiente aglomerativo (valores mais próximos de um indicam forte estrutura de agrupamento).

Para as simulações do tópico 2.2.3, foi realizado uma análise de variância da interação entre os dois fatores estudados. Posteriormente, realizou-se regressões lineares para descrever as relações entre a porcentagem de ovos parasitados e o número de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula no último passo de tempo para cada nível de infestação inicial de *E. heros*.

O efeito das diferentes capacidades de dispersão de *T. podisi* sobre o número de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula no último passo de tempo para cada espaçamento de liberação (tópico 2.2.4) foi avaliado por análise de variância (ANOVA), quando respeitados os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade dos resíduos, analisados pelos testes de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) e de Bartlett (BARTLETT, 1937), respectivamente. Quando necessário, realizou-se a transformação dos dados pelo logaritmo neperiano para adequação dos dados aos pressupostos da ANOVA. Utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (KRUSKAL; WALLIS, 1952) para os dados não normais. Quando detectado efeito significativo dos fatores analisados, as médias foram comparas pelo teste de Tukey ou pelo teste não paramétrico de Wilcoxon pareado (WILCOXON, 1945; MANN; WHITNEY, 1947). Todas as análises foram realizadas utilizando o software R (2021).

3. RESULTADOS

3.1. Estratégias de liberação

Quando não realizado o manejo dos percevejos, observou-se que a população cresce exponencialmente até o fim da simulação, quando atinge uma média ($\pm$ erro padrão) de 50,97 ($\pm 1,26$) percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ou metro quadrado (Figura 2A), cerca de 25,5 vezes acima do nível de controle estabelecido para a cultura, ultrapassado no 33º passo de tempo. As populações de ovos, ninfas e adultos de *Euschistus heros* apresentam ciclicidade resultante da dinâmica biológica destes estágios, em que os picos populacionais de ovos precedem os picos de ninfas à medida que eclodem, e os de adultos ao emergirem, que por sua vez ovipositam formando um novo pico de ovos superior ao anterior, reiniciando o ciclo (Figura 2B). Nota-se que, neste modelo, todas as fases de desenvolvimento podem ocorrer simultaneamente no mesmo passo de tempo. A maior população média ($\pm$ erro padrão) alcançada pelos estágios de desenvolvimento do percevejo ao longo das simulações foi de 2.598.382,60 ($\pm 7.819,20$) de ovos, 2.616.038,20 ($\pm 7.087,36$) de ninfas e 101.529,70 ($\pm 291,90$) de adultos, nos passos de tempo 78, 89 e 66, respectivamente.

Figura 2. Número médio de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula das 100 x 100 células centrais do lattice (A), e população total média de ovos, ninfas e adultos (B) de *Euschistus heros* ao longo de 90 passos de tempo (dias) na cultura da soja quando não realizada liberação de *Telenomus podisi*. Linha tracejada na figura da esquerda indica o nível de controle do percevejo definido para a cultura.

Todas as estratégias de liberação de *T. podisi* realizadas contribuíram para a redução da população de percevejos abaixo do nível de controle ao final do cultivo de soja, quando considerado que a prole dos parasitoides liberados poderiam emergir para também atuar na supressão da população de percevejos (Figuras 3 e 4). Contudo, quando realizada apenas uma liberação de 3.000 parasitoides, a população de percevejos ainda ultrapassa o nível de controle

durante o ciclo da cultura para todos os espaçamentos de liberação, tanto em pontos (Figura 3) quanto em faixas (Figura 4), assim como quanto liberados 5.000 parasitoides no espaçamento de 50m entre pontos ou faixas. Não é possível identificar diferenças relevantes entre as estratégias com duas ou mais liberações de parasitoides ao longo do ciclo da cultura. Nota-se que, de modo geral, a liberação de 3.000 parasitoides por hectare não eliminou imediatamente a população de percevejos como observado para os demais números de parasitoides liberados, e apresentou menor eficiência quando liberados utilizando o espaçamento de 50m, assim como a liberação de 5.000 parasitoides quando realizada em pontos em comparação aos demais espaçamentos (Figura 3).

Figura 3. População de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo em função das estratégias de liberação de *Telenomus podisi*, para o modo de liberação em pontos, considerando o parasitismo da prole dos parasitoides liberados. Parâmetros de liberação representados: *espaçamento* entre pontos (valores indicados na parte superior), *número de liberações* (linhas, valores indicados no canto direito) e *número de parasitoides* por hectare (cores indicadas na legenda). Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja.

Considerando-se apenas a ação dos parasitoides liberados, em que a prole não emerge, é possível observar diferenças evidentes entre as diferentes estratégias de liberação, especialmente quanto ao *número de liberações* (Figuras 5 e 6). Nota-se que apenas quando realizadas três ou quatro liberações ao longo do ciclo da soja foi possível observar estratégias

que impediram o crescimento da população de percevejos acima do nível de controle, exceto para 3.000 parasitoides por hectare por liberação. A utilização de 5.000 parasitoides por hectare por liberação em pontos com o espaçamento de 50m permitiu o crescimento populacional de percevejos acima do nível de controle, mesmo quando realizadas quatro liberações (Figura 5), o que não foi observado para liberação em faixas, em que a realização de três liberações de 5.000 parasitoides para o mesmo espaçamento já foi suficiente para controlar a população de *E. heros* (Figura 6).

Figura 4. População de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo em função das estratégias de liberação de *Telenomus podisi*, para o modo de liberação em faixas, considerando o parasitismo da prole dos parasitoides liberados. Parâmetros de liberação representados: *espaçamento* entre faixas (valores indicados na parte superior), *número de liberações* (linhas, valores indicados no canto direito) e *número de parasitoides* por hectare (cores indicadas na legenda). Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja.

De acordo com o dendrograma da análise de agrupamento aglomerativo hierárquico (Figura 7), foi possível identificar seis grandes grupos considerando a altura 2. O primeiro grupo mais à esquerda corresponde à testemunha. Os dois grupos seguintes pouco se distanciaram da testemunha em relação aos demais grupos. Estes dois grupos correspondem às estratégias de liberação que resultaram nas maiores médias do número de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula no final das simulações (Figura 7, linha A). Os três grupos da esquerda para a direita, além da

testemunha, que também são os que apresentaram menores capacidades de supressão da população de percevejos, são majoritariamente compostos por estratégias que apresentam apenas uma liberação de parasitoides ao longo de toda a simulação. O melhor grupo, por sua vez, que está indicado pelo retângulo vermelho na Figura 7, é composto pelas melhores estratégias de liberação de *T. podisi* a serem utilizadas no manejo do percevejo-marrom da soja, e que mantiveram a população da praga abaixo do nível de controle. Nota-se que estas melhores estratégias correspondem às maiores quantidades de parasitoides totais liberados (Figura 7, linha B), referentes às estratégias com três e quatro liberações a partir de 5.000 parasitoides por liberação. Não é possível identificar um padrão claro de agrupamento das estratégias quanto ao *espaçamento* e ao *modo de liberação* dos parasitoides (Figura 7, linhas E e F, respectivamente), como observado para os demais fatores.

Figura 5. População de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo em função das estratégias de liberação de *Telenomus podisi*, para o modo de liberação em pontos, considerando apenas o parasitismo realizado pelas fêmeas liberadas (as proles dos parasitoides foram eliminada ao emergirem). Parâmetros de liberação representados: *espaçamento* entre pontos (valores indicados na parte superior), *número de liberações* (linhas, valores indicados no canto direito) e *número de parasitoides* por hectare (cores indicadas na legenda). Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja.

Percebe-se que existe uma tendência assintótica de redução da quantidade de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula do último passo de tempo das simulações à medida que se aumenta a quantidade total de parasitoides liberados de acordo com suas estratégias de liberação (Figura 8). Com isso, verifica-se que liberações de 20.000 ou 40.000 parasitoides totais não diferem entre si quanto à eficiência de supressão da população de *E. heros*, para as condições de colonização da praga consideradas no modelo, apesar da primeira estratégia ser mais vantajosa financeiramente. Além disso, é possível observar que os espaçamentos de 5, 10 e 25m entre pontos ou faixas apresentam eficiências muito semelhantes entre si, em comparação ao espaçamento de 50m para a maioria das estratégias avaliadas (médias e erros padrões estão representados na tabela do Anexo A). Vale ressaltar que estratégias diferentes com quantidades totais de parasitoides liberados semelhantes apresentam diferenças significativas na capacidade de suprimir a população do percevejo-marrom da soja, evidenciando a importância dos outros fatores de liberação que compõem a estratégia, como *número de liberações* e *espaçamento* entre pontos ou faixas.

Figura 6. População de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo em função das estratégias de liberação de *Telenomus podisi*, para o modo de liberação em faixas, considerando apenas o parasitismo realizado pelas fêmeas liberadas (as proles dos parasitoides foram eliminada ao emergirem). Parâmetros de liberação representados: *espaçamento* entre faixas (valores indicados na parte superior), *número de liberações* (linhas, valores indicados no canto direito) e *número de parasitoides* por hectare (cores indicadas na legenda). Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja.

Figura 7. Agrupamento aglomerativo hierárquico das 128 estratégias de liberação de *Telenomus podisi* mais a testemunha (ramo à esquerda) em função da média do número de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula (classes de valores indicados na legenda A) no último passo de tempo das simulações de cada estratégia. Pontos coloridos descrevem a configuração de cada parâmetro (linhas B ao F) que compõem as estratégias de liberação do parasitoide, cujos valores estão descritos nas legendas. Linha tracejada utilizada para separação dos grupos de estratégias mais semelhantes entre si. Retângulo vermelho indica o grupo que melhor controlaram a população de *Euschistus heros*, cujas estratégias estão descritas no box inferior [modo de liberação (p – pontos; f – faixas); número de liberações; número de parasitoides por liberação; espaçamento entre pontos ou faixas].

3.2. Sensibilidade do modelo

A sensibilidade do modelo às variações nos valores dos parâmetros de liberação de *T. podisi*, analisada pela variação do número de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo do ciclo da soja, está representada na Figura 9. Nota-se que o modelo é pouco sensível à variação do modo de liberação dos parasitoides (linhas vermelha e azul correspondem à liberação em pontos e faixas, respectivamente), para a configuração considerada de duas liberações de 7.000 parasitoides com espaçamento de 25m. Semelhantemente, a variação nos valores do espaçamento (linhas vermelha e azul se referem ao espaçamento de 5 e 50 metros entre faixas de liberação, respectivamente) pouco influenciou a resposta do modelo, ou seja, na supressão exercida pelos parasitoides, considerando os valores testados. Por outro lado, o modelo se mostrou bastante sensível à variação do número de parasitoides por liberação (linhas vermelha e azul correspondem à 3.000 e 10.000 parasitoides, respectivamente) e no número de liberações

realizadas (linhas vermelha e azul correspondem à 1 e 4 liberações, respectivamente), sendo parâmetros importantes para a definição de estratégias eficientes de liberação de parasitoides de ovos para o manejo de percevejos.

Figura 8. Número de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula no passo de tempo 89 em função do número total de fêmeas de *Telenomus podisi* liberadas (produto do número de liberações pelo número de parasitoides por hectare) de acordo com suas diferentes estratégias de liberação. Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja.

Com relação aos parâmetros de dispersão dos parasitoides e hospedeiros, observou-se que o modelo desenvolvido apresentou maior sensibilidade à *capacidade de dispersão* de *T. podisi* (Figura 10, linhas vermelha e azul correspondem aos raios de dispersão de 16 e 4 metros, respectivamente) em comparação à *capacidade de dispersão* dos estágios de ninfa e adulto de *E. heros* (linhas vermelha e azul correspondem à capacidade de dispersão de 1,0 e 0,25 metros, respectivamente, para ambos os estágios de desenvolvimento), para o intervalo de valores considerados na análise. Nota-se que o modelo apresentou sensibilidade semelhante para a dispersão de ninfas e adultos do percevejo. Além disso, observa-se que as simulações com maiores valores de dispersão dos estágios analisados apresentaram menores populações dos percevejos, possivelmente por contribuir para o aumento da taxa de encontro dos parasitoides com os ovos do percevejo.

Figura 9. Sensibilidade do modelo à variação dos valores dos parâmetros de liberação de *Telenomus podisi* sobre a população de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo dos 90 passos de tempo simulados. Linhas vermelhas: liberação em pontos (superior esquerdo); uma liberação (superior direito); 3.000 parasitoides por hectare por liberação (inferior esquerdo); e 5 metros de espaçamento entre faixas (inferior direito). Linhas azuis: liberação em faixas (superior esquerdo); quatro liberações (superior direito); 10.000 parasitoides por hectare por liberação (inferior esquerdo); e 50 metros de espaçamento entre faixas (inferior direito).

3.3. Níveis de parasitismo e de infestação de *Euschistus heros*

Como esperado, maiores populações de percevejos foram observadas para as simulações em que maiores quantidades de adultos do percevejo colonizaram o lattice (Figura 11). Nota-se que a população de *E. heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) se manteve abaixo do nível de controle apenas para o parasitismo de 80% dos ovos, quando a colonização inicial de adultos na área de 1ha foi de no máximo 6.000 fêmeas adultas. Assim, para níveis de infestações iniciais maiores que esta, é necessário maior intensidade de parasitismo dos ovos por parte dos inimigos naturais para manter a população de percevejos em níveis não prejudiciais para a cultura. Foi possível ajustar regressões significativas ($p\text{-valor} < 0,0001$, graus de liberdade = 57) para a relação entre número de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula em função do parasitismo de ovos para cada uma das infestações iniciais simuladas (Figura 11). É interessante notar que os coeficientes angulares das equações estimadas tendem a aumentar a medida em que se aumenta a infestação inicial de percevejos, devido à tendência de aproximação entre as curvas, assintoticamente. Vale ressaltar

que estas curvas não são preditivas para parasitismo superior a 80%, visto que não tocam o eixo x mesmo quando considerado valor de 100% nas equações, quando todos os ovos seriam inviabilizados e a população de percevejos extinguida do lattice.

Figura 10. Sensibilidade do modelo à variação dos valores dos parâmetros de dispersão dos adultos de *Telenomus podisi* (linhas vermelha e azul correspondem aos raios de dispersão de 16 e 4 metros, respectivamente), ninfas e adultos de *Euschistus heros* (linhas vermelha e azul correspondem à capacidade de dispersão de 1,0 e 0,25 metros, respectivamente, para ambos os estágios de desenvolvimento) sobre a população média de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ou m^2 .

3.4. Capacidade de dispersão do parasitoide e espaçamento de liberação

Detectou-se efeito significativo dos fatores *capacidade de dispersão* e *espaçamento de liberação* sobre o número de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula do último passo de tempo ($p\text{-valor} \leq 0,05$). Segundo as condições de simulação do modelo, observou-se que os parasitoides com maiores capacidades de dispersão permitiram liberações em maiores espaçamentos entre pontos sem que houvesse redução significativa na eficiência da estratégia (Figura 12). Observou-se ainda que os parasitoides de ovos com maior capacidade de dispersão diária apresentaram melhor eficiência na redução da população de percevejos para todos os espaçamentos entre pontos de liberação investigados (Tabela 2).

Figura 11. População de percevejos *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula ao longo do ciclo de soja (parte superior), cujos ovos foram submetidos a diferentes níveis de parasitismo constantes, assumindo três níveis de infestação iniciais do lattice com fêmeas adultas de *E. heros*. Os pontos (parte inferior) representam os números de percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) do último passo de tempo destas simulações, e as regressões em função da porcentagem de ovos parasitados ajustadas para cada nível de infestação inicial de adultos. Linha pontilhada no gráfico inferior indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja.

Figura 12. Efeito do espaçamento de liberação de parasitoides de ovos com diferentes capacidades de dispersão diária (indicados no topo dos gráficos) sobre o número de percevejos *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula do lattice ao longo dos passos de tempo da simulação. Linha pontilhada indica o nível de controle (2 percevejos fêmeas $\geq 0,5\text{cm}$ por m^2) estabelecido para a cultura da soja.

Tabela 2. Número médio ($\pm$ erro padrão) de percevejos *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula no passo de tempo 89 em função do espaçamento de liberação entre pontos de parasitoides de ovos com diferentes capacidades de dispersão diária. Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes entre colunas, e minúsculas diferentes entre colunas, diferem significativamente entre si ($p\text{-valor} \leq 0,05$) pelo teste de Tukey ou Wilcoxon pareado.

Espaçamento entre pontos de liberação	Dispersão diária do parasitoide de ovos		
	4 m	8 m	16 m
5m	1,766 ($\pm 0,004$) Ad	1,701 ($\pm 0,006$) Bcd	1,676 ($\pm 0,006$) Cb
10m	1,767 ($\pm 0,006$) Ad	1,696 ($\pm 0,004$) Bd	1,677 ($\pm 0,006$) Cb
25m	3,013 ($\pm 0,019$) Ac	1,722 ($\pm 0,005$) Bc	1,658 ($\pm 0,006$) Cb
50m	17,966 ($\pm 0,089$) Ab	2,327 ($\pm 0,012$) Bb	1,684 ($\pm 0,008$) Cb
100m	32,298 ($\pm 0,058$) Aa	16,030 ($\pm 0,072$) Ba	2,144 ($\pm 0,008$) Ca

Considerando as configurações de liberação do modelo, para a capacidade de dispersão de 4 metros, os espaçamentos entre pontos que apresentaram maiores eficiências na supressão da população de percevejos foram os de 5 e 10 metros segundo o modelo, o equivalente a 400 e 100 pontos por ha, respectivamente. Na metodologia tradicional a quantidade de pontos por hectare estimada é de aproximadamente 199 pontos por ha, assumindo uma área média de dispersão de $50,27 \text{ m}^2$. Para a capacidade de dispersão de 8 metros os melhores espaçamentos entre pontos foram de 5 e 10 metros, sendo que o de 25 metros não diferiu significativamente do primeiro espaçamento, equivalente a 16 pontos por hectare. Pela metodologia tradicional seria recomendado uma quantidade de aproximadamente 50 pontos por ha, assumindo uma área

média de dispersão de $201,07\text{m}^2$. Por fim, para a capacidade de dispersão de 16 metros, as maiores reduções nas populações do percevejo foram registradas para espaçamentos entre pontos de liberação iguais ou inferiores a 50 metros entre pontos, que equivale a 4 pontos por ha, enquanto a metodologia tradicional recomenda a utilização de aproximadamente 12 pontos por hectare, assumindo uma área média de dispersão de $804,25\text{m}^2$. Portanto, os melhores espaçamentos entre pontos de liberação sugeridos pelo modelo para cada capacidade de dispersão foram maiores do que aqueles definidos com base na metodologia tradicional, que se baseia na área de dispersão média do parasitoide (POMARI-FERNANDES et al., 2018).

4. DISCUSSÃO

Ao analisar os resultados apresentados é preciso levar em consideração as limitações e a abrangência do modelo proposto. Este é um modelo teórico desenvolvido a partir de dados da biologia do parasitoide e do hospedeiro estudados em laboratório, com populações de insetos obtidas da região centro-sul, sob condições controladas de temperatura, umidade e fotoperíodo (AZAMBUJA; DEGRANDE; PEREIRA, 2013; MICHEREFF et al., 2013; POSSEBOM et al., 2020; SILVA et al., 2018). Apesar de estocástico, o modelo não considera a ação de agentes bióticos, como inimigos naturais de *T. podisi* e de *E. heros*, e abióticos, como precipitação, oscilações na temperatura e umidade, velocidade e direção do vento, e até mesmo a aplicação de agrotóxicos, que podem influenciar a sobrevivência e fecundidade dos insetos estudados e a eficiência do manejo utilizando o parasitoide (GRANDE, 2021; NAKAMA; FOERSTER, 2001; PAZINI et al., 2019; POMARI-FERNANDES et al., 2018). Além disso, não foram considerados os efeitos de competição intra e interespecífica para *T. podisi* e *E. heros*. O único fator limitante para o crescimento populacional foi a capacidade suporte, estabelecida para cada estágio de desenvolvimento dos insetos.

Buscou-se realizar a colonização de *E. heros* em quantidades suficientes para que a população ultrapassasse o nível de controle estabelecido para a cultura o quanto antes, quando não realizado nenhuma liberação. Além disso, buscou-se criar um cenário que simulasse um nível de infestação extremamente elevado para que as melhores estratégias indicadas pelo modelo sejam capazes de controlar os mais diversos níveis de infestação observados em campos de soja. A população de percevejos da testemunha foi ligeiramente superior às maiores populações detectadas por Souza et al. (2013) e Marques et al. (2019) para o mesmo período. É interessante notar que o primeiro pico populacional ocorre entre 30 e 40 dias após a colonização dos percevejos, como também observado por Fonseca et al. (2014) e Souza et al. (2013), mas que foi posteriormente superado ao final da simulação pela prole da segunda geração de percevejos. Contudo, este aumento populacional teórico ao final da simulação não é usualmente observado em populações de campo, e depende da duração do ciclo do cultivar (fornece-se tempo suficiente para o desenvolvimento e reprodução dos percevejos) e da intensidade de migração dos percevejos para plantas alternativas e culturas adjacentes a partir da maturação fisiológica da soja (CORRÊA-FERREIRA; PANIZZI, 1999), não levado em consideração no modelo.

Comparando-se os resultados das simulações em que se considerou o desenvolvimento da prole dos parasitoides liberados com aqueles em que a prole não foi considerada é possível

notar a importância da manutenção de ambientes favoráveis ao desenvolvimento dos agentes de controle biológico para o manejo da população de insetos praga. Estas condições podem ser promovidas pela utilização de inseticidas químicos seletivos aos inimigos naturais, implementação do manejo integrado de pragas (MIP) para redução do número de aplicações de agrotóxicos, disponibilidade de alimento para os adultos de parasitoides pela presença de plantas nectíferas próximo à lavoura etc. (PAZINI et al., 2019; TILLMAN et al., 2015). Desta forma, em um ambiente favorável para a sobrevivência da prole dos parasitoides liberados, a realização de apenas uma liberação de 5.000 fêmeas de *T. podisi* pode ser suficiente para manter a população de *E. heros* abaixo do nível de controle ao longo de todo o ciclo da soja, segundo as condições assumidas no modelo.

Quando considerado a prole dos parasitoides liberados, não se observa diferenças significativas entre as estratégias com mais de uma liberação de 5.000 ou mais fêmeas devido ao expressivo crescimento da população destes parasitoides, cujo ciclo de desenvolvimento é mais rápido que o do percevejo (CHEVARRIA; PONTE; JAHNKE, 2013). A capacidade de parasitismo da população de *T. podisi* ultrapassa o número de ovos colocados pelos percevejos para estas estratégias de liberação, extinguindo a população da praga ao longo da simulação. Assim, do ponto de vista teórico, o fator limitante para a diferenciação da eficiência das estratégias de liberação do parasitoide, pelo modelo, foi o tamanho da população de percevejos assumida para esta configuração, que, por sua vez, depende do número inicial de adultos que colonizam o lattice. Contudo, visto que a maioria das lavouras de soja brasileiras oferecem um ambiente hostil para o desenvolvimento de inimigos naturais e para que os resultados das simulações reflitam unicamente a ação dos parasitoides efetivamente liberados na lavoura, optou-se por estudar as estratégias de liberação a partir das simulações em que a prole dos parasitoides é eliminada do modelo ao emergir.

As estratégias de liberação capazes de manter a população de percevejos abaixo do nível de controle foram aquelas que liberaram pelo menos 15.000 parasitoides fêmeas por hectare ao todo (somando-se todas as liberações). Contudo, é interessante notar que a forma como estes parasitoides são distribuídos ao longo do ciclo da cultura é fundamental para o sucesso do manejo. Por exemplo, duas liberações de 10.000 fêmeas por hectare, totalizando 20.000 parasitoides, apresentou menor eficiência na supressão da população de percevejos do que a realização de três liberações de 5.000 parasitoides, totalizando 15.000 fêmeas por hectare. Esta importância do número de liberações e do número de parasitoides por liberação sobre a eficiência da estratégia pode ser melhor observada na análise de sensibilidade. Sendo assim, para estudos em campo com *T. podisi*, recomenda-se testar estratégias com três ou quatro

liberações com 5.000 ou mais fêmeas por ha, visto que as demais estratégias apresentaram menor eficiência para o nível de infestação de percevejos assumido no modelo. Esta recomendação assemelha-se com aquela indicada na especificação de referência para utilização de *T. podisi* (BRASIL, 2019), que sugere a realização de três liberações de 6.500 parasitoides por hectare (aproximadamente 4.550 fêmeas, assumindo uma razão sexual de 0,7). Bueno, A. F. et al. (2020) obtiveram controle satisfatório da população de *E. heros* quando realizaram três liberações de 6.250 pupas de *T. podisi* (aproximadamente 4.375 fêmeas, assumindo uma razão sexual de 0,7) em intervalos de sete dias. Sá, Parra e Silveira Neto (1993) concluíram que uma maior eficiência no manejo de *Helicoverpa zea* (Boddie, 1850) (Lepidoptera, Noctuidae) em milho com *Trichogramma pretiosum* Riley, 1879 (Hymenoptera: Trichogrammatidae) é conseguido com três ou mais liberações espaçadas entre 7 e 4 dias.

A maior longevidade das fêmeas de *E. heros* e sua constante migração de áreas vizinhas (não considerado neste modelo) permite que a oviposição do percevejo ocorra por mais tempo que o período de parasitismo significativo da população de *T. podisi* proveniente de uma única liberação. Desta forma, a maior eficiência das estratégias de liberação que distribuem os parasitoides em três ou quatro liberações pode ser explicada pelo fornecimento sucessivo de fêmeas jovens de *T. podisi* – que apresentam a capacidade de parasitismo maior nos primeiros dias após a emergência (ROCHA, 2016; SILVA et al., 2018) – ao longo do primeiro pico populacional de ovos de *E. heros*. Além disso, é importante que se balanceie a quantidade de parasitoides por liberação de modo que a capacidade diária de parasitismo da população liberada não supere excessivamente a população de ovos disponíveis para o parasitismo. Portanto, a realização de um maior número de liberações (de modo a abranger o primeiro pico de oviposição de *E. heros*) com menor número de parasitoides em cada liberação (dependendo do nível de infestação pela praga) pode contribuir para um melhor aproveitamento dos parasitoides liberados, ao permitir que a capacidade de parasitismo da população de *T. podisi* liberada se aproxime da quantidade de ovos disponíveis para o parasitismo.

Do ponto de vista econômico, as melhores estratégia de liberação são aquelas que mantêm a população de percevejos abaixo do nível de dano econômico pelos menores custos de implementação. Assim, percebe-se que, para o nível de infestação de *E. heros* assumido no modelo, liberações de mais de 20.000 parasitoides totais por hectare não contribuíram para aumentar significativamente a eficiência na supressão da população do percevejo ao ponto de compensar o aumento do custo da estratégia, não quantificado neste trabalho.

Apesar do *espaçamento* entre pontos ou faixas de liberação de *T. podisi* ter exercido menor influência sobre a eficiência na supressão da população de percevejos em comparação

ao número de liberações e número de parasitoides por liberação por hectare, sua importância não pode ser subestimada. Por exemplo, a estratégia de quatro liberações de 5.000 parasitoides por hectare em pontos espaçados em 50 metros resultou em uma população final de percevejos 21 vezes maior do que quando utilizado a mesma estratégia, mas com espaçamento entre pontos de 25 metros. Portanto, visto que os espaçamentos de 5 a 25 metros pouco diferem entre si quanto à eficiência na supressão da população de *E. heros*, recomenda-se que os estudos de liberação de *T. podisi* realizados em campo utilizem o espaçamento de 25 metros para ambos os modos de liberação em pontos ou faixas, para um melhor aproveitamento dos parasitoides liberados. Vale ressaltar que o modo de liberação em faixas contribuiu para reduzir a diferença na eficiência das estratégias de liberação com espaçamento de 50 metros em relação aos demais espaçamentos, possivelmente por distribuir os parasitoides ao longo das faixas de liberação, aumentando a área de ocupação do parasitoide logo nos primeiros dias após a liberação. Contudo, a eficiência das estratégias quanto aos dois modos de liberação analisados foi pouco afetada para os espaçamentos de 5, 10 e 25 metros, como observado por Bueno, A. F. et al. (2020) ao comparar a liberação de cápsulas contendo pupas de *T. podisi* e a liberação de pupas à granel em faixas. Este resultado é interessante pois sugere que as liberações podem ser realizadas dos dois modos, dependendo da ferramenta disponível para o agricultor ou aquela mais viável economicamente para ser implementada em campo.

Visto que o valor da capacidade média de dispersão diária de *E. heros* não é conhecida, a reduzida sensibilidade do modelo a este parâmetro para ambos os estágios de ninfa e adulto do percevejo é desejável, devido ao seu desprezível impacto sobre os resultados das estratégias de liberação estudadas. Isto pode ser explicado pela maior capacidade de dispersão do parasitoide em relação ao hospedeiro, de modo que os valores de dispersão médios testados não permitiram que a população de percevejos se distanciasse suficientemente da área de ocupação de *T. podisi* ao ponto de serem observadas diferenças expressivas na população de percevejos. Portanto, a capacidade de ocupar a área de distribuição da população de *E. heros* foi mais afetada pela variação da capacidade de dispersão do parasitoide, e não do hospedeiro, de acordo com os valores testados.

Constatou-se que as estratégias de manejo de *E. heros* pela liberação de parasitoides de ovos precisam atingir aproximadamente 80% de parasitismo dos ovos do percevejo para que a população de ninfas e adultos permaneça próximo ou abaixo do nível de controle para a soja, para as condições de colonização assumidos no modelo. Bueno, A. F. et al. (2020) conseguiram aumentar o parasitismo de ovos para 70% após a liberação de *T. podisi* em campo, e mantiveram a população de percevejos em níveis satisfatórios. Entretanto, é interessante notar que os níveis

de parasitismo de 20 e 40% foram responsáveis por reduções significativas, de aproximadamente 35% e 62%, respectivamente, nas populações de percevejos em relação à ausência de parasitismo. Estes níveis de parasitismo, que também podem ser entendidos como níveis de predação de ovos, são frequentemente observados pela ação de inimigos naturais (parasitoides e predadores de ovos) nas lavouras de soja (CORRÊA-FERREIRA; MOSCARDI, 1995; MEDEIROS et al., 1998; PACHECO; CORRÊA-FERREIRA, 2000; YERGAN, 1979). Assim, ressalta-se a importância de medidas de manejo que promovam a conservação e aumento das populações de inimigos naturais para auxiliar na manutenção das populações de percevejos abaixo do nível de dano econômico.

A maior eficiência na supressão da população de percevejos por parasitoides com maior capacidade de dispersão não coincide com o demonstrado pelo modelo de otimização desenvolvido por Plouvier e Wajnberg (2018), que sugerem uma menor capacidade de dispersão ótima para maior eficiência de agentes de biocontrole. Contudo, estes autores consideraram um risco de morte proporcional à dispersão do agente de biocontrole, e não houve escassez de hospedeiros para os parasitoides liberados. No presente modelo, por sua vez, a maior capacidade de dispersão dos parasitoides permite que eles distribuam melhor sua população na região de ocupação dos percevejos, se distanciem de áreas de intensa ocupação por parasitoides e escassez de hospedeiros não parasitados e acessem ovos mais distantes de sua posição, sem ter sua longevidade prejudicada.

Como mencionado anteriormente, os melhores espaçamentos entre pontos de liberação sugeridos pelo modelo foram maiores do que aqueles definidos com base na metodologia tradicional. Do ponto de vista econômico, é mais vantajoso utilizar espaçamentos maiores, por representar menor esforço e tempo necessário para realizar o manejo, conseguindo-se liberar em maiores áreas por unidade de tempo. Contudo, é necessário realizar experimentos em campo para comparar a eficiência das estratégias com ambos os espaçamentos (indicados pelo modelo e pela metodologia tradicional) sobre a supressão de populações de *E. heros* para validar os resultados produzidos pelo modelo.

As liberações de parasitoides simuladas neste trabalho iniciaram-se a partir da detecção da chegada de adultos de percevejos no grid de células, e não quando a população atingiu o nível de controle de 2 percevejos ($\geq 0,5\text{cm}$) por metro linear. Este nível de controle foi definido com base na utilização do controle químico (BUENO et al., 2015), que pode atuar diretamente sobre a população de ninfas e/ou adultos e têm ação mais imediata, se comparado ao manejo com parasitoide de ovos. Desta forma, a decisão do melhor momento de liberação de *T. podisi* precisa levar em consideração o estágio da praga em que o parasitoide atua e o

horizonte de tempo necessário para a efetiva supressão da praga pela população do parasitoide. Sendo assim, ao liberar os parasitoides de ovos, deve-se buscar manejar a população de ovos do percevejo que futuramente resultariam em uma população de ninfas e adultos que causariam perdas significativas à cultura.

A utilização da detecção da chegada de percevejos na lavoura como critério para iniciar as liberações de *T. podisi* é uma estratégia interessante para suprimir o primeiro pico de ovos colocados pela população de percevejos que colonizam a área, além de fornecer inimigos naturais que podem permanecer na lavoura até a colheita, caso houver condições favoráveis para estes organismos. Ademais, o monitoramento frequente e assertivo da lavoura é fundamental para que se consiga detectar a chegada dos percevejos para realizar a liberação dos parasitoides eficientemente. Contudo, ainda são necessários estudos em campo com *T. podisi* para se definir com mais segurança o momento ótimo de liberação do parasitoide (não abordado neste trabalho) e investigar níveis de controle apropriados para esta ferramenta de manejo.

A escolha das melhores estratégias de liberação estudadas neste trabalho considerou apenas sua capacidade de redução da população de percevejos ao longo das simulações. Entretanto, para a efetiva implementação em campo, é necessário considerar os custos associado à cada estratégia e testar sua eficiência em campo, a fim de se escolher aquela que apresentar melhor custo-benefício para o agricultor. É importante ressaltar que a estratégia de manejo por liberação de parasitoides é apenas uma das ferramentas de controle que compõem o Manejo Integrado de Pragas, sendo imprescindível a utilização de outras táticas para o manejo sustentável e eficiente de *E. heros* em soja (BUENO, A. F. et al., 2020). Dentre elas, pode-se citar a conservação de seus inimigos naturais, utilização de cultivares tolerantes ou resistentes ao ataque do percevejo, disponibilização de nutrientes em quantidades adequadas à cultura e até mesmo a utilização do controle químico com inseticidas seletivos aos inimigos naturais. Ainda, o sucesso do controle biológico depende do efetivo monitoramento da população da praga para detectar sua chegada na cultura e realizar o manejo no momento apropriado, segundo o estágio alvo de controle do parasitoide (CROWDER, 2007). Portanto, a implementação de um bom programa de manejo de pragas é fundamental para o estabelecimento de lavouras de soja produtivas e sustentáveis do ponto de vista ambiental, econômico e social.

5. CONCLUSÃO

As estratégias de liberação capazes de manter a população de *Euschistus heros* abaixo do nível de controle, de acordo com o modelo computacional, foram aquelas que liberaram pelo menos 15.000 parasitoides fêmeas por hectare ao todo, seguindo a configuração de três a quatro liberações de 5.000 ou mais fêmeas de *Telenomus podisi* por hectare. Recomenda-se a utilização do espaçamento de 25 metros entre pontos ou faixas de liberação. Os modos de liberação em pontos ou faixas avaliados apresentaram eficiência semelhante entre si para a maioria das estratégias estudadas. Observou-se que os parasitoides liberados precisam parasitar aproximadamente 80% dos ovos dos percevejos para manter a população da praga abaixo do nível de controle na soja. Os espaçamentos ótimos entre pontos de liberação de parasitoides de ovos indicados pelo modelo computacional, para maior eficiência na supressão da população de *E. heros*, foram maiores do que aqueles indicados pelo método tradicional, baseado na razão entre a área de controle pela área dispersão média do parasitoide.

REFERÊNCIAS

- AZAMBUJA, R.; DEGRANDE, P. E.; PEREIRA, F. F. Comparative Biology of *Euschistus heros* (F.) (Hemiptera: Pentatomidae) Feeding on Cotton and Soybean Reproductive Structures. **Neotrop. Entomol.**, v. 42, p. 359–365, 2013.
- BARTLETT, M. S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proc. Royal Stat. Soc., Series A**, v. 160, p. 268–282, 1937.
- BORTOLOTTI, O. C. et al. The use of soybean integrated pest management in Brazil: a review. **Agro. Sci. Biot.**, v. 1, n. 1, p. 25–32, 2015.
- BORTOLOTTI, O. C. et al. Development of *Dichelops melacanthus* and its egg parasitoid *Telenomus podisi* reared on Bt-soybean MON 87701 x MON 89788 and its near conventional isolate under different temperatures. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, v. 88, n. 2, p. 1023–1034, 2016.
- BRASIL. **Instrução Normativa n. 25 de 4 de setembro de 2019**. Acrescenta ao Anexo II da Instrução Normativa Conjunta SDA/SDC n. 2, de 12 de julho de 2013, quatro novas especificações de referência de produtos fitossanitários com uso aprovado para a agricultura orgânica. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, 4 set. 2019. Seção 1, p. 4–6.
- BUENO, A. F. et al. Assessment of a more conservative stink bug economic threshold for managing stink bugs in Brazilian soybean production. **Crop Protec.**, v. 71, p. 132–137, 2015.
- BUENO, A. F. et al. Release of the egg parasitoid *Telenomus podisi* to manage the Neotropical Brown Stink Bug, *Euschistus heros*, in soybean production. **Crop Protec.**, v. 137, 105310, 2020.
- BUENO, A. F. et al. Challenges for adoption of integrated pest management (IPM): the soybean example. **Neotrop. Entomol.**, v. 50, p. 5–20, 2021.
- BUENO, V. H. P. et al. Biological Control in Brazil. In: VAN LENTEREN, J. C. et al. (Ed.). **Biological Control in Latin America and the Caribbean: Its Rich History and Bright Future**. CABI International, Boston: USA, p. 78–107, 2020.
- CASTELLANOS, N. L. et al. The Fitness and Economic Benefits of Rearing the Parasitoid *Telenomus podisi* Under Fluctuating Temperature Regime. **Neotrop. Entomol.**, v. 48, p. 934–948, 2019.
- CHEVARRIA, V. V.; PONTE, E. M.; JAHNKE, S. M. Número de gerações de um percevejo e seu parasitoide e da severidade da ferrugem asiática em soja, simulados em cenários de clima e manejo no norte do RS. **Ciênc. Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 4, p. 571–578, abr. 2013.

- CIVIDANES, F. J. Determinação das exigências térmicas de *Nezara viridula* (L., 1758), *Piezodorus guildinii* (West., 1837) e *Euschistus heros* (Fabr., 1798) (Heteroptera: Pentatomidae) visando ao seu zoneamento ecológico. 1992, 100p. **Tese** (Doutorado em Entomologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.
- CORRÊA-FERREIRA, B. S.; MOSCARDI, F. Seasonal occurrence and host spectrum of egg parasitoids associated with soybean stink bugs. **Bio. Control**, Orlando, n. 5, p. 196–202, 1995.
- CORRÊA-FERREIRA, B. S.; PANIZZI, A. R. Percevejos da soja e seu manejo. Londrina: **EMBRAPA-CNPSO**, Circular Técnica 24, 45 p., 1999.
- COSTA, M. L. M.; BORGES, M.; VILELA, E. F. Biologia Reprodutiva de *Euschistus heros* (F.) (Heteroptera: Pentatomidae). **An. Soc. Entomol. Brasil**, v. 27, n. 4, p. 559–568, 1998.
- CROWDER, D. W. Impact of release rates on the effectiveness of augmentative biological control agents. **J. Insect Sci.**, v. 7, 2007.
- DEANGELIS, D. L.; GRIMM, V. Individual-based models in ecology after four decades. **F1000Prime Rep.**, v. 6, n. 39, jun. 2014.
- FONSECA, P. R. B. et al. Spatial Distribution of Adults and Nymphs of *Euschistus heros* (F.) (Hemiptera: Pentatomidae) on Bt and Non-Bt Soybean. **J. Agric. Sci.**, v. 6, n. 6, p. 131–142, 2014.
- GARCIA, A. et al. A mathematical approach to simulate spatio-temporal patterns of an insect-pest, the corn rootworm *Diabrotica speciosa* (Coleoptera: Chrysomelidae) in intercropping systems. **Land. Ecol.**, Netherland, v. 29, n. 9, p. 1531–1540, 2014.
- GARCIA, A. G. et al. Predicting evolution of insect resistance to transgenic crops in within-field refuge configurations, based on larval movement. **Ecol. Complex.**, v. 28, p. 94–103, 2016.
- GARCIA, A. G.; GODOY, W. A. C. A theoretical approach to analyze the parametric influence on spatial patterns of *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) populations. **Neotrop. Entomol.**, Londrina, v. 46, p. 283–288, 2016.
- GARCIA, A. G. et al. A computational model to predict the population dynamics of *Spodoptera frugiperda*. **J. Pest Sci.**, v. 92, p. 429–441, 2018.
- GRANDE, M. L. M. et al. Impact of Environmental Variables on Parasitism and Emergence of *Trichogramma pretiosum*, *Telenomus remus* and *Telenomus podisi*. **Neotrop. Entomol.**, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13744-021-00874-2>.
- JACKSON, L. J.; TREBITZ, A. S.; COTTINGHAM, K. L. An Introduction to the Practice of Ecological Modeling. **BioSci.**, v. 50, n. 8, p. 694–706, aug. 2000.

- JORGENSEN, S. E.; CHON, T. S. Model types available for ecological modelling. In: JORGENSEN, S. E.; CHON, T. S.; FRIEDRICH, R. (Ed.). **Handbook of Ecological Modelling and Informatics**. WIT Press, Southampton: UK, p. 9–40, 2009.
- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **J. Am. Stat. Assoc.**, v. 47, p. 583–621, 1952.
- LAHIRI et al. Longevity and fecundity of the egg parasitoid *Telenomus podisi* provided with different carbohydrate diets. **Entomol. Exper. App.**, Netherland, v. 162, p. 178–187, 2017.
- LIMA, E. A. B. F.; FERREIRA, C. P.; GODOY, W. A. C. Ecological Modeling and Pest Population Management: a Possible and Necessary Connection in a Changing World. **Neotrop. Entomol.**, Londrina, v. 38, n. 9, p. 699–707, 2009.
- MALAQUIAS, J. B. et al. Larval dispersal of *Spodoptera frugiperda* strains on bt cotton: a model for understanding resistance evolution and consequences for its management. **Sci. Rep.**, London: UK, v. 7, n. 1, p. 1–10, 2017.
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Ann. Math Stat.**, v. 18, p. 50–60, 1947.
- MARGARÍA, C. B.; LOIÁCONO, M. S.; LANTERI, A. A. New geographic and host records for scelionid wasps (Hymenoptera: Scelionidae) parasitoids of insect pests in South America. **Zootaxa**, v. 2314, p. 41–49, 2009.
- MARQUES, R. P. et al. Managing Stink Bugs on Soybean Fields: Insights on Chemical Management. **J. Agric. Sci.**, v. 11, n. 6, p. 225–234, 2019.
- MEDEIROS, M. A. et al. Incidência natural de parasitóides em ovos de percevejos (Hemiptera: Pentatomidae) encontrados na soja no Distrito Federal. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 33, n. 8, p. 1431–1435, ago. 1998.
- MENDOZA, A. C.; ROCHA, A. C. P.; PARRA, J. R. P. Lyophilized artificial diet for rearing the Neotropical *Euschistus heros* (Hemiptera: Pentatomidae). **J. Insect Sci.**, v. 16, n. 1, p. 1–9, 2016.
- MICHEREFF, M. F. F. et al. The influence of resistant soybean cultivars on the biological development of *Euschistus heros* (Hemiptera: Pentatomidae). **J. Plant Interact.**, v. 14, n. 1, p. 544–551, 2019.
- MOREIRA, G. R. P.; BECKER, M. Mortalidade de *Nezara viridula* (Linnaeus, 1758) (Heteroptera: Pentatomidae) no estágio de ovo na cultura da soja. In: II. Parasitoides, 2, **An. Soc. Entomol. Brasil**, Jaboticabal, v. 198, p. 291–308, 1986.
- NAKAMA, P. A.; FOERSTER, L. A. Efeito da Alternância de Temperaturas no Desenvolvimento e Emergência de *Trissolcus basalis* (Wollaston) e *Telenomus podisi* Ashmead (Hymenoptera: Scelionidae). **Neotrop. Entomol.**, Londrina, v. 30, n. 2, p. 269–275, jun. 2001.

- PACHECO, D. J. P.; CORRÊA-FERREIRA, B. S. Parasitismo de *Telenomus podisi* Ashmead (Hymenoptera: Scelionidae) em Populações de Percevejos Pragas da Soja. **An. Soc. Entomol. Brasil**, Jaboticabal, v. 29, n. 2, p. 295–302, jun. 2000.
- PANIZZI, A. R. et al. Dispersal of *Nezara viridula* and *Piezodorus guildinii* Nymphs in Soybeans. **Environ. Entomol.**, v. 9, p. 293–297, 1980.
- PANIZZI, A. R.; NIVA, C. C. Overwintering Strategy of the Brown Stink Bug in Northern Paraná. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 29, n. 3, p. 509–511, mar. 1994.
- PANIZZI, A. R. Growing Problems with Stink Bugs (Hemiptera: Heteroptera: Pentatomidae): Species Invasive to the U.S. and Potential Neotropical Invaders. **Amer. Entomol.**, v. 61, n. 4, p. 203–233, 2015.
- PAZINI J. B. et al. Differential impacts of pesticides on *Euschistus heros* (Hem.: Pentatomidae) and its parasitoid *Telenomus podisi* (Hym.: Platygasteridae). **Sci. Rep.**, v. 9, 6544, 2019.
- PERES, W. A. A.; CORRÊA-FERREIRA, B. S. Methodology of Mass Multiplication of *Telenomus podisi* Ash. and *Trissolcus basalisi* (Woll.) (Hymenoptera: Scelionidae) on Eggs of *Euschistus heros* (Fab.) (Hemiptera: Pentatomidae). **Neotrop. Entomol.**, Londrina, v. 33, n. 4, p. 457–462, 2004.
- PLOUVIER, W. N.; WAJNBERG, E. Improving the efficiency of augmentative biological control with arthropod natural enemies: A modeling approach. **Bio. Control**, Orlando, v. 125, p. 121–130, 2018.
- POMARI, A. F. et al. Releasing number of *Telenomus remus* (Nixon) (Hymenoptera: Platygasteridae) against *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) in corn, cotton and soybean. **Ciênc. Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 377–382, mar. 2013.
- POMARI-FERNANDEZ, A. et al. Dispersal capacity of the egg parasitoid *Telenomus remus* Nixon (Hymenoptera: Platygasteridae) in maize and soybean crops. **Bio. Control**, Orlando, v. 126, p. 158–168, 2018.
- POSSEBOM, T.; LUCINI, T.; PANIZZI, A. R. Stink Bugs Nymph and Adult Biology and Adult Preference on Cultivated Crop Plants in the Southern Brazilian Neotropics. **Environ. Entomol.**, v. 49, n. 1, p. 132–140, 2020.
- QUEIROZ, A. P. et al. Host Preferences of *Telenomus podisi* (Hymenoptera: Scelionidae): Parasitism on Eggs of *Dichelops melacanthus*, *Euschistus heros*, and *Podisus nigrispinus* (Hemiptera: Pentatomidae). **Neotrop. Entomol.**, Londrina, v. 47, p. 543–552, 2017.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2021.
- RAMOS, G. R. Capacidade de dispersão e parâmetros biológicos inerentes à criação massal de *Telenomus podisi* Ashmead (Hymenoptera: Platygasteridae) para o controle de pentatomídeos-praga em soja. 2020, 128p. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2020.

- ROCHA, A. C. P. Dinâmica de interações tróficas de *Euschistus heros* (Hemiptera: Pentatomidae) com *Telenomus podisi* e *Trissolcus basal* (Hymenoptera: Platygasteridae). 2016, 105p. Tese (Doutorado em Entomologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- ROSS, A. M. **Modeling Population Dynamics**. University of Amsterdam, 222 p., 2014. Disponível em: <https://staff.fnwi.uva.nl/a.m.deroos/downloads/pdf_readers/syllabus.pdf>. Acesso em: 15 out. 2019.
- SÁ, L. A. N.; PARRA, J. R. P.; SILVEIRA NETO, S. Capacidade de dispersão de *Trichogramma pretiosum* Riley, 1879 para controle de *Helicoverpa zea* (Boddie, 1850) em milho. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 50, n. 2, p. 226–231, jun./set. 1993.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, Great Britain, v. 52, n. 3, p. 591–611, 1965.
- SILVA, C. C. et al. *Euschistus heros* mass rearing technique for the multiplication of *Telenomus podisi*. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 43, n. 5, p. 575–580, maio 2008.
- SILVA, G. V. et al. Biological Characteristics and Parasitism Capacity of *Telenomus podisi* (Hymenoptera: Platygasteridae) on Eggs of *Euschistus heros* (Hemiptera: Pentatomidae). **J. Agric. Sci.**, v. 10, n. 9, p. 210–2020, 2018.
- SOUZA, L. A. et al. Spatial Distribution of *Euschistus heros* (F.) (Hemiptera: Pentatomidae) in Soybean. **Neotrop. Entomol.**, v. 42, p. 412–418, 2013.
- SOUZA L. A. et al. Spatial distribution of nymphs and adults of *Euschistus heros* (Fabricius, 1794) (Heteroptera: Pentatomidae) in transgenic soybean cultivars of different maturing cycles. **Semina: Ciên. Agrárias**, Londrina, v. 39, n. 3, p. 905–920, 2018.
- TILLMAN, P. G. et al. Trap Cropping Systems and a Physical Barrier for Suppression of Stink Bugs (Hemiptera: Pentatomidae) in Cotton. **J. Econ. Entomol.**, v. 108, n. 5, p. 2324–2334, 2015.
- TORRES, J. B.; PRATISSOLI, D.; ZANUNCIO, J. C. Exigências Térmicas e Potencial de Desenvolvimento dos Parasitóides *Telenomus podisi* Ashmead e *Trissolcus brochymenae* (Ashmead) em ovos do Percevejo Predador *Podisus nigrispinus* (Dallas). **An. Soc. Entomol. Brasil**, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 445–453, dec. 1997.
- WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **J. Am. Stat. Assoc.**, v. 58, p. 236–244, 1963.
- WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods. **Biom. Bull.**, v. 1, p. 80–83, 1945.
- YEARGAN, K. V. Parasitism and predation of stink bug eggs in soybean and alfafa fields. **Environ. Entomol.**, v. 8, p. 715–719, 1979.

YEARGAN, K. V. Reproductive Capability and Longevity of the Parasitic Wasps *Telenomus Podisi* and *Trissolcus euschisti*. **Ann. Entomol. Soc.**, v. 75, p. 181–183, 1982.

ANEXO

ANEXO A. Médias ($\pm$ erro padrão) do número de *Euschistus heros* ($\geq 0,5\text{cm}$) por célula no passo de tempo 89 em função das 128 estratégias de liberação de fêmeas de *Telenomus podisi* simuladas pelo modelo computacional desenvolvido, considerando apenas o parasitismo realizado pelos indivíduos liberados (as proles dos parasitoides foram eliminada ao emergirem).

Modo de liberação	Número de liberações	Parasitoides por liberação por ha	Espaçamento entre pontos ou faixas de liberação			
			5m	10m	25m	50m
Faixas	1	3.000	22,82 ($\pm 0,11$)	22,52 ($\pm 0,10$)	22,69 ($\pm 0,08$)	24,33 ($\pm 0,09$)
		5.000	15,80 ($\pm 0,07$)	15,72 ($\pm 0,06$)	15,71 ($\pm 0,09$)	16,44 ($\pm 0,08$)
		7.000	11,33 ($\pm 0,07$)	11,24 ($\pm 0,07$)	11,30 ($\pm 0,06$)	11,52 ($\pm 0,07$)
		10.000	7,51 ($\pm 0,04$)	7,37 ($\pm 0,03$)	7,40 ($\pm 0,04$)	7,51 ($\pm 0,04$)
	2	3.000	8,61 ($\pm 0,08$)	8,54 ($\pm 0,08$)	8,60 ($\pm 0,07$)	10,98 ($\pm 0,11$)
		5.000	3,00 ($\pm 0,01$)	3,00 ($\pm 0,01$)	3,00 ($\pm 0,02$)	4,00 ($\pm 0,05$)
		7.000	2,39 ($\pm 0,01$)	2,37 ($\pm 0,02$)	2,37 ($\pm 0,02$)	2,64 ($\pm 0,02$)
		10.000	1,88 ($\pm 0,01$)	1,86 ($\pm 0,01$)	1,88 ($\pm 0,01$)	2,07 ($\pm 0,01$)
	3	3.000	5,95 ($\pm 0,07$)	5,74 ($\pm 0,07$)	5,89 ($\pm 0,06$)	8,55 ($\pm 0,05$)
		5.000	0,88 ($\pm 0,01$)	0,86 ($\pm 0,01$)	0,89 ($\pm 0,01$)	1,71 ($\pm 0,04$)
		7.000	0,42 ($\pm 0,01$)	0,43 ($\pm 0,01$)	0,44 ($\pm 0,01$)	0,69 ($\pm 0,02$)
		10.000	0,13 ($\pm 0,01$)	0,13 ($\pm 0,01$)	0,14 ($\pm 0,01$)	0,35 ($\pm 0,01$)
	4	3.000	4,42 ($\pm 0,08$)	4,32 ($\pm 0,08$)	4,33 ($\pm 0,08$)	7,06 ($\pm 0,09$)
		5.000	0,10 ($\pm 0,01$)	0,10 ($< 0,01$)	0,09 ($< 0,01$)	1,02 ($\pm 0,04$)
		7.000	0,09 ($< 0,01$)	0,10 ($< 0,01$)	0,10 ($\pm 0,01$)	0,36 ($\pm 0,01$)
		10.000	0,09 ($< 0,01$)	0,09 ($< 0,01$)	0,10 ($< 0,01$)	0,28 ($\pm 0,01$)
Pontos	1	3.000	22,67 ($\pm 0,09$)	22,60 ($\pm 0,11$)	22,70 ($\pm 0,07$)	25,22 ($\pm 0,10$)
		5.000	15,62 ($\pm 0,07$)	15,56 ($\pm 0,07$)	15,43 ($\pm 0,07$)	17,23 ($\pm 0,07$)
		7.000	11,55 ($\pm 0,07$)	11,28 ($\pm 0,06$)	11,12 ($\pm 0,04$)	12,13 ($\pm 0,07$)
		10.000	7,44 ($\pm 0,04$)	7,43 ($\pm 0,04$)	7,42 ($\pm 0,04$)	7,65 ($\pm 0,06$)
	2	3.000	8,51 ($\pm 0,07$)	8,36 ($\pm 0,12$)	8,45 ($\pm 0,09$)	12,75 ($\pm 0,11$)
		5.000	3,01 ($\pm 0,02$)	3,01 ($\pm 0,02$)	3,02 ($\pm 0,01$)	5,40 ($\pm 0,06$)
		7.000	2,39 ($\pm 0,01$)	2,37 ($\pm 0,02$)	2,37 ($\pm 0,01$)	3,21 ($\pm 0,03$)
		10.000	1,88 ($\pm 0,01$)	1,87 ($\pm 0,01$)	1,88 ($\pm 0,01$)	2,40 ($\pm 0,02$)
	3	3.000	5,81 ($\pm 0,06$)	5,84 ($\pm 0,07$)	5,74 ($\pm 0,06$)	10,75 ($\pm 0,11$)
		5.000	0,86 ($\pm 0,01$)	0,86 ($\pm 0,01$)	0,89 ($\pm 0,01$)	3,18 ($\pm 0,08$)
		7.000	0,44 ($\pm 0,01$)	0,42 ($\pm 0,01$)	0,44 ($\pm 0,01$)	1,20 ($\pm 0,03$)
		10.000	0,13 ($\pm 0,01$)	0,13 ($< 0,01$)	0,14 ($\pm 0,01$)	0,67 ($\pm 0,02$)
	4	3.000	4,34 ($\pm 0,06$)	4,24 ($\pm 0,07$)	4,40 ($\pm 0,08$)	9,40 ($\pm 0,11$)
		5.000	0,10 ($< 0,01$)	0,11 ($< 0,01$)	0,12 ($\pm 0,01$)	2,52 ($\pm 0,06$)
		7.000	0,10 ($< 0,01$)	0,10 ($< 0,01$)	0,11 ($< 0,01$)	0,89 ($\pm 0,03$)
		10.000	0,09 ($< 0,01$)	0,10 ($< 0,01$)	0,10 ($< 0,01$)	0,57 ($\pm 0,02$)