

ECOLOGIA DA PAISAGEM E CONTROLE DE PRAGAS AGRÍCOLAS

ADRIANO GOMES GARCIA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para a obtenção do título de Mestre em Biometria.

BOTUCATU
São Paulo - Brasil
Fevereiro – 2014

ECOLOGIA DA PAISAGEM E CONTROLE DE PRAGAS AGRÍCOLAS

ADRIANO GOMES GARCIA

Orientador: Prof. Dr. **Paulo Fernando de Arruda Mancera**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para a obtenção do título de Mestre em Biometria.

BOTUCATU
São Paulo - Brasil
Fevereiro – 2014

Dedicatória

Dedico este trabalho a todas os seres vivos que o tornaram possível.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, acima de tudo, por ter me dado forças em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis. Muitas vezes eu pensei em desistir, mas com Ele ao meu lado, sempre me ergui novamente.

Agradeço aos meus pais Carlos e Giselda e à minha irmã Débora. Vocês me acompanharam durante toda a minha trajetória, sempre me fornecendo o apoio que precisei para chegar onde cheguei. Dessa forma, todas minhas conquistas são suas também! Sem vocês, eu não seria nada!

Agradeço às minhas companheirinhas peludas, Grega, Kirara e Chica Suzy, que apesar de estarem longe, sempre me receberam com um latido e um miado de boas vindas como se eu fosse a pessoa mais importante do mundo para elas. Obrigado por me fazerem esquecer os momentos difíceis com sua inocência.

Agradeço ao meu amor da vida, Josemeri. Você esteve comigo quando a trilha era mais espinhosa durante esse mestrado. Compartilhamos lágrimas, sorrisos, momentos felizes e tristes. Eu não poderia ter acertado mais ao encontrar alguém tão especial! Obrigado por me auxiliar não só durante todo o projeto, como também em todas as minhas decisões e desafios!

Agradeço à professora Cláudia Pio Ferreira por todo o suporte, conselhos, conversas e ensinamentos durante esses dois anos. Obrigado por me apoiar quando eu precisava, por sempre acreditar em mim e ser um exemplo de profissional na minha vida acadêmica. Obrigado também por fazer esse trabalho se tornar realidade.

Agradeço ao meu orientador e amigo Paulo Fernando de Arruda Mancera. Obrigado por aceitar me orientar quando eu estava em um momento difícil, pelas conversas e pelas piadas que deixaram meus dias muito mais felizes.

Agradeço ao professor Carlos Roberto Padovani pelos conselhos, por me passar um pouco da sua experiência e me ensinar como agir em várias situações adversas. Guardarei para sempre suas palavras, “Não suje suas mãos”, para agir de forma sábia no futuro.

Agradeço à professora Luzia Aparecida Trinca, que foi uma grande colaboradora para que parte do meu mestrado fosse realizado no exterior, por sempre me apoiar e se preocupar comigo mesmo quando estava longe.

Agradeço ao professor Andrew Mead por trabalhar comigo durante parte do meu mestrado. No período em que permaneci na Universidade de Warwick sob sua supervisão, adquiri muitos conhecimentos, que me tornaram um melhor profissional.

Agradeço aos professores Wesley de Augusto Conde Godoy e Fernando Consoli por todo o suporte que deram a esse trabalho e pela oportunidade de participar de um projeto tão fantástico e que tem dado tantos belos frutos como esse.

Agradeço à minha banca por ter aceitado o convite.

Agradeço a todos funcionários do departamento de Bioestatística por me auxiliarem direta ou indiretamente, em especial, a dona Selda, que sempre manteve o ambiente adequado para que todos do departamento trabalhassem, inclusive eu.

Agradeço ao meu amigo Paulo Victor, que mesmo longe, sempre esteve torcendo por mim. Obrigado por todas as conversas, risadas, e por me lembrar que eu sempre terei um amigo de verdade para contar.

Por fim, agradeço à CAPES pelo financiamento.

Sumário

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
SUMMARY	xiv
1 INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Métodos culturais de controle	3
1.3 O inseto <i>Diabrotica speciosa</i>	7
1.4 Modelos matemáticos para o estudo de controle de pragas	10
2 AUTÔMATO CELULAR	13
3 METODOLOGIA	19
3.1 Base de dados	19
3.2 Medida de similaridade	19
3.3 Modelo proposto	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Medida de similaridade	25
4.2 Análise de sensibilidade	26
4.3 Modelos de autômatos celulares	31

	viii
5 CONCLUSÕES	41
5.1 Trabalhos futuros	41
REFERÊNCIAS	43

Lista de Figuras

	Página
1 Técnicas de manejo de um programa integrado para controle de pragas	5
2 Diferentes fases da <i>Diabrotica speciosa</i>	8
3 Tipos de vizinhança mais comuns em modelos de autômatos	14
4 Exemplo de condição de contorno periódica	15
5 Exemplo de condição de contorno reflexiva	16
6 Exemplo de condição de contorno fixa	16
7 Exemplo de um modelo de autômato celular	18
8 Representação do arranjo da paisagem utilizado nas simulações, visto de cima.	23
9 Paisagens com diferentes proporções e posições do cultivo inserido.	24
10 Evolução temporal da densidade populacional para cada estágio de vida quando os valores do parâmetro “oviposição” são variados.	27
11 Evolução temporal da densidade populacional para cada estágio de vida quando os valores do parâmetros “mortalidade larval” são variados.	28
12 Evolução temporal da densidade populacional ao longo do tempo para cada estágio de vida quando os valores do parâmetro “desenvolvimento larva- adulto” são variados.	29
13 Evolução temporal da densidade populacional para cada estágio de vida quando os valores do parâmetro “mortalidade adulta são variados”.	30
14 Densidade populacional em cada uma das faixas do plantio dos consórcios. .	32
15 Evolução temporal da distância média percorrida pela população de insetos. .	35
16 Padrão espacial da população de larvas na paisagem simulada.	36

17	Evolução temporal da distância média atingida em diferentes proporções na combinação feijão-milho.	38
18	Padrão espacial da população de larvas.	39

Lista de Tabelas

	Página
1	Valores dos parâmetros biológicos do inseto <i>Diabrotica speciosa</i> utilizados no modelo 20
2	Distâncias calculadas entre os diferentes hospedeiros da praga <i>D.speciosa</i> . . . 25

ECOLOGIA DA PAISAGEM E CONTROLE DE PRAGAS AGRÍCOLAS

Autor: ADRIANO GOMES GARCIA

Orientador: Prof. Dr. PAULO FERNANDO DE ARRUDA MANCERA

RESUMO

A crescente preocupação envolvendo o impacto ambiental associado a produtos químicos utilizados para o controle de insetos-pragas tem motivado estudos de métodos alternativos de controle, dentre eles, a manipulação de *habitat*. Neste sentido, a utilização de consórcios agrícolas, que se baseiam no aproveitamento de um mesmo terreno por culturas diferentes, pode ser vista como uma alternativa de controle de menor impacto. Uma praga de grande importância é o besouro *Diabrotica speciosa*, que ataca diferentes cultivos como feijão, soja e milho. Contudo, a sobrevivência, a fecundidade e o desenvolvimento variam diferentemente em cada um destes hospedeiros para cada fase da vida do inseto. Por exemplo, a fase larval possui valores maiores para as taxas de crescimento e sobrevivência quando está associada a raízes de milho, enquanto a fase adulta possui valores maiores para as taxas de sobrevivência e reprodução quando associada à parte aérea de cultivos de feijão ou soja. Dessa forma, torna-se importante estudar se a combinação desses cultivos em um consórcio poderia ser capaz de controlar a praga, visto

que eles podem prejudicar ou beneficiar o inseto, dependendo da fase em que ele se encontra. A partir da importância da *D. speciosa* como praga e da necessidade de medidas alternativas de controle que possuam um melhor resultado econômico e ambiental, este trabalho objetivou estudar um controle baseado na manipulação da paisagem através da utilização de modelos matemáticos e computacionais de autômatos celulares. Utilizaram-se quatro cultivos (batata, milho, feijão e soja) como *habitats* para o inseto, simulando-se diferentes combinações, dois a dois, de plantio em faixas entre eles. Nas simulações, a paisagem permaneceu inalterada ao longo do tempo. Os resultados mostraram que a amplitude de oscilações na densidade populacional do inseto, ao se dispersar pela paisagem, foi proporcional à dissimilaridade dos cultivos. Para o cálculo da similaridade entre os cultivos, utilizou-se a distância de Canberra. Os consórcios em que o milho estava inserido foram os mais efetivos no controle da população, tornando-se interessante um estudo em campo dessas combinações. A partir desse resultado, foram estudadas outras variáveis que poderiam influenciar na efetividade do controle, como a proporção e a posição em que as faixas de milho eram inseridas no plantio. O arranjo se mostrou mais eficaz quando as faixas estavam concentradas próximas ao ponto inicial de invasão do inseto-praga. Finalmente, a análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros mostrou que a taxa de oviposição é o parâmetro que mais influencia a dinâmica espaço-temporal do inseto.

LANDSCAPE ECOLOGY AND AGRICULTURAL PEST CONTROL

Author: ADRIANO GOMES GARCIA

Adviser: Prof. Dr. PAULO FERNANDO DE ARRUDA MANCERA

SUMMARY

The growing concern about the impact of chemicals on the environment has motivated the search for alternative control methods including landscape management. In this sense, habitat management characterized by the crop spatial rearrangement may be viewed as an alternative tool to enhance biological control with less impact. The beetle *Diabrotica speciosa* has a great importance as a pest, since it is associated with a wide range of host plants including common bean, soybean and corn. However, its immature and adult stages exploit different host plants to achieve its best survival and reproduction fitness. As an example, larva death rate is higher on soybean than on corn, meanwhile adult death rate is higher on corn than on soybean. Therefore it has become interesting to study if combinations between these hosts could be able in controlling the pest, since they can either enhance or harm the insect population depending on its life stage. Based on the importance of *D.speciosa* as a pest and the search for control methods to achieve better environmental and economical results, we aimed to use a cellular automata in order

to investigate habitat management to control *D.speciosa*. We alternated the mosaic arrangements of agricultural landscapes assuming the existence of four different types of crops (bean, soybean, potato and corn) as habitat for the insect, simulating different spatial combinations of strip cropping between two crops. In each automata site, landscape remains unaltered over time. Our results showed that amplitude of oscillations in population density per strip when crops are combined gets higher the less similar are the crops. We used Canberra distance to calculate similarity. The combinations, in which corn strips were inserted, presented the most effective in controlling the pest population, therefore it is interesting to study these combinations in field. From this result we studied other variables that could influence on results like rows proportion and position in the landscape since arrangement was better when rows were concentrated close to the initial point of invasion. Finally sensitive analysis of model to the parameters showed that oviposition rate is the most influent on spatiotemporal dynamic of insect population.

1 INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA

O controle de pragas baseado em métodos químicos vem sendo amplamente questionado devido, principalmente, ao seu uso abusivo e desordenado, o que tem gerado várias consequências negativas que afetam o ser humano e outras espécies. Dentre as consequências que podem ser citadas, destacam-se o aparecimento de resistência em populações de pragas, a ressurgência de pragas, efeitos adversos sobre inimigos naturais e efeitos tóxicos sobre os alimentos consumidos pela população humana. Impulsionado por essas questões, surgiu o conceito de manejo integrado de pragas, o qual busca uma estratégia fundamentada em bases ecológicas, de forma que o controle por agentes biológicos naturais seja maximizado, minimizando a utilização do químico. Com base neste conceito, o uso de inseticidas deve ser regulado, em combinação com outros tipos de controle, de forma que a aplicação deste no cultivo seja reduzido (Gallo et al., 2002).

Atualmente, uma das pragas de maior interesse de controle na América Latina é a *Diabrotica speciosa*, um inseto que pertence à ordem Coleoptera e ataca diversos hospedeiros agrícolas, tais como milho, soja, batata e feijão (Avila & Parra, 2002). Uma peculiaridade dessa praga é a alternância de hospedeiros durante as diferentes fases de vida, buscando maximizar sua sobrevivência e reprodução. Tal característica já foi estudada e quantificada por Avila & Parra (2002), que estimaram valores para quatro parâmetros biológicos relacionados à espécie (oviposição, mortalidade larval e adulta, e desenvolvimento larva-adulto) para quatro diferentes hospedeiros (milho, feijão, batata e soja). Este estudo apontou que há uma significativa diferença de preferência de hospedeiros entre a fase larval e a fase adulta, de forma que um cultivo que foi benéfico ao

crescimento na fase larval pode ser prejudicial para a fase adulta e vice-versa.

Como o hospedeiro possui elevada influência sobre a população de *D. speciosa*, um possível método de controle alternativo poderia ser baseado na manipulação da paisagem, estabelecendo-se um consórcio agrícola entre dois diferentes cultivos, os quais influenciariam de maneira diferente a população de pragas. Consórcios agrícolas são combinações na mesma área de plantio de diferentes cultivos agrícolas, possuindo, como principais vantagens, a redução do risco de pragas, a melhor ciclagem de nutrientes e a diversificação da fonte de renda do produtor (Schreiner & Baggio, 1984). Por meio desse método, o produtor consegue manter a produtividade na área e diversificar os cultivos produzidos à medida que estabelece um controle de baixo impacto ambiental sobre a praga. Controles baseados na manipulação da paisagem agrícola, na qual são inseridos hospedeiros desfavoráveis a uma espécie-praga, já foram estudado por Spencer et al. (2003) e Skirvin et al. (2011), sendo que o último trabalhou com o controle de uma praga de mesmo gênero da *D. speciosa*, a *Diabrotica virgifera*, utilizando a rotação de culturas.

Motivando-se na importância da *D. speciosa* como praga agrícola, na influência de diferentes hospedeiros ao longo de seu ciclo de vida e na busca de formas alternativas de controle que sejam menos impactante ao meio ambiente, esta pesquisa realizou um estudo teórico, baseado em modelos de autômatos celulares, do efeito de um controle baseado na manipulação do *habitat* sobre a população deste inseto-praga. O trabalho foi dividido da seguinte forma: na subseção 1.1, são definidos os objetivos; nas subseções 1.2 a 1.4, há uma revisão da literatura relacionada à praga *D. speciosa* e a possíveis metodologias de controle; na seção 2, são apresentados os conceitos teóricos de modelos de autômatos celulares; na seção 3, é apresentada a metodologia que foi seguida para a elaboração dos modelos; na seção 4, são apresentados os resultados obtidos das simulações realizadas, seguidos de uma discussão baseada na similaridade entre os cultivos, na análise de sensibilidade do modelo e na ecologia da espécie. Por fim, na seção 5, é realizada a conclusão.

1.1 Objetivos

Objetivou-se a elaboração de modelos de autômatos celulares para estudar a dinâmica espaço-temporal da população de *Diabrotica speciosa* em diferentes paisagens de consórcio agrícola, alternando-se quatro hospedeiros (milho, feijão, batata e soja), dois a dois, em faixas, para cada paisagem. Foram realizadas simulações computacionais, com base nesses modelos, para identificar o cultivo mais prejudicial ao crescimento e à dispersão populacional da praga, quando inserido em um consórcio agrícola. Os resultados das simulações também foram utilizados para identificar o arranjo e a proporção desse cultivo na paisagem que proporciona a maior eficiência no controle da praga. Adicionalmente, foi feita uma análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros para identificar aqueles que eram mais relevantes.

1.2 Métodos culturais de controle

O estabelecimento das atividades agrícolas pelo homem criou um ambiente propício ao rápido desenvolvimento de algumas espécies de inseto, que se tornaram pragas agrícolas à medida que cultivos mais produtivos foram selecionados, barreiras geográficas foram quebradas e a biodiversidade reduzida pelos monocultivos, criando uma situação de oferta abundante de alimento em condições ambientais favoráveis (Waquil, 2013).

Inicialmente, o ser humano procurou medidas naturais de controle, utilizando até mesmo métodos manuais (Waquil, 2013). Ao longo dos anos, substâncias químicas começaram a ser testadas para o controle de insetos. Um marco histórico para o controle químico foi a utilização de organossintéticos como o DDT (dichlorodiphenyltrichloroethane), o qual causa a abertura de canais de íons de sódio em neurônios, levando a espasmos e eventual morte. Seu uso indiscriminado na agricultura selecionou populações de insetos resistentes, causou impactos ambientais e na saúde humana e levou muitos países a banirem sua utilização a partir de 1970, como Hungria, Noruega, Suécia, Alemanha e Estados Unidos (D'Amato et al., 2002).

Nos últimos anos, o controle químico tem deixado de ser aplicado sistema-

ticamente em culturas. A aplicação baseada apenas no poder residual dos inseticidas tem sido evitada, quando não considerado o nível de prejuízo econômico atingido, pois essa prática gerou muitos problemas, como a seleção de populações resistentes a pesticidas, o aparecimento de pragas secundárias e efeitos tóxicos sobre o homem e sobre espécies que poderiam atuar como inimigos naturais (Gallo et al., 2002). A crescente preocupação com o impacto dos químicos sobre o meio ambiente e o desenvolvimento de resistência nas populações das pragas têm motivado biólogos e agrônomos na procura por métodos de controle alternativos, incluindo os culturais, que visam a manutenção da paisagem de um modo que ela se torne desfavorável ao inseto.

A partir dessa motivação, surgiu o conceito de Manejo Integrado de Pragas (MIP) para designar um novo conceito de controle, baseando-se em conhecimentos ecológicos e multidisciplinares (entomologia, fisiologia vegetal, matemática, computação, dentre outros) para a tomada de decisões relacionadas à escolha do tipo de controle de pragas a ser aplicado. Cada controle é estudado, considerando-se seus efeitos negativos sobre o meio social, ambiental e econômico à medida que são maximizados os agentes naturais de controle do meio físico e biológico. Nesse contexto, diferentes métodos de controle podem ser aplicados com o controle químico, de forma que a praga seja mantida abaixo do nível econômico (Gallo et al., 2002). A Figura 1 exemplifica algumas medidas de controle utilizadas no MIP.

De particular interesse para este trabalho é a manipulação do ambiente, a qual utiliza a composição da paisagem para desfavorecer a praga. Dentro do MIP, essa técnica pode estar associado a um controle químico, no qual os cultivos selecionados para plantio e a forma como eles estão inseridos na paisagem afetam a suscetibilidade do inseto ao inseticida; ou associado a um controle biológico, no qual o arranjo da paisagem beneficia predadores naturais ou prejudica diretamente a praga a ser controlada.

A manipulação do ambiente baseia-se em conhecimentos ecológicos e biológicos da praga e dentre os mais comuns, podem ser citados (Gallo et al., 2002):

- rotação de culturas: consiste na alternância de diferentes plantios em anos sucessivos, de forma que um deles não seja hospedeiro da praga, o que em consequência

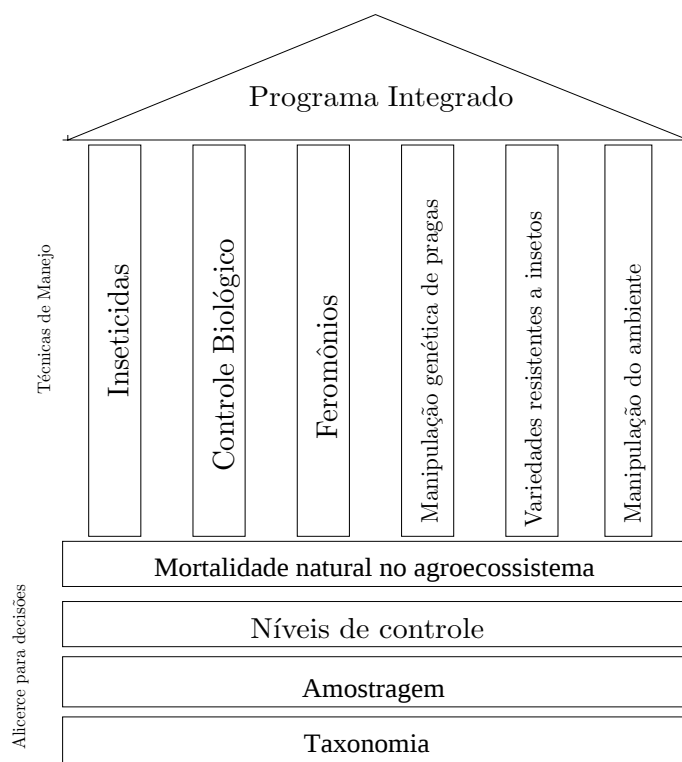


Figura 1: Técnicas de manejo de um programa integrado para controle de pragas (Gallo et al., 2002).

reduz a população dela.

- aração do solo: expõe larvas e pupas de insetos que vivem no solo a raios solares e a implementos agrícolas.
- época de plantio e colheita: antecipação ou atraso do plantio ou da colheita, de forma que o período de presença do cultivo não coincida com o período de presença do inseto.
- cultura no limpo: limpeza do terreno, de forma que a presença de mato próximo à cultura não favoreça certas pragas.
- plantio direto: técnica que elimina os métodos convencionais de preparo de solo, alterando o *habitat* das comunidades do ambiente criado pelo sistema convencional de plantio.

Estudando a técnica de manipulação de ambiente, Cottrel & Yeargan (1998) avaliaram a presença de uma planta da família das *Euphorbiaceae* em uma cultura de milho e verificaram que a presença desse cultivo favoreceu a população de joaninhas *Coleomegilla maculata*, a qual é predadora natural dos ovos da lagarta da espiga. Plantas floríferas silvestres, quando cultivadas em faixas em um plantio, podem aumentar o nível populacional de inimigos naturais das pragas, proporcionando recursos alimentares para seu crescimento (Pfiffner et al., 2003), desde que se considerem a seleção de espécies adequadas para o benefício do inimigo natural, o conhecimento biológico prévio do predador ou do parasitóide e os possíveis aspectos negativos que a inserção do novo plantio pode causar no cultivo como um todo (Gallo et al., 2002).

Frank (1999) também observou que a inserção de plantas silvestres, como por exemplo, *Artemisia vulgaris* em culturas de alface, induziu um aumento na população de joaninhas, inimigos naturais de pulgões. Em um trabalho semelhante, Skirvin et al. (2011) estudaram um cultivo em faixas alternadas de alface e plantas silvestres, verificando que a presença destas plantas poderia ser favorável ao estabelecimento de inimigos naturais de pulgões durante alguns meses do ano.

Hossain et al. (2002) cultivaram *Medicago sativa* em faixas, coletando apenas metade delas, para criar um ambiente de refúgio para inimigos naturais da praga. Um estudo realizado por Medeiros et al. (2009) demonstrou que a inserção de cultivos de coentro e botão-de-ouro em cultivos de tomate levou a uma diminuição da abundância de pragas e a um aumento no número de predadores.

Como pode ser visto, a literatura aborda a manipulação do *habitat* para a promoção de um controle biológico que beneficie o crescimento da população de inimigos naturais. Contudo, poucos são os estudos sobre os efeitos diretos da manipulação do *habitat*, em particular, a modificação dos valores dos parâmetros biológicos de uma espécie de praga devido à inserção de diferentes tipos de cultivo em um plantio. Uma pesquisa que pode ser citada é Staudacher et al. (2013), que apresentou um estudo sobre como faixas intercaladas de trigo em culturas de milho podem controlar a população de larvas de *D. speciosa*. Visto que é muito difícil realizar experimentos para se estudarem esses efeitos,

além de demandarem um intervalo de tempo muito grande, torna-se necessário a utilização de ferramentas matemáticas e computacionais que permitam simular os estudos de caso desejados.

1.3 O inseto *Diabrotica speciosa*

O gênero *Diabrotica* faz parte da ordem Coleoptera, sendo dividido em três grupos: *signifera*, *virgifera* e *fucata*. Enquanto o primeiro é pouco conhecido, os membros dos outros dois grupos constituem algumas das principais inseto-pragas das Américas. O grupo *virgifera* ocorre na região Neoártica do México, causando prejuízos em lavouras de milho. O grupo *fucata* ocupa tanto a região Neoártica como a Neotropical, contendo membros polífagos na fase larval e adulta (Nardi, 2010). Um dos representantes mais famosos do grupo *fucata* é a *Diabrotica speciosa* devido à sua abundância e danos para a agricultura (Figura 2).

D. speciosa é uma espécie fitófaga que ocorre em diversos países da América do Sul, causando grandes prejuízos agrícolas. Está associada a diferentes tipos de cultivos, incluindo feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e milho (*Zea mays* L.) (Avila & Parra, 2002). Os adultos da espécie são de coloração verde-amarelada (por isso são chamadas também de “vaquinha verde-amarela”) e podem se alimentar de flores, frutos e folhas, causando impacto direto sobre a planta ao reduzir o tecido vegetal, ou indireto ao transmitir patógenos. As larvas são esbranquecidas, atingindo por volta de 8,5 mm de comprimento, e se desenvolvem próximas a plantas de milho e batata, alimentando-se das raízes e prejudicando seu desenvolvimento. Algumas larvas podem atacar a raiz adventícia, fazendo a planta ficar recurvada, sintoma da doença conhecida como “pescoço de pato”. Nesta fase, o inseto apresenta baixa mobilidade, o que faz com que ele fique altamente concentrado ao redor das raízes (Margolus, 1987; Viana, 2010).

A dispersão local da *D. speciosa* ocorre por meio de voos na fase adulta, enquanto a fase de larva possui baixa capacidade de dispersão, podendo ser transportada pela contaminação de veículos agrícolas. No caso da dispersão à longa distância, adultos



Figura 2: Diferentes fases da *Diabrotica speciosa* (Cruz, 2013).

podem estar associados a plantas hospedeiras que são replantadas em outra localidade (Viana, 2010).

O controle de *D. speciosa* é realizado, principalmente, por meio de métodos químicos, tanto para adultos quanto para larvas. Algumas plantas do grupo das curcubitáceas são utilizadas em conjunto com o controle químico, de forma que elas agem como estimulantes alimentares, levando os indivíduos a se alimentarem de plantas contendo inseticidas (Deheer & Pereira, 1991). Esses procedimentos, porém, são limitados para serem aplicados em grandes áreas, e o controle da fase larval apresenta grande dificuldade, o que

leva à procura de métodos alternativos. Nos Estados Unidos e Europa, tem-se utilizado um controle comportamental, envolvendo atrativos químicos para promover a captura de machos e fêmeas e repelentes para interferir na migração de fêmeas grávidas no cultivo. No Brasil, um controle comportamental com uso de um feromônio produzido pelas fêmeas sobre os machos foi estudado por Nardi (2010). Os extratos de algumas plantas como a *Cyperos rotundus* (tiririca) vêm sendo utilizado para o controle em sistemas agroecológicos, pois eles contêm substâncias inseticidas e repelentes, que induzem respostas induzidas de defesa no hospedeiro (Barbosa et al., 2007). O controle biológico é citado por Viana (2010) como uma tática de controle promissora, porém os trabalhos ainda são escassos. Alguns inimigos naturais são *Celatori bosqi*, pertencente à ordem Diptera, e *Centistes gaseni*, pertencente à ordem Hymenoptera (Salvadori et al., 2004). O controle da fase larval, por meio de fungos hifomicetos, também tem sido visto como promissor (Consolo et al., 2012).

D. speciosa é suscetível às toxinas produzidas pela bactéria *Bacillus thuringiensis*, o que indica que a praga também pode ser controlada por meio de cultivos de milho transgênico *bt*, que possuem genes da *B. thuringiensis* (Teixeira & Franco, 2007). Para a safra de 2013/2014, a empresa Monsanto está lançando a variedade de milho VT PRO 3 RIB no mercado, a qual utiliza genes da bactéria para produzir uma proteína que ataca especificamente a larva da praga (Monsanto-Brasil, 2013).

Um método de particular interesse nesta dissertação é a manipulação de *habitat* através do estabelecimento de consórcios entre cultivos em faixas alternadas (Skirvin et al., 2011). Por exemplo, em um cultivo em faixas alternadas, o arranjo pode garantir que sempre após uma faixa de cultivo suscetível à praga, há um cultivo não-suscetível, de forma que a população seja controlada pela disposição de cultivos suscetíveis e não-suscetíveis.

Além disso, muitos cultivos inseridos em um consórcio podem aumentar o número de inimigos naturais da praga, provendo comida e abrigo. Frequentemente, este tipo de controle é utilizado em algumas regiões do Brasil. Um sistema de rotação de culturas, com inserção de milho em cultivos de soja, tem-se mostrado eficaz, e o uso de in-

seticidas só ocorre quando *D. speciosa* é de difícil controle por esta técnica (OEPP/EPPO, 2005). Esta metodologia é possível, pois, apesar de ser uma praga polifágica, o potencial de sobrevivência, reprodução e desenvolvimento de *D. speciosa*, ao se alimentar em cada um dos cultivos é diferente. Por exemplo, a fase larval possui valores maiores de crescimento e sobrevivência quando ela está associada a raízes de milho, enquanto a fase adulta possui valores maiores de sobrevivência e reprodução quando associada à parte aérea de cultivos de feijão ou soja. Enquanto a mortalidade larval é aproximadamente 4 vezes maior em cultivos de soja que em cultivos de milho, a mortalidade de adultos é 1,3 maior em cultivos de milho do que em cultivos de soja (Avila & Parra, 2002).

Uma questão importante que surge a partir do estudo desse tipo de controle é como a estrutura espacial, associada à ecologia nutricional, afeta a população de insetos. O desenvolvimento de modelos matemáticos que incluem fatores espaciais e parâmetros ecológicos relacionados ao ciclo de desenvolvimento do inseto-praga podem fornecer um direcionamento sobre como esse tipo de controle pode ser aplicado em campo. Há um crescente interesse em estudos teóricos para problemas semelhantes, envolvendo os efeitos da heterogeneidade da paisagem sobre populações biológicas, estimulando o desenvolvimento de modelos matemáticos que levam em consideração a diversidade espacial (Hiebeler, 2004). A subseção 1.4 apresentará alguns dos modelos desenvolvidos no estudo do controle de pragas na literatura, dentre eles, aqueles que permitem que se trabalhe com a espacialidade.

1.4 Modelos matemáticos para o estudo de controle de pragas

O interesse em estudos envolvendo modelos matemáticos relacionados à dinâmica de pragas remete-se a meados da década de 1950, motivado pelo surgimento do conceito do manejo integrado de pragas (Stern et al., 1959). A modelagem começou a ter importante função no processo de escolha da estratégia de manejo que garantisse o melhor resultado ambiental e econômico. Dentro deste contexto, Stern et al. (1970) elaboraram um modelo matemático, utilizando técnicas de otimização para definir quando, com que frequência e com que intensidade, um controle químico deve ser utilizado. Com base neste

trabalho, Chatterjee (1973) adicionou um fator que permitia a variação da intensidade do controle ao longo da aplicação, além de levar em consideração os custos da administração, o impacto ambiental e os efeitos residuais. Envolvendo as tomadas de decisão dentro do manejo integrado de pragas, Norton (1976) ressaltou o importante papel de modelos matemáticos no auxílio à escolha das estratégias a serem adotadas. Bertsekas (1976) porém, afirmou que os modelos matemáticos de tomada de decisão encontram dificuldades relacionadas à estocasticidade e à natureza incerta do problema trabalhado. Segundo ele, a estocasticidade estava relacionada aos elevados ganhos e riscos, a curto prazo, que a não utilização de pesticidas pode acarretar. Por exemplo, seja a situação hipotética em que um produtor, caso aplique pesticidas em sua área de plantio, obterá, com 100% de probabilidade, um lucro de 70 dólares, enquanto se ele não aplicar, poderá obter um lucro de 200 dólares, com probabilidade de 50% ou pode ter prejuízo de 20 dólares, com probabilidade de 50%. Dessa forma, os ganhos ou lucros do produtor estão associados a um fator estocástico, dependentes da escolha feita. Outro exemplo está associado à imprevisibilidade de surtos populacionais da praga, pois muitas delas podem permanecer em baixa densidade durante longos períodos, e alguns fatores ambientais podem desencadear um surto. Há uma probabilidade associada à ocorrência desses surtos e o agricultor deve optar por adotar um controle químico antes que eles ocorram, o que caracteriza uma ação de risco, que pode implicar em acerto ou falha.

Nesse mesmo período, estudos com modelos matemáticos discretos de populações foram desenvolvidos envolvendo o controle de pragas por meio da introdução de machos estéreis com Knipling (1955) e, posteriormente, com Prout (1978), que adicionou um componente de capacidade suporte do ambiente. Esses modelos geraram algumas críticas por serem discretos e não levarem em consideração eventos aleatórios que influenciam no controle de pragas. Esse problema foi resolvido por Costello & Taylor (1975), o qual modificou o modelo de Knipling (1955) para um modelo estocástico, inserindo uma probabilidade, dependente do tempo, de extinção da espécie estudada.

Com o objetivo de fazer previsões sobre a capacidade da população de insetos se tornar resistente devido ao uso de inseticidas, Comins (1977) criou um modelo

logístico para definir a quantidade de pesticida a ser utilizada e a proporção de áreas de refúgio para evitar o surgimento de insetos resistentes, contudo o modelo não considerava a dinâmica dos cultivos ao longo do tempo, o que foi inserido por Gutowitz (1991).

Em relação ao controle envolvendo a manipulação de *habitat*, Picket & Bugg (1998) apresentaram um estudo envolvendo um modelo matemático para entender como a dinâmica da população de inimigos naturais respondia a agroecossistemas diversificados. No mesmo artigo, ressaltou-se a importância da modelagem para simular paisagens com combinações de cultivos, objetivando manipulá-las de forma que as pragas fossem controladas. Okubo (1980) desenvolveu modelos espaço-temporais de *random walk* capazes de prever a presença e a movimentação de um inseto em diferentes arranjos da paisagem agrícola. Uma ideia similar de modelagem também foi utilizada por Ludwig et al. (1979) com modelos de difusão para explorar como diferentes padrões florestais influenciam a dinâmica populacional da lagarta *Choristoneura fumiferana*.

Uma alternativa para a modelagem do controle de pragas por meio da modificação do *habitat* é a utilização de autômatos celulares. Autômatos celulares são modelos matemáticos dinâmicos, com tempo, espaço e variáveis discretas, compostos por uma malha de células que podem assumir um número finito de estados. A escolha de modelos de autômato celular é interessante, porque os estados das células podem indicar presença ou ausência de diferentes fases da vida do inseto-praga em dada localização espacial. Este estado pode se alterar ao longo do tempo por meio de regras estocásticas simples que representam oviposição ou desenvolvimento larva-adulto, por exemplo. A capacidade de dispersão da espécie também pode ser representada com a utilização desse tipo de modelagem. Adicionalmente, todas as características espaciais da área agrícola podem ser detalhadas dentro do modelo, de forma que elas influenciem no comportamento e sobrevivência da população.

2 AUTÔMATO CELULAR

Autômatos celulares são sistemas dinâmicos e discretos, nos quais o espaço é representado por uma rede uniforme com um determinado número de células, cada uma delas associada a dados que a definem (estados das células). O tempo avança em passos discretos e o estado de cada célula pode se alterar a cada passo de tempo, dependendo de regras determinísticas ou estocásticas que são definidas previamente no sistema (Margolus, 1987).

Os componentes básicos de um autômato celular podem ser definidos como uma rede celular que pode assumir um número finito de estados, uma vizinhança de células para cada uma das células constituintes da malha, regras de transição que determinam como as células mudam de um estado para outro em cada passo de tempo e o número de passos de tempo da simulação (Hiebeler, 2004).

As regras dos autômatos celulares são definidas como uma função f em um conjunto finito $Z_k = 0, 1, \dots, k - 1$, que representa as células pertencentes à rede celular. Essas regras devem ser capazes de especificar um valor de saída para cada possível entrada dentro do autômato, de forma que, a cada passo de tempo, são definidos novos estados para as células. O estado de cada célula em qualquer tempo $t + 1$ é, então, determinado por uma função dependente dos estados das células vizinhas e da própria célula no tempo anterior, t . Portanto, para um autômato celular unidimensional tem-se que

$$x_i(t + 1) = f(x_{i-r}(t), \dots, x_i(t), \dots, x_{i+r}(t)),$$

sendo que $x_i(t)$ é o valor da célula i no tempo t , $f : Z_k^{2r+1} \rightarrow Z_k$ é a regra que define o autômato e r é um número inteiro não-negativo que especifica o tamanho da vizinhança da célula (Gutowitz, 1991).

Dentre os tipos de vizinhança mais comuns utilizados, podem ser citadas a vizinhança de Neumann, com $r = 1$ ou $r = 2$, em que são levadas em consideração as direções “norte” $(i, j + 1)$, “leste” $(i + 1, j)$, “oeste” $(i - 1, j)$, “sul” $(i, j - 1)$; e a vizinhança de Moore, com $r = 1$ ou $r = 2$, em que são levadas em consideração todas as direções definidas na vizinhança de Neumann, além de “nordeste” $(i + 1, j + 1)$, “noroeste” $(i - 1, j + 1)$, “sudeste” $(i + 1, j - 1)$ e “sudoeste” $(i - 1, j - 1)$ (Gutowitz, 1991). A Figura 3 ilustra as quatro vizinhanças descritas previamente.

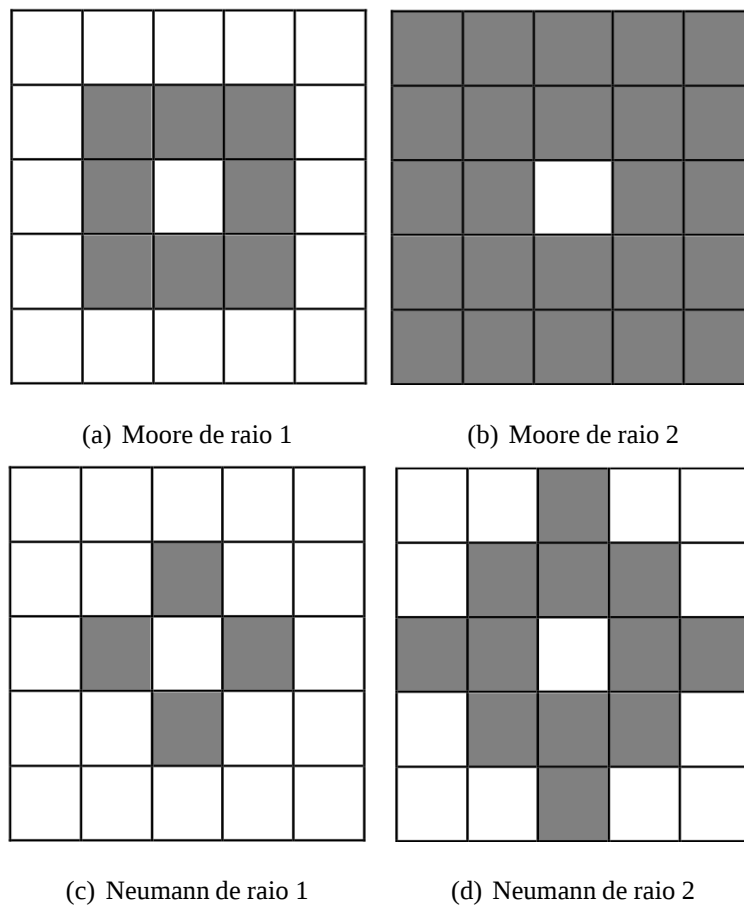


Figura 3: Tipos de vizinhança mais comuns em modelos de autômatos (Gutowitz, 1991).

Visto que se torna impossível representar um espaço com dimensão infinita dentro de um autômato, devem-se adotar limites (condições de fronteira) que especifiquem os vizinhos dos sítios que estão nas bordas da rede (Melotti, 2009). As principais

condições de fronteiras podem ser definidas como:

- periódica: para o autômato unidimensional, essa condição de fronteira é definida de forma que a última célula (C_n) terá a primeira célula (C_1) como vizinha e vice-versa. No autômato bidimensional, as células da primeira linha fazem parte da vizinhança das células da última linha, e as células da primeira coluna fazem parte das vizinhança das células da última coluna (Figura 4).

C22	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C15
C8	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C1
C28	C9							C28	C9
C27	C10							C27	C10
C26	C11							C26	C11
C25	C12							C25	C12
C24	C13							C24	C13
C23	C14							C23	C14
C22	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C15
C8	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C1

Figura 4: Exemplo de condição de contorno periódica para uma vizinhança de Moore.

- reflexiva: é definida quando a condição de contorno reflete o autômato em cada borda. Por exemplo, em um autômato unidimensional com $r=2$, as duas células vizinhas de C_1 serão C_2 e C_1 , e as duas células vizinhas de C_n serão C_{n-1} e C_n . No bidimensional, cada célula da borda é refletida para ser utilizada como o limite do autômato (Figura 5).
- fixa: é definida quando os estados das células na borda são fixados, sendo os mesmos em qualquer instante da simulação (Figura 6).

A atualização da rede pode ser classificada como simultânea ou não-simultânea. Na implementação simultânea, há um “cronômetro” que garante que todas

		C2					C7		
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
C9	C9							C28	C28
	C10							C27	
	C11							C26	
	C12							C25	
	C13							C24	
C14	C14							C23	C23
	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	
		C16					C21		

Figura 5: Exemplo de condição de contorno reflexiva para uma vizinhança de Neumann.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
	C9							C28	
	C10							C27	
	C11							C26	
	C12							C25	
	C13							C24	
	C14							C23	
	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	

Figura 6: Exemplo de condição de contorno fixa para uma vizinhança de Neumann.

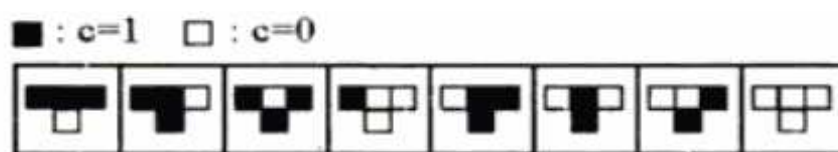
células serão atualizadas ao mesmo tempo, o que ocorre em duas fases. Na primeira fase, um novo estado é calculado para cada célula, baseando-se em sua vizinhança e na regra estabelecida. Na segunda fase do processo, os valores são armazenados e, após todos os novos estados serem calculados, são copiados para as células. No método não-simultâneo,

a variável de tempo não é explicitamente definida, e as mudanças de estado em cada célula são implementadas imediatamente, sem a necessidade de que o processo seja dividido em duas fases. Apesar da atualização simultânea facilitar a programação computacional, pois a quantidade de memória alocada é menor, ela pode não ser realística para representar alguns sistemas vivos em que não há a presença de um “relógio biológico” que garanta a simultaneidade nas transições (Schonfisch & Ross, 1999). Uma observação importante é que em ambos os casos, um passo de tempo corresponde à atualização de todos os sítios da rede, porém no caso não simultâneo, a sequência dos sítios deve ser feita de maneira aleatória.

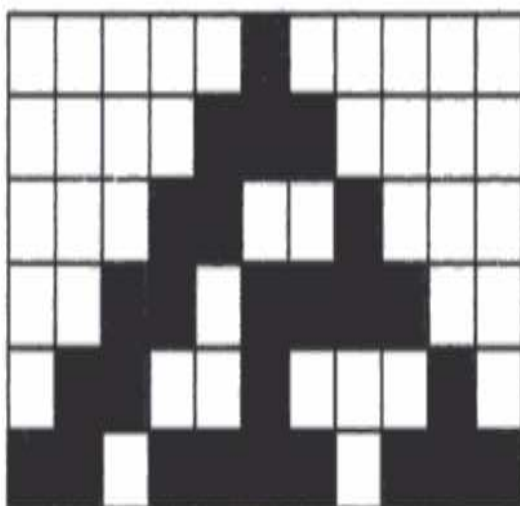
Um último ponto que merece atenção no estudo de autômatos celulares é a condição em que o sistema se encontra no tempo inicial ($t = 0$), pois diferentes configurações podem surgir ao se alterarem as condições iniciais definidas.

Exemplificando a modelagem, seja um autômato celular unidimensional constituído de 300 células, no qual o valor da i -ésima célula no tempo t , denotado por $c_i(t)$, evolui ao longo do tempo, de acordo com uma regra determinística F , que é uma função de $c_i(t)$ e das outras células que estão à esquerda e à direita de $c_i(t)$. Portanto, para cada combinação de três células adjacentes em uma geração, a regra F atribui um valor para a célula central do trio na próxima geração. Os possíveis estados que podem ser atribuídos às células são 0 e 1. A atualização é simultânea e as bordas são fixas e igual a zero. Na Figura 7, são ilustradas as regras utilizadas e a evolução do autômato em micro (b) e macro escala (c). Em $t = 0$, são sorteadas aleatoriamente 50 células, que receberão valor igual a 1. Cada geração é representada por uma linha de células e a evolução é mostrada de cima para baixo.

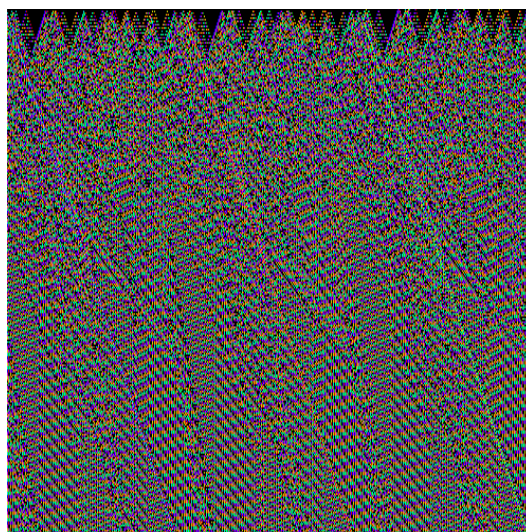
A principal vantagem dos modelos de autômatos celulares, em comparação com modelos de equações diferenciais ordinárias (EDO), é que a heterogeneidade espacial pode ser representada. Modelos baseados em EDO homogeneizam as características da população trabalhada e não consideram o componente espacial. Por outro lado, modelos de autômatos celulares consistem de um conjunto discreto heterogêneo de indivíduos espacialmente distribuídos, cada um com suas próprias características, as quais podem se



(a) Regras



(b) 5 Gerações



(c) 300 Gerações

Figura 7: Exemplo de um modelo de autômato celular (Ilachinski, 2001). A evolução temporal do autômato ocorre de cima para baixo.

alterar ao longo do tempo, e regras que definem seus comportamentos (Ilachinski, 2001).

3 METODOLOGIA

Esta seção está subdividida da seguinte forma: na subseção 3.1, são apresentados os valores dos parâmetros utilizados durante todo o trabalho; na subseção 3.2, é apresentada a metodologia utilizada para o cálculo da métrica de similaridade entre os hospedeiros; e, por fim, na subseção 3.3, é apresentada a forma como o problema foi modelado matematicamente.

3.1 Base de dados

Como base para o desenvolvimento do modelo, utilizaram-se os valores dos parâmetros biológicos de *D.speciosa*, estimados a partir de experimentos laboratoriais, descritos no trabalho de Avila & Parra (2002) para quatro diferentes hospedeiros. Os quatro parâmetros calculados foram “oviposição” (ϕ), “mortalidade larval” (μ), “desenvolvimento larva-adulto” (σ) e “mortalidade adulta” (γ). A Tabela 1 apresenta os valores desses parâmetros.

3.2 Medida de similaridade

Primeiramente, utilizou-se uma métrica matemática para calcular a similaridade entre os cultivos hospedeiros. Desta forma, foi possível basear a discussão dos resultados do modelo na similaridade entre os cultivos combinados no consórcio agrícola, comparando-se os resultados entre paisagens mais homogêneas e mais heterogêneas em relação aos valores dos parâmetros estudados, de forma a verificar se a heterogeneidade da paisagem agrícola favorece o controle da praga. Uma métrica em um conjunto X é uma

Tabela 1: Valores dos parâmetros biológicos do inseto *Diabrotica speciosa* utilizados no modelo (Avila & Parra, 2002). Para todos os parâmetros, a unidade adotada é dia⁻¹.

cultivo	ϕ	μ	σ	γ
batata	0,379	0,005	0,027	0,020
feijão	0,394	0,085	0,036	0,020
milho	0,011	0,011	0,040	0,031
soja	0,056	0,045	0,037	0,020

função

$$d : X \times X \longrightarrow \mathbb{R},$$

que possui as seguintes propriedades:

1. ser definida como não-negativa para todos os elementos x e y , ou seja,

$$d(x, y) \geq 0.$$

2. ser simétrica para todos os elementos x e y , ou seja,

$$d(x, y) = d(y, x).$$

3. obedecer à desigualdade triangular para todos os elementos x , y e z , ou seja,

$$d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z).$$

4. ser nula quando os pontos são coincidentes, ou seja,

$$d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y.$$

Dentre as possíveis métricas a serem calculadas, optou-se pela distância de Canberra. A escolha desta métrica ocorreu por ela ser sensível a dados próximos a zero, sendo, consequentemente, mais sensível à diferença proporcional do que à absoluta.

Visto que os valores apresentados na Tabela 1 estão próximos a zero, esta métrica torna-se apropriada para o atual trabalho.

A distância de Canberra entre dois vetores x e y em uma dimensão p é dada pela equação

$$\delta_{x,y} = \sum_{k=1}^p \frac{|x_k - y_k|}{|x_k| + |y_k|},$$

em que $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ e $y = (y_1, y_2, \dots, y_p)$ (Gower & Legendre, 1986).

3.3 Modelo proposto

Foram definidas duas redes bidimensionais de autômatos celulares, uma correspondente à fase larval (CA1) e a outra à fase adulta (CA2). Cada célula CA1 pode adotar a configuração “presença de larva” (1) ou “ausência de larva” (0), enquanto CA2 pode adotar a configuração “presença de fêmea adulta” (2) ou “ausência de fêmea adulta” (0). A atualização de cada autômato foi simultânea, definindo-se bordas fixas como condições de fronteira. O tamanho das redes foi definido como 256×256 células, sendo que cada célula foi interpretada como $10m \times 10m$, o que representaria uma área de plantio. O tamanho da rede permitiu que fosse verificada a tendência de crescimento populacional, porém evitando problemas relacionados à condição de fronteira. Cada passo de tempo, t , correspondeu a um dia. As regras de atualização são:

1. CA1:

- a) Uma célula pode se tornar vazia, caso a larva morra com probabilidade μ ou sofra metamorfose para a fase adulta com probabilidade σ .
- b) Cada célula ocupada por um adulto em CA2 ovipõe com probabilidade de oviposição igual a ϕ , aleatoriamente, em cada um dos seus 25 vizinhos (incluindo ela mesma) em uma vizinhança de Moore de raio 2 em CA1.

2. CA2:

- a) Uma célula ocupada por uma fêmea adulta pode se tornar vazia, se ela morrer com uma probabilidade igual a γ .

- b) Uma célula vazia em CA2 tem uma probabilidade σ de se tornar ocupada por uma fêmea adulta, se houver uma larva na célula correspondente de CA1, devido ao processo de metamorfose.

Segundo Spencer et al. (2003), os adultos da espécie *Diabrotica virgifera*, de mesmo gênero da *D. speciosa*, podem se locomover de 6 a 17 metros/dia. A difusão no modelo foi implementada a cada passo de tempo, analisando-se a vizinhança de Moore de cada uma das células ocupadas por um adulto em CA2. Uma célula vazia dentro da vizinhança era sorteada aleatoriamente para se tornar ocupada, enquanto a célula anteriormente ocupada se tornava vazia.

Para a análise de sensibilidade das populações estudadas, foi elaborada uma paisagem hipotética, constituída de apenas um cultivo. Os valores de cada um dos parâmetros foram variados dentro de um intervalo baseado em valores reais, enquanto os outros eram mantidos fixos para verificar a sua influência individual sobre a densidade da praga. Para a paisagem hipotética, os seguintes valores foram utilizados (em unidades de dia^{-1}): $\phi = 0,1$; $\mu = 0,05$; $\sigma = 0,04$; $\gamma = 0,02$.

No estudo dos diferentes arranjos de consórcio, realizando as simulações, foram elaborados seis tipos de paisagens, arrançadas como na Figura 8, correspondentes às diferentes combinações possíveis, dois a dois, em faixas alternadas, dos quatro cultivos descritos anteriormente, totalizando dez faixas de cultivo por paisagem simulada. Para cada paisagem, foram realizadas 20 simulações, calculando-se a média entre elas para estudar a evolução temporal da população de insetos. O tempo máximo de simulação foi $t = 200$, o qual permitiu a análise das diferenças entre as dinâmicas populacionais em cada paisagem e garantiu que as populações não atingissem a borda.

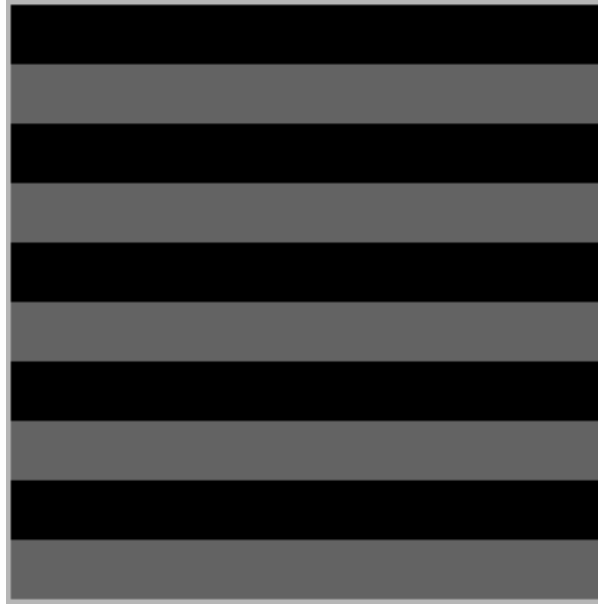


Figura 8: Representação do arranjo da paisagem utilizado nas simulações, visto de cima. As faixas cinzas e pretas correspondem a diferentes cultivos hipotéticos.

Para cada uma das paisagens estudadas, a invasão iniciou-se na célula central da malha de autômatos e, ao final de cada simulação, a densidade populacional média foi calculada em cada uma das faixas, assim como a distância média atingida pela população de insetos a partir do ponto inicial de invasão. A distância média foi calculada por meio do raio de giração. Os componentes R_x e R_y do raio de giração são dados por:

$$\begin{aligned} R_x^2 &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (x_i - x_{cm})^2 \\ R_y^2 &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (y_i - y_{cm})^2, \end{aligned} \tag{1}$$

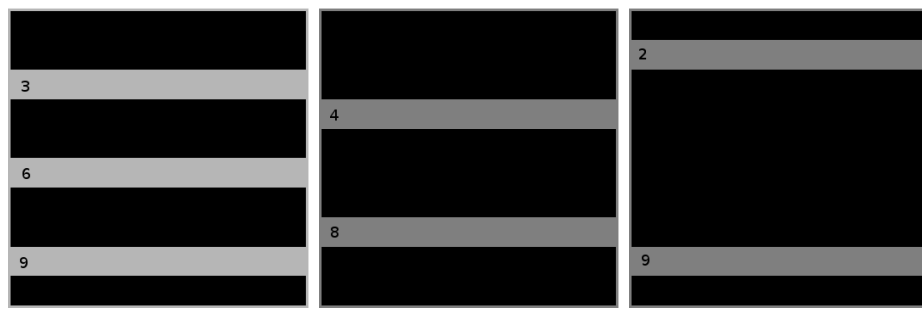
em que p é o número total de células ocupadas, x_i e y_i são os componentes vertical e horizontal, respectivamente, de cada célula ocupada por um inseto; e x_{cm} e y_{cm} são os componentes vertical e horizontal, respectivamente, do centro de massa da nuvem de dispersão de insetos no interior da malha celular. Para a definição do centro de massa, calcularam-se as médias das coordenadas horizontal e vertical para o conjunto de células ocupadas. Após

calculados os componentes, o raio de giração médio é calculado por:

$$R_d = +\sqrt{R_x^2 + R_y^2}. \quad (2)$$

Os resultados das simulações foram analisados em conjunto com as medidas de similaridade calculadas entre os cultivos constituintes dos consórcios, de forma que os padrões entre consórcios mais heterogêneos e homogêneos fossem comparados.

Além das seis combinações propostas, foram simuladas paisagens com diferentes proporções e posições do cultivo que melhor restringiu a população e a dispersão da praga (Figura 9). Como será visto na seção 4, esse cultivo corresponde ao milho. O objetivo foi verificar a diferença entre os resultados obtidos com o uso do consórcio em diferentes situações, porém se mantendo os mesmos hospedeiros.



(a) Proporção 7:3 (b) Proporção 8:2 - caso 1 (c) Proporção 8:2 - caso 2

Figura 9: Paisagens com diferentes proporções e posições do cultivo inserido. As faixas de cor cinza correspondem ao milho, cuja numeração associada indica sua posição na paisagem, enquanto as faixas de cor preta correspondem ao outro cultivo associado no consórcio (feijão).

A paisagem com proporção 7:3 exibe o padrão de sequência de faixas “feijão-feijão-milho”, a paisagem com proporção 8:2 (caso 1), “feijão-feijão-feijão-milho”, e a paisagem com proporção 8:2 (caso 2) não apresenta um padrão, as faixas individuais de plantio de milho ocupam as posições 2 e 9 ao longo das 10 faixas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção está dividida da seguinte forma: na subseção 4.1, são apresentados os resultados obtidos após o cálculo da medida de similaridade, discutindo-se qual arranjo apresentou maior heterogeneidade ambiental; na subseção 4.2, é apresentada a análise de sensibilidade das populações a cada um dos parâmetros do modelo; e, por fim, na subseção 4.3, são apresentados os gráficos de dinâmica populacional da praga dentro das paisagens propostas na modelagem. Os resultados são discutidos com base no que foi obtido na subseções 4.1 e 4.2 .

4.1 Medida de similaridade

Utilizando-se a distância de Canberra, as similaridades entre os cultivos foram calculadas, baseando-se nos valores dos parâmetros do modelo apresentados na Tabela 1. Todas as distâncias calculadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Distâncias calculadas entre os diferentes hospedeiros da praga *D.speciosa*.

-	batata	feijão	milho	soja
batata	0	-	-	-
feijão	1,050	0	-	-
milho	1,752	1,999	0	-
soja	1,703	1,079	1,543	0

Comparando-se as distâncias entre os cultivos, as combinações que geraram as paisagens mais heterogêneas foram milho-feijão e milho-batata. O resultado da

análise motivou uma melhor exploração das combinações entre o milho e os outros cultivos para controlar a população da praga. Vários autores, como Gallo et al. (2002) e Skirvin et al. (2011), afirmam que a heterogeneidade da paisagem pode favorecer mais o ambiente agrícola que uma paisagem homogênea, visto que a heterogeneidade pode transformar a paisagem em mais favorável a inimigos naturais e menos favorável à praga agrícola estudada. Além disso, uma maior diversidade na paisagem agrícola pode atrair um maior número de polinizadores naturais devido à maior oferta de alimento. Embora as distâncias de similaridade não considerem o arranjo espacial dos cultivos e a sensibilidade da população a cada um dos parâmetros, ela fornece uma visão geral das combinações que proporcionam maior e menor heterogeneidade na paisagem. Utilizando-se os resultados obtidos com o cálculo da métrica e os modelos de autômatos celulares desenvolvidos, foi possível estudar a influência da estrutura espacial na dispersão do inseto.

4.2 Análise de sensibilidade

A partir de simulações realizadas com a paisagem hipotética e homogênea definida na subseção 3.3, foi possível verificar a sensibilidade das populações de larvas e de adultos a cada um dos parâmetros. As Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam a evolução temporal das populações de larvas e adultos, variando-se cada um dos parâmetros na paisagem hipotética enquanto os outros são mantidos fixos.

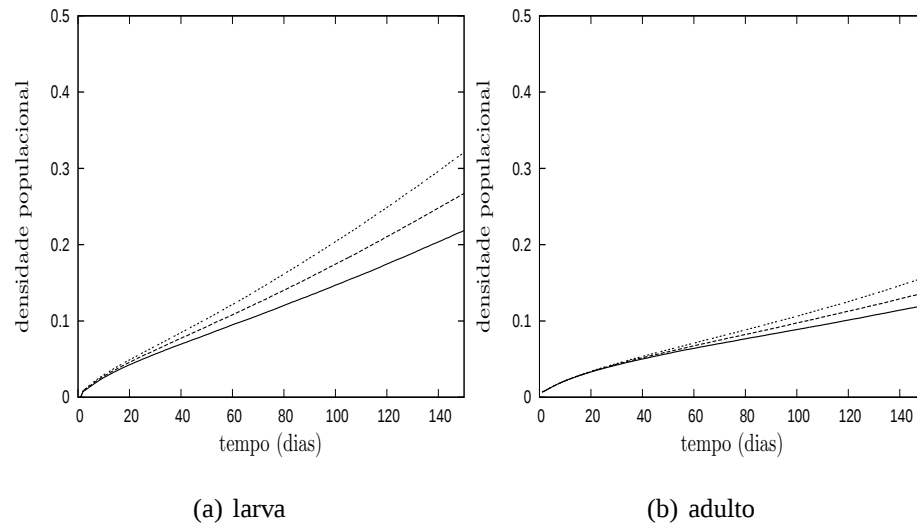


Figura 10: Evolução temporal da densidade populacional para cada estágio de vida quando os valores do parâmetro “oviposição” são variados. Contínua - $\phi = 0,1$; Tracejada: $\phi = 0,2$; Pontilhada: $\phi = 0,4$.

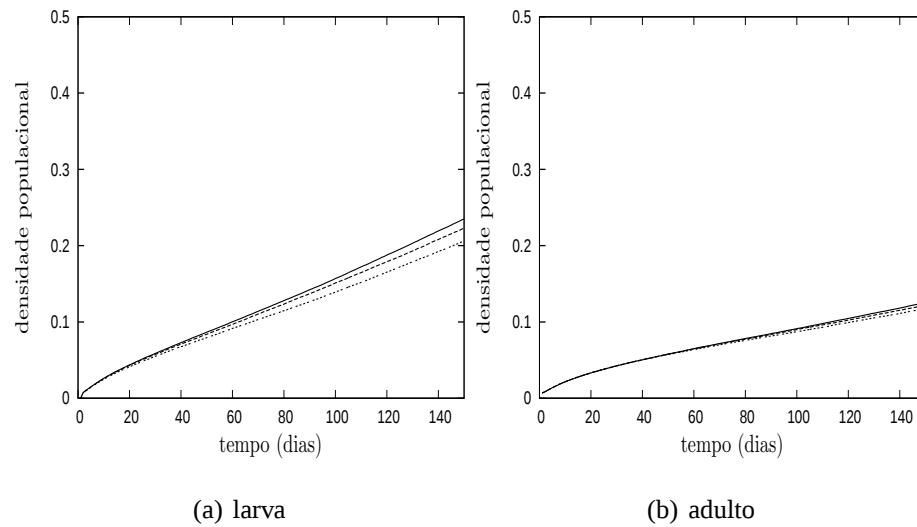


Figura 11: Evolução temporal da densidade populacional para cada estágio de vida quando os valores dos parâmetros “mortalidade larval” são variados. Contínua: $\mu = 0,01$; Tracejada: $\mu = 0,02$; Pontilhada: $\mu = 0,04$.

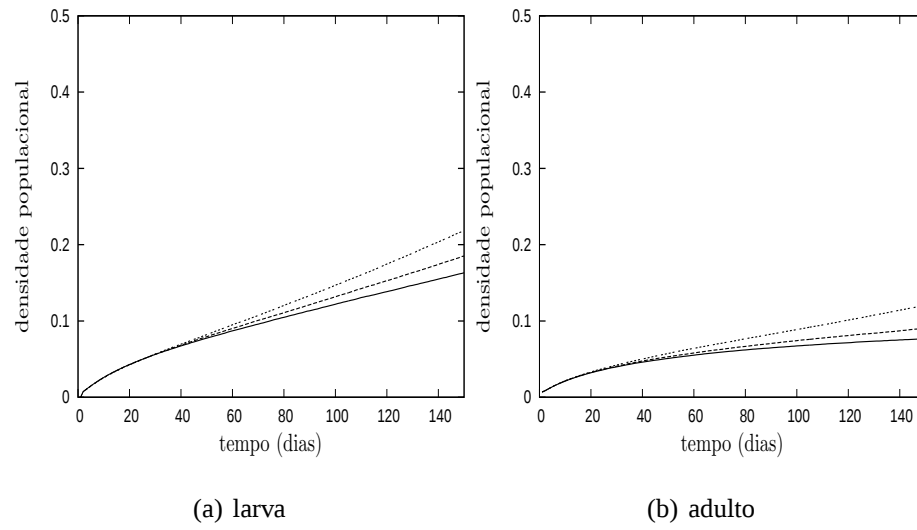


Figura 12: Evolução temporal da densidade populacional ao longo do tempo para cada estágio de vida quando os valores do parâmetro “desenvolvimento larva-adulto” são variados. Contínua: $\sigma = 0,01$; tracejada: $\sigma = 0,02$; pontilhada: $\sigma = 0,04$.

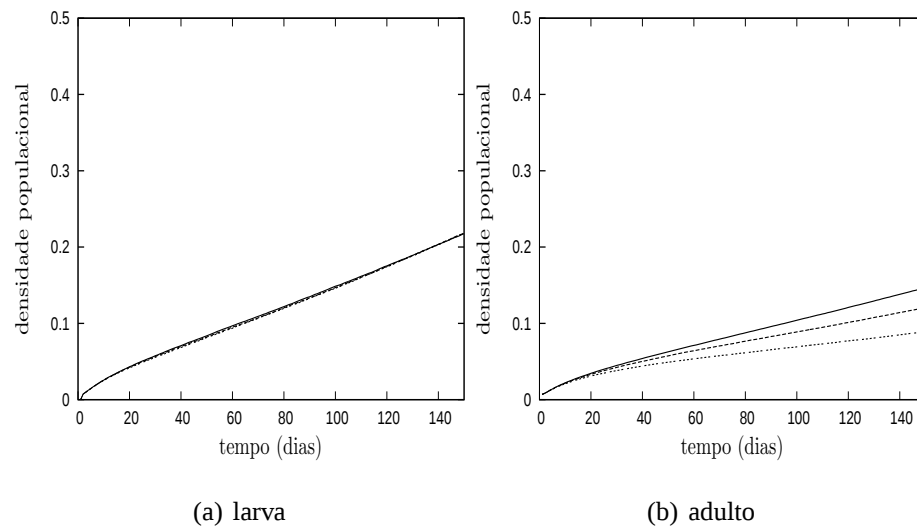


Figura 13: Evolução temporal da densidade populacional para cada estágio de vida quando os valores do parâmetro “mortalidade adulta são variados”. Contínua: $\gamma = 0,01$; tracejada: $\gamma = 0,02$; pontilhada: $\gamma = 0,04$.

Como pode ser visto, os parâmetros para os quais as duas populações apresentaram sensibilidade foram “oviposição” e o “desenvolvimento larva-adulto”. Além disso, a oviposição foi o parâmetro que mais influenciou uma das populações, no caso, a larval. A sensibilidade de ambas as populações ao desenvolvimento larva-adulto pode ser explicada por este ser o único parâmetro que influencia diretamente as duas populações. Desta forma, quando ocorre a fase de muda de larva para adulto, as dinâmicas das duas populações estão sendo afetadas diretamente. Em relação à oviposição, sua influência pode ser explicada pelo fato da praga agrícola *D.speciosa* ser uma espécie *r* estrategista.

Essa estratégia pode ser associada a *D.speciosa*, visto que os recursos foram considerados ilimitados no modelo, possuindo um amplo nicho disponível para o seu desenvolvimento e investindo na taxa reprodutiva, que é representada pela oviposição, o que explica a sensibilidade de sua população a esse parâmetro. Essa consideração corresponde à realidade, pois em casos de invasão de cultivos agrícolas por pragas, dificilmente há uma limitação da população por uma capacidade suporte, o que pode ser explicado pelo recurso alimentar ser abundante. Segundo Robert McArthur e Edward Osborn Wilson (MacArthur & Wilson, 1967), as espécies podem ser limitadas pela taxa de crescimento populacional (*r* estrategistas) ou pela capacidade suporte do ambiente (*K* estrategista). Espécies *K* são competidoras com outras espécies, disputando por espaços em nichos já ocupados, sendo limitadas pela capacidade de suporte do ambiente, *K*. De forma geral, são indivíduos de vida livre que investem em um baixo número de descendentes. Por outro lado, as espécies *r* estrategistas não competem por espaço e alimento com outras espécies, pois o nicho está vazio. Desta forma, possuem alto investimento no número da prole, mesmo que poucas dela cheguem à fase adulta, o que é expresso pela taxa de reprodução *r*. Geralmente, são espécies pragas, invasoras ou iniciadoras de processos de sucessão ecológica como a *D.speciosa*.

Baseando-se na mesma explicação da estratégia da espécie, pode-se entender porque a sensibilidade da população adulta à mortalidade larval foi baixa e vice-versa. A estratégia de espécies *r* é focada na taxa reprodutiva e não na sobrevivência dos indivíduos. Esse fato implica que as taxas de mortalidade das populações em cada estágio

só afetam as populações às quais elas estão relacionadas.

4.3 Modelos de autômatos celulares

Na Figura 14, são apresentados os resultados obtidos nas simulações com os autômatos celulares, ilustrando-se o padrão espacial da densidade populacional de pragas em $t = 200$, ao longo de uma paisagem hipotética constituída de dez faixas alternadas a partir da combinação de dois cultivos.

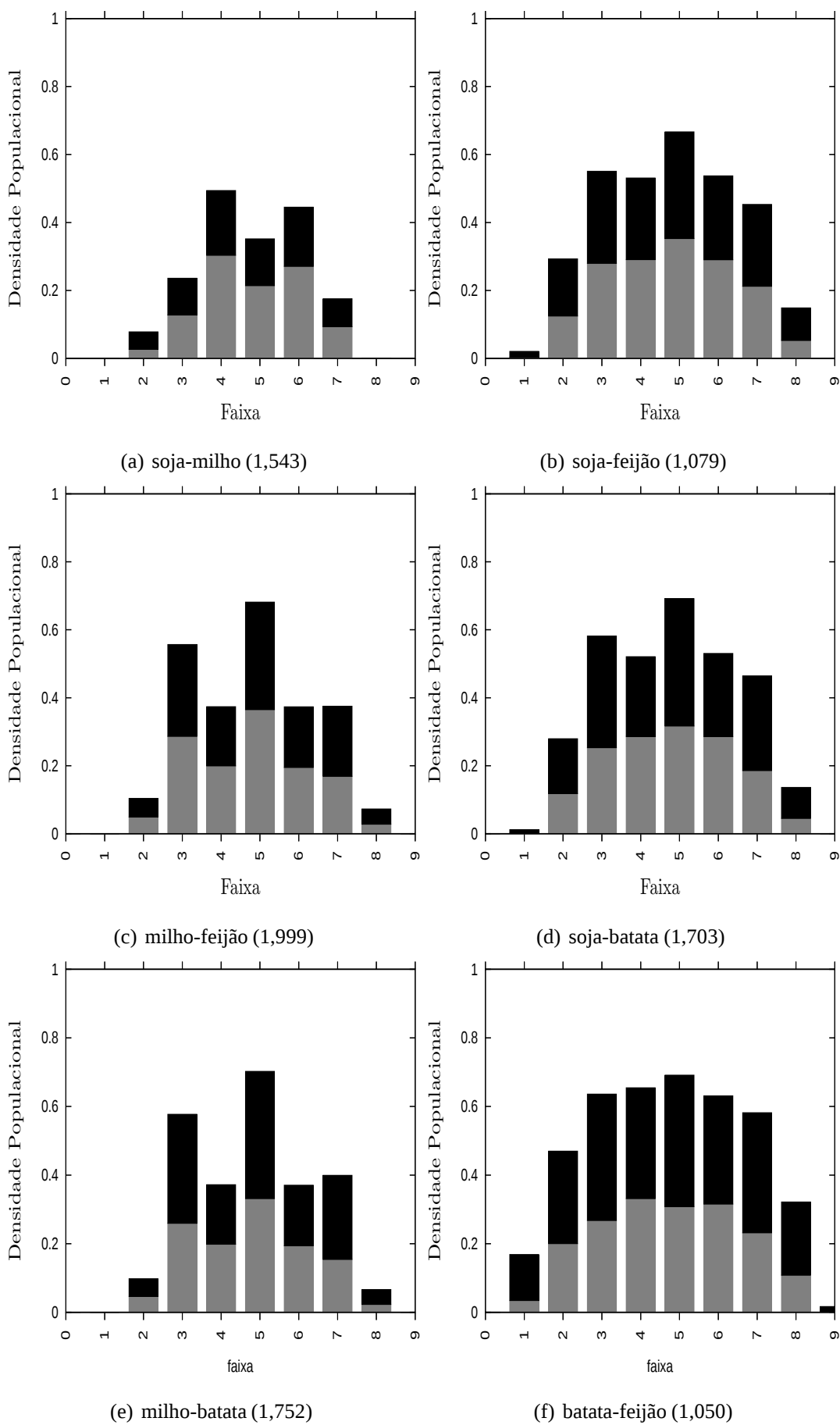


Figura 14: Densidade populacional em cada uma das faixas do plantio dos consórcios.

Barras pretas: larva, Barras cinzas: adulto.

Um padrão pode ser observado nos gráficos da Figura 14. Cultivos mais próximos entre si apresentaram uma menor flutuação da densidade populacional do inseto ao longo das faixas. Por exemplo, a combinação entre os dois cultivos mais próximos, feijão e batata, apresentaram menor flutuação na densidade populacional à medida que a população se dispersou. Por outro lado, as combinações de feijão e batata com o milho apresentaram maior flutuação. Esses padrões podem ser explicados pela distância de proximidade entre os cultivos. Cultivos com características mais similares entre si, como o feijão e a batata, quando em consórcio, assemelham-se a uma paisagem homogênea, e a transição de uma faixa para outra ocorre de forma mais “suave”. Quando os cultivos são muito distintos em relação aos parâmetros estudados, como o feijão e o milho, a transição de uma faixa para outra ocorre de maneira “abrupta”, o que é refletido na flutuação populacional (Gallo et al., 2002).

A combinação entre milho e batata, contudo, apresentou mais flutuações que a combinação entre batata e soja, apesar da medida de similaridade ser próxima para os dois pares. O motivo é que a métrica calculada considerou que todos os parâmetros possuíam peso igual sobre a dinâmica do modelo, porém a análise de sensibilidade indicou que a oviposição é um dos parâmetros que mais influencia a população como um todo (considerando as fases larval e adulta). Desta maneira, a maior diferença no parâmetro de oviposição entre o milho e a batata se refletiu na maior quantidade de flutuações na densidade populacional, pois enquanto o valor do parâmetro é de aproximadamente 35 vezes maior entre milho e batata, ele é 6 vezes maior entre soja e batata. Os outros parâmetros, porém, afetam apenas uma das populações e/ou variam muito pouco relativamente ao parâmetro de ovoposição entre os cultivos.

Além dessa observação, nota-se também que a densidade populacional em cada uma das faixas foi menor para cultivos em que houve a inserção de milho, quando comparadas com as faixas correspondentes em outras combinações. Uma possível explicação para este resultado está relacionada à quantidade de nitrogênio foliar, à taxa de oviposição e à taxa de mortalidade adulta. Segundo Avila & Parra (2002), a taxa de oviposição de adultos que se alimentam com folhas de milho é menor que 2% que a taxa

de oviposição de adultos que se alimentam de folhas de batata e feijão, ou seja, a redução é muito acentuada. O processo fisiológico da ovogênese é regulado pela disponibilidade de nutrientes no organismo da fêmea, de forma que qualquer fator que afete essa disponibilidade pode influenciar na taxa de postura de ovos. Visto que segundo Avila & Parra (2002), a quantidade de nitrogênio nas folhas de milho é inferior a dos outros cultivos, a capacidade de ovipor é afetada negativamente quando a fêmea se alimenta desse cultivo. A mesma discussão pode ser atribuída às combinações envolvendo a soja, porém a densidade populacional não sofreu uma redução tão acentuada quanto as que envolviam o milho, pois a quantidade de nitrogênio foliar na soja é maior, implicando em uma taxa de oviposição maior que a do milho, além de não ocorrer variação na taxa de mortalidade de adultos, quando alimentados com folhas de cultivos de soja em relação a cultivos de feijão e batata.

A taxa de mortalidade de adultos também influenciou na menor densidade populacional ao longo das faixas de consórcios com milho, porém não na mesma escala que a oviposição, pois apenas a população de adultos foi sensível a esse parâmetro, além de sua variação entre os cultivos ter sido menor. Contudo, um experimento realizado por Avila & Parra (2002) mostrou que adultos alimentados com folhas de milho tiveram sua sobrevivência reduzida, pois elas são nutricionalmente menos favoráveis.

Observa-se que a combinação que apresentou menor densidade populacional ao longo das faixas dentre as seis simulações foi justamente “milho-soja”, que corresponderam aos cultivos com as menores taxas de oviposição e menores quantidades de nitrogênio foliar.

Estudou-se também a distância média percorrida à medida que a população se dispersou ao longo da rede celular (Figura 15) e o padrão de distribuição espacial da população de insetos (Figura 16). Visto que os padrões de dispersão foram muito similares para larvas e para adultos, optou-se por apresentar apenas o padrão correspondente à larva para a realização da discussão do efeito dos diferentes tipos de paisagens sobre a população.

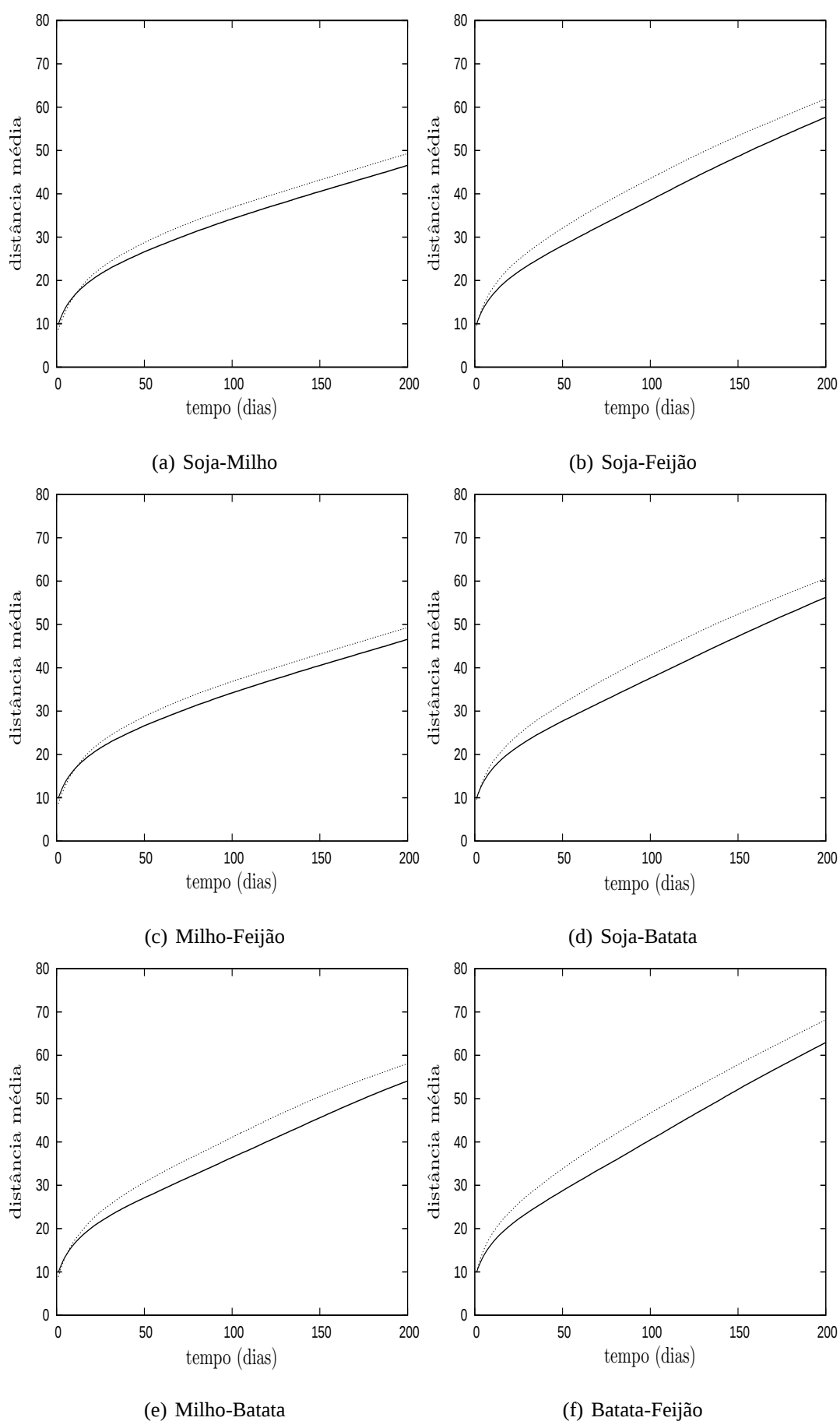
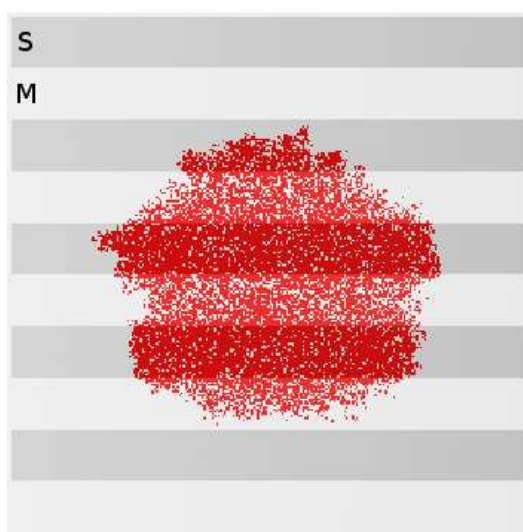
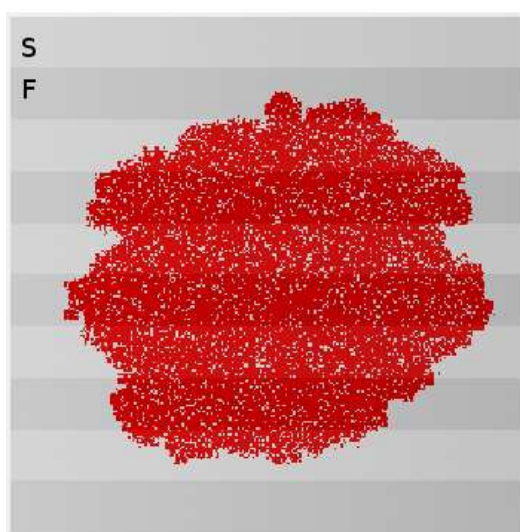


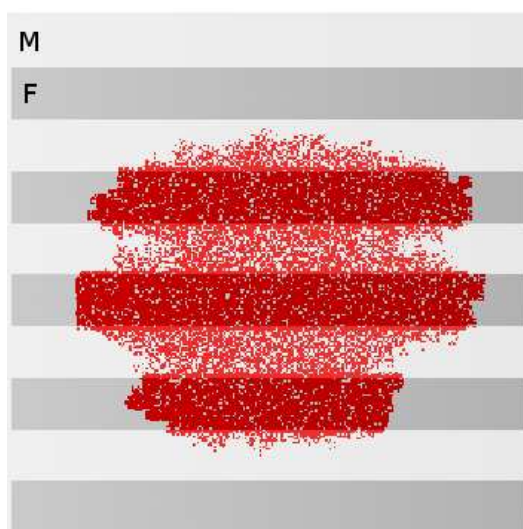
Figura 15: Evolução temporal da distância média percorrida pela população de insetos até $t = 200$. Linha descontínua: adulto; Linha contínua: larva.



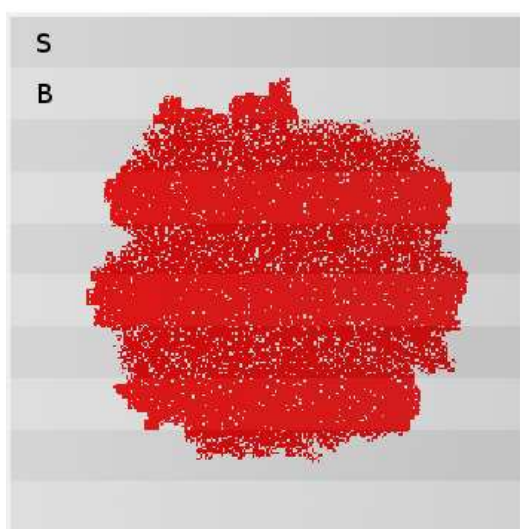
(a) soja-milho



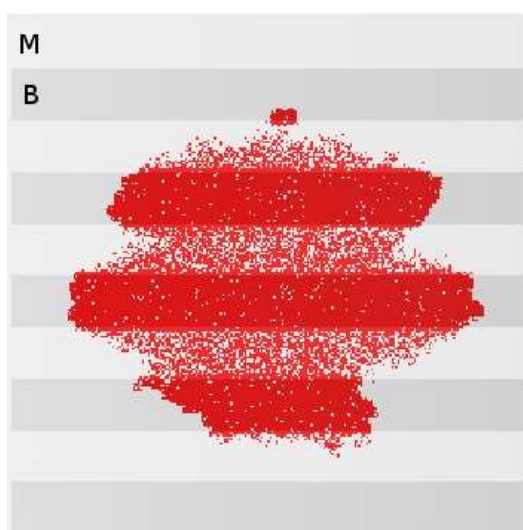
(b) soja-feijão



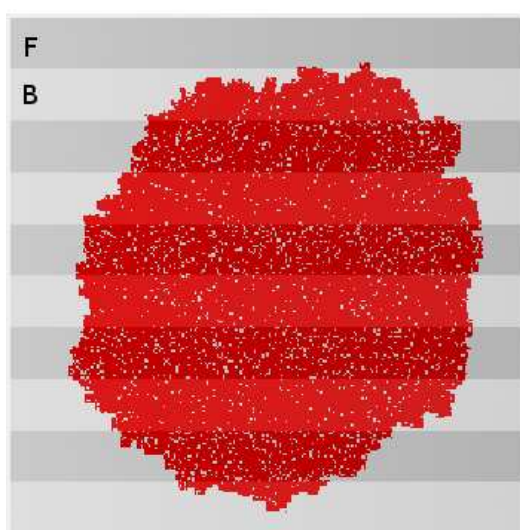
(c) milho-feijão



(d) soja-batata



(e) milho-batata



(f) batata-feijão

Figura 16: Padrão espacial da população de larvas na paisagem simulada. S: soja, M: milho, F: feijão, B: batata.

As distâncias atingidas foram menores quando o milho e a soja estavam presentes na combinação, sendo que os valores são um pouco menores para as combinações com o milho. Por outro lado, a combinação “feijão-batata” foi a que apresentou o maior valor de distância média atingida. A combinação entre soja e milho foi a que melhor restringiu a dispersão, provavelmente, por reduzir a densidade populacional, como explicado anteriormente. As condições desfavoráveis dos cultivos de milho e soja para a oviposição afetaram a capacidade de dispersão, pois um menor número de insetos foi liberado. Além disso, a inserção do cultivo de milho no consórcio reduziu o número de insetos maduros capazes de se dispersar, dado a maior valor do parâmetro de mortalidade adulta. Por outro lado, as condições associadas à combinação entre os cultivos de feijão e batata foram altamente favoráveis à dispersão da praga ao longo da paisagem, visto que a taxa de oviposição foi elevada nos dois cultivos. Apesar das distâncias atingidas com a inserção de soja ou milho nas paisagens terem sido muito similares, o padrão da dinâmica espacial da população final foi nitidamente diferente. Dada a baixa similaridade entre o milho e os outros cultivos, é possível observar que houve um padrão de expansão, seguido de retração, durante a passagem de uma faixa para outra. A razão para esse padrão é que o inseto transitou entre cultivos que são muito distintos entre si em relação aos parâmetros ecológicos estudados.

Torna-se interessante, portanto, a combinação dos outros cultivos com o cultivo de milho, pois esses consórcios apresentaram acentuada redução da densidade populacional do inseto, além de maior restrição da dispersão. Esse resultado é suportado por OEPP/EPPO (2005), que observou que a inclusão de cultivos de milho em plantações de feijão era capaz de manter a população da praga a baixos níveis.

A proporção em que o milho está presente na paisagem também pode influenciar no controle. Em todos os resultados apresentados até o momento, a proporção foi de 1:1. Utilizando os arranjos e as proporções apresentados na Figura 9, a Figura 17 apresenta as distâncias médias atingidas pela população das pragas, correspondentes a cada um deles.

A tendência geral foi que, à medida que a proporção de milho diminuiu,

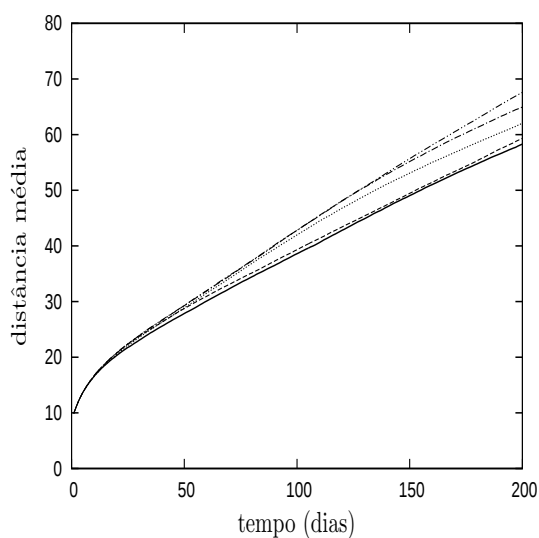


Figura 17: Evolução temporal da distância média atingida em diferentes proporções na combinação feijão-milho. Traço-ponto-ponto: 100% feijão (10:0); Traço-ponto: 80% feijão e 20% milho (8:2 - caso 1); Tracejado: 80% feijão e 20% milho (8:2 - caso 2); Pontilhado: 70% feijão e 30% milho (7:3); Contínua: 50% feijão e 50% milho (5:5).

o comportamento da curva se assemelhou mais à situação de um cultivo homogêneo de feijão. Porém, um ponto interessante a se destacar é que há uma exceção quando comparadas as proporções 7:3 e 8:2. Isso indica que o agricultor poderia utilizar o arranjo “feijão-feijão-feijão-milho” em substituição ao arranjo “feijão-feijão-milho” sem grandes alterações no controle da dispersão da praga via manipulação da paisagem, sendo que neste caso em particular, a paisagem com a menor proporção (8:2) possuiu um efeito melhor no controle.

Uma possível explicação para esse resultado é que a proporção do cultivo não foi o único fator que influenciou na distância média atingida pela população. Como pode se ver na Figura 17, paisagens com a mesma proporção, 8:2, porém com diferentes posições das faixas, apresentaram resultados distintos.

O controle da dispersão da praga foi mais eficiente quando as faixas estavam próximas ao ponto inicial de invasão na lavoura e menos eficiente quando estavam distantes. Uma possível explicação é que a população controlada é menor no início do

processo de invasão, o que pode ser corroborado por Gallo et al. (2002) e OEPP/EPPO (2005), que concluíram que o controle baseado na manipulação da paisagem é mais eficiente quando a praga está em uma situação de baixa população.

De forma a ilustrar e explicar melhor esse resultado, a Figura 18 apresenta o padrão espacial da população larval nas paisagens abordadas.

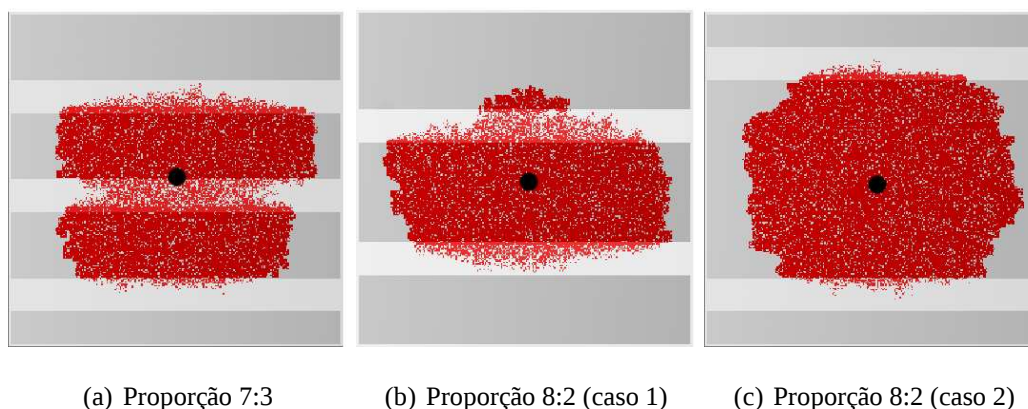


Figura 18: Padrão espacial da população de larvas. O círculo preto no centro indica o início da invasão, as faixas de cor mais clara correspondem ao milho, enquanto as mais escuras correspondem ao feijão.

Das quatro faixas mais próximas ao ponto de início de invasão, nenhuma delas correspondeu ao milho na paisagem com proporção 8:2 (caso 2), o que explica sua pior capacidade de restringir a dinâmica populacional. Como discutido anteriormente, o cultivo de milho possui importante função para o controle da praga. Por outro lado, das quatro faixas mais próximas ao mesmo ponto, duas delas corresponderam ao milho na paisagem com proporção 8:2 (caso 1), o que explica a sua melhor capacidade de conter a praga. Esse arranjo também explica o porquê dessa paisagem ser um pouco mais eficiente que uma paisagem com proporção 7:3, a qual apresentou um maior número de faixas de milho. Apesar da maior proporção, a paisagem de 7:3 apresentou apenas uma faixa correspondente ao milho das quatro mais próximas ao centro de invasão. O ponto inicial de invasão na paisagem com proporção 7:3 está em contato direto com uma faixa de plantio de milho, porém a população entrou em contato com uma sequência de duas faixas de plantio

de feijão após a de milho, as quais favoreceram seu desenvolvimento e compensaram a redução inicial. No caso da paisagem com proporção 8:2, o oposto ocorreu; o ponto inicial de invasão estava em contato direto com cultivos de feijão, que promoveram o crescimento inicial da população, porém, imediatamente após eles, ela foi restrita nos limites superior e inferior pelo de milho, que “freiou” sua expansão. Esse resultado é importante à medida que é uma informação que pode ser utilizada para casos em que o agricultor não quer reduzir acentuadamente a área de plantação do cultivo principal.

,

5 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, conclui-se que consórcios com cultivos muito similares entre si apresentaram um efeito similar ao de uma paisagem homogênea. Dessa forma, conhecendo-se a ecologia nutricional do inseto em relação a diferentes cultivos, as melhores opções para o controle da praga são paisagens que maximizem a heterogeneidade ambiental.

O milho se mostrou como o cultivo mais promissor para ser inserido em um consórcio, de forma a controlar a população de *D.speciosa*, visto que a densidade populacional em cada faixa e a capacidade de dispersão foram menores quando em contato com faixas de milho. Uma importante pergunta a ser feita, quando são inseridas faixas de plantio de milho, é “onde” e “quanto”. “Onde”, pois o consórcio se mostrou mais eficaz no modelo, quando as faixas estavam concentradas próximas ao ponto inicial de invasão e “quanto”, pois a proporção em que o cultivo de milho estava inserido foi também uma importante variável a ser levada em consideração.

5.1 Trabalhos futuros

Há várias alternativas de pesquisas futuras, baseadas nessa dissertação, para serem realizados. No caso estudado até o momento, os cultivos são mantidos constantes, porém em um consórcio, os plantios ocorrem em períodos distintos. Modelar essa variação temporal, utilizando um calendário agrícola, torna o modelo mais realístico, fornecendo resultados de maior acurácia.

Um outro fator importante a ser levado em consideração é a capacidade de escolha do inseto, ou seja, sua ecologia comportamental. No atual trabalho, considerou-se

que a praga se dispersou continuamente, sem direção preferencial, porém isto pode não ocorrer na realidade, pois os insetos podem apresentar preferência para permanecerem em determinado cultivo, gerando-se uma situação de competição intra-específica.

Devido à crescente discussão sobre a utilização de cultivos transgênicos, ressaltando-se a necessidade de áreas de refúgio, onde não há utilização de transgenia, torna-se interessante o estudo da evolução espaço-temporal da praga em paisagens com combinações entre cultivos transgênicos e não-transgênicos.

REFERÊNCIAS

- AVILA, C. J.; PARRA, J. R. P. Desenvolvimento de *Diabrotica speciosa* (Germar) (Coleoptera: Chrysomelidae) em diferentes hospedeiros. **Ciência Rural**, v.32, n.5, p.739–743, 2002.
- BARBOSA, F. S.; LEITE, G. L. D.; PAULINO, M. A. O.; GUILHERME, D. O.; MAIA, J. L. T. S.; FERNANDO, R. C.; COSTA, C. A. Utilização de extrato de tiririca no controle de *Diabrotica speciosa*. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.2, n.2, p.764–767, 2007.
- BERTSEKAS, D. A. **Dynamic Programming and Stochastic Control**. New York: Academic Press, 1976. 488p.
- CHATERJEE, S. A mathematical model for pest control. **Biometrics**, v.29, n.4, p.727–734, 1973.
- COMINS, H. N. The development of resistance in the presence of migration. **Journal of Theoretical Biology**, v.64, p.177–197, 1977.
- CONSOLO, V. F.; SALERNO, G. L.; BERON, C. M. Pathogenicity, formulation and storage of insect pathogenic hyphomycetous fungi tested against *Diabrotica speciosa*. **BioControl**, v.48, n.6, p.705–712, 2012.
- COSTELLO, W.; TAYLOR, H. . In: **Mathematical Models of the Sterile Male Technique of Insect Control**. Berlim: Springer-Verlag, 1975. p.318–359.
- COTTREL, T. E.; YEARGAN, K. V. Influence of a native weed, *Acalypha ostryaefolia* (Euphorbiaceae), on *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae) population density, predation, and cannibalism in sweet corn. **Environmental Entomology**, v.37, p.1375–1385, 1998.

CRUZ, I. Larva-alfinete, *Diabrotica speciosa* (Germar, 1824) (*Coleoptera: Chrysomelidae*), 2013. Disponível em <http://panorama.cnpms.embrapa.br>. Acesso em 06-10-2013.

D'AMATO, C.; TORRES, J. P. M.; MALM, O. DDT (dicloro difenil tricloroetano): toxicidade e contaminação ambiental - uma revisão. **Química Nova**, v.25, n.6, p.995–1002, 2002.

DEHEER, C. J.; PEREIRA, M. R. Stability of entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* on beetle attracting tubers and cowpea foliage in Brazil. **Environmental Entomology**, v.15, n.6, p.1237–1243, 1991.

FRANK, T. Density of adult hoverflies (*Dipt.*, *Syrphidae*) in sown weed strips and adjacent fields. **Journal of Applied Entomology**, v.129, n.6, p.351–355, 1999.

GALLO, D.; NAKAMO, O.; NETO, S. S.; CARVALHO, R. P. L.; BAPTISTA, G. C.; FILHO, E. B.; PARRA, J. R. P.; ZUCCHI, R. A.; ALVES, S. B.; VENDRAMIM, J. D.; MARCHINI, L. C.; LOPES, J. R. S.; OMOTO, C. **Entomologia Agrícola**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 2002. 920p.

GOWER, J. C.; LEGENDRE, P. Metric and Euclidean properties of dissimilarity coefficients. **Journal of Classification**, v.3, p.5–48, 1986.

GUTOWITZ, H. **Cellular Automata: Theory and Experiment**. Massachusetts: MIT Press Series, 1991. 488p.

HIEBELER, D. Spatially correlated disturbances in a locally dispersing population model. **Journal of Theoretical Biology**, v.272, p.143–149, 2004.

HOSSAIN, Z.; GURR, G. M.; WRATTEN, S. D.; RAMAN, A. Habitat manipulation in lucerne *Medicago sativa*: arthropod population dynamics in harvested and refuge crops strips. **Journal of Applied Ecology**, v.39, p.445–454, 2002.

ILACHINSKI, A. **Cellular Automata: A Discrete Universe**. Danvers, USA: World Scientific Publishing, 2001. 807p.

KNIPLING, E. F. Possibilities of insect control or eradication through the use of sexually sterile males. **Journal of Economical Entomology**, v.45, p.459–462, 1955.

LUDWIG, D.; ARONSON, D.; WEINBERGER, H. Spatial patterning of the spruce budworm. **Journal of Mathematical Biology**, v.8, p.217–258, 1979.

MACARTHUR, R.; WILSON, E. O. **The Theory of Island Biogeography**. Princenton: Princenton University Press, 1967. 203p.

MARGOLUS, N. **Cellular Automata Machine: A New Environment for Modeling**. Massachusetts: MIT Press Series, 1987. 260p.

MEDEIROS, M. A.; SUJII, E. R.; MORAIS, H. C. Efeito da diversificação de plantas na abundância da traça-do-tomateiro e predadores em dois sistemas de cultivo. **Horticultura Brasileira**, v.27, n.3, p.300–306, 2009.

MELOTTI, G. Aplicações de autômatos celulares em sistemas complexos: Um estudo de caso em espalhamento de epidemias. Belo Horizonte, Brasil, 2009. 116p. Tese (Doutorado) - Laboratório de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares – Universidade Federal de Minas Gerais.

MONSANTO-BRASIL. Monsanto lança tecnologias VT PRO 3 RIB e VT PRO MAX RIB para a cultura do milho na safra 2013/14, 2013. Disponível em <http://www.monsanto.com.br>. Acesso em 06-10-2013.

NARDI, C. Estímulos olfativos envolvidos no comportamento sexual e na seleção hospedeira de *Diabrotica speciosa* (Germar) (Coleoptera: Chrysomelidae). Piracicaba, Brasil, 2010. 106p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo.

NORTON, D. A. Analysis of decision making in crop protection. **Agroecosystem**, v.3, p.27–44, 1976.

OEPP/EPPO. Data sheets on quarantine pest - *Diabrotica speciosa*. **Bulletin OEPP/EPPO**, v.35, p.374–376, 2005.

OKUBO, A. **Diffusion and Ecological Problems: Mathematical Models**. Berlin: Springer-Verlag, 1980. 500p.

PFIFFNER, L.; MERKELBACH, L.; LUKA, H. Do sown wildflower strips enhance the parasitism of lepidopteran pests in cabbage crops? **IOBC/WPRS Bulletin**, v.26, n.4, p.111–116, 2003.

PICKET, C. H.; BUGG, R. L. **Enhancing Biological Control: Habitat Management to Promote Natural Enemies of Agricultural Pests**. Berkeley, USA: University of California, 1998. 632p.

PROUT, T. The joint effects of the release of sterile males and immigration of fertilized females on a density regulated population. **Theoretical Population Biology**, v.13, p.40–71, 1978.

SALVADORI, J. R.; AVILÁ, C. J.; SILVA, M. T. B. **Pragas de Solo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. 400p.

SCHONFISCH, B.; ROSS, A. Synchronous and asynchronous updating in cellular automata. **Biosystem**, v.51, n.3, p.123–143, 1999.

SCHREINER, H. G.; BAGGIO, A. J. Culturas intercalares de milho (*Zea mays*, L.) em reflorestamento de *Pinus taeda* L. no sul do Paraná. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v.1, n.8, p.26–49, 1984.

SKIRVIN, J. C.; KRAVAR-GARD, L.; REYNOLDS, K.; WRIGHT, C.; MEAD, A. The effect of within-crop habitat manipulation on the conservation biological control of aphids in field - grown lettuce. **Bulletin of Entomological Research**, v.101, p.623–631, 2011.

SPENCER, J. L.; MABRY, T. R.; VAUGHN, T. T. Use of transgenic plants to measure insect herbivore movement. **Journal of Economical Entomology**, v.96, p.1738–1749, 2003.

STAUDACHER, K.; SCHALLHART, N.; THALINGER, B.; WALLINGER, C.; JUEN, A.; TRAUGOTT, M. Plant diversity affects behavior of generalist root herbivores, reduces

crop damage, and enhances crop yield. **Ecological Applications**, v.1, n.23, p.1135–1145, 2013.

STERN, V. M.; SMITH, R. F.; BOSZH, R. V. D.; HOGAN, K. S. The integrated control concept. **Hilgardia**, v.29, p.81–101, 1959.

STERN, V. M.; SMITH, R. F.; BOSZH, R. V. D.; HOGAN, K. S. Control of a pest population. **Biometrics**, v.26, p.365–375, 1970.

TEIXEIRA, M. L. F.; FRANCO, A. A. Susceptibilidade de larvas de *Cerotoma arcuata* Olivier (Coleoptera: Chrysomelidae) a *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuillemin, *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin e *Bacillus thuringiensis* Berliner. **Ciência Rural**, v.37, n.1, p.19–25, 2007.

VIANA, P. A. Manejo de *Diabrotica speciosa* na cultura do milho. **Circular Técnica**, v.141, p.1–6, 2010.

WAQUIL, J. M. Manejo integrado de pragas: revisão histórica e perspectiva, 2013. Disponível em <http://ainfo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em 06-10-2013.