

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A SIMULAÇÃO DE
ESTRATÉGIAS DE CONTROLE BIOLÓGICO DA MOSCA-DO-
MEDITERRÂNEO *C. capitata* (DIPTERA: TEPHRITIDAE), EM
PLANTAÇÕES DE *CITRUS*: "UTILIZAÇÃO DE VARIÁVEIS
TEMPORAIS E ESPACIAIS"**

RODRIGO MAURO FREIRE

Dissertação apresentada ao Instituto de
Biotecnologia do Campus de Rio Claro,
Universidade Estadual Paulista, como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Ciências Biológicas
(Área de Concentração - Zoologia).

Rio Claro
Estado de São Paulo – Brasil
Setembro de 2007

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A SIMULAÇÃO DE
ESTRATÉGIAS DE CONTROLE BIOLÓGICO DA MOSCA-DO-
MEDITERRÂNEO *C. capitata* (DIPTERA: TEPHRITIDAE), EM
PLANTAÇÕES DE *CITRUS*: "UTILIZAÇÃO DE VARIÁVEIS
TEMPORAIS E ESPACIAIS"**

RODRIGO MAURO FREIRE

Orientador: Prof. Dr. CLAUDIO JOSÉ VON ZUBEN

Co-orientador: Prof. Dr. Sílvio de Alencastro Pregnoatto

Dissertação apresentada ao Instituto de
Biotecnologia do Campus de Rio Claro,
Universidade Estadual Paulista, como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Ciências Biológicas
(Área de Concentração - Zoologia).

Rio Claro
Estado de São Paulo – Brasil
Setembro de 2007

595.7 Freire, Rodrigo Mauro
F866m Modelagem matemática para simulação de estratégias de controle biológico da mosca-do-mediterrâneo *C. capitata* (Díptera: Tephritidae), em plantações de *Citrus*: utilização de variáveis temporais e espaciais / Rodrigo Mauro Freire. – Rio Claro : [s.n.], 2007
128 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro
Orientador: Cláudio José Von Zuben

1. Inseto. 2. Modelo matemático. 3. Dinâmica populacional
4. Moscas-das-frutas. 5. Manejo integrado de praga.
6. Equação de difusão. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI – Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

*Dedico aos meus pais e ao meu
grande amigo e mestre Sílvio de A. Pregnotto.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de mestrado é o produto de três anos de aprendizado, amizade, evolução pessoal e profissional.

Nada do apresentado aqui seria possível sem a colaboração ativa de três grandes profissionais, cada um deles especializado em uma área do conhecimento científico.

Dentre tais profissionais, o Prof. Dr. Sílvio de Alencastro Pregnoatto, do Departamento de Matemática Aplicada, do Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação (IMECC) – UNICAMP, esteve ao meu lado nesta jornada de modelagem matemática populacional desde o princípio. Tudo o que é apresentado a seguir referente à grande área de matemática é devido a esse grande amigo e excelente professor.

No entanto, de nada me adiantaria saber todo o ferramental matemático necessário à modelagem matemática populacional caso eu não tivesse uma base ecológica e agroecológica sólida referente ao objeto de estudo que eu me propus a analisar. Nesse sentido, tenho muito a agradecer ao Prof. Dr. Júlio Marcos Melges Walder, do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), da USP – Piracicaba, pelas suas valiosas informações fornecidas sobre o controle biológico da mosca-do-mediterrâneo através do parasitóide *Diachasmimorpha longicaudata*, e pelo seu sempre presente bom humor e grande receptividade.

Em relação às análises e dicas diferenciadas e sempre muito oportunas relativas às teorias de dinâmicas populacionais e às metodologias científicas, tenho muito a agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Cláudio José Von Zuben, do Depto. de Zoologia da UNESP – Rio Claro.

Tive muita sorte e felicidade em conseguir trabalhar com estes três excelentes profissionais e personalidades ao longo deste trabalho estruturado em três distintas áreas do conhecimento científico, como a Biologia, a Matemática e a Agronomia.

Sou muito grato também ao Instituto de Biociências da UNESP, campus de Rio Claro e ao Departamento de Zoologia por fornecerem toda a estrutura necessária à elaboração deste trabalho, assim como devo muito ao CNPq, por ter financiado a minha pesquisa durante um ano.

No entanto, o que é apresentado aqui não é somente o resultado de aprendizados intelectuais e científicos ocorridos entre setembro de 2004 e setembro de 2007. É muito mais do que isso. É, em verdade, a expressão de um dos aspectos da minha personalidade, da minha história de vida e do meu universo subjetivo.

Com toda a certeza, este trabalho não existiria sem o amor, o carinho e o investimento educacional e pessoal que recebi da minha família, principalmente dos meus pais Cecília e Júlio e dos meus irmãos Renata e Luís. Sei também que o que sou agora, e conseqüentemente o resultado final desta dissertação, não seriam os mesmos sem os processos diários de construção e reconstrução psicológicos e emocionais, proporcionados pelos meus grandes amigos Sangue (vulgo Alexandre), Galbieri, Tutu, Max, Michel, e BH.

Tenho muito a agradecer à Michele Peres, que foi minha companheira durante todo o período de mestrado, me ensinando a profundidade do amor, de como vivenciar a alegria, a compreensão e o companheirismo.

Agradeço de coração à Adryane Gorayeb (Dryca) por ter corrigido o português e a metodologia científica da versão final deste trabalho, e por ter proporcionado ótimos momentos a mim e aos meus companheiros de república, durante sua estadia, em Rio Claro, no ano de 2006. Também devo muito ao Guilherme Gomes, pelo seu inabalável bom humor, e mando fortes abraços para o Léo Gomes e para o Fofô, pelas conversas descontraídas e ajudas mútuas durante dias de trabalho.

Por fim, não sei o que seria de mim sem o céu sempre azul de Rio Claro, que quando completado pelo verde do campus Bela Vista, da UNESP- Rio Claro, gera um mundo embebido em devires misteriosos e vibrantes.

ÍNDICE	Página
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. Família Tephritidae.....	14
2.2. Biologia do parasitóide <i>Diachasmimorpha longicaudata</i> (Hymenoptera: Braconidae).....	25
2.3. Modelagem matemática aplicada ao controle biológico.....	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	51
4. RESULTADOS	57
4.1. Modelo teórico-pictográfico e sistemas de equações matemáticas.....	57
4.2. Simulações das dinâmicas populacionais.....	69
4.2.1. Simulações iniciais.....	69
4.2.2. Simulações para analisar o grau de importância das variáveis <i>quantidade, frequência e distribuição espacial</i> de fêmeas adultas de <i>D. longicaudata</i> liberadas, em plantações de laranja, para controlar biologicamente <i>C. capitata</i>	78
4.2.3. Simulações para análises práticas do manejo integrado de <i>C. capitata</i> utilizando-se liberações massivas de <i>D. longicaudata</i> conjuntamente com aplicações de iscas tóxicas, em plantações de laranja.....	85
5. DISCUSSÃO	99
6. CONCLUSÕES	106
7. LITERATURA CITADA	108

RESUMO

As moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) são as principais pragas da fruticultura mundial. Na citricultura brasileira, elas são consideradas pragas de grande importância econômica e exigem cuidados quarentenários. No Brasil, os gêneros de tefritídeos mais importantes são *Anastrepha* e *Ceratitis*, cujas espécies que mais causam danos à fruticultura paulista são *A. fraterculus*, *A. obliqua* e *C. capitata*. Estratégias atuais de controle destas pragas agrícolas estão sendo estruturadas a partir do Manejo Integrado de Pragas (MIP), o qual é um sistema de decisão para uso de táticas de controle de pragas. Dentre as diferentes estratégias de manejo integrado de moscas-das-frutas, em plantações de laranja do Estado de São Paulo, o uso de iscas tóxicas merece grande destaque. Estudos recentes indicam que um agente eficiente para o controle biológico das moscas-das-frutas é o parasitóide exótico braconídeo *Diachasmimorpha longicaudata*. Em relação ao planejamento de um programa de controle de pragas, a modelagem matemática vem se mostrando de grande utilidade, pois permite reunir informações de diferentes áreas, simular diferentes cenários e analisar a eficácia de possíveis estratégias de manejo integrado de praga. O presente trabalho propõe um modelo matemático espacialmente explícito que descreve e simula as interações biológicas entre a mosca-do-mediterrâneo *C. capitata* e seu parasitóide braconídeo *D. longicaudata*, em plantações de laranja. Além disso, é apresentada uma nova forma de manejo integrado de *C. capitata* (com possíveis aplicações à *Anastrepha* spp.) baseada em aplicações conjuntas de iscas tóxicas com liberações inundativas de *D. longicaudata*, em plantações de laranja. Para tal manejo proposto, estratégias ótimas de liberações de parasitóides são analisadas através de simulações computacionais.

ABSTRACT

Fruit flies (Diptera: Tephritidae) are the main pests of the worldwide fruitculture. In Brazilian orchards of citrus, those flies are pests of great economic importance and they require quarantine measures. In Brazil, the most important tephritid genera are *Anastrepha* and *Ceratitis*, and the species that cause the greatest economic losses in the fruitculture of São Paulo State are *A. fraterculus*, *A. obliqua* and *C. capitata*. The current strategies for controlling these agricultural pests are being developed considering the Integrated Pest Management (IPM) techniques, which use the combined application of different methods of pest control. Among the different strategies of IPM applied to control fruit flies in citrus orchards on São Paulo State, the use of toxic baits has a great importance. Nevertheless, recent studies indicate that an efficient agent for the biological control of fruit flies is the exotic braconid parasitoid *Diachasmimorpha longicaudata*. A very useful tool for planning the program of pest control is the mathematical modeling application, which combines information from different areas and simulates different environmental backgrounds, besides of analyzing the effectiveness of possible strategies for the integrated pest management. The present study presents a spatially explicit mathematical model that describes and simulates the biological interactions between the Mediterranean fruit fly *C. capitata* and its braconid parasitoid *D. longicaudata* in citric orchards. Furthermore, we also propose a new type of integrated pest management strategy for *C. capitata* (with possible applications to *Anastrepha* spp) based on the combined use of toxic baits and inundating releases of *D. longicaudata* in citrus orchards. For such management, we present computer simulations used to analyze optimal strategies for parasitoid releasing.

INTRODUÇÃO

Atualmente, a fruticultura brasileira é considerada uma das maiores do mundo, em especial no que se refere à produção de frutas frescas e à área cultivada. De todas as árvores frutíferas, a laranjeira é uma das mais conhecidas, cultivadas e estudadas.

Sabe-se que as plantas cítricas (laranjeiras, limoeiros, tangerinas, pomeleiros, cidreiras, toranjeiras, etc.) são originárias das regiões úmidas tropicais e subtropicais do continente asiático e ilhas adjacentes, tendo sido levadas para os países europeus há séculos, antes da descoberta do Novo Continente (WEBBER, 1967). No Brasil, as citrinas foram, sem dúvida, introduzidas pelas primeiras expedições colonizadoras, provavelmente na Bahia, tanto que em 1540 já existiam laranjais espalhados pelo nosso litoral, de norte a sul (MOREIRA; MOREIRA, 1991).

Encontrando no Brasil melhores condições para vegetar e produzir do que nas próprias regiões de origem, as citrinas se expandiram por todo o país, tornando-se até supostamente “nativas” em certas partes, como em Mato Grosso. Naturalmente, com o aumento da população e do consumo, foram

sendo plantadas em toda parte, em pequenos pomares caseiros e pomares comerciais (MOREIRA; MOREIRA, 1991).

Sabe-se que, em 2007, o Brasil possui uma área plantada de um milhão de hectares de frutas cítricas e sua produção supera 19 milhões de toneladas, a maior no mundo há alguns anos. O PIB do setor é de US\$10 bilhões, sendo responsável pela geração de 400 mil empregos diretos e aproximadamente 1,2 milhão de indiretos. O país é o maior exportador mundial de suco concentrado congelado de laranja, cujas exportações juntamente com as de outros derivados, têm gerado cerca de 1,4 bilhões de dólares anuais. Apesar da produção estar concentrada na região Sudeste, está presente em 300 municípios brasileiros nos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Pará, Paraná, Sergipe, com destaque para São Paulo, que é responsável por, aproximadamente, 80% da produção brasileira e a região Nordeste, por 8,6% (www.agricultura.gov.br)

Em 2000, o país teve uma superprodução, com 400 milhões de caixas de laranja. Em 2003, o setor movimentou US\$ 3,23 bilhões. O sistema citrícola representa 1,87% da pauta total de exportações brasileiras e 4,47% das exportações de produtos do *agribusiness*. A principal comercialização no mercado internacional é a do suco de laranja concentrado congelado, que representa 72% do valor dessas exportações. Em 2003, este sistema produtivo destinou aos cofres federais US\$ 139,41 milhões, e pagou mais de US\$ 100 milhões em frete (dos insumos até o atacado) e US\$ 14 milhões em pedágio (sem considerar a distribuição). Atualmente, os setores de irrigação, fertilização foliar e produção de mudas são os mais dependentes da produção agrícola de laranja. A cultura é a que mais tem investido na irrigação localizada nos últimos cinco anos; de 1,5% em 1999, a irrigação passou a ocupar 10,2% da área total plantada. Já o setor de fertilizantes foliares recebeu mais de US\$ 4 milhões da citricultura, o equivalente a 5% do mercado. Para os viveiros, o faturamento foi de US\$ 19 milhões (SIRINO; SCHIAVETO, 2004).

Contudo, tanto para áreas citrícolas fortes quanto para as iniciantes, no Brasil, um grave problema para a atividade é a ação de um complexo de moscas-das-frutas, que além de promover danos diretos à cultura dificulta

sobremaneira a exportação de frutas, por se tratar de uma praga de importância quarentenária.

De acordo com Silva (1990), as moscas-das-frutas estão entre as principais pragas que afetam a fruticultura em todo o mundo, pois atacam mais de 400 espécies de frutas, causando destruição da polpa, manchas e perfurações nos frutos e perdas devido às exigências quarentenárias impostas pelos países importadores de fruta *in natura*. Desta forma, geram prejuízos consideráveis, elevando os custos de produção e limitando o mercado internacional dos países produtores.

As moscas-das-frutas pertencem à família Tephritidae, uma das maiores e mais economicamente importantes da ordem Diptera, com 4000 espécies em 500 gêneros (WHITE; ELSON-HARRIS, 1992). Dessas, aproximadamente 861 espécies ocorrem no continente americano (HERNANDEZ-ORTIZ; ALUJA, 1993). Do total de espécies dos tefritídeos, cerca de 1500 (38%) causam danos em frutos, sendo os gêneros de maior importância, segundo White e Elson-Harris (1992), *Anastrepha*, *Bactrocera*, *Ceratitis*, *Dacus* e *Rhagoletis*. *Ceratitis capitata* (Wiedemann) e as espécies do gênero *Anastrepha* são as moscas-das-frutas que causam maiores danos à fruticultura brasileira (ZUCCHI, 1988).

Estratégias atuais de controle de pragas agrícolas estão sendo estruturadas a partir do Manejo Integrado de Pragas (MIP), que segundo Kogan (1998), é um sistema de decisão para uso de táticas de controle, isoladas ou associadas harmoniosamente, numa estratégia de manejo baseada em análises de custo/benefício que levam em conta o interesse e/ou impacto nos produtores, sociedade e ambiente. O MIP não é somente o uso conjunto de vários métodos de controle que caracteriza um sistema de manejo, mas sim a relação do método (ou métodos) dentro dos preceitos ecológicos, econômicos e sociais que são a base do manejo de pragas.

De acordo com Gallo *et al.* (2002), existem diferentes tipos de controles que podem ser usados e a escolha de um ou vários métodos pode depender do sistema envolvido, da praga a ser controlada e da disponibilidade de recursos. Tais tipos de controles constituem-se em: a) métodos legislativos; b) métodos mecânicos; c) métodos culturais; d) método de resistência de plantas

a insetos (plantas transgênicas e plantas inseticidas); e) método de controle por comportamento (controle com hormônios e/ou feromônios); f) controle através da esterilização de insetos (autocida); g) controle biológico; h) métodos químicos i) método genético (baseado na obtenção de esterilidade através de cruzamentos interespecíficos com produção de híbridos estéreis, de mutações condicionais letais e de esterilidade de translocação), j) métodos de controle físico e f) controle de pragas na agricultura orgânica.

De acordo com Parra *et al.* (2002), o controle biológico está ganhando cada vez mais importância em programas de manejo integrado de pragas (MIP), no Brasil e no mundo. O controle biológico constitui, ao lado da taxonomia, do nível de controle e da amostragem, um dos pilares de sustentação de qualquer programa de MIP. Além disso, é importante como medida de controle para a manutenção das pragas abaixo do nível de dano econômico, junto a outros métodos, como o cultural, o físico, o de resistência de plantas a insetos e os comportamentais (feromônios), que podem até ser harmoniosamente integrados com métodos químicos ou mesmo com plantas transgênicas.

Controle Biológico

O controle biológico é uma derivação do próprio controle natural, descoberto, concebido e mantido pelo ser humano, no combate às pragas, particularmente aos insetos (OLALQUIAGA ; LOBOS, 1993). Segundo Gallo *et al.* (2002) este tipo de controle de praga pode ser: a) controle biológico clássico, quando se procura introduzir de forma definitiva um inimigo natural em uma determinada região, para que ele possa controlar efetivamente populações de espécies praga; b) controle biológico aumentativo ou inundativo, de forma que o inimigo natural é multiplicado massalmente em laboratórios especializados e posteriormente liberado no campo, em momentos apropriados e c) controle biológico por conservação, quando é feita a manutenção dos inimigos naturais em agroecossistemas através do favorecimento de suas condições de sobrevivência e reprodução.

As principais vantagens do controle biológico são: 1) não deixa resíduos, 2) é mais específico e geralmente não provoca desequilíbrio ou causa problemas ambientais e 3) é permanente. Todavia, pode-se citar como desvantagens: 1) ação mais lenta que os inseticidas; 2) é mais eficiente para culturas perenes ou semi-perenes (onde a população da praga pode se manter continuamente todo o ano); 3) faz-se necessário o domínio da criação massal e posterior liberação, considerando-se o custo relacionado à mão-de-obra especializada, laboratórios, etc e 4) a aclimatação de inimigos naturais introduzidos em novas áreas nem sempre é perfeita, o que reduz a eficiência do controle no campo, sendo necessário realizar pesquisas específicas para avaliar os impactos da liberação destes no meio.

No entanto, o controle biológico no sentido clássico tem sido limitado em suas oportunidades de êxito, dentro do contexto da produção agrícola comercial, pois requer certa estabilidade ambiental e de uma biodiversidade mínima que somente alguns ecossistemas perenes, dependendo do manejo, possuem. Outra questão importante na restrição das oportunidades do controle biológico clássico é o fato das taxas naturais de parasitismo de muitas espécies introduzidas e muitas espécies endêmicas serem geralmente baixas, inviabilizando, assim, o controle populacional adequado da espécie praga (GERARDO, 1996).

Controle biológico contra as moscas-das-frutas

Segundo Wharton (1989), o primeiro programa de controle biológico dirigido contra as moscas-das-frutas (tephritídeos) foi realizado na Austrália em 1902, quando foi iniciada, sem muito êxito, a busca de inimigos naturais contra a mosca-do-mediterrâneo, *C. capitata*.

Em 1945, foi implementado no Hawaii um dos mais importantes programas de controle biológico clássico já desenvolvido contra Tephritidae, após a invasão da mosca oriental *Bactrocera dorsalis* (CLAUSEN *et al.*, 1965).

Três espécies de parasitóides apresentaram maior importância: *Biosteres vandenboschi* (Fullaway), *Biosteres arisanus* (Sonan) e *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmed) (Hymenoptera: Braconidae). Os

resultados de campo favoreceram a primeira espécie, mas os melhores resultados da criação massal (cada vez mais artificial), foram obtidos com *D. longicaudata*, que se estabeleceu na área de liberação, como mencionam Wong *et al.* (1992) e Marucci e Clancy (1950). Desde então, os procedimentos estabelecidos na criação de *D. longicaudata* têm servido como base para criar outras espécies de parasitóides. No entanto *B. arisanus* e *B. vandenvoschi* têm apresentado diferentes problemas para obter resultados satisfatórios na aplicação do controle biológico.

Segundo Cancino (1996), Greany *et al.* (1976) publicaram um avanço muito importante na criação de *D. longicaudata*, no qual se discutem técnicas que fornecem as bases para estabelecer uma produção de milhões de parasitóides por semana. A criação de parasitóides em larvas de Tephritidae tem possibilitado estabelecer níveis massivos, e provavelmente são as espécies de parasitóides com processo de criação massal mais avançado e com maiores resultados positivos em quantidades de produção.

Marucci e Clancy (1950) marcam o início da criação massal com respeito aos parasitóides de moscas-das-frutas, que foi posteriormente desenvolvida com os trabalhos de diversos autores, até a criação, com êxito, de *D. longicaudata* na fábrica de Moscafrut em Metapa de Domínguez, Chiapas, onde se logrou uma cifra recorde de produção mundial de 50 milhões/semana (DE LA TORRE *et al.*, 1995). Em 1983, Greathead e Waage definiram o controle biológico por inundação como uma estratégia em que os inimigos naturais nativos ou introduzidos, são criados de forma massiva e liberados nos períodos críticos para a supressão de populações de pragas.

Mas é Knipling (1992) quem propõe com maior ênfase a alternativa de utilizar o controle biológico por inundação para a supressão de populações de pragas. Entre as condições ideais para desenvolver um programa desta natureza, Knipling (1992) ressalta que as liberações inundativas devem ocorrer de maneira preventiva, em épocas de menor densidade da população da praga e com uma densidade, por parte do inimigo natural, que possa garantir que o número de encontros parasitóide-hospedeiro seja tal que ocasione uma diminuição drástica na população hospedeira (DE ARAÚJO, 2000).

Sivinski *et al.* (1996) mostraram que liberações inundativas de *D. longicaudata* contra *A. suspensa*, na Flórida, EUA, provocaram diminuições muito importantes nas médias de captura de moscas por armadilha (nas áreas de liberação quando comparadas com registros históricos de capturas). De forma semelhante, Burns *et al.* (1996) apresentam dados sobre a diminuição de captura de moscas-das-frutas, na Flórida, EUA, depois de liberações inundativas de *D. longicaudata*. No entanto as porcentagens de parasitismos encontradas foram relativamente baixas, com média de 8,83%.

Gallo *et al.* (2002), assim como Gerardo (1996), consideram que o controle biológico por inundação pode vir a ser, em muitos casos, a forma mais eficiente de controle, mas para isto é necessário proceder a uma estimativa do controle biológico natural existente, fazer outra estimativa da população da praga e seguir a criação massal do inimigo natural para depois liberá-lo no meio em número suficiente para o controle da praga alvo. Gerardo (1996) salienta que é mais importante que a produção massiva seja economicamente rentável, em vez de proporcionar indivíduos altamente competitivos para serem liberados no campo.

Em Setembro de 1994, a Embrapa Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas, BA, com o apoio do Laboratório de Quarentena “Costa Lima”, da Embrapa Meio Ambiente, introduziu no território nacional o parasitóide exótico *D. longicaudata*, proveniente do Department of Plant Industry, Gainesville, Florida, EUA. Tal introdução objetivou avaliar o potencial de utilização desse agente em diferentes ecossistemas do Brasil visando a implementação de um programa de controle biológico de moscas-das-frutas neotropicais do gênero *Anastrepha* e de *Ceratitis capitata* presentes no país (CARVALHO *et al.* 1995; 1998; 2000; WALDER; SARRIÉS, 1995; CARVALHO; NASCIMENTO, 2001).

Segundo Carvalho e Nascimento (2002), o parasitóide *D. longicaudata* foi escolhido porque ataca várias espécies de moscas-das-frutas: *C. capitata* (Guatemala, Costa Rica e Chile/Peru); *A. ludens*, a mosca-das-frutas mexicana (México e Texas); *A. suspensa*, a mosca do Caribe (Flórida); e outras espécies de *Anastrepha* (México, Costa Rica, Guatemala e Brasil).

Foram enviadas remessas do parasitóide exótico para laboratórios interessados na avaliação desse organismo, a fim de garantir e ampliar a chance de sucesso no estabelecimento de *D. longicaudata* no Brasil: Laboratório de Entomologia da Embrapa Clima Temperado, em Pelotas, RS, Laboratório de Entomologia da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural (Epagri) em Caçador, SC; Seção de Entomologia do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), em Piracicaba, SP; e Laboratório de moscas-das-frutas do Instituto de Biociências/USP, em São Paulo, SP. A avaliação desse parasitóide foi feita nos estados da Bahia, Pernambuco, Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul e Amazonas (CARVALHO; NASCIMENTO, 2001).

Todos os projetos implementados no Brasil seguiram a mesma metodologia, ou seja, realizaram monitoramentos de larvas de moscas-das-frutas em diferentes fruteiras antes das liberações de *D. longicaudata* em campo. Os objetivos principais dessa fase foram o conhecimento do complexo de parasitóides nativos presentes e a avaliação do impacto após a introdução de *D. longicaudata* nos diferentes ecossistemas nos quais foi liberado (CARVALHO; NASCIMENTO, 2002).

Segundo Carvalho e Nascimento (2001), no dia 28 de setembro de 1994, chegaram no CENA/USP, Piracicaba - SP, 1.349 pupas de *C. capitata* parasitadas por *D. longicaudata*. No ano de 2006 foram feitas liberações deste parasitóide em áreas de citros e café, no Centro de Citricultura Sylvio Moreira (Cordeirópolis, SP), onde se verificou índice de parasitismo médio de 19,8% em frutos de café, com recaptura de 51 machos e 19 fêmeas (WALDER, 1997). Em 1999, o CENA produziu massalmente 2 milhões de *D. longicaudata*, colaborando com o programa internacional para a erradicação de mosca-da-carambola (Carambola Fruit Fly Programme). Os parasitóides foram enviados de São Paulo para Macapá, PA, sendo as ações de biocontrole e a avaliação da qualidade dos parasitóides coordenadas pela Embrapa Mandioca e Fruticultura (CARVALHO; NASCIMENTO, 2001).

No entanto, existe uma certa resistência na utilização deste método de controle, por parte dos produtores e técnicos, pois um dos problemas

apontados é que os parasitóides como *D. longicaudata*, parasitam a praga no fim de seu desenvolvimento larval, ou seja, depois que causou o dano.

Pode-se notar que na maioria dos trabalhos existentes, as espécies com melhor avaliação correspondem a *D. longicaudata* e a *D. tryoni*, pois estas têm mostrado vantagens tanto em sua adaptação para a criação massal como em seu desempenho no campo, sem que isto signifique que sejam as únicas espécies disponíveis para este fim, ficando claro que são necessárias maiores investigações para inserir outras espécies com potencial de serem utilizadas em programas inundativos, a fim de dispor de um leque mais amplo que satisfaça as necessidades que diferentes ambientes e hospedeiros apresentam.

Em relação ao planejamento do programa de controle de pragas, a modelagem matemática vem se mostrando de grande utilidade. A modelagem matemática consiste na arte de transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e resolvê-los interpretando suas soluções na linguagem do mundo real (BASSANEZI, 2002).

Modelos de simulação parasitóide-praga, desenvolvidos em programas de computadores, facilitam a adoção de medidas biológicas. Embora ainda incipientes no Brasil, já são de larga utilização em outros países. A confecção desses modelos depende da alimentação com dados básicos sobre o inimigo natural, nem sempre disponíveis em nosso país (PARRA *et al.*, 2002).

A modelagem matemática para simulação de sistemas dinâmicos é uma técnica apropriada para orientar na solução de problemas referentes à dinâmica de populações de insetos e seu controle, pois permite reunir informações de diferentes áreas, simular diferentes cenários e avaliar a interferência das variáveis envolvidas no sistema, orientando pesquisas futuras de erradicação/controle (DE ARAÚJO, 2000).

Muitas vezes, quando os sistemas são complexos e envolvem diferentes variáveis, como os agroecológicos, é necessário utilizar ferramentas como modelos de simulação para auxiliar na decisão mais acertada a ser adotada. Olalquiaga e Lobos (1993) também concordam que a modelagem e simulação

podem dar uma maior segurança em relação a melhor atitude a ser tomada para o controle de pragas agrícolas.

Para que um modelo matemático de simulação possa simular adequadamente práticas de controle biológico é necessário que ele seja constituído por equações e variáveis matemáticas que representem fielmente o sistema biológico e ecológico em questão. Tendências atuais indicam que para que isto ocorra, é importante que tal modelo leve em consideração variáveis biológicas e ecológicas específicas do sistema analisado, considere o nível trófico composto pela planta hospedeira da espécie praga e seja composto por equações espacialmente explícitas.

Até o momento, os modelos matemáticos de interação presa-predador e hospedeiro-parasitóide, aplicados ao controle biológico, apresentam um enfoque muito mais teórico do que prático, já que este tipo de conhecimento científico ainda é relativamente recente e exige trabalho conjunto entre profissionais de áreas geralmente distintas (área de exatas e área de biológicas). A maioria de tais modelos possui a função de questionar, alterar ou propor teorias científicas na área de dinâmica populacional de insetos e de controle biológico.

Estão em pequena proporção os trabalhos que se baseiam em dados reais coletados em campo ou em laboratório, e são pouquíssimos aqueles que possuem enfoque específico e prático, com objetivos reais de analisar e propor soluções para situações reais de campo. Dentre os modelos internacionais com aplicabilidade prática específica, podem-se citar aqueles desenvolvidos para combater o besouro da manga (“mango mealy bug”) do oeste da África, proposto por Goldfray e Waage (1991), o besouro da farinha da mandioca (“cassava mealy bug”), na África, desenvolvido por Gutierrez *et al.* (1993), a broca da cana-de-açúcar africana (“sugarcane stalk borer”), apresentado por Hearne *et al.* (1994), o ácaro vermelho da Califórnia (“California red scale”), desenvolvido por Murdoch *et al.* (1996), a mosca branca do algodoeiro (“cotton whitefly”), modelo proposto por Mills e Gutierrez (1996), e o besouro do algodoeiro (“cotton boll weevil”), apresentado por Legaspi *et al.* (1998).

No Brasil, exemplos de modelos matemáticos de simulação que apresentam estratégias práticas específicas de controle biológico de pragas agrícolas são mais escassos ainda. Entre eles, pode-se citar o modelo para o controle de broca-da-cana pelo parasitóide *Tichogramma galloi*, desenvolvido por Ambrosano *et al.* (1996), o modelo para simular a aplicação da técnica do inseto estéril e etapas de implementação de um programa de controle da mosca-do-mediterrâneo no Brasil, apresentado por De Araújo (2000) e o modelo de simulação do impacto do fungo *Nomuraea rileyi* em populações da lagarta da soja, proposto por Sujii *et al.* (2002).

O objetivo inicial desse trabalho de mestrado é propor um modelo matemático de simulação, especialmente explícito em duas dimensões, baseado na Equação de Reação-Difusão, que represente o controle biológico da mosca-das-frutas *Ceratitis capitata* através de liberações inundativas do parasitóide braconídeo *Diachasmimorpha longicaudata*, em plantações de laranja doce. O objetivo final desta dissertação é apresentar uma nova proposta de manejo integrado de *C. capitata*, em plantações de laranjas, através do uso conjunto de iscas tóxicas com liberações inundativas de *D. longicaudata*.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

FAMÍLIA TEPHRITIDAE

A ordem Diptera, a qual pertencem as moscas-das-frutas (Tephritidae), compreende uma diversidade de espécies adaptadas a explorar diferentes tipos de alimentos, com hábito alimentar desde hematófago, herbívoro, até saprobiótico, todos eles de grande importância do ponto de vista ecológico. As espécies de moscas-das-frutas presentes no continente americano representam um quarto das espécies de moscas-das-frutas do mundo. As áreas quentes e úmidas das regiões tropicais e subtropicais são os locais com maior diversidade, onde o gênero *Anastrepha* com suas 180 espécies está melhor representado, formando grande parte da biodiversidade destas zonas (TEJADA, 1996).

A mosca-do-mediterrâneo, *C. capitata*, encontra-se amplamente distribuída nas regiões produtoras do país. O primeiro registro mundial de *C. capitata*, foi na Europa, distribuída em grande quantidade de frutos, nos arredores de Grassé (costa meridional francesa), no ano de 1772 (ROS, 1988). No continente americano, essa espécie foi detectada pela primeira vez no

Brasil, em 1901, e a partir desta data foi encontrada por toda América do Sul (MOLINEROS *et al.*, 1992).

Ciclo de Vida e Hábitos

Os tefritídeos são insetos holometabólicos com ciclo de vida composto pelas fases de ovo, larva, pupa e adulto (SOUZA FILHO *et al.*, 2003). As moscas-das-frutas se desenvolvem nas espécies vegetais, onde os adultos buscam proteção, alimento e local para a corte e o acasalamento. O ciclo de vida das moscas-das-frutas começa quando a fêmea adulta, depois de fecundada, perfura a casca das frutas (hospedeiro) e deposita seus ovos.

Os ovos incubam e produzem larvas, que se desenvolvem alimentando-se da polpa da fruta. A fruta infestada se decompõe e normalmente cai no solo. Neste local as larvas se enterram, depois de completarem seu desenvolvimento, para se transformarem em pupas. Ocorre, então, a metamorfose e os adultos emergem das pupas e reiniciam um novo ciclo, conforme esquematizado na **Figura 1**. A duração do ciclo de vida varia de espécie para espécie, conforme as características climáticas de cada região e da oferta de hospedeiros. A **Figura 1** mostra também quais são os momentos do ciclo de *C. capitata* que permitem liberações de parasitóides e aplicação da técnica do inseto estéril.

CICLO DA MOSCA DO MEDITERRÂNEO E POSSÍVEIS CONTROLES BIOLÓGICOS

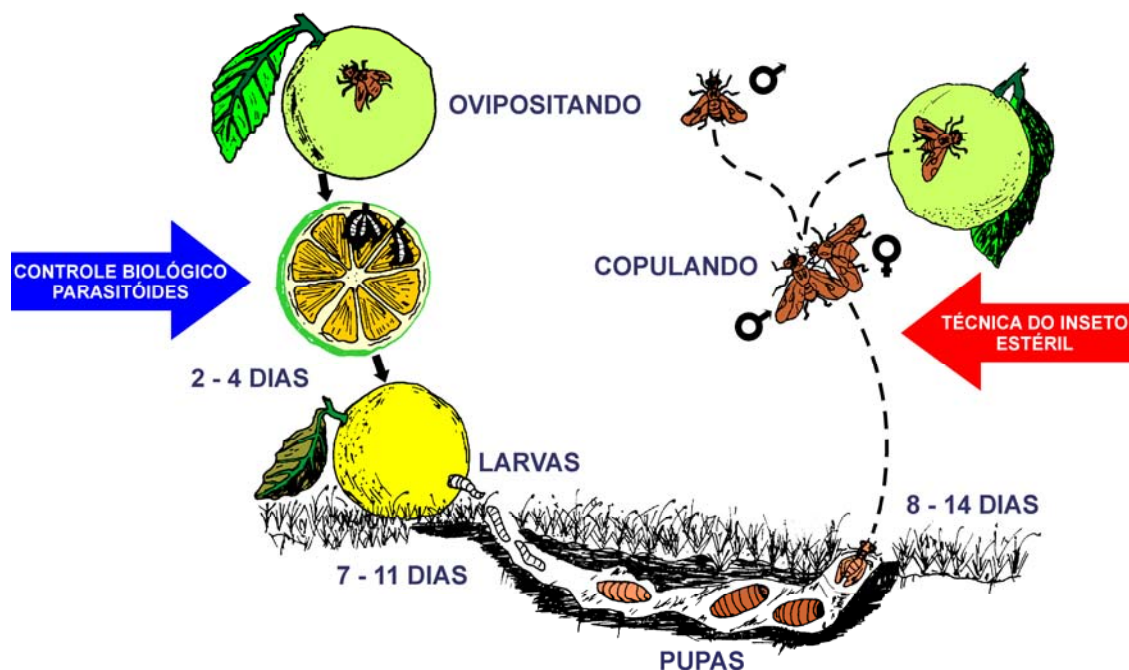


Figura 1. Esquema do ciclo de vida de *Ceratitis capitata*, indicando o momento de aplicação de possíveis controladores biológicos. Esquema retirado de Walder (2002).

A duração do desenvolvimento das moscas-das-frutas, como de todos insetos, está diretamente relacionada com a temperatura, diminuindo em temperaturas mais altas e aumentando em temperaturas mais baixas. Ovos, larvas e adultos têm desenvolvimento influenciado pela temperatura do ar, enquanto que a pupa, pela temperatura do solo (DE ARAÚJO, 2002).

Em condições de laboratório, à temperatura de 25°C, o ciclo de vida até adulto de *Anastrepha fraterculus* (Wied.) dura 30 dias (ovo: 3 dias, larva: 14 e pupa: 13). Em *C. capitata*, o ciclo dura 30 dias para insetos recém-coletados (ovo: 2, larva: 11 e pupa: 17) e 21 dias para insetos mantidos em laboratório por 10 gerações (ovos: 2, larva: 9 e pupa: 10) (MATIOLI, 1986). O tipo de hospedeiro também pode alterar a duração do ciclo de vida das espécies de mosca das frutas.

A oviposição é feita em frutos na fase de amadurecimento. Fatores climáticos como a temperatura, luminosidade, forma, tamanho e características

da superfície do fruto, influenciam o processo de oviposição. Para a localização correta do fruto, a fêmea utiliza estímulos visuais e olfativos detectados por estruturas localizadas nas antenas, tarsos, probóscide e ovipositor. A localização correta do sítio de oviposição é uma das etapas cruciais do ciclo de vida, pois a escolha errada leva à perda da descendência (SUGAYAMA; MALAVASI, 2000).

Localizado o fruto adequado, a fêmea caminha sobre ele para determinar o melhor local para oviposição, e depois de encontrando o local apropriado, introduz o ovipositor através da casca, no mesocarpo. Em seguida faz um movimento para alargar o orifício a fim de fazer uma câmara onde coloca de 1 a 10 ovos, dependendo do fruto (GALLO *et al.*, 2002).

Diversos autores estudaram a oviposição das moscas-das-frutas. Souza *et al.* (1983), encontraram um número médio de 10,5 ovos por oviposição em pêssegos e 5,76 em café, para *C. capitata*. Os mesmos autores verificaram que para *A. fraterculus*, a média de ovos por oviposição foi de 1,16, 1,04 e 1,00 infestando café, pêssago e maçã, respectivamente.

A freqüência de postura geralmente é maior no início do período de oviposição e decresce com a idade da fêmea (MARTINS, 1986). Gallo *et al.* (2002) comentaram que fêmeas de *C. capitata*, podem ovipor cerca de 800 ovos durante seu ciclo de vida. Fletcher (1989) encontrou uma variação entre 300 a 1000 ovos, durante o ciclo de vida de *C. capitata* e para *A. fraterculus* o número médio de ovos foi de 394,2 por fêmea, quando mantidas sob temperatura de 25°C.

De acordo com Muniz e Gil (1984), em condições de laboratório, o período de oviposição de *C. capitata* é de aproximadamente 50 dias, variando conforme as condições climáticas. Durante o período de pré-oviposição, aproximadamente 10 dias, as fêmeas de moscas-das-frutas consomem com avidez alimentos ricos em proteína, necessários ao pleno desenvolvimento dos ovários.

Os ovos das moscas-das-frutas apresentam coloração branco-leitosa (**Figura 2**), são fusiformes e em algumas espécies são encurvados (semelhantes a pequenas bananas). Nas espécies em que a morfologia dos

adultos é muito semelhante, os ovos são diferentes, como é o caso de *A. fraterculus* e *Anastrepha obliqua* (Macquart). O tamanho dos ovos varia de espécie para espécie (GALLO *et al.*, 2002; OLALQUIAGA; LOBOS, 1993).



Figura 2. Ovos de *C. capitata* em polpa de fruto de damasco. Foto retirada de http://www.todafruta.com.br/todafruta/mostra_conteudo.asp?conteudo=12091.

Segundo Morgante (1991), as larvas das moscas-das-frutas são do tipo vermiforme, sem pernas torácicas e abdominais, e sem cápsula cefálica. O desenvolvimento larval ocorre através de três instares, que podem ser caracterizados pelo aspecto dos ganchos bucais. A **Figura 3** a seguir mostra algumas larvas de *C. capitata* em polpa de pêsego.



Figura 3. Larvas de *Ceratitidis capitata* em polpa de pêsego. Foto retitada de <http://edis.ifas.ufl.edu/IN371>.

As pupas são do tipo coarctata, cobertas pelas exúvias do último estágio larval que formam o pupário (**Figura 4**). Em *C. capitata*, as pupas medem 4 mm de comprimento por 2 mm de largura (MORGANTE, 1991).



Figura 4. Pupas de *Ceratitidis capitata*. Foto retirada de <http://www.viarural.com.ar/viarural.com.ar/agricultura/aa-incsetos/ceratitidis-capitata-06.html>

Os adultos da mosca-do-mediterrâneo possuem o corpo com 4 a 5 mm de comprimento e asas em delta, com zonas de cores laranja, pardo, negro, cinza e branco (**Figura 5**). O macho se distingue por suas vibrisas espatuladas

e o abdome em terminal arredondado. A fêmea exibe um ovipositor, com o qual causa grandes danos nas frutas. Mesmo que o ovipositor não possa atravessar a casca de alguns frutos, pode ser utilizado para fazer feridas nos mesmos (ovipositor oportunista). Geralmente, as fêmeas acasalam uma única vez, podendo ocorrer um segundo acasalamento quando a quantidade de líquido seminal é muito pequena.

Adultos nativos de *C. capitata* podem viver cerca de 10 meses (GALLO *et al.*, 2002). Muñiz e Gil (1984) afirmam que a expectativa de vida é de 25 a 78 dias, para fêmeas mantidas de 31° a 19 °C, respectivamente, e para machos de 44 a 107 dias, mantidos às mesmas temperaturas.



Figura 5. Adulto fêmea de *Ceratitidis capitata*. Foto retirada de http://www.fundecitrus.com.br/doencas/mosca_fruta.html.

Segundo Quesada-Alué *et al.* (1994), os adultos de *C. capitata* são bons voadores, pois já foi detectado que moscas marcadas dispersaram com facilidade até 2,5 km do lugar da liberação. Além desse dado, existem casos registrados de vôo a grandes distâncias (mais de 25 km) que incluem a travessia de extensões de água, entre ilhas. Provavelmente o vento ajuda na dispersão destes insetos.

Acasalamento das moscas-das-frutas

Uma das características principais de um sistema de acasalamento é a existência de sinais para atrair e comunicar-se com o sexo oposto. De acordo com Burk (1981), os sinais mais elaborados no comportamento sexual de insetos se encontram em dípteros e dentro desta ordem, nas famílias Otitidae, Drosophilidae e Tephritidae.

De acordo com Burk (1981), os sinais mais observados nas moscas-das-frutas são produzidos pelos machos, e são usados no contexto sexual. O corpo destas moscas é colorido e reflexivo, suas asas transparentes são marcadas com distintos padrões. As diferentes posições e movimentos das asas e pernas, provavelmente provêm informações acerca da espécie, sexo e outras características individuais, embora isto não tenha sido ainda demonstrado experimentalmente. É possível que os machos usem esta informação acústica combinada com os vãos para avaliar o tamanho do oponente e desta forma, evitar os custos que estão implicados nas brigas reais. Mesmo que as moscas-das-frutas, como outros dípteros, não tenham desenvolvido alguma defesa especial, as brigas podem resultar custosas. Por exemplo, um macho com as asas machucadas como resultado de uma briga, possivelmente não possa atrair muitas fêmeas com seu reduzido chamado acústico (SIVINSKI; WEBB, 1985).

Webb *et al.* (1983) e Sivinski *et al.* (1984) observaram diferentes sinais acústicos, cada um com diferentes características e padrões de intensidade, os quais são produzidos por vibrações das asas. Os sinais acústicos ocorrem quando estão emitindo feromônios, brigando com outros machos, cortejando fêmeas, antes da cópula e depois da iniciação.

A comunicação química não é tão sofisticada como em lepidópteros, mas os feromônios têm sido identificados em um grande número de espécies de moscas-das-frutas (CHAMBERS, 1977). Em várias espécies, os machos produzem substâncias atraentes de média a longa distância, as quais são dispersadas de uma cavidade distensora ao final do abdômen, quando os machos estão chamando as fêmeas (NATION, 1981). Os machos, adotando uma postura "inflada", ondulam suas asas, abanando-as rapidamente, rodando

ao redor de si mesmos e freqüentemente tocando com a ponta do abdômen abaixo da superfície das folhas, aparentemente para depositar seu feromônio sexual e aumentar a área efetiva de evaporação do feromônio (PROKOPY; HENDRICHIS, 1979).

Diversidade de Hospedeiros

Segundo Sugayama e Malavasi (2000), frutos hospedeiros, que constituem as fontes de alimento larval, variam conforme a espécie da mosca. O processo de seleção do hospedeiro adequado para o desenvolvimento das larvas é feito pela fêmea. Isto é crítico para a sobrevivência dos descendentes, em função da impossibilidade das larvas trocarem de hospedeiro. Pode-se afirmar que a distribuição geográfica de uma espécie é determinada pela presença de hospedeiros.

Segundo Norrbom e Kim (1988), não são conhecidos os hospedeiros de 50% das espécies brasileiras de *Anastrepha spp.* De maneira geral, os levantamentos populacionais são feitos através de coletas com frascos caça-moscas, utilizando substâncias atrativas. Embora de grande utilidade para o estudo da ocorrência e distribuição geográfica, este método não permite estabelecer uma relação entre a planta hospedeira onde foi instalada a armadilha, com as espécies capturadas.

Apesar de dados insuficientes quanto ao número de hospedeiros de cada espécie de Tephritidae, podem-se reconhecer espécies polífagas e monófagas. As primeiras infestam hospedeiros de diferentes famílias de plantas, enquanto as monófagas infestam hospedeiros de plantas relacionadas, pertencentes a um mesmo gênero ou família (DE ARAÚJO, 2002).

No estudo das relações de espécies de moscas-das-frutas com seus hospedeiros, observa-se que apesar de algumas espécies de *Anastrepha* serem consideradas polífagas, certas espécies apresentam preferência acentuada, enquanto que no gênero *Ceratitis* esta preferência ainda não tem sido suficientemente aclarada.

Segundo Morgante (1991) e Silva (1990), a ocorrência no Brasil de *C. capitata* se relaciona preferencialmente a hospedeiros introduzidos como

pêssego, maçã, pêra, caqui, café, laranjas e outros. Esta é uma das espécies de moscas-das-frutas cosmopolitas, sendo citada infestando mais de 250 espécies de plantas hospedeiras.

A seleção do hospedeiro em insetos fitófagos é regulada por diversos fatores dependentes de sua percepção, encontro e reconhecimento. Ao mesmo tempo, estes fatores dependem de forma direta das características próprias das plantas, tais como certos atributos morfológicos e nutricionais (THORSTEINSON, 1960).

Os requerimentos nutricionais podem ser qualitativos em relação aos tipos de nutrientes (tais como proteínas, açúcares e vitaminas), e podem ser quantitativos, em função das quantidades relativas requeridas em sua dieta. A este respeito os Tephritidae têm diferentes habilidades para explorar seus hospedeiros; particularmente nas espécies polífagas e oligófagas, suas larvas vivem em plantas com grande variabilidade em suas características nutricionais; esta capacidade de utilizar um amplo número de hospedeiros deve ter um controle genético (TSITSIPIS, 1989).

Em relação à citricultura paulista, é comum o ataque de *A. fraterculus* em frutos verdes, sobretudo nas variedades precoces, como as laranjas “Lima”, “Hamlin”, “Baia” e tangerinas “Cravo” e “Ponkan”, durante o final do verão e o início de outono (março-abril). A mosca-do-mediterrâneo ataca principalmente as variedades tardias (Pêra, Valência, Natal e Murcott), no período de julho a novembro, nas regiões central e norte do Estado de São Paulo (SOUZA-FILHO; RAGA, 1998 apud SOUZA-FILHO, 2007a, p. 6). Além disso, a tendência dos citricultores cultivarem diversas variedades desde a mais precoce até a mais tardia, favorece a formação de uma seqüência de gerações de moscas pelo fato de encontrarem constantemente frutos em condições adequadas de serem atacados (SOUZA-FILHO *et al.* 2003; AGUIAR-MENEZES *et al.* 2004 apud SOUZA-FILHO, 2007b, p. 6).

Danos

Segundo White e Elson-Harris (1992) e Souza Filho *et al.* (2003), as espécies de moscas-das-frutas causam grandes perdas econômicas, não só

pelo dano direto no fruto, como também pelas restrições às exportações, às práticas quarentenárias exigidas e aos altos custos de controle ou erradicação. Entretanto, a quantificação dos danos causados por moscas-das-frutas é muito difícil, pois o status da praga varia de país para país e tem mudado com o passar dos anos, especialmente nas últimas décadas.

Em um mesmo país a importância de uma espécie pode variar segundo o hospedeiro, a região ou a época do ano (HERNANDEZ-ORTIZ; ALUJA, 1993). No entanto, em muitos países os danos causados por Tephritidae não têm sido avaliados (WHITE; ELSON-HARRIS, 1992). Enkerlin *et al.* (1989), estimou perdas médias de 25% na fruticultura desenvolvida na América Central e do Sul, por acausa das moscas-das-frutas, no final da década de 1980.

Em algumas regiões, essas pragas chegam a comprometer 100% da produção de frutos (ORLANDO; SAMPAIO, 1973).

Em São Paulo, todo ano são perdidas aproximadamente 1,5 milhões de caixas de citros por causa dessa praga (NASCIMENTO *et al.*, 1993). As **Figuras 6 e 7** a seguir mostram os tipos de danos que as moscas-das-frutas causam em frutos de laranja.



Figuras 6 e 7. Lesões provocadas por mosca-das-frutas em frutos de laranja. Fotos retiradas de http://www.fundecitrus.com.br/doencas/mosca_fruta.html.

Baldez (1972), em Itaboraí (RJ), calculou em 20% as perdas causadas por moscas-das-frutas à citricultura. Prates (1980) estimou uma perda de seis milhões de caixas de citros nas áreas produtoras de São Paulo, sendo que na safra 78/79 as perdas foram de aproximadamente 5%.

BIOLOGIA DO PARASITÓIDE *Diachasmimorpha longicaudata* (HYMENOPTERA: BRACONIDAE)

Segundo Cancino (1997), *D. longicaudata* é um himenóptero endoparasitóide originário da região Indoaustraliana, introduzido inicialmente no Hawaii (EUA) para combater a mosca *Bactrocera dorsalis*, em 1945. Neste ano, foram liberadas 32 espécies de inimigos naturais para combater a mosca-das-frutas-oriental, mas com exceção de *D. longicaudata*, os outros parasitóides apresentaram problemas na produção massal. Esta é umas das principais razões deste parasitóide ser amplamente utilizado em programas de controle biológico de moscas-das-frutas.

O parasitóide braconídeo *D. longicaudata* apresenta a sua fase imatura no interior das larvas de moscas-das-frutas, mas há citações de que pode se desenvolver ocasionalmente nas larvas de outros dípteros, por exemplo, em moscas domésticas (LÓPEZ, 1983, apud CANCINO, 1997). Ele se distingue também por ser um parasitóide de larva-pupa, pois os ovos são colocados na fase larval do hospedeiro e o adulto emerge na fase pupal deste.

Estágios de Desenvolvimento

Segundo Cancino (1997), os ovos de *D. longicaudata* são cilíndricos, brancos e apresentam uma superfície viscosa quando são recém ovipositados. São cobertos por uma membrana externa delgada, chamada exocóion. O formato do ovo é ligeiramente côncavo na parte ventral e convexo na parte dorsal. As regiões anterior e posterior possuem protuberâncias, sendo a da região posterior de menor tamanho. Durante o período de incubação, os ovos possuem um comprimento de 0,5 mm e no final deste estágio, apresenta comprimento de 0,6 mm. Em função dos movimentos das larvas, estas eclodem e o período de incubação é de 2,5 dias.

A fase larval deste parasitóide possui quatro instares de desenvolvimento, no qual cada um possui aspectos morfológicos bem diferenciados (CANCINO, 1997).

Segundo Gil (2003), logo após eclodir do ovo, a larva possui 0,85 mm de comprimento e grande atividade, se dedicando principalmente à alimentação, com ingestão de gorduras. A larva possui boa organização muscular, digestiva, nervosa e respiratória que se combinam para os movimentos serem livres. A cabeça é grande, quitinizada, coloração escura e possui um par de mandíbulas com bases separadas que permitem movimentos rápidos. Possui antenas curtas para guiarem os movimentos, o canal digestivo é simples, com um tubo reto, esôfago curto e um intestino que ocupa a maior parte do corpo. A larva não possui pernas, embora tenha dois apêndices na parte ventral do corpo, na base da cabeça.

O primeiro instar possui duração de 36 a 40 horas. O segundo, se caracteriza pela cabeça da larva não possuir quitinização e não apresentar partes do corpo diferenciadas. A larva começa a se segmentar, apresentando 14 divisões, as mandíbulas se tomam translúcidas e são distinguidas com dificuldade. Os alimentos consumidos consistem de fluidos, glóbulos de gordura e tecidos. Este instar tem duração de 48 horas. O terceiro instar se distingue claramente do anterior devido ao fato da larva possuir mandíbulas menos quitinizadas e não apresentar diferenciação entre as partes do corpo. A duração desta fase é de 48 horas. O início do quarto instar se caracteriza por um sistema traqueal bem desenvolvido, nove estigmas podem ser observados de cada lado desde o 2º ao 11º segmento corporal. A larva apresenta 3,1 mm de comprimento e 1 mm de largura, o aparelho bucal se mantém saliente e a cabeça se apresenta bem desenvolvida. A sua coloração é amarelo-café (GIL, 2003).

A pupa de *D. longicaudata* possui uma coloração pálida com olhos avermelhados, mede de 3,5 a 4,0 mm de comprimento e 1,6 mm de largura, e é nessa fase que as antenas e o ovipositor das fêmeas começam a se desenvolver. O intestino começa a diminuir. O período pupal é de 6 - 10 dias, mas pode variar dependendo da temperatura ambiente. Uma vez terminado o desenvolvimento, o adulto rompe a pupa abrindo um orifício no 3º ou 4º segmento pupal com a ajuda das mandíbulas (CANCINO, 1997).

O desenvolvimento de *D. longicaudata* sobre *Anastrepha suspensa* dura em torno de 18 - 19 dias, segundo Lawrence *et al.* (1976). Já o ciclo de vida médio, de ovo a adulto, do parasitóide *D. longicaudata* criado sobre larvas de *Ceratitis capitata* é de 14 - 16 dias. O desenvolvimento do estágio imaturo no interior do hospedeiro leva a um parasitóide solitário, ou seja, um hospedeiro dá origem a um parasitóide, mas há casos de superparasitismo em laboratório com conseqüente canibalismo. Neste caso há emergência de um parasitóide muito pequeno, pouco eficiente (WALDER *et al.*, 1995).

Em relação à fase de adultos, o primeiro a emergir é o macho e aproximadamente dois dias depois, a fêmea, quando a temperatura é próxima de 26°C. A cópula ocorre imediatamente após a emergência da fêmea e é efetuada em segundos. Sivinski e Webb (1989) citam a presença de sons produzidos pelos machos através da vibração das asas e acreditam que esses sons atraem as fêmeas. A **Figura 8** mostra um adulto de *D. longicaudata* à procura de uma larva hospedeira.



Figura 8. Adulto de *Diachasmimorpha longicaudata*. Foto retirada de <http://www.spc.int/pacifly/Control/Biocontrol.html>.

Segundo Martinez (1992), há possibilidade de a fêmea copular mais de uma vez. Não há estudos sobre a presença de substâncias (feromônios) que possam ter relação com a cópula.

Doutt (1964) indica que a oviposição em fêmeas de *D. longicaudata* pode se realizar imediatamente após a emergência, e são mais freqüentes após um período de 3 - 5 dias, sendo provável que este período de pré-oviposição tenha razões fisiológicas que às vezes são respostas da alimentação.

Parâmetros Biológicos

De acordo com Walder (2002), o laboratório de Radioentomologia do CENA/USP produziu em 2001 (janeiro - outubro) uma média de 309,35 litros de pupas (quantidade referente à 20 milhões de unidades) de *Ceratitidis capitata*, resultantes de larvas irradiadas com radiação gama, parasitadas por *D. longicaudata* com uma porcentagem média de emergência de 30,72%.

Hardy e Godfray (1990) afirmam que as fêmeas de alguns himenópteros apresentam sistema haplodiplóide, o qual permite que estes gerem descendentes mesmo sem serem fecundadas pelos machos, porém nascerão apenas machos haplóides, sendo as fêmeas diplóides provenientes de ovos fertilizados.

Segundo Gil (2003), o laboratório de Radioentomologia do CENA/USP, produziu, em 2002, 7 milhões de parasitóides com razão sexual média fêmea/macho de 0,54 e 0,59 sobre larvas de *C. capitata* irradiadas e não irradiadas com radiação gama, respectivamente.

Bispo (1999) observou em seu trabalho que fêmeas não acasaladas de *D. longicaudata* produziram apenas descendentes machos, enquanto que fêmeas acasaladas produziram uma razão sexual média de 0,52. Além disso, este autor percebeu que fêmeas não acasaladas apresentaram longevidade máxima de 59 dias e mínima de 10 dias, com uma média de 32,8 dias. Já as fêmeas acasaladas, exibiram uma longevidade mínima e máxima de 8 e 40 dias, respectivamente, com média de 25,5 dias. O fato de fêmeas virgens terem sido mais longevas do que as acasaladas provavelmente ocorreu por causa da economia da energia que seria gasta nos acasalamentos.

Segundo Bispo (1999), o objetivo dos programas de controle biológico é conseguir multiplicar os parasitóides em laboratório obtendo-se a maior

proporção possível de fêmeas; por isso, o acasalamento de espécies arrenótocas deverá ser feito logo após a emergência das fêmeas, pois fêmeas não fecundadas geram machos ou não originam descendentes.

MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AO CONTROLE BIOLÓGICO

A utilização de ferramentas matemáticas na resolução de problemas do mundo real vem se consolidando fortemente em tempos modernos. Isso se deve, em grande parte, ao uso de metodologias sistêmicas na resolução de problemas, ao aumento da força computacional de computadores digitais e ao aprimoramento da metodologia computacional, os quais facilitaram a resolução matemática de muitos problemas (MURTHY *et al.*, 1992).

O passo inicial em qualquer atividade de resolução de problemas, envolvendo ou não modelagem matemática, é a definição clara e sem ambigüidade do problema (ou questão) a ser resolvido. Para o propósito de desenvolver uma metodologia para modelagem matemática, é essencial o desenvolvimento de uma estrutura universal que facilite uma abordagem comum a todos os problemas. A “abordagem sistêmica” oferece tal estrutura, na qual os problemas são vistos como parte integrante de um sistema. Olhando o problema através dessa estrutura, as características importantes do objeto real podem ser claramente identificadas. Esse processo de “caracterização do sistema” é o primeiro passo em direção ao desenvolvimento de um modelo matemático (MURTHY *et al.*, 1992).

Na abordagem sistêmica, o objeto analisado é visto como um sistema composto por características inter-relacionadas. E a solução do problema referente ao objeto é entendida como um estudo do sistema com um objetivo bem definido. O ponto inicial para tal estudo é uma descrição apropriada para o sistema. Qualquer problema do mundo real é geralmente bastante complexo. Desta forma, sua descrição total, quando vista como um sistema, é complexa e praticamente intratável. Felizmente, nem todas as características relativas ao objeto real em pauta são relevantes para o problema analisado e sua resolução. Conseqüentemente, uma descrição parcial é freqüentemente

adequada. Essa descrição parcial, chamada de “caracterização do sistema” retém apenas aquelas características do mundo real que são realmente relevantes para a resolução do problema considerado (MURTHY *et al.*, 1992). Segundo Finkelstein e Carson (1986), a fase de caracterização do sistema pode ser considerada como um processo de simplificação e idealização do problema biológico ou ecológico em consideração.

A caracterização do sistema pode ser feita em qualquer linguagem natural, como por exemplo, o português. No entanto, métodos alternativos, como esquemas pictóricos, maquetes, esquemas teórico-gráficos são mais compactos e elegantes em termos de representação. Como esses métodos de representação descrevem o problema analisado de uma forma mais simples e de mais fácil entendimento, eles propiciam o avanço na direção da construção da modelagem matemática (MURTHY *et al.*, 1992).

Um dos passos mais cruciais e importantes no uso da matemática para resolver problemas do mundo real é a tradução do problema do mundo físico real para uma linguagem matemática. Uma vez isso feito, técnicas de análises matemáticas podem ser usadas para a obtenção da solução do problema em questão. A descrição matemática é chamada de modelo matemático, e o processo de sua obtenção é chamado de modelagem matemática (MURTHY *et al.*, 1992). Assim, a modelagem matemática é um processo através do qual um problema do mundo real é interpretado e representado em termos de símbolos abstratos. Essa abstração formal do problema se separa do mundo real e pode ser tratada somente em termos matemáticos (MURTHY *et al.*, 1992). É importante ressaltar de início que a “solução” obtida é solução do modelo. Trata-se assim de uma aproximação da solução do problema do mundo real. Tal solução deve ser validada de alguma forma para ser aceita.

O uso da matemática é uma das muitas formas de resolver problemas do mundo real. Outras formas incluem experimentação, tanto usando modelos físicos em escala, quanto utilizando experimentação direta, no mundo real (MURTHY *et al.*, 1992).

Segundo McLone (1976) e Murthy *et al.* (1992), a prática de modelagem matemática requer o entendimento de diferentes tópicos. Alguns tópicos são

necessários para lidar com características do mundo real do problema e outros para lidar com a formulação relativa ao mundo abstrato da matemática. Além disso, é necessário haver habilidade para se poder correlacionar estes dois mundos diferentes - o mundo real relativo ao problema e o mundo abstrato da formulação matemática.

De acordo com McLone (1976), Finkelstein e Carson (1986) e Murthy *et al.* (1992), a modelagem matemática é uma arte, como a ciência. Assim como dois problemas nunca são iguais no mundo real, características pessoais como criatividade, intuição e pontos de vista também são muito importantes na arte da modelagem matemática. Isso a torna uma atividade muito desafiadora.

Murthy *et al.* (1992), Hilborn e Mangel (1997) e Bassanezi (2002) afirmam que raramente um modelo matemático adequado é obtido na primeira tentativa de se representar e resolver um problema considerado. Em geral, um procedimento iterativo é necessário; desta forma melhoramentos são progressivamente feitos até o ponto em que se atinge um modelo matemático que se revela adequado. O estilo artístico de modelar é muito importante durante esta fase.

A representação de um sistema geralmente possui menos informação do que o próprio sistema. Isso é importante, pois indica que a representação deve conter somente as características relevantes e significativas para quem está desenvolvendo o modelo. A representação do sistema pode ser um aparato físico ou uma formulação abstrata.

Murthy *et al.* (1992) classificam alguns diferentes tipos de representação:

- i) *Representação em escala*: onde um objeto físico é representado por um outro objeto em escala proporcionalmente menor. Como exemplo pode-se citar a maquete de um prédio. Ela é geometricamente similar a um prédio real, só que em menor escala. Essa maquete pode ser colocada em um túnel de vento para que se possa fazer uma previsão de quais devem ser as forças exercidas pelo vento no prédio real.
- ii) *Representação pictográfica*: como exemplos simples, podem-se citar o desenho de círculos que apresentam a função de

representar a Terra, mapas que representam as características topográficas da superfície do solo e a fotografia que representa um objeto físico.

- iii) *Representação verbal*: consiste na descrição verbal do sistema, seja qual for a linguagem, por exemplo, o português. Esse tipo de representação poderia ser a descrição de características físicas de um elefante, como tamanho, cor e forma do corpo.
- iv) *Representação figurativa ou esquemática*: como exemplo, a representação de moléculas complexas através de estruturas compostas por bolas e varetas de plástico, onde as bolas seriam os átomos e as varetas as ligações atômicas.
- v) *Representação simbólica*: ocorre quando um sistema é representado por uma formulação envolvendo símbolos. Os símbolos podem apresentar significados bem definidos e serem manipulados de acordo com regras bem definidas. Para que uma formulação simbólica se torne a representação de um sistema, é necessário o estabelecimento de correspondência um a um entre os símbolos da formulação e as características físicas do sistema. Sem essa correspondência, a representação simbólica se torna abstrata. Os modelos matemáticos de simulação se enquadram neste tipo de representação.

Como os sistemas analisados são geralmente complexos, um modelo considerado ideal é aquele que, busca representar um determinado sistema da forma mais simples e adequada possível (MURTHY *et al.*, 1992, e HILBORN; MANGEL, 1997).

Modelo matemático

O modelo matemático é a representação simbólica de um sistema através de formulação matemática abstrata. A formulação matemática é composta por símbolos que não possuem sentido fora da matemática. Os símbolos apresentam significados matemáticos precisos e são manipulados através de regras pertencentes à lógica matemática. A formulação matemática

em si não é o próprio modelo matemático. O modelo matemático surge da correlação direta entre formulação matemática e as características que compõem o sistema analisado (MURTHY *et al.*, 1992).

Os modelos que descrevem movimento e dinâmicas populacionais variam de muito simples a extremamente complexos. Eles podem empregar diferentes tipos de formalismo matemático e serem aplicáveis a diferentes níveis de organização biológica.

Segundo Turchin (1998), os principais objetivos dos modelos matemáticos aplicados em ecologia são:

Entendimento formal do problema:

A formulação de um modelo é sempre útil no esclarecimento das idéias. Este exercício descritivo força as pessoas a pensarem sobre quais são os principais aspectos do problema que, por consequência, devem ser incorporados ao modelo e quais aspectos podem ser deixados de fora.

Identificação de lacunas no conhecimento:

Ao se lançar à atividade de formular um modelo, são analisadas as formas funcionais e os valores numéricos dos parâmetros que compõem o modelo. Isso pode revelar a disponibilidade de dados suficientemente bons para estimar algumas funções e alguns parâmetros, e não para outros, imediatamente sugerindo um enfoque para futuras pesquisas empíricas. Quando há muitas lacunas de dados, é necessário decidir quais parâmetros precisam ser estimados com precisão e quais dados podem ser aproximados sem que isso afete a validade do modelo. Isto pode ser feito através da aplicação de um teste de sensibilidade. Tal análise pode indicar que variações em alguns parâmetros geram apenas pequenas variações no resultado final do modelo, enquanto que a variação em outros parâmetros pode causar efeitos desproporcionais. É evidente que é muito interessante concentrar esforços de pesquisas sobre tais efeitos-chave.

Ganhar “insights” teóricos:

Existe uma larga classe de modelos que apresentam a finalidade de terem seus resultados confrontados com dados empíricos. Esses modelos são algumas vezes chamados de “estratégicos” ou “explanatórios”, e tipicamente fazem a seguinte pergunta: Se certos conceitos fossem verdadeiros, como o sistema se comportaria? O objetivo desta classe de modelos é criar “insights” sobre as possíveis interconexões entre os vários fatores que compõem o sistema, e em geral, melhorar nossa intuição. Modelos teóricos do tipo estratégico tendem a ser genéricos – isto é, aplicáveis a uma grande gama de situações. Suas previsões tendem a ser qualitativas. Por esse motivo, eles não são muito apropriados para formulação de hipóteses específicas para problemas particulares.

Testes quantitativos da teoria:

Uma predição qualitativa seria do tipo “o fator X crescerá com a diminuição do fator Y”. O teste qualitativo questiona a teoria que conduz a tal afirmação, sem fazer uma análise muito aprofundada. Um teste do tipo quantitativo por outro lado, pode ser um teste muito mais robusto para analisar a teoria em questão, pois ele não apenas irá dizer se X aumentará, mas dentro de quais limites aumentará. Além disso, ele pode especificar o “formato” da função que descreve a relação entre X e Y e como um possível fator Z afetaria tal curva. Predições quantitativas, no entanto, são de difícil obtenção a partir de um modelo estratégico geral, que não enfoque detalhes biológicos. Isto mostra que este tipo de predição está mais ligado a modelos específicos que apresentam grande embasamento em dados empíricos. Tal tipo de modelo realista (e complexo) pode ser derivado de um modelo estratégico a partir da adição de detalhes biológicos ao seu sistema.

Previsão e Predição:

Finalmente, os objetivos mais almejados, mas ao mesmo tempo os mais elusivos da modelagem matemática são a previsão e a predição. Previsão tem um sentido mais fraco do que predição, e usa o conhecimento que se tem sobre o comportamento passado do sistema para prever seu estado futuro. A

previsão não necessariamente requer um entendimento aprofundado da dinâmica do sistema, e pode ser feita no nível fenomenológico. No entanto, caso a dinâmica do sistema se altere, a previsão provavelmente irá falhar. Para que se possa usar o termo *predição* no seu sentido mais forte, isto é, para prever uma situação que nunca se viu no passado, é necessário um entendimento mecânico do sistema que se analisa. A habilidade de predição deve ser o objetivo final e o teste mais poderoso ao qual um modelo pode ser submetido. No entanto, isto não quer dizer que ciência ou modelos que não sejam preditivos são inúteis. Predição é, apesar de tudo, apenas um dos objetivos listados anteriormente.

Tais classificações para as propostas e os objetivos de modelagem matemática seguem fortemente o espectro clássico do esquema descrição-explicação-predição. Desta forma, a declaração formal do problema e a identificação de lacunas no conhecimento são consideradas objetivos descritivos; ganho de insights teóricos e de interpretação de dados são do tipo explanatório; enquanto previsão e predição e teste quantitativo da teoria em questão apresentam aspectos preditivos do ato de modelar.

Finalmente, existe ainda um outro tipo de objetivo no ato de modelagem biológica e ecológica. Como Pielou (1977) notou, hoje em dia existe uma tradição estabelecida na área de matemática aplicada de utilizar assuntos e teorias ecológicas como material ilustrativo. Apesar de alguns artigos terem como foco problemas ecológicos, seus objetivos são examinar as propriedades de objetos matemáticos abstratos, ou provar teoremas. Essas atividades possuem uma proposta essencialmente matemática e freqüentemente não apresentam relevância direta para a ecologia. No entanto, devido ao fato da ecologia estar sendo um solo tão fértil para os matemáticos, muitos dos modelos, formulados e resolvidos por questões meramente matemáticas, têm se mostrado muito úteis aos ecólogos, apesar de não necessariamente estarem dentro do contexto em que eles foram formulados (TURCHIN, 1998).

A modelagem matemática vem ganhando bastante espaço dentro das áreas de ciências biológicas e do meio ambiente. Pode-se perceber isso nitidamente no campo de disciplinas de biologia e ecologia de populações, já

que ambas são estruturadas basicamente em teorias e formulações matemáticas, com enfoque de estudo na distribuição e na abundância de organismos (ELTON, 1927; ANDREWATHA e BIRCH, 1954; CASE, 1999).

Para os biólogos e ecólogos populacionais, a variável primordial de interesse é a densidade espaço-temporal dos organismos, ou seja, o número de organismos que ocupam uma certa unidade de área ou de volume, em uma determinada coordenada espacial e em um dado instante de tempo (TURCHIN, 1998).

Dentro das áreas de Biologia e Ecologia de Populações, as teorias e os modelos matemáticos que procuram representar as taxas de crescimento e de decréscimo populacional, as formas de interação entre os indivíduos e seu ambiente e, principalmente, os variados tipos de interação entre diferentes espécies, são de enorme interesse ao controle biológico. Isto porque tais estudos possibilitam um grande aprofundamento teórico relacionado ao controle de pragas e permitem inferências em relação à eficiência de possíveis estratégias práticas relacionadas ao controle de espécies praga (CASE, 1999).

Segundo Mills e Getz (1996), os modelos mais importantes ao controle biológico são aqueles que representam e descrevem interações do tipo presa-predador e hospedeiro-parasitóide. Tais modelos podem ser estruturados por Equações Diferenciais ou por Equações de Diferenças. As primeiras trabalham com variáveis contínuas e as últimas com variáveis discretas.

Os modelos que apresentam variáveis discretas devem incluir definições sobre a ordem dos eventos durante cada unidade de tempo (por exemplo, reprodução do hospedeiro, depois parasitismo, depois dispersão, etc...). Em contrapartida, nos modelos com variáveis contínuas os eventos ocorrem continuamente e simultaneamente e por esse motivo nenhuma definição acerca da ordem dos eventos é necessária (BRIGGS; HOOPES, 2004).

Modelos de controle biológico possuem uma longa história de desenvolvimento teórico com enfoque na interação hospedeiro-parasitóide. Esses modelos têm sido favorecidos pelo fato de permitirem várias simplificações que não seriam possíveis para outros grupos de inimigos naturais. Segundo Mills e Getz (1996), a especificidade de muitos parasitóides

permite que o sistema seja considerado fechado e que tempos de geração do hospedeiro e do parasitóide sejam considerados equivalentes, e desde que o ataque ao hospedeiro seja realizado somente pelo estágio de fêmea adulta do parasitóide, é possível ignorar a estrutura de idade ou tratá-la de uma forma bastante simplificada.

Base conceitual dos modelos de interação hospedeiro-parasitóide

Um sistema básico de Equação de Diferenças para um sistema sincronizado de interação hospedeiro-parasitóide, com gerações discretas, pode ser escrito segundo Hassell (1978) e May e Hassell (1988) como o modelo genérico a seguir:

$$\begin{aligned} N_{t+1} &= d(N_t)N_t f(N_t, P_t) \\ P_{t+1} &= cN_t \{1 - f(N_t, P_t)\} \end{aligned} \tag{1}$$

Onde N_t , N_{t+1} e P_t , P_{t+1} são as densidades populacionais do hospedeiro e do parasitóide nas gerações t e $t+1$, respectivamente. A função $d(N_t)$ representa a taxa de crescimento per capita da população do hospedeiro, $f(N_t, P_t)$ é a proporção de indivíduos que escapam ao ataque do parasitóide, e c significa o número médio de parasitóides gerados por cada hospedeiro parasitado. A variável P é geralmente interpretada como sendo a densidade de parasitóides fêmeas adultas e N representa a densidade populacional de hospedeiros adultos. Essa estrutura discreta das gerações caracteriza uma interação entre parasitóides e hospedeiros perfeitamente sincronizados, o que geralmente acontece em sistemas do tipo hospedeiro-parasitóide de regiões temperadas do globo e até mesmo em algumas regiões tropicais (GOLDFRAY; HASSELL, 1987, 1989; GORDON *et al.*, 1991).

Quando ocorre sobreposição de gerações, uma estrutura constituída por Equações Diferenciais é mais adequada para a representação do mesmo sistema:

$$\frac{dN}{dt} = g(N)N - h(N, P)P \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = \gamma h(N, P) - \delta P$$

onde N e P são, respectivamente, as densidades populacionais do hospedeiro (qualquer estágio, mas geralmente adultos) e do parasitóide (geralmente fêmea adulta). A função $g(N)$ representa a taxa per capita de crescimento do hospedeiro; $h(N, P)$ é a resposta funcional per capita do parasitóide ou também chamada de taxa de ataque ao hospedeiro; δ é a taxa de mortalidade per capita do parasitóide e γ é um termo que representa a eficiência de conversão de hospedeiros em parasitóides. Esse modelo diferencial foi originalmente desenvolvido para explorar interações de presa-predador em vertebrados (LOTKA, 1925; VOLTERRA, 1926), mas também pode ser aplicado a um sistema de interação hospedeiro-parasitóide com variáveis contínuas que incluam dinâmicas de sobreposição de gerações (MILLS; GETZ, 1996).

É importante notar que, em geral, modelos que representam situações de controle biológico são compostos por apenas duas espécies (hospedeiro e parasitóide). Na verdade, uma interação do tipo hospedeiro-parasitóide nunca ocorre de forma isolada das plantas. Modelos tritróficos deveriam ser usados para melhor representar estruturas do controle biológico de insetos praga (MILLS; GETZ, 1996).

Desenvolvimentos Iniciais

Thompson (1939) atribuiu a Marchal (1908) e a Fiske (1910) os primeiros desenvolvimentos de modelos matemáticos de interação hospedeiro-parasitóide. No entanto, o primeiro modelo notável é atribuído ao próprio Thompson (1922, 1924). O seu envolvimento nos primeiros programas de controle biológico que utilizavam parasitóides lhe possibilitou desenvolver uma simples expressão matemática para descrever o impacto da presença do parasitóide sobre a população de hospedeiro:

$$Y = N\{1 - \exp(-X/N)\} \quad (3)$$

onde Y é o número de hospedeiros parasitados, N é o número de indivíduos da população de hospedeiro e X é o número total de ovos postos pelo parasitóide.

Essa equação é notável por duas razões. Inicialmente, pelo fato de introduzir pela primeira vez, uma função de probabilidade para descrever o ataque do parasitóide.

Dado que $-X/N$ representa o número médio de ovos depositados em cada hospedeiro, e assumindo-se que os ovos dos parasitóides são distribuídos aleatoriamente (distribuição de Poisson) entre os hospedeiros, então a fração dos hospedeiros que escapam ao parasitismo pode ser descrita como $\exp(-X/N)$ e a fração que é parasitada pode ser representada por $\{1 - \exp(-X/N)\}$. Em segundo lugar, a equação de Thompson introduziu o conceito de que a taxa do ataque do parasitóide é limitada pela quantidade de ovos produzidos (MILLS; GETZ, 1996).

Mais tarde, Thompson (1929) indicou que a dinâmica das populações de hospedeiros e parasitóides poderia ser descrita através de um Sistema de Equações de Diferenças:

$$\begin{aligned} N_{t+1} &= \lambda N_t \exp(-\beta P_t / N_t) \\ P_{t+1} &= \lambda N_t \{1 - \exp(-\beta P_t / N_t)\} \end{aligned} \quad (4)$$

que é equivalente ao **Sistema de Equações 1**, onde a taxa per capita de crescimento da população de hospedeiro é dada por $d(N_t) = \lambda$, a função de escape ao parasitismo é $f(N_t, P_t) = \exp(-\beta P_t / N_t)$ e o parâmetro $c = \lambda$. O parâmetro β representa o número médio de ovos ovipostos por parasitóide. Esse modelo pressupõe que as gerações tanto do hospedeiro quanto do parasitóide são discretas, que a taxa de crescimento do hospedeiro é constante entre as gerações e independente da abundância do hospedeiro e que cada

fêmea parasitóide sempre resulta de um indivíduo hospedeiro atacado. O modelo ignora a questão da taxa de sobrevivência e a razão sexual da população do hospedeiro e do parasitóide (MILLS; GETZ, 1996).

Thompson (1929) interpretou que seu modelo de interação hospedeiro-parasitóide é instável e não garante que a população de parasitóide sempre eliminará a população de hospedeiro, como se esperava que ocorresse.

Mills e Getz (1996) mostraram que o modelo de Thompson não possui um ponto de equilíbrio trivial e, dependendo das densidades populacionais iniciais, ele prevê que tanto a população do hospedeiro quanto a do parasitóide podem ser levadas à extinção ou a um crescimento sem limites.

Um modelo mais familiar e influente de interação hospedeiro-parasitóide, com geração discreta, foi desenvolvido por Nicholson e Bailey (1935):

$$\begin{aligned} N_{t+1} &= \lambda N_t \exp(-aP_t) \\ P_{t+1} &= N_t \{1 - \exp(-aP_t)\} \end{aligned} \tag{5}$$

Neste caso, a função de escape ao parasitismo é dada por $f(N_t, P_t) = \exp(-aP_t)$, onde a representa a área de forrageamento do parasitóide ou a proporção do habitat do hospedeiro que pode ser visitada ou abrangida por um indivíduo parasitóide durante seu período de vida. Esse modelo assume que o parâmetro c do **Sistema de Equações 1** é igual a um, e que cada hospedeiro atacado gera uma única fêmea parasitóide, situação apropriada somente para parasitóides solitários onde o sexo masculino é ausente (MILLS; GETZ, 1996).

A importância do modelo Nicholson-Bailey está no fato de servir de base ao desenvolvimento de modelos mais realistas com geração discreta. No entanto é importante notar que, assim como o modelo de Thompson, o modelo de Nicholson-Bailey apresenta o ataque do parasitóide à população do hospedeiro como sendo aleatório. Esse modelo também é instável e prevê que as populações de hospedeiros e de parasitóides apresentarão oscilações

divergentes, sendo a curva populacional do parasitóide sempre defasada por uma geração da curva do hospedeiro (EDELSTEIN-KESHET, 1988; MILLS; GETZ, 1996).

O modelo de Nicholson e Bailey, diferentemente do de Thompson, se baseia na hipótese de que a procura de hospedeiros pelos parasitóides é limitada pelo tempo e não pela quantidade de ovos dos parasitóides fêmeas (MILLS; GETZ, 1996).

Lotka (1925) e Volterra (1926), baseando-se nas observações iniciais de Verhulst (1838) sobre crescimento populacional, de forma independente derivaram o seguinte modelo diferencial para a interação do tipo presa-predador, com possíveis aplicações à interação hospedeiro-parasitóide:

$$\begin{aligned}\frac{dN}{dt} &= rN - aNP \\ \frac{dP}{dt} &= \gamma aNP - \delta P\end{aligned}\tag{6}$$

onde $g(N)$ do **Sistema de Equações 2** corresponde a r (taxa intrínseca de crescimento da população de hospedeiros); a resposta funcional $f(N, P) = aNP$, onde a é a taxa de ataque do parasitóide (dependente da eficiência da procura); γ é a taxa de conversão de hospedeiros atacados em fêmeas parasitóides, e δ é a taxa per capita de mortalidade do parasitóide.

O modelo é mais apropriado para a descrição de interações de predação do que de parasitismo, já que hospedeiros parasitados são sempre vulneráveis a múltiplos ataques (superparasitismo), a menos que o parasitóide apresente uma discriminação perfeita em relação a hospedeiros previamente parasitados (VAN ALPHEN; VISSER, 1990). Apesar disso, o modelo Lotka-Volterra tem sido usado como base para muitos modelos que descrevem a interação do tipo hospedeiro-parasitóide.

Esse modelo prevê constantes oscilações populacionais entre o hospedeiro e o parasitóide, devido à natureza contínua das taxas de crescimento das duas populações (MAY, 1973).

Os modelos matemáticos citados anteriormente propiciam uma base para desenvolvimento de futuros modelos mais realistas de interação hospedeiro-parasitóide e, em diferentes níveis, permitem avanços conceituais para a teoria do controle biológico. No entanto, em todos esses casos, as dinâmicas desses modelos são incapazes de gerar interações estáveis e conduzir a baixos valores de densidade da população do hospedeiro, que são na realidade, as duas características chaves de um controle biológico bem sucedido (MILLS; GETZ, 1996).

A procura por estabilidade e por maior realismo

A forte crença de que o sucesso do controle biológico resulta de uma ação direta estabilizadora por parte do parasitóide (HUFFAKER *et al.*, 1976; MURDOCH, 1994) incentivou uma grande procura por atributos biológicos dos parasitóides que pudessem induzir a estabilidade em modelos de interação hospedeiro-parasitóide. Este fator tem dominado o processo de desenvolvimento de bases teóricas para o controle biológico, em detrimento de qualquer outro paradigma, e tem sido em particular uma área muito fértil de pesquisa.

Pode-se conferir estabilidade ao modelo Nicholson-Bailey através da introdução do fator dependência de densidade tanto na população do hospedeiro quanto na do parasitóide (HASSELL, 1978; EDELSTEIN-KESHET, 1988).

Em relação aos modelos de variáveis contínuas, as formas mais estudadas e aceitas para se promover estabilidade e um maior realismo aos modelos de interação hospedeiro-parasitóide e presa-predador são a introdução o fator densidade dependente para a presa/hospedeiro e/ou para o predador/parasitóide e a adição de respostas funcionais (“functional responses”).

As respostas funcionais correlacionam diferentes funções de decrescimento e/ou de crescimento populacional entre as populações de presa-predador e/ou hospedeiro-parasitóide, de acordo com as razões populacionais existentes, em cada instante de tempo.

Uma das respostas funcionais mais conhecidas e estudadas em Ecologia e Biologia de Populações é a de Michaelis-Menten, também chamada de “Holling type II functional response”. Essa função resposta é aplicada ao modelo presa-predador de Lotka-Volterra, mas possui amplas utilizações em interações do tipo hospedeiro-parasitóide.

Solomon (1949) e Holling (1959) afirmaram que a taxa de mortalidade da população de uma presa/hospedeiro deve ser uma função não linear de sua própria densidade, pois o seu predador/parasitóide possui um limiar de saturação da quantidade de presas/hospedeiros que pode atacar, por unidade de tempo. Desta forma, a Equação de Presa-Predador de Lotka-Volterra contendo o fator densidade dependente e uma função resposta do tipo Michaelis-Menten assume a seguinte configuração:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= ax \left(1 - \frac{x}{K} \right) - \frac{cxy}{(m+x)} \\ \frac{dy}{dt} &= -dy + \left(\frac{fxy}{(m+x)} \right) \end{aligned} \tag{7}$$

onde x , y representam as densidades populacionais da presa/hospedeiro e do predador/parasitóide, respectivamente. O parâmetro a indica a taxa intrínseca de crescimento da população da presa/hospedeiro, K representa a capacidade suporte do meio em relação à população da presa/hospedeiro, c explicita a taxa de captura do predador/parasitóide sobre a(o) presa/hospedeiro, m é a constante de meia saturação de captura, f indica a taxa de conversão de presa/hospedeiro atacada(o) em predador/parasitóide e, por último, d representa a taxa de mortalidade do predador/parasitóide. A constante de meia saturação indica a quantidade de presas/hospedeiros disponíveis no meio ambiente necessária para que o predador/parasitóide atinja metade da sua capacidade máxima de ataque.

Esse modelo de tempo contínuo descrito e aqueles baseados no modelo de Nicholson-Bailey foram modificados muitas vezes. As modificações

feitas se baseiam, na maioria dos casos, em alterações nos períodos de gerações tanto para a população de presa/hospedeiro quanto para a de predador/parasitóide; nas formas de interação entre o predador/parasitóide e a(o) presa/hospedeiro; na adição de números variados de refúgios para a(o) presa/hospedeiro; na alteração da forma de distribuição do ataque do predador/parasitóide e, mais recentemente, através da introdução de variáveis espaciais explícitas.

A introdução de variáveis espaciais explícitas nos modelos de interação presa-predador e hospedeiro-parasitóide se deve principalmente a dois fatores: à idéia de que variáveis espaciais, tais como subdivisão espacial e dispersão individual ou populacional podem promover a persistência das populações em questão e ao fato de que tais variáveis permitem que os modelos descrevam situações de campo mais realistas.

Segundo Briggs e Hoopes (2004), os modelos de interação presa-predador e hospedeiro-parasitóide com variáveis espaciais explícitas adquirem estabilidade a partir de basicamente três mecanismos:

- 1) Estabilidade estatística, onde o que ocorre não é exatamente a estabilidade devido ao fato do sistema dinâmico populacional ter atingido um ponto de equilíbrio estável, e sim ao fato das variações populacionais assíncronas existentes por todo o espaço do ambiente considerado gerarem uma densidade populacional global relativamente constante;
- 2) Existência de taxas de migração entre sub-áreas parcialmente isoladas compostas por sub-populações com dinâmicas populacionais assíncronas ou pouco síncronas, dentro de uma área global maior. A estabilidade ocorre devido ao fato do sistema global sempre possuir ao menos uma sub-população viável em alguma de suas sub-áreas.
- 3) Existência de respostas funcionais relativas às densidades populacionais. Pode-se determinar, por exemplo, que elevadas densidades populacionais nas sub-áreas de um sistema espacial global resultem em altas taxas de emigração dessas

localidades para áreas vizinhas. Isso facilita a ocupação de várias sub-áreas ao mesmo tempo e conseqüentemente promove uma constância populacional global.

De acordo com Briggs e Hoopes (2004), muitos dos modelos matemáticos de interação presa-predador e hospedeiro-parasitóide com variáveis espaciais explícitas apresentam mais de um dos fatores estabilizadores anteriormente citados.

Segundo os mesmos autores, os modelos matemáticos de interação presa-predador e hospedeiro-parasitóide com variáveis espaciais explícitas podem ser classificados em três tipos básicos: Modelos de Reação-Difusão, Modelos Baseados no Indivíduo e Modelos de Metapopulação (Modelos de Área e Modelos de Mapas Reticulados Acoplados).

Modelos de Interação Hospedeiro-Parasitóide com Variáveis Espaciais Explícitas

Modelos de Reação-Difusão

Apresentam as variáveis, tempo e espaço, de forma contínua. Suas funções descrevem a densidade momentânea de cada espécie no espaço considerado. A denominação “Reação” da classificação se refere ao processo de variação populacional (ex: equação logística de crescimento populacional, crescimento do tipo malthusiano, etc) ou a qualquer tipo de perturbação ecológica, referentes a interações entre espécies (TILMAN; KAREIVA, 1997). Os Modelos de Reação-Difusão podem apresentar a forma do modelo Lotka-Volterra de interação presa-predador ou qualquer outro tipo de relação de consumidor-fonte.

A denominação “Difusão” é relativa ao tipo de dispersão de cada espécie no espaço. Nos modelos de difusão clássicos, os indivíduos se movimentam de forma aleatória em qualquer direção (BRIGGS; HOOPES, 2004).

O modelo de Reação-Difusão mais simples aplicado à área de biologia e de ecologia foi desenvolvido por Skellam (1951) e buscou representar uma população com crescimento exponencial, com ocupação territorial baseada na Equação de Difusão simples. O modelo representado num espaço unidimensional é escrito como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \alpha N + D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (8)$$

onde α é a taxa de crescimento populacional, N é a densidade de indivíduos na posição x e no tempo t e D representa o fator de difusão ou taxa de dispersão (TURCHIN, 1998).

Diferentes formas de regras de movimentação têm sido estudadas e modeladas, como por exemplo, a introdução de gradientes de concentração em modelos de difusão, como pode ser visto em Cantrel e Cosner (2003).

Quando o modelo contínuo de Reação-Difusão não puder ser resolvido analiticamente, o que ocorre na grande maioria dos casos, é necessário lançar mão de métodos numéricos de resolução, onde o espaço é tratado de forma discreta. Assim sendo, ele será composto por pontos ou células ligados pelo processo de difusão populacional. A discretização do modelo resultará em Equações de Diferenças e estas descreverão as dinâmicas populacionais em cada ponto ou célula (TILMAN; KAREIVA, 1997).

Algumas das vantagens do uso de Modelos de Reação-Difusão em Biologia e Ecologia de Populações são devidas ao fato desse tipo de modelagem ser estruturado para a escala populacional e, conseqüentemente, ser possível trabalhar diretamente com os parâmetros mais importantes e determinantes para as dinâmicas populacionais do sistema como um todo. Tais modelos representam a forma mais compacta de descrição de dinâmicas populacionais espacialmente explícitas (TILMAN; KAREIVA, 1997).

De acordo com Turchin (1998), os Modelos de Reação-Difusão possuem um enorme potencial de aplicação na área de biologia e ecologia, no entanto exigem de seus modeladores conhecimentos relativamente aprofundados de matemática. O ideal, neste caso, seria um trabalho de pesquisa em grupo multidisciplinar, contendo profissionais da área de biológicas e de exatas.

Modelos Baseados no Indivíduo

Esses modelos descrevem o comportamento biológico e ecológico dos indivíduos de uma determinada população, em uma determinada região. As suas regras determinam a forma pela qual os indivíduos se locomovem, se alimentam, se reproduzem, e morrem durante a ocupação da área considerada. A forma mais comum da estruturação do Modelo Baseado no Indivíduo é através da divisão do espaço em pequenas células discretas, cada uma tendo o tamanho suficiente para abrigar um indivíduo hospedeiro/presa e/ou um indivíduo parasitóide/predador. O tempo geralmente é dividido em unidades discretas, no decorrer das quais cada indivíduo, de cada espécie, tem uma probabilidade de se movimentar, nascer ou morrer, de acordo com as regras previamente determinadas (BRIGGS; HOOPES, 2004).

Segundo DeAngelis e Gross (1992) e Grimm e Railsback (2005), o sentido da análise da escala ecológica destes modelos é da base para o topo (ou "bottom up"). Isto significa que através de estudos ecológicos com variáveis espaciais e temporais estruturados em escalas locais (individuais) busca-se elaborar padrões e regras regionais ou globais. A partir da modelagem de determinados comportamentos individuais dos organismos frente a situações de escolha de alimentação, reprodução e deslocamento, tenta-se entender os padrões e as características de crescimento, decrescimento e variações nas ocupações espaciais das populações como um todo.

Segundo Grimm (1999), as vantagens deste tipo de modelagem em relação aos outros que descrevem dinâmicas populacionais decorrem da sua capacidade ímpar de descrever e simular características biológicas e ecológicas em escala individual e local, e conseqüentemente, do fato de poder simular com maior riqueza de detalhes situações reais, e com visão mais

pragmática. Em contraposição, como desvantagem, esses modelos exigem do modelador um trabalho árduo para conseguir isolar e identificar as características individuais dos organismos que determinam as dinâmicas e as estruturas das populações em escalas regional ou global.

Modelos de Metapopulação: Modelos de Área e Modelos de Mapas Reticulados Acoplados

Esses modelos tratam geralmente de variáveis discretas e possuem dinâmicas populacionais de hospedeiros/presas e parasitóides/predadores modeladas explicitamente, para cada área discretizada. A cada geração, uma fração dos(as) hospedeiros/presas e/ou dos parasitóides/predadores deixa cada área ou célula espacial para ocupar outras regiões existentes. Os Modelos de Área e os Modelos de Mapas Reticulados Acoplados não exigem grandes aprofundamentos matemáticos por parte dos profissionais envolvidos, e são essencialmente resolvidos numericamente através de simulações computacionais (BRIGGS; HOOPES, 2004).

Nos Modelos de Área, a cada geração, uma parcela da população considerada (hospedeiro/presa e/ou parasitóide/predador) deixa cada uma das áreas e se dispersa para as outras regiões existentes. Nesses modelos, a localização espacial de cada região não é importante, a dispersão é global, e cada local do sistema pode receber dispersores de cada uma das outras áreas (BRIGGS; HOOPES, 2004). Diferentes análises sobre as dinâmicas populacionais, sobre os padrões de distribuição espacial e sobre os processos de estabilidade referentes aos modelos de área que descrevem interações hospedeiro-parasitóide e presa-predador, foram realizadas por Adler (1993), Hochberg e Ives (1999) e Hassell (2000), entre outros.

Nos Modelos de Mapas Reticulados Acoplados, as áreas são distribuídas e organizadas em uma, duas, ou três dimensões, e a dispersão é local (onde os indivíduos que abandonam uma célula só podem ocupar as células vizinhas ou próximas). Um exemplo bastante conhecido do uso deste tipo de modelo é aquele desenvolvido por Hassell *et al.* (1991). Neste, o espaço foi representado como sendo um retângulo dividido em grandes

quantidades de pequenas sub-unidades (áreas de habitat). Inicialmente, cada área foi considerada habitada por hospedeiros e parasitóides, e a dinâmica do modelo ocorre de duas formas: num primeiro momento, as populações de hospedeiros e parasitóides interagem entre si, em cada local, de acordo com o modelo Nicholson-Bailey; num segundo momento, uma proporção fixa de hospedeiros e/ou parasitóides existentes em cada célula abandona sua localização e se distribui igualmente entre as oito células vizinhas. Hassell *et al.* (1991), explorando numericamente os comportamentos deste modelo, mostraram que é possível que o sistema apresente uma grande variedade de dinâmicas populacionais, tais como extinção das duas espécies, padrões fixos de distribuição espacial (“cristal lattices”), caos espaço-temporal e ondas em espirais (TURCHIN, 1998).

Aplicações e Usos dos Modelos Matemáticos de Interação Hospedeiro-Parasitóide com Variáveis Espaciais Explícitas

Dentre os três tipos de modelos apresentados acima, os Modelos de Metapopulação são os que possuem uma maior quantidade de estudos realizados e artigos publicados na área de controle biológico, utilizando-se parasitóides. Em seguida vêm os Modelos de Reação-Difusão e por último, os Modelos Baseados no Indivíduo.

Os Modelos de Metapopulação são os mais comuns provavelmente por causa da sua relativa simplicidade estrutural matemática, o que não exige dos modeladores (em boa parte biólogos e ecólogos) grande profundidade de conhecimento na área de matemática. Uma grande quantidade de publicações tanto de artigos como de livros nessa área, se deve ao pesquisador Michel P. Hassell e seus colaboradores, destacando-se os trabalhos Comins *et al.* (1992), Comins e Hassell (1996) e Hassell (2000). Esse grupo de pesquisadores vem desenvolvendo pesquisas inovadoras na área de ecologia espacial aplicada à interação populacional do tipo hospedeiro-parasitóide.

Atualmente, os principais estudos em Modelos de Reação-Difusão aplicados à ecologia são referentes às análises de dispersão populacional (principalmente insetos) no espaço bidimensional ou tridimensional. Uma das

principais vantagens desse tipo de modelagem em relação aos outros é a possibilidade de análise direta das variáveis estruturais populacionais, já que seu enfoque é a população como um todo. Devido à relativa complexidade estrutural matemática dos Modelos de Reação-Difusão, é interessante que eles sejam desenvolvidos por grupos multidisciplinares compostos por profissionais da área de biológicas e de exatas.

Os Modelos Baseados no Indivíduo são comparativamente os mais recentes, datando do início da década de 90. Esse tipo de modelagem ainda está em fase de maturação teórica e conceitual. Isto porque, ao mesmo tempo em que esses modelos permitem fazer uma análise diferenciada em relação à escala e ao grau de realismo da descrição da situação problema, eles oferecem algumas dificuldades para a análise das características individuais que mais influenciam e que determinam a dinâmica populacional em escala global.

De forma geral, a tendência atual de incorporação de mais um nível trófico (planta hospedeira) e de variáveis espacialmente explícitas nos modelos de interação hospedeiro-parasitóide, permite que tais modelos comecem, progressivamente, se tornarem importantes no auxílio de manejos cada vez mais eficientes na área de controle de espécies pragas da agricultura e de espécies invasoras provenientes de ambientes exóticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho se compõe de três fases distintas. Na primeira, se faz a proposição de um modelo matemático espacialmente explícito que representa, descreve e simula o controle biológico da mosca-das-frutas *C. capitata* pelo parasitóide braconídeo *Diachasmimorpha longicaudata*, em plantações de laranjas. Na segunda fase do trabalho, utiliza-se tal modelo para determinar os fatores chaves do controle biológico da mosca-do-mediterrâneo pelo seu parasitóide braconídeo. E na terceira e última etapa, são propostas práticas otimizadas do manejo integrado de *C. capitata* através do uso conjunto de iscas tóxicas com liberações inundativas de *D. longicaudata*, em plantações de laranja.

1ª FASE:

Metodologia para construção do modelo matemático espacialmente explícito para o controle biológico de *C. capitata* através do parasitóide braconídeo *D. longicaudata*, em plantações de laranja.

O processo metodológico necessário para a proposição do modelo matemático de simulação se baseou nas seguintes atividades:

- Estudo aprofundado dos fatores biológicos, ecológicos e climáticos que envolvem o controle biológico de *C. capitata* através do parasitóide *D. longicaudata*, em plantações de laranja.
- Elaboração de um esquema teórico-pictográfico que representa os processos essenciais do sistema hospedeiro-parasitóide.
- Estabelecimento do modelo matemático formado por equações diferenciais parciais e condições iniciais e de fronteira, que representam qualitativa e quantitativamente as dinâmicas populacionais do sistema biológico analisado.
- Codificação do modelo matemático proposto, de seus parâmetros através do software Matlab, versão 6.5.

- Transformação do Sistema de Equações Diferenciais proposto em um sistema de equações a-dimensionalizadas. Este processo foi utilizado para reduzir a quantidade de parâmetros do sistema de equações e também para correlacionar as escalas destas variáveis.
- Utilização do método numérico de diferenças finitas e do método de Crank-Nicholson para resolver o Sistema de Equações Diferenciais Parciais Não Lineares proposto, impossível de ser resolvido analiticamente. O método de diferenças finitas foi usado para as variáveis espaciais e o método de Crank-Nicholson foi utilizado para a variável temporal do sistema de equações.
- Simulações iniciais do modelo proposto.

- Ajustes progressivos dos parâmetros e das variáveis do modelo, até o ponto em que os resultados das simulações foram considerados satisfatórios.

2ª FASE:

Metodologia utilizada para a simulação do controle biológico da mosca-do-mediterrâneo através de *D. longicaudata*.

Na metodologia usada para simular todas as dinâmicas populacionais da mosca-do-mediterrâneo e do seu parasitóide, considerou-se temperatura constante, em aproximadamente 25°C, e umidade relativa do ar também constante, em aproximadamente 60%. Essa simplificação foi assumida por dois motivos principais: o primeiro é que no estágio de proposição inicial de um modelo, aumenta-se demasiadamente a sua complexidade com a incorporação de variáveis ambientais; e o segundo motivo é que a grande maioria dos dados biológicos de laboratório e/ou de campo encontrados na literatura, para ambas as espécies consideradas de insetos, é obtida em situação de temperatura e umidade relativa do ar com valores próximos àqueles aqui utilizados.

Para todas as simulações da interação entre *C. capitata* e *D. longicaudata*, o coeficiente de eficiência de parasitismo utilizado foi ajustado a partir da suposição de que liberações semanais, especialmente homogêneas, de 1.500 fêmeas adultas deste parasitóide, por hectare de plantação de laranja, causam a morte de aproximadamente 50% das larvas de terceiro instar da espécie hospedeira, ao término de 45 dias, quando considerada uma quantidade inicial de 50 moscas fêmeas adultas distribuídas homoganeamente pela unidade de área em questão. A primeira liberação massiva foi simulada como sendo feita no 14º dia após o início da safra.

Para o entendimento inicial da estrutura do controle biológico de *C. capitata*, pelo seu parasitóide braconídeo, foram simuladas as seguintes situações:

- Dinâmica populacional de *C. capitata* ao longo de um ano, em um hectare de plantação de laranja, na ausência de inimigos naturais

e de quaisquer métodos aplicados de controle populacional. Considerando-se uma condição inicial de 50 moscas fêmeas adultas em período de oviposição, homoganeamente distribuídas em um hectare de plantação de laranja.

- Dinâmica populacional de *C. capitata*, em um hectare de plantação de laranja, durante o período aproximado de uma safra (45 dias), sem inimigos naturais e sem métodos de controle populacional. Nessa situação estimou-se também qual seria a quantidade de frutos de laranja atacados. Como condição inicial, considerou-se a distribuição homogênea de 50 moscas fêmeas adultas em período de oviposição, em um hectare de plantação de laranja.
- Quantidades de frutos de laranjas estragados em relação a diferentes quantidades de fêmeas adultas de *C. capitata*, que ocupam um hectare de plantação, com diferentes capacidades diárias de ataque aos frutos cítricos.
- Dinâmica populacional da mosca-do-mediterrâneo de acordo com liberações homogêneas semanais de 1.500 fêmeas adultas de *D. longicaudata*, em um hectare de plantação de laranja, ao longo de uma safra. Como condição inicial, considerou-se 50 moscas fêmeas adultas distribuídas homoganeamente pelo hectare de plantação de laranja.
- Dinâmica populacional de *C. capitata* e *D. longicaudata* ao longo de três anos, em um hectare de plantação, sem restrição alimentar para os adultos de ambas as espécies. As condições iniciais utilizadas foram: 50 moscas fêmeas adultas distribuídas homoganeamente pelo hectare de plantação de laranjas e 105 vespas fêmeas adultas liberadas homoganeamente, pelo hectare de plantação, no 14^o dia após o início da safra.

Depois destas simulações iniciais que serviram para dar uma idéia geral sobre as dinâmicas populacionais da mosca-do-mediterrâneo em plantações de laranja, na ausência de inimigos naturais, em condições de controle biológico inundativo e sob controle biológico clássico, realizou-se um novo bloco de simulações, com o objetivo de estudar o grau de importância de possíveis estratégias de liberações de *D. longicaudata* para a redução populacional de *C. capitata*. Foram analisadas diferentes frequências, quantidades e formas espaciais de liberação do parasitóide braconídeo.

A metodologia utilizada para verificar a importância de cada uma dessas variáveis foi a de fixar duas delas, ao mesmo tempo, enquanto os parâmetros da terceira eram variados.

O primeiro estudo foi em relação à importância da quantidade de vespas liberadas sobre o controle populacional de *C. capitata*. Para isso fixou-se a frequência de liberação de parasitóides, em uma semana, e a forma de distribuição espacial das liberações como sendo homogênea. As quantidades simuladas de soltura de vespas fêmeas, em oviposição, foram 100, 500, 1.000, 1.500, 2.000, 2.500, 3.000, 3.500, 4.000, 4.500, 5.000, 6.000, 7.000, 8.000, 9.000 e 10.000. A partir de 5.000 vespas, foi utilizada uma escala maior de variação populacional porque acima deste número percebeu-se uma menor sensibilidade de redução populacional de *C. capitata*.

A segunda análise foi referente à importância da variação da frequência de liberações dos parasitóides. Para isso fixou-se a quantidade de fêmeas adultas liberadas de cada vez (1500 indivíduos) e considerou-se a distribuição espacial como sendo homogênea. As frequências de liberação analisadas foram: a cada 4 dias, a cada 7 dias, a cada 10 dias, a cada 14 dias e a cada 21 dias.

Por último, foi analisado o grau de importância das variações nas formas geométricas espaciais dos pontos de liberações do parasitóide. Para tanto se considerou como fixas as liberações semanais de 1500 vespas fêmeas adultas,

em oviposição. As distribuições espaciais estudadas, no hectare de plantação de laranjas, foram: liberações em um único ponto central, liberações em uma única linha central (dividindo a unidade de área em duas partes iguais), liberações em duas linhas ortogonais centrais (uma cruz dividindo a área em quatro partes iguais), liberações de parasitóides em cinco pontos espacialmente distribuídos e liberações homoganeamente distribuídas.

3ª FASE

Metodologia utilizada para a proposição de práticas otimizadas do manejo integrado de *C. capitata* pelo uso conjunto de iscas tóxicas com liberações inundativas de *D. longicaudata*, em plantações de laranja.

Os resultados finais deste trabalho de mestrado são referentes aos estudos de otimização de estratégias do controle populacional de *C. capitata* através do uso conjunto de iscas tóxicas com liberações inundativas de *D. longicaudata*, em plantações de laranja. Para isso propôs-se uma nova configuração espacial de manejo integrado da praga, onde foi considerado o uso conjunto de áreas onde são feitas aplicações de iscas tóxicas e áreas que recebem liberações inundativas do parasitóide braconídeo.

Para essa nova configuração proposta, foram analisadas as quantidades ótimas de liberação de parasitóides, considerando-se liberações espacialmente homogêneas, e frequências de liberação feitas semanalmente ou a cada duas semanas. A determinação da quantidade ideal de soltura de vespas adultas, no campo, exigiu estimar o valor de venda de cada fruto de laranja e o valor de compra de cada inseto parasitóide.

RESULTADOS

1. MODELO TEÓRICO-PICTOGRÁFICO E SISTEMAS DE EQUAÇÕES MATEMÁTICAS:

A primeira parte dos resultados é constituída pela proposição de um modelo teórico-pictográfico e de um modelo matemático espacialmente explícito, ambos com a função de representar o sistema ecológico composto pela mosca-do-mediterrâneo *C. capitata* e por seu parasitóide braconídeo *D. longicaudata*, em plantações de laranjas doces. O modelo teórico-pictográfico, aqui chamado de “Fluxograma”, resume sucintamente os conceitos teóricos da interação biológica entre a mosca-do-mediterrâneo e seu parasitóide. O modelo matemático representa qualitativa e quantitativamente as interações destas

duas espécies, em plantações de laranjas, além de permitir simular estratégias reais de controle biológico da espécie praga.

O Fluxograma pode visto através da **Figura 9** seguir:

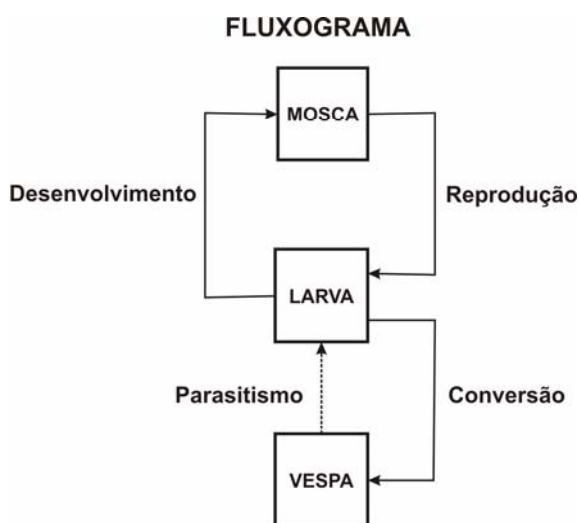


Figura 9. Indivíduos da classe “Larva”, quando se desenvolvem, passam à classe “Mosca”, e esta gera novos indivíduos para a classe “Larva”, a partir da reprodução. Os espécimes da classe de “Larva” que são parasitados por indivíduos da classe “Vespa” propiciam o surgimento de novos organismos de “Vespa”. As setas cheias indicam o sentido dos processos biológicos e a seta tracejada indica o parasitismo de “Vespa” sobre “Larva”.

Este tipo de representação mostra que a população de *C. capitata* foi caracterizada por duas classes de desenvolvimento, sendo “Larva” a classe que representa o grupo de larvas de terceiro instar, e “Mosca” a classe que representa as fêmeas adultas em fase de oviposição. A população de *D. longicaudata* é representada somente pela classe de fêmeas adultas em período de oviposição, e no Fluxograma é chamada por “Vespa”.

A simplificação conceitual do sistema biológico em questão considera que larvas de terceiro instar se transformam em moscas fêmeas adultas em período de oviposição, com o passar do tempo. Quando atacadas por fêmeas adultas de *D. longicaudata*, tais larvas não mais se transformam em moscas

fêmeas adultas, e sim dão suporte ao surgimento de novas fêmeas adultas do parasitóide.

Considerados os conceitos apresentados, foi proposto um sistema de Equações Diferenciais Parciais Não Lineares, com condições iniciais e de fronteira, que representa e simula o controle biológico da mosca-do-mediterrâneo através de *D. longicaudata* em plantações de laranja. Tais equações são as seguintes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial t} &= -\alpha_{LM}L - \beta L^2 - \nu_L L - \frac{\alpha_{LV}LV}{a+L} + \mu M \\ \frac{\partial M}{\partial t} &= -\nu_M M + \gamma_1 \phi \alpha_{LM} L + D_1 \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial V}{\partial t} &= -\nu_V V + \gamma_2 \phi \frac{\alpha_{LV}LV}{a+L} + D_2 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

As equações que compõem o **Sistema 9** representam, respectivamente, as taxas de variação populacional de larvas de terceiro instar (L) e de fêmeas adultas (em período de oviposição) de *C. capitata* (M) e de fêmeas adultas (em período de oviposição) de *D. longicaudata* (V), ao longo do tempo e do espaço bidimensional (área de plantação de laranja).

O coeficiente α_{LM} significa a proporção de larvas de terceiro instar da mosca-do-mediterrâneo que abandona essa classe para se transformar em moscas fêmeas adultas em oviposição, a cada instante de tempo; β é um coeficiente de competição intra-específica para a classe de larvas; α_{LV} representa a taxa de larvas de *C. capitata* que são parasitadas por fêmeas adultas de *D. longicaudata*, em cada unidade de tempo; e μ significa a fecundidade instantânea de *C. capitata*, ou seja, a quantidade de novas larvas de terceiro instar, geradas a cada instante de tempo, pela classe de fêmeas adultas de moscas-do-Mediterrâneo. O coeficiente a simboliza a meia

saturação do parasitismo sobre o hospedeiro (quantidade de hospedeiros disponíveis ao parasitóide para que ele atinja metade do seu potencial máximo de ataque), conceito este, modelado pela equação de Michaelis-Menten para predação ou parasitismo.

Os coeficientes ν_L , ν_M , ν_V representam, respectivamente, as taxas instantâneas de mortalidade natural para as classes de larvas de terceiro instar de mosca-do-mediterrâneo, de fêmeas adultas em oviposição de *C. capitata* e de fêmeas adultas em oviposição de *D. longicaudata*.

As variáveis γ_1 e γ_2 simbolizam, respectivamente, os fatores de conversão de larvas de terceiro instar em fêmeas adultas de *C. capitata*, e de larvas parasitadas da mosca-das-frutas em fêmeas adultas de *D. longicaudata*, a cada instante de tempo. Os coeficientes ϕ e φ representam as razões sexuais de moscas fêmeas e vespas fêmeas, respectivamente.

Por último, D_1 e D_2 são os coeficientes de difusão espacial para as classes de fêmeas adultas de mosca-do-mediterrâneo e de fêmeas adultas de *D. longicaudata*, sobre a área bidimensional de um hectare de plantação de laranja.

Para que este sistema possa ser resolvido numericamente, é necessária a definição de todas as suas variáveis, assim como das suas condições iniciais e condições de fronteira. As condições iniciais são os valores iniciais de entrada do modelo (por exemplo, as quantidades iniciais de cada classe de indivíduos) e as condições de fronteiras são as especificações das equações que ocorrem ao longo das fronteiras que delimitam a área analisada (se existem ou não fluxos de entradas e saídas de moscas e vespas em cada trecho das fronteiras, se a quantidade de indivíduos nestes locais é fixa ou varia).

Para as condições iniciais do sistema, considerou-se 50 moscas fêmeas adultas distribuídas homoganeamente pela área de um hectare de plantação, nenhuma larva de terceiro instar de *C. capitata* e nenhuma vespa fêmea adulta de *D. longicaudata*. As condições de fronteira são somente do tipo Neuman Homogêneo, tanto para as moscas, como para as vespas ($\partial M/\partial n|_F = 0$ e

$\partial V/\partial n|_F = 0$), o que significa que não houve fluxo de organismos através das bordas da área de plantação de laranja.

O **Sistema 9**, com suas condições iniciais e de fronteira, não pode ser resolvido analiticamente.

As variáveis utilizadas no modelo matemático e seus respectivos valores e explicações são apresentadas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Valores, explicações e referências bibliográficas referentes às variáveis utilizadas no modelo matemático proposto.

Variáveis	Valores	Explicação	Referências Bibliográficas
α_{LM}	0,25	A cada dia, um quarto do total de larvas de terceiro instar sai desta classe para se transformar em adulto. Esse valor é utilizado, porque o período de permanência de indivíduos nesta classe é de aproximadamente quatro dias.	Período de desenvolvimento de larvas de <i>C. capitata</i> : Matioli (1986).
α_{LV}	1,605	Valor ajustado para conferir uma redução populacional de 50% de larvas de terceiro instar, no final de uma safra de laranja, quando se considerada uma condição inicial de 50 fêmeas adultas de <i>C. capitata</i> distribuídas uniformemente, em um hectare de plantação.	Valor de redução populacional de larvas de terceiro instar de <i>C. capitata</i> : Walder (2007, comunicação pessoal).
β	0,03	Ajustado para conferir uma capacidade suporte do meio ambiente igual a 53.163 larvas de terceiro instar de <i>C. capitata</i> , por hectare de plantação de laranja.	Suposição assumida. Explicação dos cálculos é feita mais a diante.
ν_L	0,0165	Ajustado para conferir mortalidade de 18% para classe de larvas de terceiro instar de <i>C. capitata</i> .	Ajuste feito a partir de dados de Krainacker <i>et al.</i> (1987).
ν_M	0,031	Ajustado para conferir expectativa de vida de 50 dias para fêmeas adultas de <i>C. capitata</i> .	Dados sobre expectativa de vida de fêmeas adultas de mosca-do-mediterrâneo: Krainacker <i>et al.</i> (1987).
ν_V	0,109	Ajustado para conferir expectativa de vida de 15 dias para fêmeas adultas de <i>D. longicaudata</i> .	Expectativa de vida de adultos de <i>D. longicaudata</i> comentada por Walder (2007, comunicação pessoal).
a	30	Disponibilidade de larvas de terceiro instar de <i>C. capitata</i> para gerar meia saturação da capacidade diária de parasitismo de <i>D. longicaudata</i> (6,2 larvas de terceiro instar de <i>C. capitata</i> , por parasitói-de fêmea adulta, por dia).	Fecundidade máxima média de fêmeas adultas de <i>D. longicaudata</i> : Viscarret <i>et al.</i> (2006). Expectativa

		Esse valor de capacidade máxima diária de parasitismo foi calculado dividindo-se a fecundidade máxima média de uma fêmea parasitóide (93 ovos), pela sua expectativa de vida (15 dias). Em relação ao valor de meia saturação, admitiu-se que seriam necessárias 30 larvas de terceiro instar de <i>C. capitata</i> , disponíveis no meio ambiente, para que cada parasitóide fêmea adulta conseguisse atingir metade de sua capacidade diária máxima de parasitismo.	de vida de fêmeas adultas de <i>D. longicaudata</i> : Walder (2007, comunicação pessoal).
μ	7,3	Média diária de formação de larvas de terceiro instar a partir da oviposição de fêmeas adultas de <i>C. capitata</i> . Valor calculado dividindo-se a média da quantidade total de ovos de uma fêmea adulta (500 ovos) pela sua expectativa de vida (50 dias), vezes um fator de sobrevivência da progênie até estágio de larvas de terceiro instar (73%).	Fecundidade máxima média de <i>C. capitata</i> : Fletcher (1989). Expectativa de vida de fêmeas adultas da mosca-do-mediterrâneo: Krainacker <i>et al.</i> (1987).
γ_1	0,9	Sobrevivência de 90% das fêmeas que deixam a fase de larva e chegam ao estágio de fêmeas adultas de <i>C. capitata</i> , em oviposição.	Taxa aproximada do que foi apresentado por Krainacker <i>et al.</i> (1987).
γ_2	0,02	Valor ajustado para corrigir o máximo possível a função de Michaelis-Menten, que tende a superdimensionar a densidade populacional do parasitóide.	Valor Ajustado.
ϕ	0,5	Razão sexual de fêmeas de <i>C. capitata</i> .	Muniz e Gil (1984)
φ	0,59	Razão sexual de fêmeas de <i>D. longicaudata</i> .	Viscarret <i>et al.</i> (2006)
D_1	0,00004	Ajustado para que 50 fêmeas adultas de <i>C. capitata</i> ocupem um hectare de plantação de laranja, em quatro dias.	Walder (2007, comunicação pessoal).
D_2	0,000005	Ajustado para que adultos de <i>D. longicaudata</i> percorram uma distância máxima de 40 metros, em linha reta, em plantações de laranja, a partir do ponto onde foram liberados.	Paranhos <i>et al.</i> (2007).

Assim como em Pearce *et al.* (2006), o presente modelo matemático exigiu um processo de a-dimensionalização, que permite uma abordagem crítica nas magnitudes relativas dos parâmetros utilizados, necessária para a obtenção de resultados interpretados de maneira biologicamente razoável. Uma boa discussão do processo de a-dimensionalização é feita por Lin e Segel (1995). Esse método de a-dimensionalização transformou o **Sistema 9** em um novo sistema de equações, a-dimensionalizadas. O método de a-dimensionalização serviu para diminuir o número de parâmetros do modelo,

permitindo assim, que eles fossem determinados em escalas adequadas para o tratamento matemático.

O novo Sistema de Equações Diferenciais Parciais A-Dimensionadas ficou escrito como:

$$\begin{aligned}\frac{dL'}{dt'} &= -L' - L'^2 - w_1 L' - \frac{\varepsilon_1 L' V'}{a + \varepsilon_1 L'} + M' \\ \frac{dM'}{dt'} &= -w_2 M' + sL' + D_M \left(\frac{d^2 M'}{dx'^2} + \frac{d^2 M'}{dy'^2} \right) \\ \frac{dV'}{dt'} &= -w_3 V' + \frac{\varepsilon_2 L' V'}{a + \varepsilon_1 L'} + D_V \left(\frac{d^2 V'}{dx'^2} + \frac{d^2 V'}{dy'^2} \right)\end{aligned}\tag{10}$$

Para esse sistema, as condições iniciais utilizadas foram $L' = 0$, $M' = 1,6$ e $V' = 0$. As condições de fronteira aplicadas para a área de um hectare de plantação de laranja são todas do tipo Neumann Homogêneo ($\partial M'/\partial n|_F = 0$ e $\partial V'/\partial n|_F = 0$). E as condições de fronteira da área de manejo integrado de *C. capitata* são do tipo Dirichlet para as bordas superior e inferior ($M'|_{FS} = 0$, $M'|_{FI} = 0$ e $V'|_{FS} = 0$, $V'|_{FI} = 0$), e do tipo Neumann Homogêneo para as laterais esquerda e direita ($\partial M'/\partial n|_{FD} = 0$, $\partial M'/\partial n|_{FE} = 0$ e $\partial V'/\partial n|_{FD} = 0$ e $\partial V'/\partial n|_{FE} = 0$).

No **Sistema 10** todas as equações são a-dimensionais, o que quer dizer que não mais possuem dimensão. Por exemplo, no **Sistema 9**, a primeira equação descreve a variação populacional de larvas de terceiro instar da mosca-do-mediterrâneo, no tempo e no espaço. No **Sistema 10**, a primeira equação, assim como as outras duas, não representa variação populacional alguma, nem no tempo e nem no espaço, já que esta equação não possui dimensões, ou seja, é a-dimensional.

Para a obtenção do **Sistema 10** foram feitas as seguintes transformações:

$$t' = t\alpha_{LM}; L' = \frac{L\beta}{\alpha_{LM}}; M' = \frac{M\mu\beta}{(\alpha_{LM})^2}; V' = \frac{V\alpha_{LV}\beta}{(\alpha_{LM})^2}; x' = \frac{x}{l}; y' = \frac{y}{l}.$$

A partir destas transformações, foram obtidas as novas variáveis e os novos parâmetros do **Sistema de Equações 10**:

$$w_1 = \frac{v_L}{\alpha_{LM}}; w_2 = \frac{v_M}{\alpha_{LM}}; w_3 = \frac{v_V}{\alpha_{LM}}; \varepsilon_1 = \frac{\alpha_{LM}}{\beta}; \varepsilon_2 = \frac{\alpha_{LV}\gamma_2\phi}{\beta};$$

$$a = a; s = \frac{\mu\gamma_1\phi}{\alpha_{LM}}; D_M = \frac{D_1}{\alpha_{LM}l^2} \text{ e } D_V = \frac{D_2}{\alpha_{LM}l^2}.$$

É com o **Sistema 10** que são feitos todos os cálculos e aproximações numéricas exigidos pelas simulações das dinâmicas populacionais de *C. capitata* e de *D. longicaudata*. Depois de realizados os cálculos para cada situação simulada, os resultados são revertidos à condição dimensional, novamente.

Para a resolução numérica do **Sistema 10**, criou-se uma malha de pontos sobre a unidade de área simulada. Nestes pontos são calculadas as densidades populacionais das classes de larvas e de fêmeas adultas de *C. capitata*, assim como as densidades de fêmeas adultas de *D. longicaudata*. Cada ponto da malha se caracteriza por dois índices: “i” e “j”, sendo que o primeiro refere-se à posição horizontal, e o segundo à posição vertical da malha, admitindo-se que a origem é o vértice inferior esquerdo da região. Por motivos de simplicidade de cálculos, transformou-se o par de índices “(i,j)” em um único índice “i”, que corresponde ao número do ponto na malha. Esse número é resultado de numeração dos nós percorrendo-se, sucessivamente, as linhas horizontais que compõem a malha criada (CUNHA, 2000).

Com a malha criada, discretizou-se o **Sistema 10** através da técnica de diferenças finitas, nas componentes espaciais, e de Crank-Nicholson, nas componentes temporais.

Nas simulações realizadas, foram considerados dois tamanhos de áreas. A primeira área simulada foi um quadrado de um hectare de plantação, com 100 metros por 100 metros, e no processo de discretização espacial, tal área foi composta por uma malha contendo 36 nós (6 nós no eixo “x” e a mesma quantidade no eixo “y” – a distância entre cada nó correspondeu a 20 metros). A segunda área simulada, unidade de área de manejo de praga - proposta mais adiante, é um retângulo de 5 hectares (200 metros de base por 250 metros de altura), e foi discretizada em uma malha contendo 546 nós (21 nós no eixo “x” e 26 nós no eixo “y” – a distância entre cada nó representou 10 metros).

Para as fronteiras do quadrado de um hectare, foram utilizadas condições de contorno do tipo Neumann Homogêneo, pois se considerou que não houve fluxo de indivíduos através das bordas. Para a área retangular de 5 hectares, foram usadas condições de fronteira do tipo Dirichlet nas fronteiras inferior e superior (já que se admitiu que a densidade de indivíduos nesses locais é zero), e condições de fronteira do tipo Neumann Homogêneo nas laterais esquerda e direita (já que se admitiu que não houve fluxo de organismos nestas fronteiras).

As equações encontradas a partir do uso do método de diferenças finitas e do método Crank-Nicholson no **Sistema 10** são apresentadas pelo **Sistema 11** a seguir:

Equação 11.1

$$\left(1 + \frac{\Delta t}{2} + \frac{\Delta t}{4}(L_i^{K+1} + L_i^K) + \frac{\Delta t \omega_1}{2} + \frac{\Delta t \varepsilon_1}{2} \frac{(V_i^{K+1} + V_i^K)}{2a + \varepsilon_1(L_i^{K+1} + L_i^K)}\right) L_i^{K+1} =$$

$$\left(1 - \frac{\Delta t}{2} - \frac{\Delta t}{4}(L_i^{K+1} + L_i^K) - \frac{\Delta t \omega_1}{2} - \frac{\Delta t \varepsilon_1}{2} \frac{(V_i^{K+1} + V_i^K)}{2a + \varepsilon_1(L_i^{K+1} + L_i^K)}\right) L_i^K + \frac{\Delta t}{2}(M_i^{K+1} + M_i^K)$$

Equação 11.2

$$\left(1 + \frac{\Delta t \omega_2}{2} + \frac{\Delta t D_M}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t D_M}{\Delta y^2}\right) M_l^{K+1} + \left(-\frac{\Delta t D_M}{2\Delta x^2}\right) M_{l+N}^{K+1} + \left(-\frac{\Delta t D_M}{2\Delta x^2}\right) M_{l-N}^{K+1} + \left(-\frac{\Delta t D_M}{2\Delta y^2}\right) M_{l+1}^{K+1} + \left(-\frac{\Delta t D_M}{2\Delta y^2}\right) M_{l-1}^{K+1} =$$

$$\left(1 - \frac{\Delta t \omega_2}{2} - \frac{\Delta t D_M}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t D_M}{\Delta y^2}\right) M_l^K + \left(\frac{\Delta t D_M}{2\Delta x^2}\right) M_{l+N}^K + \left(\frac{\Delta t D_M}{2\Delta x^2}\right) M_{l-N}^K + \left(\frac{\Delta t D_M}{2\Delta y^2}\right) M_{l+1}^K + \left(\frac{\Delta t D_M}{2\Delta y^2}\right) M_{l-1}^K + \frac{\Delta t S}{2} (L_l^{K+1} + L_l^K)$$

Equação 11.3

$$\left(1 + \frac{\Delta t \omega_3}{2} + \frac{\Delta t D_V}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t D_V}{\Delta y^2}\right) V_l^{K+1} + \left(-\frac{\Delta t D_V}{2\Delta x^2}\right) V_{l+N}^{K+1} + \left(-\frac{\Delta t D_V}{2\Delta x^2}\right) V_{l-N}^{K+1} + \left(-\frac{\Delta t D_V}{2\Delta y^2}\right) V_{l+1}^{K+1} + \left(-\frac{\Delta t D_V}{2\Delta y^2}\right) V_{l-1}^{K+1} =$$

$$\left(1 - \frac{\Delta t \omega_3}{2} - \frac{\Delta t D_V}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t D_V}{\Delta y^2}\right) V_l^K + \left(\frac{\Delta t D_V}{2\Delta x^2}\right) V_{l+N}^K + \left(\frac{\Delta t D_V}{2\Delta x^2}\right) V_{l-N}^K + \left(\frac{\Delta t D_V}{2\Delta y^2}\right) V_{l+1}^K + \left(\frac{\Delta t D_V}{2\Delta y^2}\right) V_{l-1}^K + \frac{\Delta t \varepsilon_2}{2} \frac{(L_l^{K+1} + L_l^K)(V_l^{K+1} + V_l^K)}{2a + \varepsilon_1(L_l^{K+1} + L_l^K)}$$

As condições iniciais utilizadas foram $L = 0$, $M = 1,6$ e $V = 0$. As condições de fronteira aplicadas para a área de um hectare de plantação de laranja são todas do tipo Neumann Homogêneo. E as condições de fronteira da área de manejo integrado de *C. capitata* são do tipo Dirichlet, para as bordas superior e inferior, e do tipo Neumann Homogêneo para as laterais esquerda e direita.

No **Sistema 11**, o índice “l” varia de um até a quantidade total de nós da malha e o índice “K”, que corresponde aos instantes de tempo, tem sua contagem iniciada em zero.

Por motivo de simplificação de notação e de clareza de apresentação, a notação *linha* (‘) não foi representada neste sistema.

As condições de fronteira do problema devem ser incorporadas às equações que correspondem aos pontos da malha, para os quais pelo menos um dos pontos cardeais, da discretização do laplaciano, esteja na fronteira da

área. Fazendo-se isso, obtém-se um sistema de equações matriciais (**Sistema 12**) a ser resolvido iterativamente para os sucessivos instantes de tempo “K”:

$$\begin{aligned}
 A(L^{K+1}, L^K, V^{K+1}, V^K)L^{K+1} &= B(L^{K+1}, L^K, V^{K+1}, V^K)L^K + F(M^{K+1}, M^K) \\
 C.M^{K+1} &= D.M^K + G(L^{K+1}, L^K) \\
 E(L^{K+1}, L^K)V^{K+1} &= O(L^{K+1}, L^K)V^K
 \end{aligned} \tag{12}$$

Esse sistema é implícito, e para sua resolução utilizou-se o método discutido por Douglas e Dupont (1973), em que para cada passo no tempo (identificado aqui com o índice superior “(K)” relativo ao instante t_k) aproxima-se a solução local dos sucessivos sistemas não-lineares por um método iterativo descrito a seguir.

A partir dos resultados já conhecidos ou calculados, denotados por L^K , M^K e V^K , calcula-se os valores das variáveis em um passo de tempo seguinte, intermediário entre “ t_k ” e “ t_{k+1} ”. A resolução do **Sistema 12** é feita equação por equação.

Para a primeira equação do **Sistema 12**,

$$A(L^{K+1}, L^K, V^{K+1}, V^K)L^{K+1} = B(L^{K+1}, L^K, V^{K+1}, V^K)L^K + F(M^{K+1}, M^K),$$

substitui-se os valores das variáveis desconhecidas L^{K+1} , M^{K+1} e V^{K+1} , por aqueles já conhecidos L^K , M^K e V^K . Desta forma, tal equação fica apresentada como:

$$A(L^K, L^K, V^K, V^K)L^* = B(L^K, L^K, V^K, V^K)L^K + F(M^K, M^K).$$

Resolvido-se essa equação, obtém-se L^* , e conseqüentemente, usando-se este valor de L^* e os anteriores, M^K e V^K , obtém-se M^* resolvendo-se a segunda equação do sistema:

$$C.M^* = D.M^K + G(L^*, L^K).$$

Agora, com os novos valores de L^* e de M^* , resolve-se a terceira equação do sistema para obter V^* :

$$E(L^*, L^K)V^* = O(L^*, L^K)V^K.$$

De volta à primeira equação do **Sistema 12**, obtém-se L^{**} resolvendo:

$$A(L^*, L^K, V^*, V^K)L^{**} = B(L^*, L^K, V^*, V^K)L^K + F(M^*, M^K).$$

Com esse valor, são resolvidas a segunda e a terceira equações para se obter, respectivamente, M^{**} e V^{**} :

$$C.M^{**} = D.M^K + G(L^{**}, L^K)$$

$$E(L^{**}, L^K)V^{**} = O(L^{**}, L^K)V^K.$$

Este procedimento é usado pela terceira vez, e seus respectivos resultados, a saber, L^{***} , M^{***} e V^{***} , são usados como as aproximações, no passo "K+1" de L^{K+1} , M^{K+1} e V^{K+1} . Neste ponto, esse processo é recomeçado para se obter os valores sucessivos das variáveis L , M e V , calculados até um valor $t = t_n = T$ do tempo, previamente estabelecido.

2. SIMULAÇÕES DAS DINÂMICAS POPULACIONAIS:

2.1 SIMULAÇÕES INICIAIS:

A **Figura 10** mostra a simulação da dinâmica populacional de *Ceratitis capitata*, ao longo de um ano, em condições ótimas de desenvolvimento (sem restrição alimentar para os adultos e sem inimigos naturais). Para a condição inicial do sistema, considerou-se 50 moscas fêmeas adultas distribuídas homogeneamente pelo hectare de plantação de laranja.

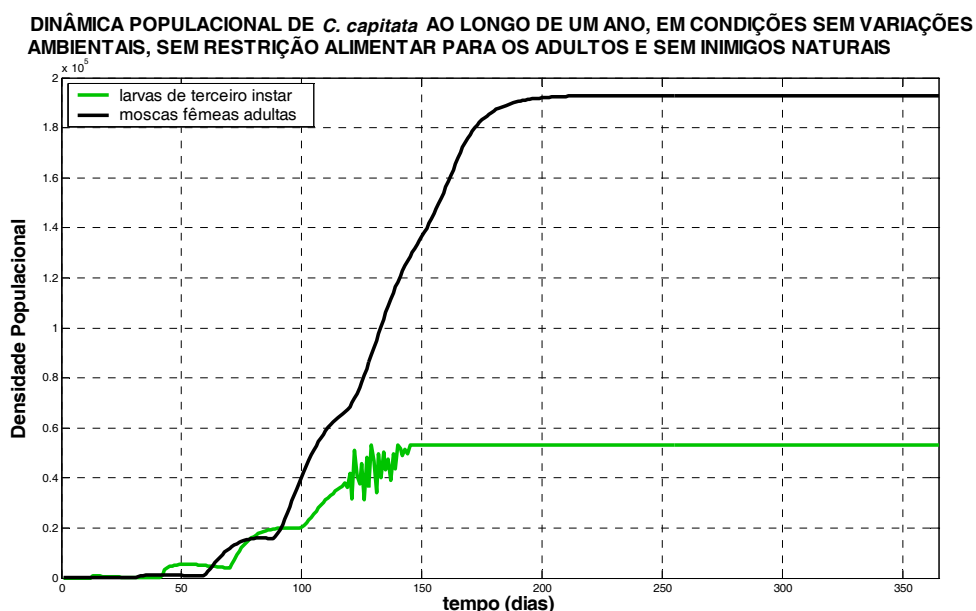


Figura 10. Simulação da dinâmica populacional de *C. capitata* ao longo de um ano. Considerou-se ausência de inimigos naturais, de variações ambientais e de períodos de restrição alimentar para os adultos.

Neste gráfico pode-se observar que as fêmeas adultas de *C. capitata* atingem uma estabilidade populacional aproximadamente no dia 200, e a

classe de larvas de terceiro instar atinge a mesma estabilidade aproximadamente no dia 150. Este efeito de estabilidade populacional apresentada pelas duas classes é devido á função de competição intra-específica conferida às larvas de terceiro instar.

A rápida oscilação populacional da classe de larvas de terceiro instar, a partir do dia 120, se deve aos efeitos de alta mortalidade de indivíduos devido à competição por espaço e nutrientes adequados. A capacidade de suporte de um hectare de plantação de laranja, para larvas de terceiro instar de mosca-do-mediterrâneo, foi estipulada considerando-se uma infestação máxima de 90% do total de frutos que podem ser produzidos por essa unidade de área e admitindo-se que em cada fruto atacado existam em média 1,32 larvas de moscas-das-frutas (MALAVASI; MORGANTE, 1980), sendo que destas, aproximadamente um terço ($1,32/3 = 0,44$) são de terceiro instar.

O valor médio de produção de laranjas por hectare, no estado de São Paulo, no ano de 2004 foi de 134.250 frutos, segundo o Instituto de Economia Agrícola (2007). Desta forma, admitindo-se que a média de produção por hectare não mudou de 2004 para 2007, calculou-se a quantidade máxima de larvas de terceiro instar suportada por hectare de plantação de laranjas-doces como sendo de 53.163 indivíduos.

Esta simulação que considera a dinâmica populacional de *C. capitata* ao longo de um ano, em condições constantes de temperatura e umidade, e sem inimigos naturais, é um tanto quanto inverossímil do ponto de vista prático. No entanto, serve para dar indicações de como e quando uma população de mosca-do-mediterrâneo poderia teoricamente atingir a capacidade suporte, em plantações de laranjas.

Considerando-se uma determinada região agrícola composta por vários tipos de plantas hospedeiras de mosca-do-mediterrâneo, com temperatura média de aproximadamente 25°C e umidade relativa do ar média próxima de 60% (por exemplo, alguma área localizada na região norte do Estado de São Paulo), não seria difícil imaginar quatro safras consecutivas de frutos hospedeiros desta mosca, em localidades próximas umas das outras. Caso o controle de moscas-das-frutas não seja efetivo em tal região, muito

provavelmente a população desta praga poderia chegar à sua capacidade limite. Tal área seria um enorme foco de moscas-das-frutas, possibilitando emigrações de grandes quantidades de indivíduos adultos para outras regiões agrícolas próximas.

A **Figura 11** mostra a simulação da dinâmica populacional de *C. capitata* em um hectare de plantação de laranja, durante o período aproximado de uma safra (45 dias) para as variedades de laranjas doces do estado de São Paulo. Esta simulação considerou a distribuição homogênea de 50 moscas fêmeas adultas, em um hectare de plantação, no início da safra. Não foi considerada forma alguma de controle populacional da mosca-do-mediterrâneo.

DINÂMICA POPULACIONAL DE *C. capitata*, EM UM HECTARE DE PLANTAÇÃO DE LARANJA, DURANTE UMA SAFRA

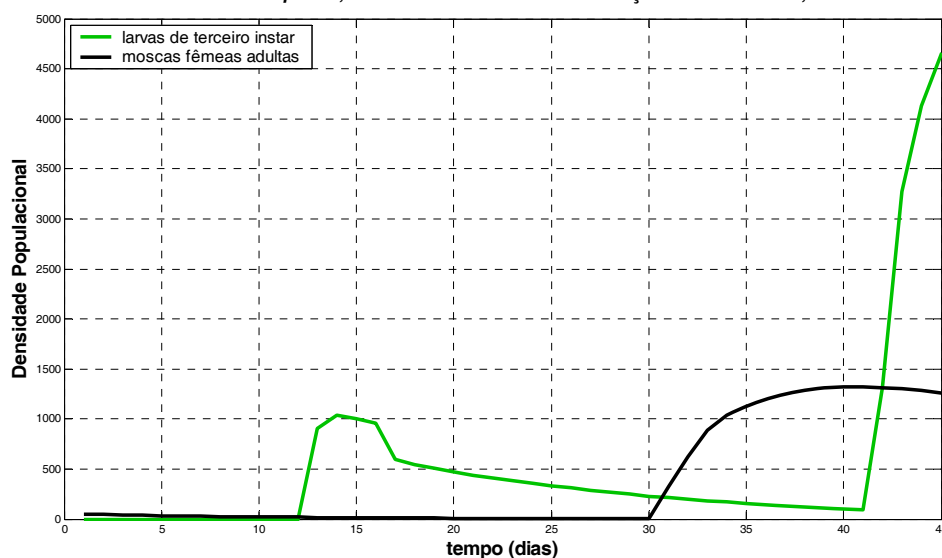


Figura 11. Simulação da dinâmica populacional de *C. capitata* em um hectare de plantação de laranja, durante o período aproximado de uma safra, na ausência de qualquer controle populacional. Para as condições iniciais considerou-se o desenvolvimento de 50 fêmeas em oviposição, no início da safra.

Através deste gráfico pode-se observar que somente a partir do 13º dia do começo da safra é que começam a aparecer as primeiras larvas de terceiro instar. A quantidade de indivíduos dessa classe cresceu rapidamente nos primeiros dias, devido ao grande número de ataques de frutos realizados pelas suas progenitoras, mas logo apresentou uma diminuição progressiva. Isto

ocorreu porque a população de moscas fêmeas adultas apresentou, em um momento anterior, uma diminuição acentuada, devido à mortalidade natural com o passar do tempo.

É interessante notar que a partir do 30º dia, a população de fêmeas adultas de *C. capitata* cresceu rapidamente. Tomando-se atenção, percebe-se que tal curva de crescimento acompanha aquela referente às larvas, de 17 dias antes. Isto porque na rotina computacional que abarca o **Sistema de Equação 12** foi embutido um “time lag” de 17 dias entre as populações de larvas de terceiro instar e fêmeas adultas de mosca-do-mediterrâneo. Este é o período aproximado entre o fim do estágio de larvas e início do estágio de fêmeas adultas em período de oviposição. Já o “time lag” entre o ataque das fêmeas em oviposição aos frutos de laranja e o surgimento das primeiras larvas de terceiro instar é de 13 dias, período aproximado esperado para que os estágios de ovo, larvas de primeiro e segundo instares se completem.

Para a simulação comentada anteriormente, os danos teóricos que *C. capitata* fez sobre a produção de laranjas foram gigantescos, já que 120.825 frutos foram atacados, o que equivale a 90% da produção total do hectare.

O fato das simulações aqui apresentadas não considerarem invasões contínuas de adultos de *C. capitata* na plantação é uma grande simplificação da realidade, mas facilita o entendimento do funcionamento básico da dinâmica populacional desta espécie e da sua interação com o parasitóide *D. longicaudata*, em plantações de laranjas doces.

A consideração de taxas de invasão de adultos da mosca-do-mediterrâneo, no pomar de laranja, depende de muitas variáveis ecológicas e ambientais específicas à região geográfica onde se localiza a possível área produtiva. Seria necessário saber quais são os cultivos de fruteiras existentes ao redor da plantação, assim como os seus respectivos períodos de frutificação, como foram os níveis de infestação de *C. capitata* em anos anteriores, qual é o histórico de temperatura atmosférica, de umidade relativa do ar e de precipitação pluvial, para a região, entre outros aspectos.

Como o objetivo desse trabalho foi a proposição de um modelo matemático de simulação que possibilite o entendimento básico da dinâmica

populacional de *C. capitata* e de seu parasitóide *D. longicaudata* em plantações de laranja, assim como ajudar a promoção, ora iniciante, de estratégias práticas do controle biológico de moscas-das-frutas através desta espécie de parasitóide, em plantações cítricas, não é interessante, neste momento, aumentar ainda mais a quantidade de variáveis que compõem o sistema computacional.

A **Figura 12** mostra as quantidades de frutos perdidos por causa dos ataques da mosca-do-mediterrâneo quando simuladas diferentes quantidades iniciais de moscas fêmeas adultas (10, 20, 30, 40 e 50) se desenvolvendo em um hectare de plantação de laranjas, a partir do início da safra. Foram considerados também diferentes taxas de ataques destas moscas sobre os frutos cítricos e ausência total de manejo de praga. Este tipo de simulação buscou estimar as quantidades de frutos de laranja perdidas, por hectare de plantação, de acordo com a quantidade de fêmeas adultas de *C. capitata* que começam a se desenvolver, em tal unidade de área de plantação, quando não se faz manejo populacional do inseto praga.

RELAÇÃO ENTRE QUANTIDADES DE FÊMEAS ADULTAS DE *C. capitata* QUE COMEÇAM A SE DESENVOLVER EM UM HECTARE DE PLANTAÇÃO DE LARANJA E QUANTIDADES DE FRUTOS ESTRAGADOS, AO TÉRMINO DE UMA SAFRA

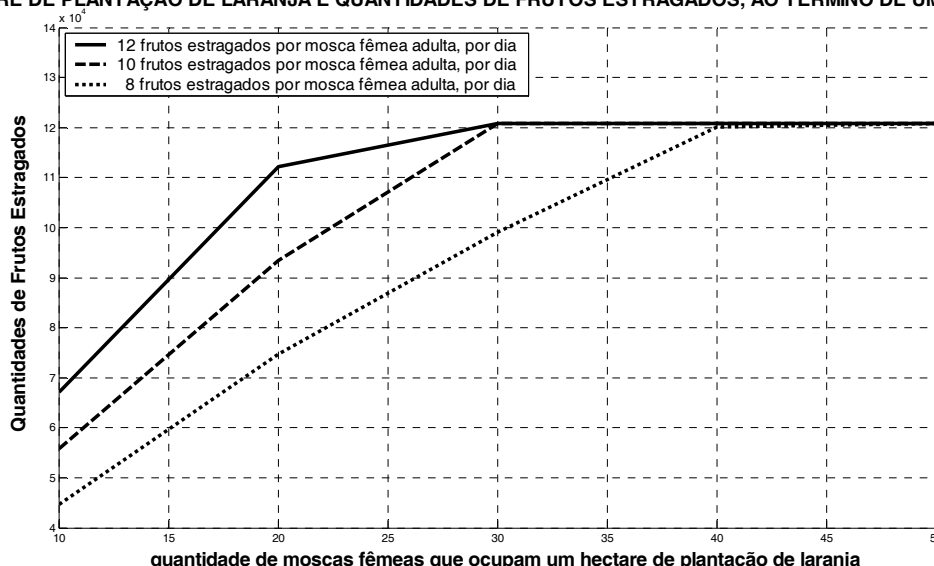


Figura 12. Correlação entre frutos de laranja estragados e quantidades (10, 20, 30, 40 e 50) de fêmeas adultas de *C. capitata* que começam a se desenvolver em um hectare de plantação de laranjas, no início da safra. Também foram simuladas três taxas diferentes de ataque ao fruto hospedeiro: 8, 10 e 12 frutos estragados por mosca fêmea adulta, por dia.

Mesmo não havendo dados precisos sobre a quantidade de frutos estragados por fêmea adulta de *C. capitata*, a cada dia, foi possível analisar as respostas referentes aos valores prováveis de ocorrência. Este tipo de análise, chamado de teste de sensibilidade, é frequentemente usado em estudos de processos de sistemas dinâmicos, quando não é possível precisar com exatidão os valores das variáveis. Para esses casos, são usados valores limites e médios de um provável intervalo de ocorrência.

Para a situação apresentada, considerou-se que cada fêmea adulta de *C. capitata* estraga 10 frutos de laranja por dia, podendo haver uma variação de vinte por cento para mais (12 frutos) ou para menos (8 frutos). Essa suposição foi assumida devido ao fato de considerar-se que cada mosca fêmea adulta oviposita 10 ovos por dia (500 ovos em seus ovários, divididos por 50 dias de expectativa de vida), em aproximadamente oito frutos - segundo Malavasi e Morgante (1980), a média de larvas de moscas-das-frutas por fruto de laranja infestado é 1,32, então, 10 ovos se transformam em 10 larvas, que divididas por 1,32, são distribuídas por 7,58 frutos.

Desta forma, seriam necessários aproximadamente 8 frutos de laranja para que uma fêmea adulta de mosca-do-mediterrâneo ovipositasse seus 10 ovos diários. Sabendo-se que muitos frutos são estragados somente pelo fato da mosca fazer puncturas (introdução do ovipositor do fruto, mas sem realização de oviposição), admitiu-se que cada mosca estraga em média 10 frutos por dia, sendo que 8 deles recebem efetivamente seus ovos e 2 seriam estragados somente pela realização de puncturas.

Percebe-se que as curvas de frutos perdidos mostradas na **Figura 12** são assintóticas, estabilizando no valor 120.825. Este tipo de curva ocorreu porque foi estabelecido na rotina computacional do modelo que a quantidade máxima possível de frutos estragados seria 90% da produção total média de um hectare. Os resultados teóricos desta simulação são importantes para perceber que pequenas quantidades de *C. capitata* que começam a se desenvolver em um determinado hectare de plantação de laranja podem gerar, teoricamente, perda quase completa ou completa da produção.

As simulações seguintes são referentes às análises do manejo populacional de *C. capitata* somente através de liberações inundativas do parasitóide braconídeo *D. longicaudata*, em plantações de laranja.

Em relação ao parasitismo de *D. longicaudata* sobre larvas de terceiro instar de *C. capitata*, em plantações de laranja, é importante afirmar que este trabalho utilizou valores de eficiências de parasitismo sugeridos por Walder (2007, comunicação pessoal). No entanto, como foi comentado por este pesquisador, não existem trabalhos específicos que suportem a determinação precisa da eficiência do parasitóide braconídeo em parasitar larvas da mosca-do-mediterrâneo, em plantações de laranja.

Dos poucos trabalhos científicos que analisaram com profundidade a questão da efetividade do controle biológico inundativo de moscas-das-frutas por parasitóides braconídeos, aqueles desenvolvidos por Wong *et al.* (1991) e Montoya *et al.* (2000) foram os que fizeram correlações mais explícitas entre quantidades e freqüências de parasitóides do gênero *Diachasmimorpha* liberados em pomares frutíferos e porcentagem de moscas-das-frutas parasitadas, além de compararem dinâmicas populacionais de moscas-das-frutas, em áreas que receberam liberações de parasitóides, com aquelas usadas como controle.

Apesar dos trabalhos Wong *et al.* (1991) e Montoya *et al.* (2000) serem os que disponibilizaram os dados mais próximos possíveis necessários ao ajuste do modelo aqui proposto, nenhum deles analisou diretamente a correlação entre liberações inundativas de *D. longicaudata* e redução populacional, ou porcentagem de parasitismo, de *C. capitata*, em plantações de laranja. Por esse motivo, o valor de eficiência de parasitismo de *D. longicaudata* sobre *C. capitata* utilizado nas simulações foi estabelecido através de suposições do que provavelmente ocorre no campo, de acordo com os conhecimentos práticos e teóricos do pesquisador Júlio Marcos Menges Walder, professor e pesquisador do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), USP, e especialista na área de controle biológico da mosca-do-mediterrâneo através de *D. longicaudata*.

A **Figura 13** apresenta a simulação da dinâmica populacional de *C. capitata* quando se considera liberações semanais, espacialmente homogêneas, de 1.500 fêmeas de *D. longicaudata*, em período de oviposição, em um hectare de plantação de laranja, durante o período de uma safra. Como condição inicial, admitiu-se a distribuição homogênea de 50 moscas fêmeas adultas, na unidade de área em pauta.

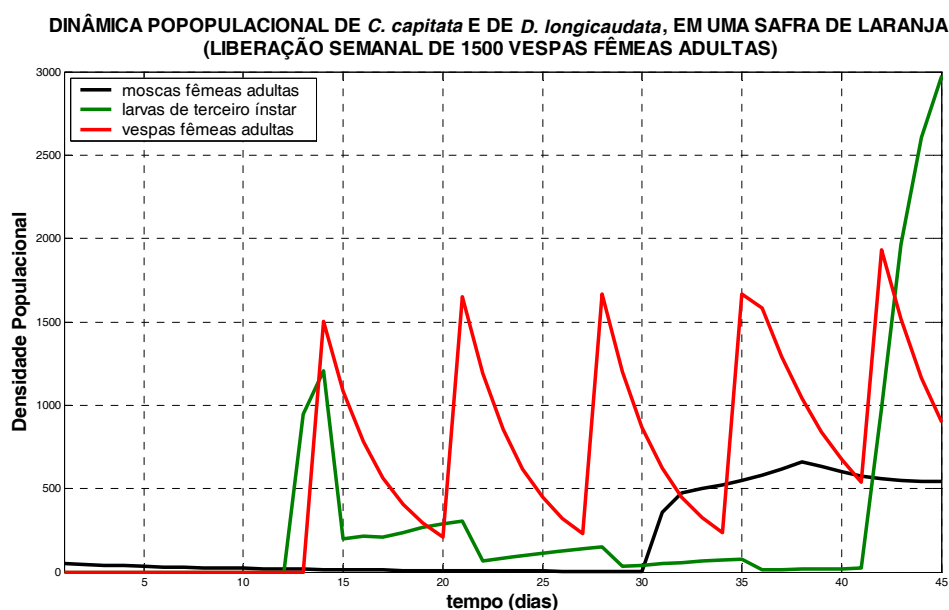


Figura 13. Dinâmica populacional de *C. capitata* sob liberações semanais, homogêneas, de 1.500 fêmeas adultas de *D. longicaudata*, em um hectare de plantação de laranja doce, durante o período de uma safra. Considerou-se a condição inicial de 50 moscas fêmeas distribuídas homogêneas pela unidade de área.

Comparando-se as **Figuras 11 e 13** é possível notar que a densidade populacional de larvas de terceiro instar da mosca-do-mediterrâneo, no dia 45 da figura que não considera liberações da vespa parasitóide é duas vezes maior (aproximadamente 6000 indivíduos) do que o gráfico da simulação que considera liberações semanais, espacialmente homogêneas, de 1.500 fêmeas adultas de *D. longicaudata*, em um hectare de plantação de laranja. Isto se deve ao fato da eficiência de parasitismo da vespa braconídea ter sido ajustada

para conferir uma mortalidade de 50% das larvas de terceiro instar de *C. capitata* sob estas mesmas condições simuladas.

É interessante notar também que a quantidade de moscas fêmeas adultas em oviposição, no dia 45, é bem menor na simulação que considera o controle biológico (na **Figura 11** a quantidade é de aproximadamente 1.250 e na **Figura 13** é de aproximadamente 600). Isto ocorreu porque muitas larvas de terceiro instar de *C. capitata* não conseguiram se transformar em fêmeas adultas, pois foram mortas pelo parasitismo de *D. longicaudata*.

A **Figura 14** apresenta a dinâmica populacional de *C. capitata* e de *D. longicaudata* durante três anos, em condições constantes de temperatura e umidade, sem inimigos naturais e sem restrições alimentares para os adultos de ambas as espécies. Para tal simulação, considerou-se condições iniciais de 50 moscas fêmeas adultas e de 1.500 vespas fêmeas adultas, distribuídas homogeneamente por um hectare de plantação de laranja. .

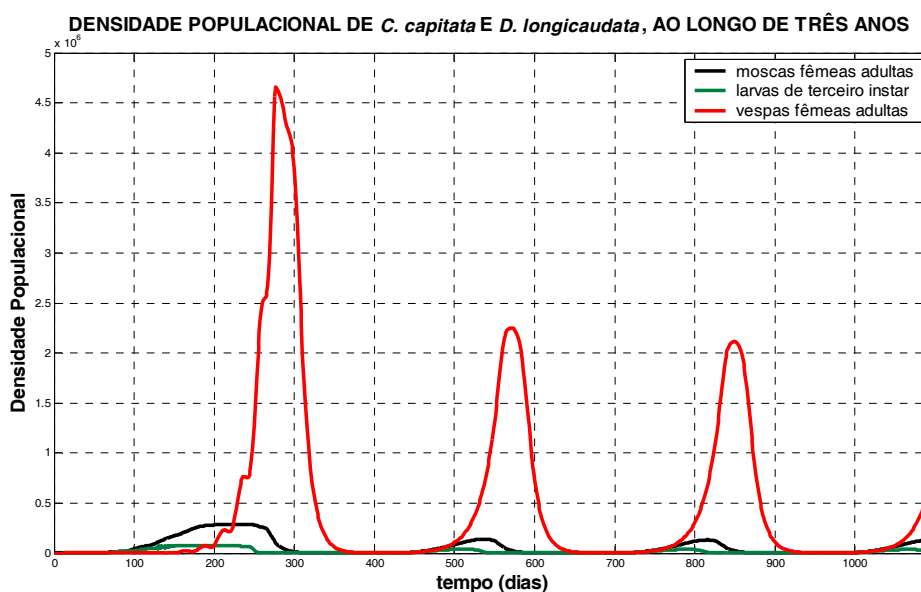


Figura 14. Simulação das dinâmicas populacionais de *C. capitata* e de *D. longicaudata* ao longo de três anos, em um hectare de plantação de laranja. Considerou-se as quantidades iniciais de 50 moscas fêmeas adultas e de 1.500 vespas fêmeas adultas. Admitiu-se valores constantes de temperatura (25°C) e umidade relativa do ar (60%) e ausência de períodos de restrição alimentar para adultos de ambas as espécies.

Essa simulação populacional, assim como aquela representada pela **Figura 10**, também é bastante irreal do ponto de vista prático, mas serve para mostrar os princípios básicos de um possível controle biológico clássico da mosca-do-mediterrâneo, utilizando-se o parasitóide braconídeo. Pode-se perceber que este tipo de estratégia de controle populacional não é viável, já que o parasitóide demora aproximadamente 10 meses para reduzir a níveis efetivamente baixos a população de seu hospedeiro. E mesmo sofrendo ataques de seu parasitóide, a praga agrícola apresenta picos populacionais muito elevados, atingindo praticamente a capacidade suporte do meio durante estes momentos.

Outra observação que deve ser feita é o fato da população de *D. longicaudata* ser geralmente bem mais alta do que a população de seu hospedeiro. Isto também é uma situação ecologicamente irreal, pois as fêmeas do parasitóide não depositam, em média, mais do que um ovo por larva de hospedeiro e a expectativa de vida desta espécie é sensivelmente menor do que a da mosca-do-mediterrâneo, fazendo assim com que a população do parasitóide seja sempre menor do que a do seu hospedeiro. Essa superdimensionalização da população de *D. longicaudata* é, aparentemente, uma consequência intrínseca da função de Michaelis-Menten para interações do tipo presa-predador e hospedeiro-parasitóide. Apesar desta superdimensionalização, os efeitos do parasitóide braconídeo sobre a redução populacional de *C. capitata* são aparentemente adequados ao que se espera em situações reais de campo.

2.2 SIMULAÇÕES PARA ANALISAR O GRAU DE IMPORTÂNCIA DAS VARIÁVEIS QUANTIDADE, FREQUÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FÊMEAS ADULTAS DE *D. longicaudata* LIBERADAS, EM PLANTAÇÕES DE LARANJA, PARA CONTROLAR BIOLÓGICAMENTE *C. capitata*.

Os resultados apresentados a seguir são referentes aos estudos da importância que as variáveis **frequência**, **quantidade** e **distribuição espacial**

das liberações de *D. longicaudata* possuem em relação à eficiência no controle populacional de *C. capitata*, em plantações de laranja doce, durante o período aproximado de uma safra (45 dias). A unidade de área analisada neste momento é de um hectare de plantação, um quadrado com 100 metros de lado.

A **Figura 15** apresenta os dados referentes às reduções populacionais das classes de larvas de terceiro instar e de fêmeas adultas em oviposição de *C. capitata* de acordo com diferentes quantidades de liberações semanais, especialmente homogêneas, de fêmeas adultas de *D. longicaudata*. Esta simulação, assim como quase todas realizadas, considerou a quantidade inicial de 50 moscas fêmeas se desenvolvendo a partir do início da safra.

RELAÇÃO ENTRE LIBERAÇÕES SEMANAIS, ESPECIALMENTE HOMOGÊNEAS, DE FÊMEAS DE *D. longicaudata*, EM PERÍODO DE OVIPOSIÇÃO, E REDUÇÃO POPULACIONAL DE *C. capitata*.

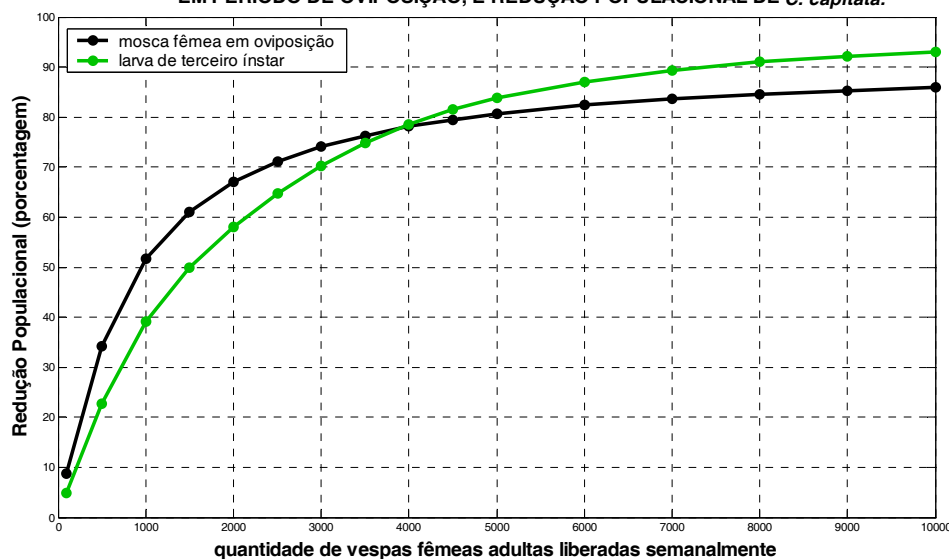


Figura 15. Simulação das reduções populacionais das classes de larva de terceiro instar e de fêmeas em oviposição de *C. capitata*, de acordo com diferentes quantidades de liberações semanais, especialmente homogêneas, de fêmeas de *D. longicaudata*, em período de oviposição.

Este gráfico mostra curvas de redução populacional de *C. capitata* conforme aumentam as quantidades semanais de liberação de parasitóides. Estas curvas possuem tendências de saturação. Isto ocorre devido à função de Michaelis-Menten que, neste modelo, descreve a taxa de mortalidade de larvas de terceiro instar de *C. capitata* de acordo com a relação de disponibilidade

entre indivíduos pertencentes a essa classe e indivíduos da classe de fêmeas adultas *D. longicaudata*, a cada instante de tempo. Conforme diminui a disponibilidade de hospedeiros no ambiente, menores são as chances de novos indivíduos serem encontrados e parasitados.

A **Figura 16** apresenta a relação existente entre diferentes freqüências de liberações, espacialmente homogêneas, de 1.500 fêmeas de *D. longicaudata* em oviposição, e redução populacional de *C. capitata*, em um hectare de plantação de laranja doce com safra de 45 dias. Para essas análises, considerou-se que as liberações dos parasitóides começaram 14 dias após o início da safra e que a população de *C. capitata* iniciou-se com 50 moscas fêmeas adultas, espalhadas homogeneamente pela unidade de área estudada.

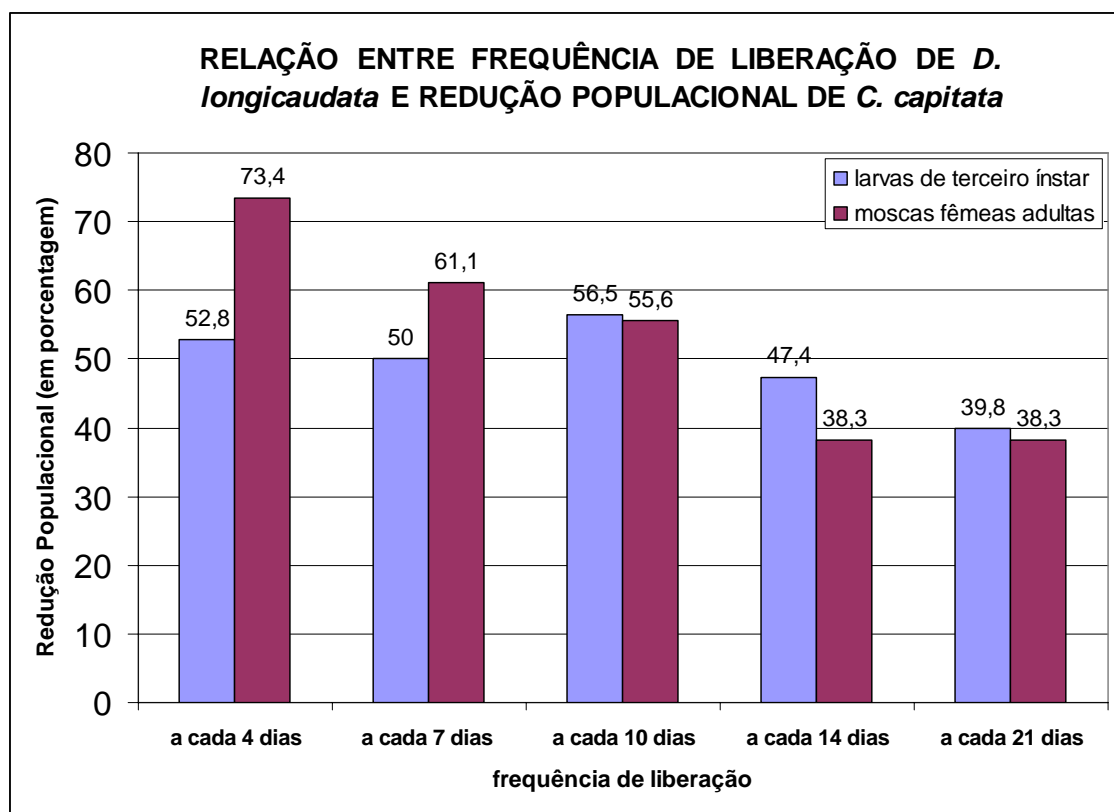


Figura 16. Relação existente entre freqüências de liberações, homogeneamente distribuídas, de 1.500 fêmeas adultas de *D. longicaudata*, em período de oviposição, e redução populacional de *C. capitata*, ao longo de uma safra de laranja doce.

Pode-se perceber através desta figura que quanto maior for a frequência de liberação de parasitóides, maior será a redução populacional da mosca-do-mediterrâneo. Segundo Walder (comunicação pessoal, 2007), a frequência de liberação semanal e aquela feita a cada duas semanas são as mais usuais no campo, já que são de fácil estruturação programática e não exigem grande complexidade logística.

A última variável importante analisada é o tipo de distribuição espacial para as liberações repetitivas de *D. longicaudata*. Nesta análise foram consideradas cinco formas diferentes de distribuição espacial, sendo que para cada uma delas foram simuladas liberações semanais de 1.500 vespas fêmeas em oviposição, sobre uma população de mosca-do-mediterrâneo que começa a se desenvolver, em um hectare de plantação de laranja doce, a partir de 50 fêmeas adultas distribuídas de forma espacialmente homogênea.

As configurações espaciais analisadas para as liberações do parasitóide foram: um único ponto central, uma linha central, cinco pontos distribuídos, duas linhas ortogonais centrais e distribuição homogênea.

Estas diferentes formas de liberação podem ser vistas através das **Figuras 17, 18, 19, 20 e 21** a seguir:

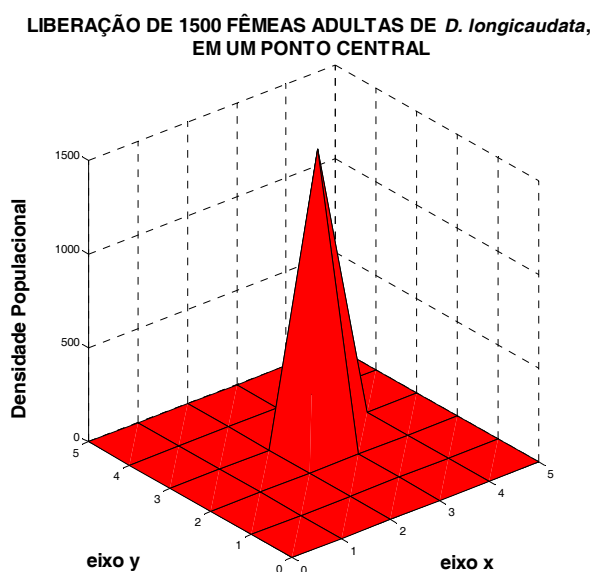


Figura 17. Liberação de parasitóides no ponto central de um hectare de plantação de laranja.

**LIBERAÇÃO DE 1.500 FÊMEAS ADULTAS DE *D. longicaudata*,
EM UMA LINHA CENTRAL**

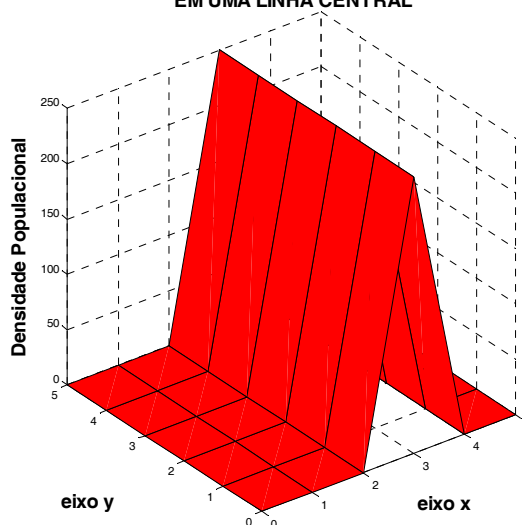


Figura 18. Liberação de parasitóides em uma linha central de um hectare de plantação de laranja.

**LIBERAÇÃO DE 1.500 FÊMEAS ADULTAS DE *D. longicaudata*,
EM CINCO PONTOS DISTRIBUÍDOS**

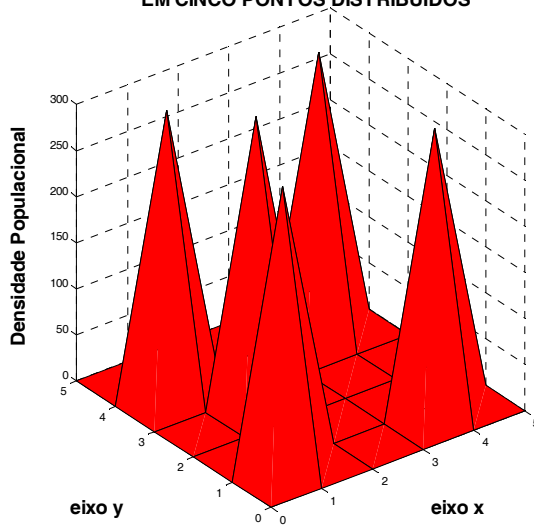


Figura 19. Liberação de parasitóides em cinco pontos distribuídos pela área de um hectare de plantação de laranja.

LIBERAÇÕES DE 1.500 FÊMEAS ADULTAS DE *D. longicaudata*,
EM LINHAS CENTRAIS ORTOGONAIS

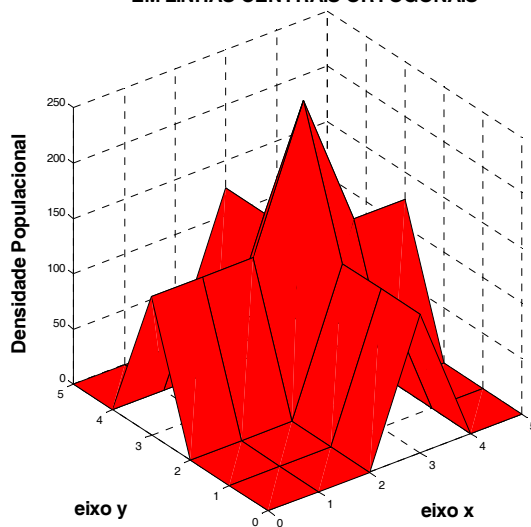


Figura 20. Liberação de parasitóides em duas linhas ortogonais centrais de um hectare de plantação de laranja.

LIBERAÇÃO DE 1.500 FÊMEAS ADULTAS DE *D. longicaudata*,
DE FORMA ESPACIALMENTE HOMOGÊNEA

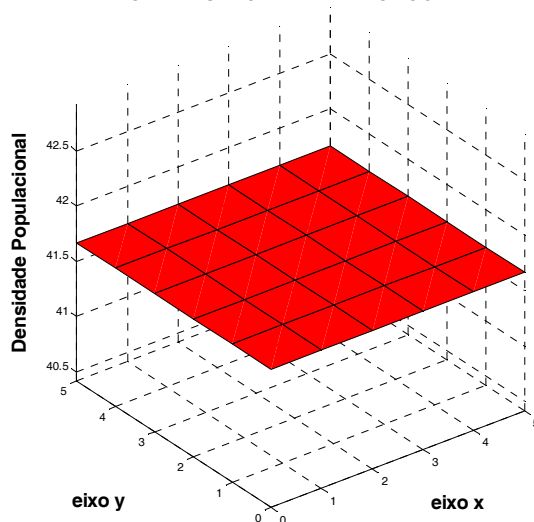


Figura 21. Liberação espacialmente homogênea de parasitóides, em um hectare de plantação de laranja.

A **Figura 22** explicita a correlação existente entre formas espaciais de liberação do parasitóide e redução populacional de *C. capitata*.

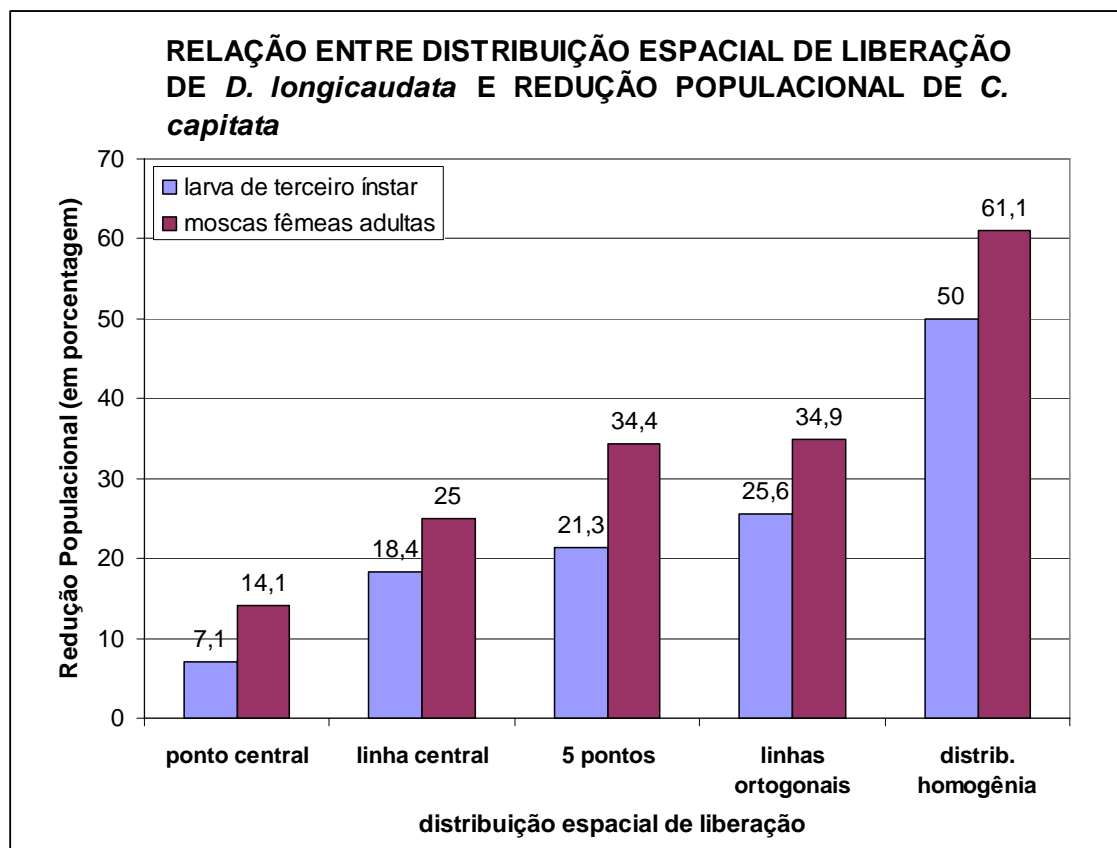


Figura 22. Redução populacional de *C. capitata*, em porcentagem, de acordo com as diferentes formas de distribuição espacial das liberações semanais de 1.500 fêmeas adultas de *D. longicaudata*, em um hectare de plantação de laranja.

Tal figura mostra que a ordem crescente de eficiência no controle populacional de *C. capitata* é a seguinte: liberações em um ponto central, em uma linha central, em 5 pontos distribuídos, em duas linhas ortogonais centrais e liberações espacialmente homogêneas.

Pode-se perceber que a distribuição homogênea é muito mais eficiente do que todas as outras. Ela é quase duas vezes mais eficiente do que a segunda colocada (linhas ortogonais centrais). Além disso, pode-se notar que as distribuições em linhas ortogonais centrais e a distribuição em 5 pontos espacialmente distribuídos são muito parecidas em relação ao controle de *C. capitata*. Por último, é visível que a distribuição em uma linha central e

principalmente a distribuição em um único ponto central são formas espaciais de liberação de *D. longicaudata* muito pouco eficientes para controlar *C. capitata*.

2.3. SIMULAÇÕES PARA ANÁLISES PRÁTICAS DO MANEJO INTEGRADO DE *C. capitata* UTILIZANDO-SE LIBERAÇÕES MASSIVAS DE *D. longicaudata* CONJUNTAMENTE COM APLICAÇÕES DE ISCAS TÓXICAS, EM PLANTAÇÕES DE LARANJA.

Conforme Raga (2007), a eficácia no controle de moscas-das-frutas está fundamentada na integração de vários métodos de controle, devido às características desse grupo de pragas, como alta taxa de fecundidade, elevada percentagem de fertilidade, alta capacidade de dispersão de adultos e facilidade de colonização sob diferentes condições ecológicas. Por esses motivos, a maneira mais adequada de controlar as populações de moscas-das-frutas é através do manejo integrado de pragas.

De acordo com Souza Filho (2007a), as laterais das plantações de fruteiras são as primeiras regiões a serem atacadas pelas moscas-das-frutas, já que geralmente os adultos destes insetos são provenientes de cultivares ou matas nativas próximas às plantações em questão. Por esse motivo, simula-se uma situação de manejo integrado composto por aplicações de iscas tóxicas e liberações massivas de *D. longicaudata*, nas bordas das plantações atacadas por *C. capitata*.

A configuração espacial aqui proposta para o manejo integrado é aplicada às laterais da plantação de laranja que sofrem importantes invasões de moscas-das-frutas. Nesta configuração, delimita-se uma seqüência contínua de faixas de 50 metros de largura, começando da borda e indo para o interior da plantação. Na faixa mais externa, foram simuladas aplicações de iscas tóxicas (geralmente no campo a freqüência é a cada duas semanas); na faixa imediatamente mais interna, não se considerou qualquer tipo de controle químico ou biológico; na próxima faixa, foram simuladas liberações massivas de parasitóides, a cada uma ou duas semanas; na penúltima faixa, não foi

considerado controle químico ou biológico algum e na faixa mais interna de todas, admitiu-se, novamente, aplicações de iscas tóxicas.

O esquema desta configuração proposta é mostrado pela **Figura 23**, a seguir.

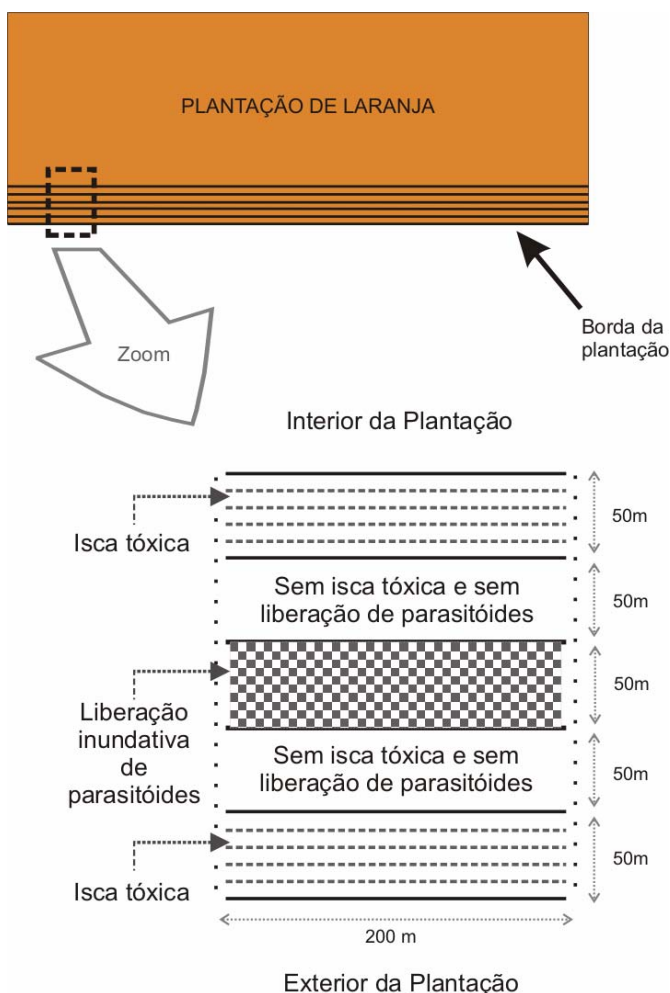


Figura 23. Esquema proposto para a unidade de área do manejo integrado de *C. capitata*, dentro de uma borda de plantação de laranja que sofre elevados níveis de ataque do inseto praga. Ilustração da disposição das 5 faixas de um hectare de área (200m por 50m), onde a faixa mais externa e a mais interna à plantação de laranja recebem aplicações de iscas tóxicas, aquelas intermediárias não recebem tratamento algum e, por último, a faixa mais central da unidade de manejo recebe somente solturas massivas de parasitóides.

A proposição desta configuração, por esse trabalho, é devida ao fato de se acreditar que a maior parte dos adultos de *C. capitata* que invadirem a plantação de laranja será contida pela faixa costeira de isca tóxica e aqueles que supostamente conseguirem passar por essa barreira teriam dificuldades de gerar a sua prole, devido ao parasitismo de suas larvas. As possíveis vantagens desta estratégia em relação àquela que considera somente a aplicação de iscas tóxicas são referentes ao menor risco de contaminação química do solo e dos frutos cítricos, e a promoção de menor impacto ecológico sobre os animais benéficos que habitam o interior das plantações, como predadores e parasitóides de insetos pragas. Isso aconteceria devido ao fato da estratégia aqui proposta reduzir as quantidades de produtos químicos e a extensão das áreas por eles afetadas.

Para a unidade de área de manejo apresentada, considerou-se a simplificação conceitual de que a mortalidade de *C. capitata* e de *D. longicaudata* nas regiões onde são feitas as aplicações de iscas tóxicas é total, o que quer dizer que todos os indivíduos de moscas ou vespas que chegam a essas regiões morrem. E por esse motivo, as condições de fronteira para as bordas superior e inferior da região simulada devem ser do tipo Dirichlet. Cunha (2000) mostra que este tipo de condição de fronteira determina valores fixos iguais a zero. As laterais da unidade da área de manejo proposta não consideram passagem de indivíduos, sejam moscas ou vespas. Essa simplificação conceitual foi utilizada porque se considerou que existe um equilíbrio de entrada e saída de moscas e de vespas adultas através destes locais, fazendo com que na média, a densidade populacional do inseto praga e de seu parasitóide não se altere devido a esses fluxos de indivíduos. As condições de fronteira das laterais direita e esquerda foram especificadas como sendo do tipo Newman Homogêneo, pois segundo Cunha (2000), esse tipo de condição de fronteira determina a inexistência de fluxo do que se pretende simular (no caso moscas e vespas fêmeas adultas) através destes locais.

Em relação às medidas métricas da unidade de área do manejo integrado de *C. capitata*, optou-se por escolher faixas retangulares com 50 metros de largura devido ao fato desta medida ser aproximadamente o limite

máximo de vôo dos adultos de *D. longicaudata*, segundo Paranhos *et al.* (2007) e, ao mesmo tempo, ser uma distância facilmente percorrida pelos adultos de *C. capitata*, que possuem um potencial de vôo muito maior do que seu inimigo natural, como pode ser percebido comparando-se os resultados de Wong *et al.* (1982), Plant e Cunningham (1991) e Paranhos *et al.* (2007). Desta forma, uma porcentagem muito pequena dos indivíduos adultos do parasitóide braconídeo, liberados na faixa central da unidade de área de manejo da mosca-do-mediterrâneo, morreria devido às iscas tóxicas aplicadas na primeira e na última faixa de área. As larvas de terceiro instar de *C. capitata* que porventura estivessem distribuídas nas três faixas mais centrais poderiam sofrer elevados níveis de ataques do seu parasitóide braconídeo, enquanto que os adultos da mosca-das-frutas distribuídos em qualquer local da região sofreriam alta mortalidade devido às iscas tóxicas.

Teoricamente, a distribuição espacial aqui proposta possibilitaria que o manejo de *C. capitata*, através de aplicações de iscas tóxicas, em plantações de laranja, seja complementado pelo controle biológico baseado em solturas inundativas do parasitóide *D. longicaudata*. A proposição de faixas de 200 m de comprimento deve-se à facilidade de cálculos métricos, já que este número é redondo, de fácil manuseio matemático, e faz com que cada faixa de área apresente a dimensão de um hectare, unidade esta muito usada em agricultura e agropecuária.

As dinâmicas populacionais de *C. capitata* e *D. longicaudata* foram simuladas para a área total da unidade de manejo integrado de praga. No entanto, como na primeira e na última faixa de 50 metros considera-se a aplicação de iscas tóxicas, contabilizou-se somente as dinâmicas populacionais existentes nas três faixas centrais da região.

Para as condições iniciais do sistema, foram admitidas distribuições espacialmente homogêneas de 250 fêmeas adultas de *C. capitata*, no início da safra, para as cinco faixas de um hectare (50 metros de largura e 200 metros de comprimento) que compõem a unidade de manejo integrado de *C. capitata*. Esta quantidade foi utilizada com a finalidade de apresentar a mesma média de

moscas adultas por hectare (50 indivíduos) utilizadas em todas as simulações anteriores.

A comparação dos resultados das simulações das dinâmicas populacionais de *C. capitata*, quando não se faz controle populacional algum e quando é feita somente a aplicação de iscas tóxicas mostra que, ao término de 45 dias, esta forma de controle de praga gera redução populacional de 56% para a classe de larvas de terceiro instar e de 80% para a classe de moscas fêmeas adultas. Estes números puderam ser calculados a partir dos dados gerados pelas simulações destas duas situações distintas, como pode ser visto a seguir.

Quando não há controle populacional algum, ao término de 45 dias, as quantidades de larvas de terceiro instar e de moscas fêmeas adultas distribuídas nos 5 hectares da unidade de manejo integrado de *C. capitata* são, respectivamente, de 23.482 e 6.308 indivíduos. Em contraposição, as densidades populacionais destas duas classes, ao término da safra, quando são feitas as aplicações de iscas tóxicas são de 10.339 e 1.286 indivíduos, respectivamente. Comparando-se estes números, percebe-se que a simulação da aplicação de iscas tóxicas gerou valores de larvas de terceiro instar e de moscas fêmeas adultas equivalentes a 44% ($10.339/23.482 \cong 0.44$) e a 20% ($1.286/6.308 \cong 0.2$) daqueles obtidos quando não são consideradas as aplicações dos produtos químicos. Isto significa que este tipo de controle de praga gerou reduções populacionais de aproximadamente 56% e 80% para as classes de larvas e de fêmeas adultas de *C. capitata*, respectivamente.

As **Figuras 24** e **25** mostram, respectivamente, as distribuições espaciais de *C. capitata* pela unidade de área do manejo integrado de praga, no dia 45, quando não são simulados métodos de controle de praga e quando são simulados os efeitos das iscas tóxicas sobre a população de mosca-do-mediterrâneo.

DENSIDADE POPULACIONAL DE FÊMEAS ADULTAS DE *C. capitata*, NO DIA 45, QUANDO NÃO É FEITO CONTROLE POPULACIONAL ALGUM

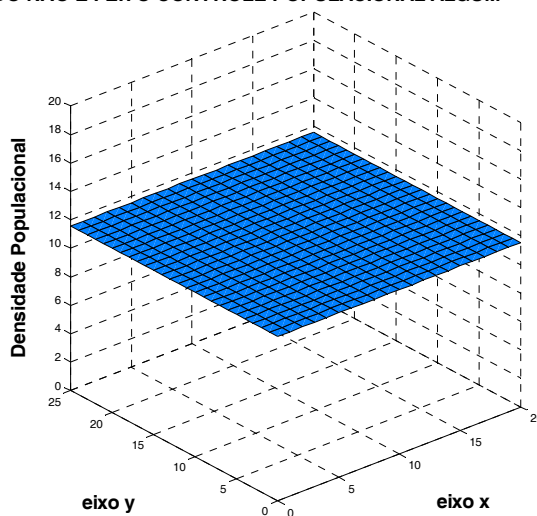


Figura 24. Densidade populacional de *C. capitata*, no dia 45, na unidade de área de manejo integrado de praga, quando não são considerados métodos de controle populacional. Para essa situação, foi considerada uma condição inicial de 250 moscas fêmeas adultas, espalhadas homogeneamente pela área, no início da safra. Não foi considerada aplicação alguma de manejo populacional.

DENSIDADE POPULACIONAL DE FÊMEAS ADULTAS DE *C. capitata*, NO DIA 45, QUANDO É FEITA A APLICAÇÃO DE ISCAS TÓXICAS

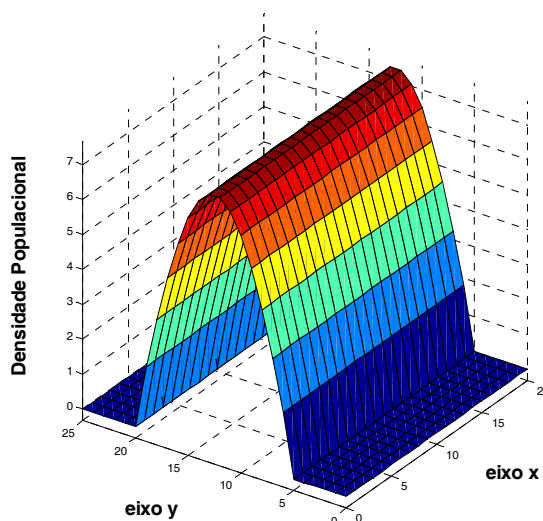


Figura 25. Densidade populacional de *C. capitata*, no dia 45, em uma área de 5 hectares de plantação de laranja (200m x 250m), considerando-se uma quantidade inicial de 250 moscas fêmeas adultas, se desenvolvendo de forma espacialmente homogênea, no início da safra. Para essa situação foi simulada aplicação de iscas tóxicas nas faixas inferior e superior da região.

A **Figura 25** mostra que existe maior concentração de adultos da mosca-do-mediterrâneo nas regiões mais distantes dos locais de aplicação de iscas tóxicas, e que não há indivíduo algum onde este tipo de tratamento químico ocorre.

A utilização conjunta de iscas tóxicas com liberações massivas de *D. longicaudata* gera taxas de mortalidade ainda maiores de *C. capitata*, na unidade de área estudada. A **Figura 26** mostra a função de redução populacional de *C. capitata* quando é feito o manejo integrado de praga baseado em aplicações, a cada duas semanas, de iscas tóxicas e em liberações semanais, especialmente homogêneas, de diferentes quantidades de adultos de *D. longicaudata*. A **Figura 27** é referente à simulação das mesmas condições citada, com a diferença que as liberações dos parasitóides são feitas a cada duas semanas.

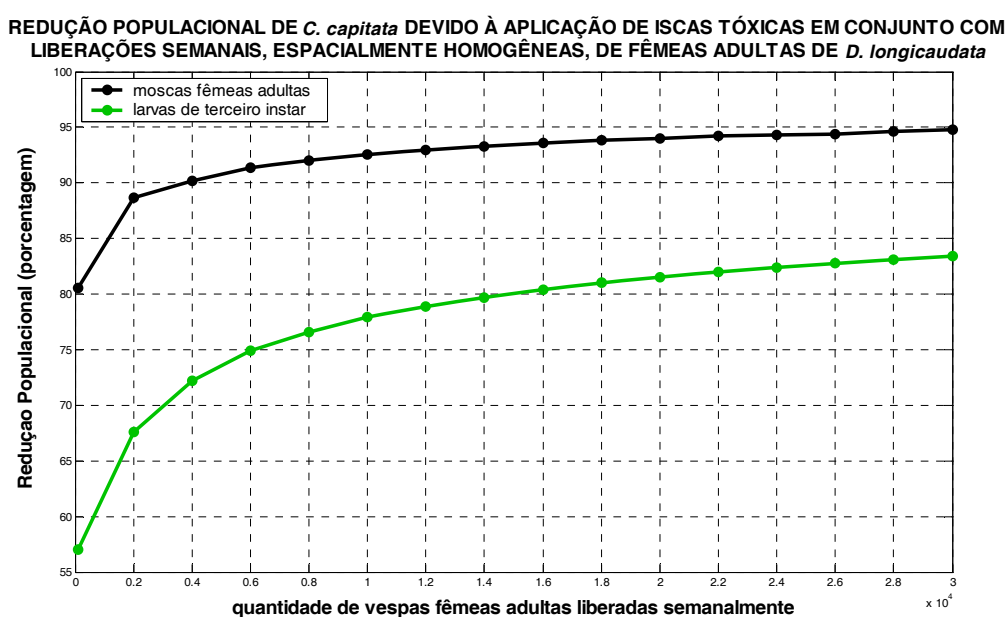


Figura 26. Reduções populacionais de larvas de terceiro instar e de fêmeas adultas de *C. capitata*, no dia 45, de acordo com a liberações semanais de diferentes quantidades de fêmeas adultas de *D. longicaudata*, em conjunto com aplicações de iscas tóxicas, em uma área de 5 hectares de plantação de laranja.

A **Figura 26** mostra que a utilização conjunta de iscas tóxicas e de liberações inundativas semanais de *D. longicaudata* podem gerar reduções populacionais de até aproximadamente 95% e de 84% para as classes de

adultos e de larvas de terceiro instar de *C. capitata*, respectivamente, na unidade de área proposta para este tipo de manejo integrado de praga.

O eixo das ordenadas deste gráfico apresentou somente os valores acima de 55% de redução populacional, para que o efeito das liberações do parasitóide sobre a espécie de moscas-das-frutas fosse evidenciado, já que as reduções de 56% para a classe de larvas e de 80% para a classe de fêmeas adultas são devidas somente às aplicações de iscas tóxicas. A classe de larvas de terceiro instar sofreu maiores impactos com as liberações dos parasitóides do que aquela de moscas fêmeas adultas. Isto é possível perceber, pois a primeira classe teve uma variação na redução populacional de aproximadamente 28% (de 56% até 84%), enquanto que a segunda apresentou uma variação de redução de 15% (de 80% à 95%). Isto é bastante coerente com o fato de ser justamente os indivíduos pertencentes ao grupo de larvas de terceiro instar que são diretamente atacados pelas as fêmeas em oviposição do parasitóide braconídeo.

A **Figura 27** mostra que liberações inundativas de *D. longicaudata*, a cada duas semanas, conjuntamente com aplicações de iscas tóxicas podem provocar reduções populacionais de até 92% e de até 83% para as classes de fêmeas adultas e de larvas de terceiro instar de *C. capitata*, respectivamente, na área de manejo integrado da mosca-do-mediterrâneo.

REDUÇÃO POPULACIONAL DE *C. capitata* DEVIDO À APLICAÇÃO DE ISCAS TÓXICAS EM CONJUNTO COM LIBERAÇÕES ESPACIALMENTE HOMOGÊNEAS, A CADA DUAS SEMANAS, DE FÊMEAS ADULTAS DE *D. longicaudata*

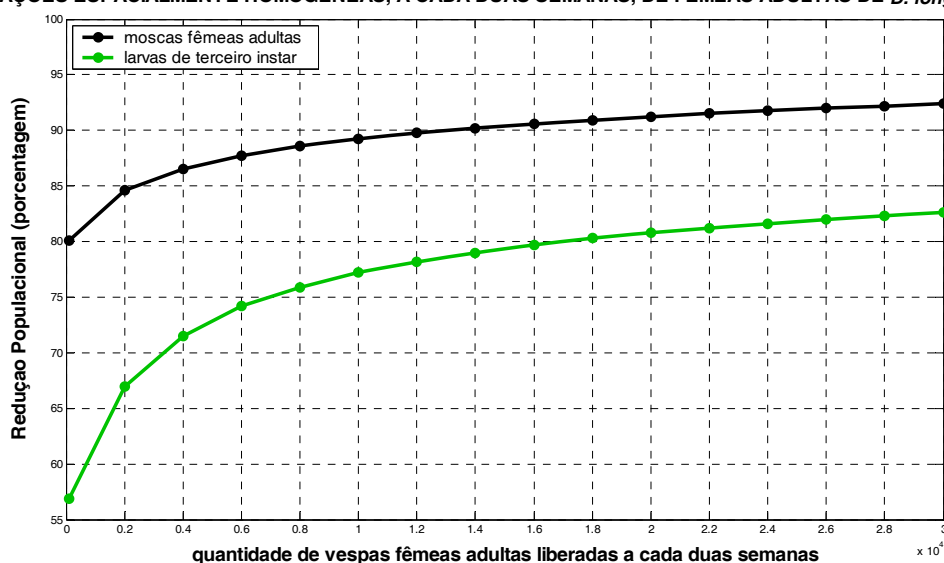


Figura 27. Reduções populacionais de larvas de terceiro instar e de fêmeas adultas de *C. capitata*, no dia 45, de acordo com as liberações feitas, a cada duas semanas, de diferentes quantidades de fêmeas adultas de *D. longicaudatas*, em conjunto com aplicações de iscas tóxicas, na unidade de área proposta para o manejo integrado de praga.

Comparando-se as **Figuras 26 e 27**, pode-se notar que a freqüência de liberação mais espaçada é um pouco menos eficiente no controle populacional da mosca-do-mediterrâneo.

Para decidir sobre a quantidade ótima de soltura do parasitóide, foi preciso usar um valor de preço médio de venda, para cada fruto de laranja, assim como um valor aproximado de compra para cada vespa fêmea adulta.

Segundo o Instituto de Economia Agrícola (2007), o preço médio da caixa de laranja doce, no ano de 2004, no estado de São Paulo, era de R\$ 10,00. E segundo a FUNDECITRUS, nessa caixa de 40.8kg cabem aproximadamente 250 frutos de laranja. Desta forma, cada fruto de laranja obteve o valor de quatro centavos de reais ($\text{R\$ } 10,00/250 = 0.04$ reais), no ano de 2004. Como não foram encontrados valores mais atuais do preço médio da caixa de laranja, para o Estado de São Paulo, considerou-se simplificada que o valor calculado para cada fruto de laranja, no ano de 2004 não tenha se alterado até junho de 2007, data quando foram feitas as simulações.

De acordo com Walder (2007, comunicação pessoal), o Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) da Universidade de São Paulo (USP),

vende 100 ml de pupas de *D. longicaudata* por 6,5 dólares, aos agricultores interessados no controle biológico de moscas-das-frutas. De cada 100 ml de pupas nascem aproximadamente 1.500 fêmeas de *D. longicaudata*. Desta forma, o valor de cada fêmea do parasitóide é 0,004333 dólar ($6,5/1.500$), o que equivaleu ao valor de 0,0086667 unidades de Real, em junho de 2007, já que neste mês o dólar valia aproximadamente dois reais.

Sabendo-se o valor de cada fruto de laranja, o preço de cada vespa fêmea adulta, e a quantidade de frutos estragados por *C. capitata* para cada situação simulada, foi possível desenvolver uma função que correlaciona o lucro do produtor de laranjas com a quantidade de parasitóides liberados por unidade de área de manejo integrado. Para tanto, não foi conferido custo algum para a logística de liberação dos parasitóides no campo, pois foi admitido que este trabalho pode ser feito, em grande parte, pela mão de obra já disponível nas fazendas produtoras de laranjas.

A função de lucro do produtor, de acordo com a quantidade de parasitóides liberados na unidade de área do manejo integrado de *C. capitata*, em cada uma das simulações mencionadas anteriormente, é relativa ao prejuízo que ele teria em termos de frutos cítricos perdidos caso fizesse somente a aplicação de iscas tóxicas na faixa mais externa e na mais interna, deixando as três faixas centrais sem manejo populacional algum. Sabendo-se a quantidade de frutos de laranja que são estragados por *C. capitata*, quando não são feitas liberações do parasitóide, pôde-se desenvolver uma função de lucro que o produtor obtém através da diferença entre o dinheiro investido na compra de parasitóides e o retorno financeiro provindo da venda dos frutos de laranjas que deixaram de ser estragados pela mosca-das-frutas.

As **Figuras 28** e **29** mostram as curvas dos possíveis lucros de um produtor de laranjas, por unidade de área de manejo integrado de praga. Cada uma destas figuras mostra três curvas de lucros, sendo que cada uma delas representa os lucros gerados a partir da liberação de parasitóides com diferentes capacidades de parasitismo.

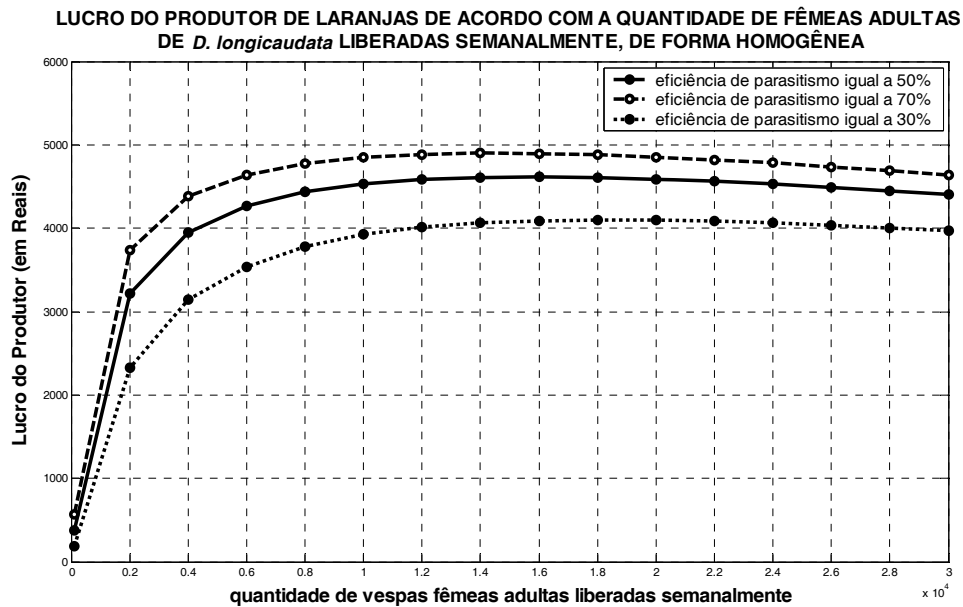


Figura 28. Curvas de possíveis lucros de um produtor de laranjas, por unidade de área de manejo de praga, de acordo com as quantidades e as eficiências de parasitismo das fêmeas adultas de *D. longicaudata*, liberadas semanalmente.

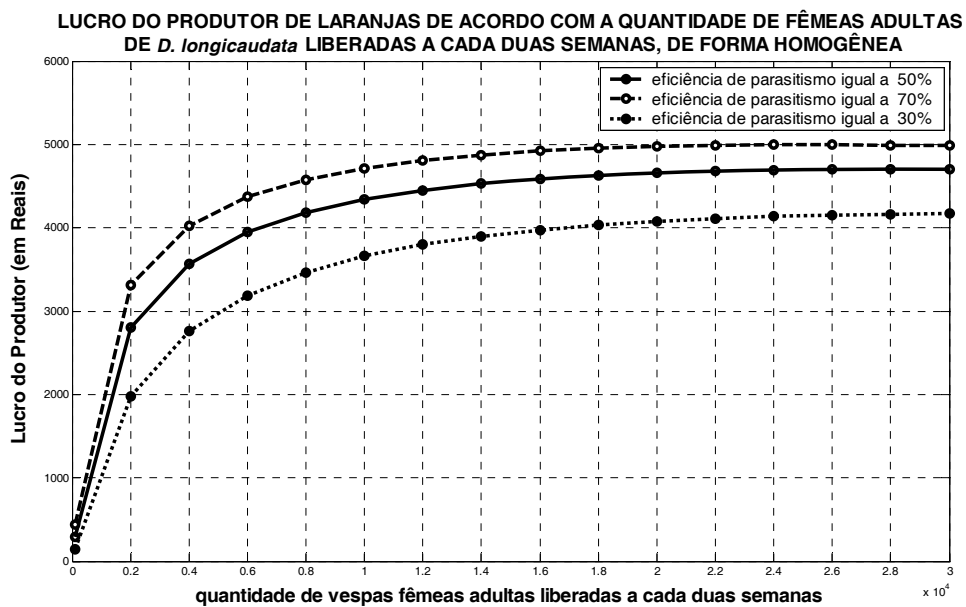


Figura 29. Curvas de possíveis lucros de um produtor de laranjas, por unidade de área de manejo integrado de praga, de acordo com as quantidades e as eficiências de parasitismo das fêmeas adultas de *D. longicaudata* liberadas, a cada duas semanas.

As curvas sólidas indicam os lucros provindos das liberações de vespas fêmeas adultas com capacidade de parasitismo igual à todas as outras

simulações realizadas anteriormente. Ou seja, vespas que reduzem em 50% a quantidade de larvas de terceiro instar de *C. capitata*, ao término de 45 dias, quando são feitas liberações semanais de 1.500 fêmeas adultas sobre um hectare de plantação de laranja, ocupado homoganeamente por 50 moscas fêmeas adultas, no início da safra.

As linhas tracejadas com marcadores de bordas pretas e preenchimento interno branco indicam os lucros obtidos a partir das liberações de parasitóides que possuem a capacidade de reduzir em 70% a população de larvas de terceiro instar, ao término de 45 dias, quando 1500 fêmeas adultas de *D. longicaudata* atacam uma população de *C. capitata* que foi iniciada com a ocupação homogênea de 50 moscas fêmeas, em um hectare de plantação de laranja, no início da safra.

Por último, as linhas pontilhadas com marcadores sólidos em cor preta indicam os lucros provindos de liberações de parasitóides com eficiência de parasitismo igual a 30%, dadas as mesmas condições iniciais comentadas anteriormente.

As três curvas de lucro apresentadas nestes dois últimos gráficos são referentes aos testes de sensibilidade realizados com o objetivo de analisar a importância da eficiência do parasitismo de *D. longicaudata* sobre a quantidade ideal de liberação massal deste parasitóide, em plantações de laranjas atacadas por *C. capitata*. Este tipo de teste é muito interessante para dar indicativas sobre o grau de importância de uma determinada variável, sobre a resposta funcional do sistema analisado, quando não existem dados precisos disponíveis. Este artifício foi aqui utilizado, por não existem na literatura científica, dados específicos sobre a eficiência de fêmeas adultas de *D. longicaudata* em parasitar larvas de terceiro instar de *C. capitata*, em plantações de laranja.

Os testes de sensibilidade mostrados nas **Figuras 28 e 29** indicam que quanto maior a eficiência do parasitóide em parasitar sua espécie hospedeira, menor será a sua quantidade ótima de liberação e maior será o controle populacional sobre a espécie praga. Isto pode ser verificado a partir da constatação de que os lucros máximos para as liberações semanais e a cada

duas semanas são relativos às liberações de parasitóides com maior eficiência de ataque aos seus hospedeiros. Isto ocorre porque a relação entre investimento (compra e liberação de parasitóides) e retorno financeiro (venda dos frutos que deixaram de ser estragados devido à redução populacional de moscas-das-frutas) é a maior.

Apesar de serem aparentes estas correlações entre eficiências de parasitismo, quantidades ótimas de liberações de parasitóides e lucros máximos obtidos, é muito importante perceber que os testes de sensibilidade apresentados indicam um padrão bem definido de soltura ótima de parasitóides, na área de manejo integrado de praga. Para as situações de liberações semanais e para aquelas com intervalos de duas semanas ficou evidente que por mais que as eficiências de parasitismo variem muito, de 30% à 70%, as quantidades ótimas de soltura de parasitóides não foram tão diferentes umas das outras.

Nas liberações semanais (situação mostrada pela **Figura 28**), as quantidades ótimas de soltura de fêmeas adultas do parasitóide foram de aproximadamente 14.000, 16.000 e 18.000 para as eficiências de parasitismo de 70%, 50% e 30%, indicando assim uma tendência ótima de soltura próxima a 16.000 fêmeas adultas do parasitóide, o que representa liberação ótima de aproximadamente 32.000 adultos, machos e fêmeas. Para as liberações com intervalos de duas semanas (situação apresentada na **Figura 29**), as quantidades ótimas de solturas foram de aproximadamente 24.000, 26.000 e 30.000 fêmeas adultas, para as eficiências de parasitismo de 70%, 50% e 30%, respectivamente, indicando que existe um padrão ótimo de soltura próximo de 27.000 fêmeas adultas de *D. longicaudata* ou de aproximadamente 54.000 adultos (machos e fêmeas).

Comparando-se as **Figuras 28** e **29**, pode-se perceber que as liberações feitas a cada duas semanas apresentaram quantidades ótimas de soltura de parasitóides bem maiores do que aquelas semanais, na ordem de 10.000 fêmeas adultas. No entanto os lucros gerados por estes dois tipos de estratégia não diferem muito um do outro, já que ficaram entre os valores de quatro mil e cinco mil reais.

Comparando-se novamente estas duas figuras, é possível notar que as liberações de parasitóides feitas a cada duas semanas geram lucros um pouco maiores do que aquelas feitas semanalmente. Mas esta diferença de retorno financeiro não está relacionada com o fato deste tipo de estratégia ser mais eficiente na redução populacional de *C. capitata* (mesmo porque as **Figuras 26** e **28** mostram o contrário), e sim tem a ver com o fato de que as liberações a cada duas semanas apresentam uma relação maior de retorno financeiro. Isto provavelmente ocorre devido ao fato destas liberações mais espaçadas gastarem menos dinheiro na compra de parasitóides (já que a quantidade total de vespas liberadas ao término do período de 45 dias é menor do que a estratégia de liberação semanal) e mesmo assim apresentarem uma distribuição temporal relativamente eficiente no combate de *C. capitata*.

DISCUSSÃO

O esquema teórico-pictográfico chamado de *Fluxograma*, apresentado pela **Figura 1**, é uma forma de caracterização do sistema ecológico composto pelas interações de *C. capitata* e *D. longicaudata*, em plantações de laranja. Segundo Murthy *et al.* (1992) este tipo de representação simplificada e concisa de um sistema dinâmico é o primeiro passo para a elaboração de um modelo matemático de simulação. O *Fluxograma* apresentado buscou representar somente as características relevantes e significativas do sistema ecológico em questão.

O modelo matemático proposto (**Sistema de Equações 9**) é constituído por um Sistema de Equações Diferenciais Parciais Não Lineares, com condições iniciais e de fronteiras dadas, e composto por variáveis espacialmente explícitas em duas dimensões. A movimentação espacial da espécie praga de fruteira *C. capitata* e de seu parasitóide braconídeo *D. longicaudata* é do tipo aleatória (ou randômica) e é determinada por Equações de Difusão. A modelagem matemática baseada na Equação de Difusão (ou Reação-Difusão) foi escolhida devido ao fato de possibilitar o trabalho direto

com os parâmetros mais importantes e determinantes para as dinâmicas populacionais do sistema como um todo, como por exemplo, os coeficientes de difusão populacional, as taxas de mortalidade e as taxas de ataque do parasitóide sobre a sua espécie hospedeira. Segundo Tilman e Kareiva (1997), os modelos que utilizam Equações de Difusão representam a forma mais compacta de descrição de dinâmicas populacionais espaciais.

A interação do tipo hospedeiro-parasitóide existente entre as duas espécies de insetos é determinada pela equação de Michaelis-Menten (componente do **Sistema 9**), que segundo Berryman (1992) é uma forma de resposta funcional muito utilizada em modelos de presa-predador, com possível aplicação em modelos do tipo hospedeiro-parasitóide. Este tipo de função resposta foi utilizado no presente modelo devido ao fato de conferir bastante realismo à interação do tipo hospedeiro-parasitóide, já que estabelece um limiar de saturação na quantidade de hospedeiros atacados, por parasitóide, por unidade de tempo, conforme foi afirmado por Solomon (1949) e Holling (1959). Segundo Shea *et al.* (1996), esta saturação de parasitismo ocorre devido à limitação de tempo existente para a atividade diária de forrageamento do parasitóide e/ou por causa da limitação na quantidade diária de ovos produzidos por cada parasitóide fêmea adulta.

Em relação aos resultados provenientes das primeiras simulações, pode-se perceber que as curvas de crescimento populacional das classes de larvas de terceiro instar e de fêmeas adultas de *C. capitata*, apresentadas pela **Figura 10**, seguem a configuração padrão das curvas de crescimento logístico, que segundo Hastings (1997) e Gotelli (1998), são caracterizadas pela determinação de uma capacidade suporte do meio ambiente.

O gráfico da **Figura 10** é semelhante àquele apresentado por Freire *et al.* (2005) no que se refere ao tipo de comportamento populacional de *C. capitata* em um hectare de plantações de laranja, com a diferença de que o valor aqui apresentado para a saturação populacional de moscas fêmeas adultas é bem maior. Em Freire *et al.* (2005), os valores de saturação populacional de larvas de terceiro instar e de fêmeas adultas de *C. capitata* são da ordem de 50.000 e 6.000 indivíduos, respectivamente, enquanto que os

valores aqui apresentados são próximos de 53.000 e de 190.000. A grande diferença dos resultados referentes à classe de moscas fêmeas adultas ocorreu porque o presente trabalho de mestrado usou valores mais realistas para a taxa de mortalidade e para duração do período de moscas fêmeas adultas.

Os dados sobre a dinâmica populacional da mosca-do-mediterrâneo em um hectare de plantação de laranja, quando não há manejo populacional algum (**Figura 11**), servem para dar uma noção do que pode ocorrer quando esta espécie praga invade uma plantação de frutos cítricos. Tais dados permitem analisar os momentos adequados para o início de métodos de manejo integrado do inseto praga, tanto através de controle biológico, quanto pelo controle químico. Conforme mostrado, o período adequado para início das liberações dos parasitóides seria a partir do dia 13, pois é quando começam a surgir as primeiras larvas de terceiro instar de *C. capitata*. E, pensando-se no controle químico dos adultos da mosca-do-mediterrâneo, o ideal, segundo Ribeiro *et al.* (2002), é começar o trabalho de contenção populacional logo que o monitoramento de moscas-das-frutas apresente valores de MAD (mosca/armadilha/dia) entre 0,1 e 1, levando-se em consideração as diferenças das zonas de produção, como plantas hospedeiras, condições climáticas e variedades cítricas em produção. De acordo com Raga (2007), a forma mais adequada de controle químico é através do uso de iscas tóxicas, sendo caracterizadas pela composição de atrativos alimentares com inseticidas.

A análise da quantidade de frutos de laranjas estragados de acordo com a quantidade inicial de fêmeas adultas de *C. capitata* que se desenvolvem em um hectare de plantação de laranja (**Figura 12**) indica que estratégias que visam minimizar os danos de moscas-das-frutas sobre fruteiras comerciais devem reduzir ao máximo as invasões destes insetos sobre as áreas produtivas. Neste sentido, os dados aqui apresentados corroboram a afirmação de Headrick e Goeden (1996), Montoya *et al.* (2000) e Walder (2007, comunicação pessoal) em relação à necessidade do controle populacional de moscas-das-frutas ser feito em escala regional, considerando os cultivos

existentes próximos à região produtora em questão, assim como as matas nativas circundantes à plantação em questão.

Em relação às simulações do controle populacional de *C. capitata* através de *D. longicaudata*, em plantações de laranja, é importante reafirmar que este trabalho utilizou estimativas feitas por Walder (comunicação pessoal, 2007) para o ajuste da eficiência de parasitismo da vespa braconídea sobre sua espécie hospedeira. O ajuste desta variável foi feito através de estimativas teóricas porque não existem trabalhos científicos específicos referentes ao grau de parasitismo de *D. longicaudata* sobre *C. capitata*, ou sobre o efeito de redução populacional desta espécie praga devido às liberações de seu parasitóide braconídeo, em plantações de laranja.

Apesar de não haver dados precisos do controle biológico da mosca-do-mediterrâneo por *D. longicaudata*, percebeu-se que os resultados das reduções populacionais da espécie praga, gerados nas simulações, são aparentemente condizentes com aqueles apresentados em Wong *et al.* (1991) e em Montoya *et al.* (2000), já que os resultados aqui apresentados de reduções populacionais são valores intermediários àqueles mostrados por estes dois trabalhos.

O primeiro grupo de pesquisadores mostrou que liberações semanais de aproximadamente 210 adultos de *Diachasmimorpha Tryoni* (Hymenoptera: Braconidae), por hectare de plantação de pêssego, durante 105 dias, geraram parasitismo de aproximadamente 25% das larvas de moscas-das-frutas, na região de Kula, Hawaii. Já o grupo encabeçado por Montoya mostrou que liberações semanais de aproximadamente 940 adultos de *D. longicaudata*, por hectare de plantação, geraram reduções populacionais de até 70% para as espécies de *Anastrepha ludens* (Loew) e *Anastrepha suspensa* (Loew), em áreas de cultivares mistos contendo manga, citros, goiaba e também plantas nativas hospedeiras de moscas-das-frutas, na localidade de Soconusco, Chiapas, México.

As análises das variáveis **quantidade**, **freqüência** e **forma geométrica espacial** de *D. longicaudata* liberados (**Figuras 15 a 22**) indicaram que quanto mais vespas forem soltas, com a maior freqüência possível, da forma mais

especialmente distribuída possível, em uma determinada região, maior será a redução populacional de *C. capitata*.

Estas conclusões são bastante intuitivas, no entanto, o resultado mais interessante indica que as liberações de parasitóides feitas de forma espacialmente homogênea, no hectare de plantação, geraram reduções populacionais de *C. capitata* muito maiores do que qualquer outra forma de liberação simulada (liberações em um único ponto central, liberações em uma linha central, liberações em duas linhas ortogonais centrais e liberações em cinco pontos distribuídos). Esse tipo de análise referente à eficiência do controle de uma espécie praga agrícola através de diferentes formas espaciais de liberação de inimigos naturais é semelhante àquele empregado por Legaspi *et al.* (1998).

Como pode ser visto na **Figura 22**, existe uma relação direta entre homogeneidade de distribuição espacial de *D. longicaudata* e eficiência do controle populacional de *C. capitata*. Isto ocorre porque a capacidade de dispersão dos parasitóides adultos é baixa quando comparada com aquela dos adultos de mosca-do-mediterrâneo, como pode ser percebido comparando-se os resultados de Wong *et al.* (1982), Plant e Cunningham (1991) e Paranhos *et al.* (2007).

Por este motivo, para que o controle biológico da mosca-do-mediterrâneo através de *D. longicaudata* seja otimizado, o ideal é liberar os parasitóides da forma mais homogênea distribuída possível, pela área de plantação. Caso contrário, o controle da praga não será muito eficiente. Uma forma aparentemente adequada para a distribuição homogênea de parasitóides de moscas-das-frutas, em grandes áreas de plantação de fruteiras, é através de liberações aéreas, por avião ou helicóptero, como descrito em Montoya *et al.* (2000).

Os resultados finais desta dissertação são referentes à proposição de uma nova forma de manejo integrado para *C. capitata* (com possíveis aplicações para *Anastrepha* sp.), em plantações de laranjas. Tal manejo baseia-se no uso conjunto de iscas tóxicas com liberações inundativas do parasitóide braconídeo *D. longicaudata*.

A proposição desta nova forma de manejo integrado de *C. capitata* (com possíveis aplicações à *Anastrepha* sp.), cuja unidade de área é apresentada pela **Figura 23**, baseou-se na idéia que o controle químico (iscas tóxicas) dos adultos da mosca-do-mediterrâneo pode ser complementado pelo controle biológico inundativo do parasitóide *D. longicaudata*, que afeta diretamente a classe de juvenis desta espécie praga.

Para analisar a viabilidade do manejo integrado de praga proposto neste trabalho, é necessário que sejam feitos trabalhos práticos de campo. Seria interessante iniciar tais trabalhos estudando a redução populacional de *C. capitata* a partir de liberações semanais de 32.000 adultos do parasitóide e/ou de liberações a cada duas semanas de 54.000 parasitóides adultos, na faixa central da unidade espacial de manejo, quando ocorrerem níveis de infestações moderadas deste inseto praga, em plantações de laranjas. Estes valores devem ser analisados primeiramente porque foram os que se mostraram mais interessantes a um possível produtor de laranjas, nas simulações realizadas, como pode ser visto nas **Figuras 28 e 29**.

Apesar de ser uma representação simplificada de situações reais de campo, o presente trabalho de mestrado vai diretamente de encontro às afirmações feitas por Legaspi *et. al* (1998) em relação à importância da aplicação, ora iniciante, de modelos matemáticos espacialmente explícitos na implementação de programas de manejo integrado de pragas (MIP), assim como sobre a possibilidade destes tipos de modelos promoverem *insights* não somente em relação às taxas de liberações de inimigos naturais, mas como também sobre as eficiências das liberações feitas em diferentes pontos espaciais da área analisada.

O trabalho de modelagem matemática realizado também atende à afirmativa feita por Kareiva (1989) em relação à grande importância da utilização de modelos em ecologia experimental, já que esta grande área de conhecimento tem se tornado cada vez mais sofisticada. Segundo o mesmo autor, possíveis padrões espaciais gerados em ambientes homogêneos, coexistência de diferentes populações devido às variações estocásticas e a existência de dinâmicas populacionais complexas são exemplos de fenômenos

que não podem ser plenamente entendidos somente através da intuição e argumentação verbal dos pesquisadores na área de biológicas, mas sim através da utilização complementar de modelos matemáticos.

Versões futuras deste modelo deverão levar em consideração variações ambientais, tais como temperatura atmosférica e umidade relativa do ar, assim como a utilização de dados mais precisos sobre a eficiência de parasitismo de *D. longicaudata* sobre larvas de *C. capitata*.

CONCLUSÕES

O modelo matemático proposto não tem a pretensão de ser uma ferramenta de previsão ou predição exata do que ocorrerá em relação às dinâmicas populacionais de *C. capitata* e de *D. longicaudata*, em programas de manejo integrado de praga, mesmo quando são conhecidas as condições iniciais do sistema. Isto porque é sabido que qualquer forma de representação de uma situação ecológica é apenas uma simplificação do que ocorre na realidade. Em verdade, espera-se que este trabalho possa auxiliar no entendimento mais aprofundado sobre as estruturas básicas das dinâmicas populacionais de *C. capitata*, e que auxilie a elaboração de práticas de manejo integrado de moscas-das-frutas, cada vez mais eficientes, em plantações de laranjas.

Uma análise geral final deste trabalho indica que:

- O modelo matemático espacialmente explícito proposto mostrou-se adequado para a descrição e representação da interação biológica entre a mosca-do-mediterrâneo *C. capitata* e seu parasitóide braconídeo *D. longicaudata*, em plantações de laranjas.

- Através dos “insights” ecológicos obtidos durante o processo de modelagem matemática do controle biológico de *C. capitata* por *D. longicaudata*, foi possível elaborar uma nova forma de manejo integrado para o inseto praga em questão, em plantações de laranja. Tal manejo baseia-se no uso conjunto de iscas tóxicas com liberações inundativas de *D. longicaudata*.
- Simulações das reduções populacionais de *C. capitata*, de acordo com as diferentes quantidades e frequências de parasitóides adultos liberados, na área de manejo de praga proposta, permitiram estimar estratégias ótimas de liberação de *D. longicaudata*.
- São necessários experimentos de campo para que ajustes mais refinados sejam feitos no modelo matemático proposto, assim como para verificar a viabilidade ecológica e econômica do manejo integrado de praga proposto.
- Versões futuras do modelo deverão incorporar variáveis ambientais e climáticas referentes ao sistema do manejo integrado de *C. capitata*, composto por liberações inundativas de *D. longicaudata* e por aplicações de iscas tóxicas, em plantações de laranja.

LITERATURA CITADA

ADLER, F. R. Migration alone can produce persistence of host-parasitoid models. **American Naturalist**, v. 141, p. 642-650, 1993.

AGUIAR-MENEZES, E. L.; FERRARA, F. A. A.; MENEZES, E. B. Moscas-das-frutas. In: CASSINO, P. C. R.; RODRIGUES, W. C. **Citricultura fluminense: principais pragas e seus inimigos naturais**. Seropédica: EDUR, Cap. 6, p. 67-84, 2004.

AMBROSANO, G. M. B.; STIMAC, J. L.; NETO, S. S.; IGUE, T.; NAGAI, V. Modelo matemático para simulação do controle biológico da broca-da-cana com o parasitóide *Trichogramma galloi*: I. modelos conceituais. **Bragantia**, v. 55, n. 2, p. 371-382, 1996.

ANDREWARTHA, H. G.; BIRCH, L. C. **The distribution and abundance of animals**. Chicago: Univ. Chicago Press, 1954.

BALDEZ, L.C.G. Moscas-das-frutas. **Boletim de Campo**, v. 35, n. 247, p. 5-9, 1972.

BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática**. São Paulo: Contexto, 2002.

BERRYMAN, A. A. The origins and evolution of predator-prey theory. **Ecology**, v. 73, n. 5, 1992.

BISPO, S. W. P. **Longevidade e reprodução de *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead, 1905) (Hymenoptera: Braconidae) criado em larvas de *Ceratitis capitata* (Wiedernann, 1824) (Diptera: Tephritidae)**. Dissertação de Mestrado, UFBA, Cruz das Almas, Bahia, 1999. 44 p.

BRIGGS, C. J.; HOOPES, M. Stabilizing effects in spatial-host and predator-prey models: a review. **Theoretical population biology**, v. 65, p. 299-315, 2004.

BURK, T. Signaling and sex in aclyprate flies. **Fla. Entomol.** v. 64, p. 30-43, 1981.

BURNS, R. E.; DÍAZ, J. O.; HOLLER, T. C. Inundative release of the parasitoid *Diachasmimorpha longicaudata* for the Caribbean fruit fly, *Anastrepha suspensa*. In: McPHERON, B. A.; STECK, B. A. **Fruit fly pests**. Delray Beach Florida: St. Lucie Press, 1996. p. 377-381.

CANCINO, J.L.D. Procedimientos y fundamentos de la cria masiva de *Diachasmimorpha longicaudata* (Asmead) parasitóide de moscas de la fruta. In: X Curso Internacional sobre Moscas de la Fruta. CICMF, México. 1996. p. 409-417.

CANCINO, J. L. Biología y comportamiento de *Diachasmimorpha longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae) parasitoide de moscas de la fruta. In: Curso regional sobre moscas de la fruta y su control em areas grandes com enfasis em la técnica del insecto estéril, Tapachula, Chiapas, p. 89-96, 1997.

CANTREL, R. S.; COSNER, C. **Spatial ecology by reaction-diffusion equations**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

CARVALHO, R. da S.; NASCIMENTO, A. S.; MENDONÇA, M. da C. Introdução e criação do *Diachasmimorpha longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae) parasitóide de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae). In: 15º Congresso Brasileiro de Entomologia, 1995, Caxambu. **Anais...** Caxambu, 1995.

CARVALHO, R. da S.; NASCIMENTO, A. S.; MATRANGOLO, W. J. R. **Metodologia de criação do parasitóide exótico *Diachasmimorpha longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae), visando estudos em laboratório e em campo**. Cruz das Almas, Embrapa, CNPMF, 16p, 1998.

CARVALHO, R. da S.; NASCIMENTO, A. S.; MATRANGOLO, W. J. R. Controle biológico de Moscas-das-frutas. In: MALAVASI, A.; ZUCCHI, R. A. **Moscas-das-frutas no Brasil: Taxonomia, biologia, evolução e controle**. Ribeirão Preto, Holos, 2000.

CARVALHO, R. da S.; NASCIMENTO, A. S. Avaliação do controle biológico de moscas-das-frutas no Brasil utilizando o parasitóide exótico *D. longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae). In: 7º Simpósio de Controle Biológico, 2001, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas, 2001.

CARVALHO, R. da S.; NASCIMENTO, A. S. Criação e utilização de *Diachasmimorpha longicaudata* para controle biológico das moscas-das-frutas (Tephritidae). In: PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. **Controle biológico no Brasil: parasitóides e predadores**. São Paulo: Manole, 2002.

CASE, T. J. **An Illustrated Guide to Theoretical Ecology**. Oxford University Press, 1999.

CHAMBERS, D. L. Attractants for fruit fly survey and control. In: SHOREY, H. H.; McKELVELEY Jr, J. J. **Chemical control of insect behavior: Theory and application**. New York: John & Sons, p. 327-344, 1977.

CLAUSEN, C. P.; CLANCY, D. W.; CHOCK, Q. C. Biological control of the oriental fruit fly (*Dacus dorsalis* H.) and other fruit flexsin Hawaii. **Technic Bulletin**, USDA. Washington D. C , n. 1322, 1965.

COMINS, H. N.; HASSELL, M. P.; MAY, R. M. The spatial dynamics of host-parasitoid systems. **Journal of animal ecology**, v. 61, n. 3, p. 735-748, 1992.

COMINS, H. N.; HASSELL, M. P. Persistence of multispecies host-parasitoid interactions in spatially distributed models with local dispersal. **Journal of theoretical biology**, v. 183, n. 1, p. 19-28, 1996.

CUNHA, M. C. C. **Métodos Numéricos**. 2^a ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2000.

DE ARAÚJO, K. R. P. **Modelo Matemático para Simular a Aplicação da Técnica do Inseto Estéril SIT e Etapas de Implementação de um Programa de Controle da Mosca do Mediterrâneo no Brasil**. Piracicaba, 2000. 301 p.

Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura - Universidade de São Paulo.

DE LA TORRE, S.; ZENIL, M.; MORENO, F.; HERNANDEZ, E.; RUIZ, S. Avances en la cría masiva de *Diachasmimorpha longicaudata*, parasitada de moscas de la fruta, en el laboratorio de Metapa de Dominguez, Chiapas. Memória del XVIII Congreso Nacional de Control Biológico y I Congreso Americano de Control Biologico. S.M.C.B. – Ecosur, Tapachula, Chis. p. 54-67, 1995.

DeANGELIS, D. L.; GROSS, L. J. **Individual-based models and approaches in ecology**: populations, communities, and ecosystems. New York: Chapman & Hall, 1992.

DOUGLAS, J.; DUPONT, T. Galerkin methods for parabolic equations with nonlinear boundary conditions. **Numerische Mathematik**, v. 20, n. 3, 1973.

DOUTT, R. I. Características biológicas de los adultos entomófagos. En: **Control biológico de las plagas de insectos y malas hierbas**. P. de Beach, Mexico, p. 179-204, 1964.

EDELSTEIN-KESHET, L. **Mathematical Models in Biology**. Random House, New York, 1988.

ELTON, C. **Animal ecology**. London: Sidgwick and Jackson, 1927.

ENKERLIN, D.; GARCIA, R. L.; LOPEZ, M. F. Mexico, Central em South America. In: ROBINSON, A. S.; HOOPER, G. **Fruit flies: their biology, natural enemies and control**. New York: Elsevier, v. 3A, cap. 2.7, p. 83-90, 1989.

FINKELSTEIN, L.; CARSON, E. R. Formulation of mathematical models. In: _ _ _ **Mathematical modeling of dynamic biological systems**. Research Studies Press LTD. e John Wiley & Sons INC, 1986. Cap. 8, p. 163-171.

FISKE, W. F. Superparasitism: an important factor in the natural control of insects. **J. Econ. Entomol.**, v. 3, p. 88-97, 1910.

FLETCHER, B. S. Life history strategies of tephritid fruit flies. In: ROBINSON, A. S.; HOOPER, G. **Fruit flies, their biology, natural enemies and control**. Amsterdam: Elsevier, 1989. 82p.

FREIRE, R. M.; PREGNOLATTO, S. de A.; WALDER, J. M. M; VON ZUBEN, C. J. Modelagem matemática aplicada ao controle biológico de *Ceratitidis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) por *Diachasmimorpha longicaudata* Ashmead (Hymenoptera: Braconidae) in *Citrus*. **Neotropical Entomology**, v. 32, n. 2, p. 281-289, 2005.

GALLO, D. *et al.* **Entomologia agrícola**. Piracicaba: FEALQ, 2002.

GERARDO, P. J. M. Control biológico de moscas de la fruta mediante liberaciones aumentativas de parasitoides. In: X Curso Internacional sobre moscas de la fruta. CICMF. México, 1996.

GIL, R. **Biologia e comportamento de *Diachasmimorpha longicaudata* Ashmead (Hymenoptera: Braconidae) criados sobre larvas de *Ceratitidis capitata* Wiedemann (Díptera: Tephritidae) irradiadas e não irradiadas com irradiação gama**. 2003. 53 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

GOLDFRAY, H. C. J.; HASSELL, M. P. Natural enemies can cause discrete generations in tropical insects. **Nature**, v. 327, p. 144-147, 1987.

GOLDFRAY, H. C. J.; HASSELL, M. P. Discrete and continuous insect populations in tropical environments. **J. Anim. Ecol.**, v. 58, p. 153-174, 1989.

GOLDFRAY, H. C. J.; WAAGE, J. K. Predictive modeling in biological control: the mango mealybug (*Rastrococcus invadens*) and its parasitoids. **J. Appl. Ecol.**, v. 28, p. 434-453, 1991.

GORDON, D. M.; NISBET, R. M.; DE ROOS, A.; GURNEY, W. S. C.; STEWART, R. K. Discrete generations in host-parasitoid models with contrasting life cycles. **J. Anim. Ecol.**, v. 60, p. 295-308, 1991.

GOTELLI, N. J. **Primer of ecology**. 2. ed. Massachusetts: Sinauer Associates, 1998.

GREANY, P. D.; ASHLEY, T. R.; BARANOWSKI, R. M.; CHAMBERS, D. L. Rearing life history studies on *Biosteres (Opius) longicaudatus* (Hym.: Braconidae). **Entomophaga**, v. 21, n. 2, p. 207-215, 1976.

GREATHEAD, D. J.; WAAGE, J. K. Opportunities for biological control agricultural pests in developing countries. **World Bank Technical**. Paper Number 11, Washington D. C. USA, p. 58, 1983.

GRIMM, V. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? **Ecological Modelling**, v. 115, p. 129-148, 1999.

GRIMM, V.; RAILSBACK, S. F. **Individual-based modeling and ecology**. Princeton University Press, 2005.

GUTIERREZ, A. P.; NEUENSCHWANDER, P.; VAN ALPHEN, J. J. M. Factors affecting biological control of cassava mealybug by exotic parasitoids: a ratio-dependent supply-demand model. **J. Appl. Ecol.** v. 30, p. 706-721, 1993.

HARDY, I. C. W.; GODFRAY, H. C. J. Estimating the frequency of constrained sex allocation in field populations of hymenoptera. **Behavior**, v. 114, n. 1 - 4, p. 137-147, 1990.

HASSELL, M. P. **The dynamics of arthropod predator-prey systems.** Princeton: Princeton University Press, 1978.

HASSEL, M. P.; MAY, R. M.; PACALA, S. W.; CHESSON, P. L. The persistence of host-parasitoid associations in patchy environments: I. A general criterion. **Am. Nat.**, v. 138, p. 568-583, 1991.

HASSELL, M. P. **The spatial and temporal dynamics of host-parasitoid interactions.** Oxford University Press, 2000.

HASTINGS, A. **Population biology.** Concepts and models. New York: Springer-Verlag, 1997.

HEADRICK, D. H.; GOEDEN, R. Issues concerning the eradication of establishment and biological control of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae), in California. **Biological Control**, v. 6, p. 412-421, 1996.

HEARNE, J. W.; VANCOLLER, L. M.; CONLONG, D. E. Determining strategies for the biological-control of a sugarcane stalk borer. **Ecol. Modelling.**, v. 73, n. 1-2, p. 117-133, 1994.

HERNANDEZ-ORTIZ, V.; ALUJA, M. Listado do genero neotropical *Anastrepha* (Díptera: Tephritidae) con notas sobre su distribución y plantas hospederas. **Folia Entomologica Mexicana**, v. 88, p. 89-105, 1993.

HILBORN, K.; MANGEL, M. Alternative views of the scientific method and modeling. In: _ _ _ _ **The ecological detective**: Confronting models with data. Princeton Press, 1997. Cap. 2, p. 12-39.

HOCHBERG, M. E.; IVES, A. R. Can natural enemies enforce geographical range limits? **Ecography**, v. 22, n. 3, p. 268-276, 1999.

HOLLING, C.S. The components of predation as revealed by a study of small mammal predation of the European pine sawfly. **Canadian Entomologist**, v. 91, p. 293-320, 1959.

HUFFAKER, C. B.; LUCK, R. F.; MESSEGER, P. S. The ecological basis of ecological control. **Proc. 15 Tint. Congr. Entomol.**, p. 560-586, 1976.

KAREIVA, P. Renewing the dialogue between theory and experiments in population ecology. In: ROUGHGARDEN, J.; MAY, R. M.; LEVIN, S. A. **Perspectives in ecological theory**. Princeton Univ. Press, 1989.

KOGAN, M. **Integrated pest management: historical perspectives and contemporary development**. Ann. Rev. Entomol., V. 43, p. 234-270, 1998.

KNIPLING, E. F. **Principles of insect parasitism analyzed from new perspectives**: Practical implications for regulating insect populations by biological means. USDA. Agr. Research Servise, 1992.

KRAINACKER, D. A; CAREY, J. R.; VARGAS, R. I. Effect of larval host on life history traits of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata*. **Oecologia**, v. 73, p. 583-590, 1897.

LAWRENCE, P. O.; BARANOWSKI, R. M.; GREANY, P. D. Effect age on development of *Biosteres longicaudatus* a parasitoid of the Caribbean fruit fly *Anastrepha suspense*. **The Florida Entomologist**, v. 59, n. 1, p. 33-39, 1976.

LEGASPI Jr, B. C.; ALLEN, J. C.; BREWSTER, C. C.; MORALES-RAMOS, J. A.; KING, E. G. Areawide management of the cotton boll weevil: use of a spatio-temporal model in a augmentative biological control. **Ecol. Modelling**, v. 110, p. 151-164, 1998.

LIN, C. C.; SEGEL, L. A. **Mathematics applied to deterministic problems in natural sciences**. New York: Society of Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1995.

LÓPEZ, E. T. Efecto de la edad del huésped sobre la preferencia y el parasitismo de *Biosteres longicaudatus* em larvas de *Anastrepha ludens* (Loew) y *Musca domestica* (Linn.). **Tesis Ingeniero Agronomo**, Universidad de Tamaulipas, 1983.

LOTKA, A. J. **Elements of physical biology**. Baltimore: Williams and Wilkins, 1925.

McLONE, R. R. Mathematical modeling – the art of applying mathematics. In: ANDREWS, J. G.; McLONE, R. R. **Mathematical Modelling**. London – Boston: Butterworths, 1976. Cap. 1, p. 1-11.

MALAVASI, A.; MORGANTE, J. S. Biologia de “moscas-das-frutas” (Diptera, Tephritidae). II: Índices de infestação em diferentes hospedeiros e localidades. **Rev. Brasil. Biol.**, v. 40, n. 1, p. 17-24, 1980.

MARCHAL, P. The utilization of auxiliary entomophagous insects in the struggle against insects injurious to agriculture. **Pop. Sci. Mon.**, v. 72, p. 352-370, 406-419, 1908.

MARTINEZ, L. M. Parasitismo, supervivencia e reproducción de *Diachasmimorpha longicaudata* parasitoide de moscas de la fruta. **Tesis de Maestria**. Colegio de Postgraduados Montecillos, Mexico, 1992.

MARTINS, J. C. **Aspectos biológicos de *Anastrepha fraterculus* (Wied. 1830) em dieta artificial sob diferentes condições ambientais**. Piracicaba, ESALQ, USP, Dissertação de Mestrado, 1986.

MARUCCI, P. E.; CLANCY, D. W. The artificial culture of fruit flies and their parasites. **Proc. Hawaiian Entomol. Soc.** v. 14, n. 1, p. 103-166, 1950.

MATIOLI, J. C. Controle de moscas das frutas (Diptera: Tephritidae) em cafeeiros. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 1986, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: SEB, 1986. p. 272.

MAY, R. M. On relationships among various types of population models. **Am. Nat.**, v. 107, p. 46-57, 1973.

MAY, R. M.; HASSELL, M. P. Population dynamics and biological control. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.**, v. 318, p. 129-169, 1988.

MILLS, N. J.; GETZ, W. M. Modelling the biological control of insect pests: a review of host-parasitoid model. **Ecological Modelling**, v. 92, p. 121-143, 1996.

MILLS, N. J.; GUTIERREZ, A. P. Prospective modelling in biological control: an analysis of the dynamics of heteronomous hyperparasitism in a cotton-whitefly-parasitoid system. **J. Appl. Ecol.**, v. 33, p. 1379-1394, 1996.

MOLINEROS, J.; TIGRERO, J.; SANDOVAL, D. **Diagnostico de la situación actual del problema de las moscas de la fruta en el Ecuador**. Dirección de Investigaciones Departamento de Entomología. Comisión Ecuatoriana de Energía Atomica, Quito. 1992. 47 p.

MONTOYA, P.; LIEDO, P.; BENREY, B.; CANCINO, J.; BARRERA, J. F.; SIVINSKI, J.; ALUJA, M. Biological control of *Anastrepha* spp. (Diptera: Tephritidae) in mango orchards through augmentative releases of *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae). **Biological Control**, v. 18, p. 216-224, 2000.

MOREIRA, C. S.; MOREIRA, S. História da citricultura no Brasil. In: RODRIGUEZ, O.; VIÉGAS, F.; POMPEU Jr, J.; AMARO, A. S. **Citricultura brasileira**. Campinas: Fundação Cargill, 1991.

MORGANTE, J. S. Moscas das frutas (Tephritidae): Características biológicas, detecção e controle. **Boletim Técnico de Recomendações para os Perímetros Irrigados do Vale do São Francisco**, N°2, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Brasília, 1991.

MUÑIZ, M.; GIL, A. Desarrollo y reproducción de *Ceratitis capitata* (Wied.) en condiciones artificiales. **Boletín del Servicio contra Plagas e Inspección Fitopatológica**. Fuera de Serie, n. 2, 1984.

MURDOCH, W. W. Population regulation in theory and practice. **Ecology**, v. 75, p. 271-287, 1994.

MURDOCH, W. W.; BRIGGS, C. J.; NISBET, R. M. Competitive displacement and biological control in parasitoids: a model. **The Am. Nat.** v. 148, n. 5, 1996.

MURTHY, D. N. P.; PAGE, N. W.; RODIN, E. Y. **Mathematical modeling: a tool for solving in engineering, physical, biological, and social sciences.** Oxford: Pergamon, 1992.

NASCIMENTO, A.S.; MORGANTE, J.S.; MALAVASI, A. Occurrence and distribution of *Anastrepha* in melon production areas in Brazil. In: ALUJA, M.; LIEDO, P. (eds). **Fruits flies: Biology and management.** New York: Springer-Verlag, 1993. p. 39-42.

NATION, J. L. Sex-specific glands in tephritid fruit flies of the genera *Anastrepha*, *Ceratitis*, *Dacus*, and *Rhagoletis* (Diptera: Tephritidae). **J. Insect Morphol. Embryol.**, v. 10, p. 121-129, 1981.

NICHOLSON, A. J.; BAILEY, V. A. The balance of animal populations. Part 1. **Proc. Zool. Soc. Lond.**, v. 3, p. 551-598, 1935.

NORRBOM, A. L.; KIM, K. C. A. **List of the reported host plants of the species of *Anastrepha* (Díptera: Tephritidae).** Washington: USDA, 1988, 114pp.

O SETOR produtivo da citricultura. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br> . Acesso em: 21 de julho de 2007.

OLALQUIAGA, G. F.; LOBOS, C. A. **La mosca del Mediterráneo en Chile, Introducción y erradicación. Servicio agrícola y Ganadero.** Min. De. Agr., Santiago, Chile. 1993

ORLANDO, A; SAMPAIO, A. S. Moscas das frutas – notas sobre o reconhecimento e combate. **O Biológico**, v .39, n. 6, p. 143-150, 1973.

PARANHOS, B. A. J.; MENDES, P. C. D.; PAPADOPOULOS, N. T.; WALDER, J. M. M. Dispersion patterns of *Diachasmimorpha longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae) in *Citrus* orchards in southeast Brazil. **Biocontrol Science and Technology**, v. 17, n. 4, p. 375-385, 2007.

PARRA, J. R. P *et al.* Controle biológico: terminología. In: PARRA, J.R.P. **Controle biológico no Brasil**. São Paulo: Manole, 2002. Cap 1, p. 1-13.

PEARCE, I. G.; CHAPLAIN, M. A. J.; SCHOFIELD, P. G.; ANDERSON, A. R. A.; HUBBARD, S. F. Modelling the spatio-temporal dynamics of multi-species host-parasitoid interactions: heterogeneous patterns and ecological implications. **Journal of Theoretical Biology**, v. 24, p. 876-886, 2006.

PIELOU, E. C. **Mathematical ecology**. New York: Chichester: John Wiley, 1977.

PLANT, R. E.; CUNNINGHAM, R. T. Analyses of the dispersal of sterile Mediterranean fruit flies (Diptera: Tephritidae) released from a point source. **Environ. Entomol.** v. 20, n. 6, p. 1493-1503, 1991.

PRATES, HS. Importância das moscas dos frutos na citricultura. **Correio Agrícola**, v.2, p. 254-257, 1980.

PROKOP, R. J.; HENDRICHIS, J. Mating behavior of *Ceratitidis capitata* on a field caged host tree. **Ann. Entomol. Soc. Am.**, v. 72, p. 642-648, 1979.

QUESADA-ALUÉ, L. A.; RABOSI, A.; WAPPNER, P. La mosca Mediterránea. **Guia de laboratorio/I**. Talleres Trama S. R. L. Buenos Aires, Argentina. 1994.

RAGA, A. Métodos de controle e manejo integrado (MIP) de moscas-das-frutas. In: RAGA, A.; SOUZA FILHO, M. F. **III Curso sobre Moscas-das-frutas**. Campinas: Instituto Biológico/Governo do Estado de São Paulo/Secretaria da Agricultura e Abastecimento/Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2007, p. 25-28.

RIBEIRO, J. G. B.; RAGA, A.; D'ANGELCOLA, M. E.; AZZARO, F. G.; FARIÑA, N.; MIRANDA, A.; ZEFFERINO, E. Manual técnico de procedimentos das moscas-das-frutas em citros. In: RIBEIRO, J. G. B. **Projeto Comunidade Européia MERCOSUL**, ALA 93/143. Brasília: MAPA/DAS;DDIV, 36p., 2002.

ROS, P. **La mosca mediterránea de la fruta**, Wied. **Biología y Métodos de control**. Ministerio da Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid-España, 1988. p. 1-3.

SHEA, K.; NISBET, R. M.; MURDOCH, W. W.; YOO, H. J. S. The effect of egg limitation on stability in insect host-parasitoid population models. **Journal of Animal Ecology**, v. 65, p. 743-755, 1996.

SILVA, E. B. **Aspectos da dispersão da mosca-do-mediterrâneo, *Ceratitis capitata* (WIED., 1824) (Diptera: Tephritidae), marcada com ³²P em citros**. (Dissertação de Mestrado – Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP), Piracicaba, 1990, 74p.

SIRINO, A.; SCHIAVETO, A. C. Nova avaliação. **Revista Fundecitrus**. v. 122, p. 8-9, 2004.

SIVINSKI, J.; BURK, T.; WEBB, J. C. Acoustic courtship signals in the Caribbean fruit fly *Anastrepha suspensa* (Loew). **Anim. Behav.** v. 32, p. 1011-1016, 1984.

SIVINSKI, J.; WEBB, J. C. Sound production and reception in the caribfly fruit fly *Anastrepha suspensa* (Loew) (Diptera: Tephritidea). **Fla. Entom.**, v. 68, p. 273-278, 1985.

SIVINSKI, J.; WEBB, J. C. Acousting signals produced during courtship in *Diachasmimorpha longicaudata* and others braconids. **Ann. Entom. Soc. Am.**, v. 82, n. 1, p. 116-120, 1989.

SIVINSKI, J. M.; CALKINS, C. O.; BARANOWSKY, R.; HARRIS, D. BRAMBILA, J.; DIAZ, J.; BURNS, R. E.; HOLLER, T.; DODSON, G. Suppression of a Caribbean fruit fly (*Anastrepha suspensa* Loew) (Diptera: Tephritidae) population through augmentative releases of the parasitoid *Diachasmimorpha longicaudata* (Asmead) (Hymenoptera: Braconidae). **Biological Control**, v. 6, p. 177-185, 1996.

SKELLAM, J. G. Random dispersal in theoretical populations. **Biometrika**, v. 38, p. 196-218, 1951.

SOLOMON, M. E. The natural control of animal population. **Journal of Animal Ecology**, v. 18, p. 1-35, 1949.

SOUZA-FILHO, M. F.; RAGA, A. Moscas-das-frutas: mudanças nas condições climáticas favorecem o aumento desses insetos. **Citricultura Atual** (Cordeirópolis), v. 1, n. 4, 1998.

SOUZA FILHO, M. F.; RAGA, A.; ZUCCHI, R. A. Fruit flies in the state of São Paulo (Brazil): occurrence and damages. **LARANJA**, Cordeirópolis, v. 24, n. 1 p. 45-69, 2003.

SOUZA FILHO, M. F. Métodos de monitoramento. In: RAGA, A.; SOUZA FILHO, M. F. **III Curso sobre Moscas-das-frutas**. Campinas: Instituto

Biológico/Governo do Estado de São Paulo/Secretaria da Agricultura e Abastecimento/Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2007a, p. 14-16.

SOUZA FILHO, M. F. Taxonomia, biologia e plantas hospedeiras de moscas-das-frutas. In: RAGA, A.; SOUZA FILHO, M. F. **III Curso sobre Moscas-das-frutas**. Campinas: Instituto Biológico/Governo do Estado de São Paulo/Secretaria da Agricultura e Abastecimento/Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2007b, p. 14-16.

SOUZA, H. M. L.; CYTRYNOWICZ, M; MORGANTE, J. S. Occurrence of *Anastrepha fraterculus* (Wied.), *Ceratitis capitata* and *Silba spp* eggs in oviposition punctures on three host fruits. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 27, p. 191-195, 1983.

SUGAYAMA, R. L.; MALAVASI, A. Ecologia comportamental. In: MALAVASI, A.; ZUCCHI, R. A. **Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: conhecimento básico e aplicado**. Ribeirão Preto: Holos, 2000.

SUJII, E. R.; TIGANO, M. S.; SOSA-GOMES, D. Simulação do impacto do fungo *Nomuraea rileyi* em populações de lagarta da soja, *Anticarsia gemmatalis*. **Pesq. Agropec. Bras.** v. 37, n. 11, 2002.

TEJADA, O. L. Importancia de la familia Tephritidae y su control. In: X Curso Internacional sobre moscas de la fruta. CICMF. México, 1996. p. 1-5.

THOMPSON, W. R. Biologie-theorie de l` action des parasites entomophages. Les formules mathématiques du parasitismo cyclique. Paris: **C. R. Acad. Sci.**, v. 174, p. 1201-1204, 1922.

THOMPSON, W. R. La théorie mathématique de l` action des parasites entomophages et le facteur du hasard. **Ann. Fac. Sci.**, v. 2, p. 69-89, 1924.

THOMPSON, W. R. On the effect of random oviposition on the action of entomophagous parasites as agents of natural control. **Parasitology**, v. 21, p. 180-188, 1929.

THOMPSON, W. R. Biological control and the theories of the interactions of populations. **Parasitology**, v. 31, p. 299-388, 1939.

THORSTEINSON, A. J. Host selection in phytophagous insects. **Ann. Rev. Entomol.**, v. 5, p. 193-218, 1960.

TILMAN, D.; KAREIVA, P. **Spatial Ecology**: the role of space in population dynamics and interspecific interactions. Princeton University Press, 1997.

TSITSIPIS, J. A. Nutrition. Requirements. In: ROBINSON, A. S.; HOOPER, G. **Fruit flies, their biology, natural enemies and control**. Amsterdam: Elsevier, 1989.

TURCHIN, P. **Quantitative analysis of movement**: measuring and modeling population redistribution in animals and plants. Sinauer Associates, 1998.

VAN ALPEN, J. J. M.; VISSER, M. E. Superparasitism as an adaptive strategy for insect parasitoids. **Ann. Rev. Entomol.**, v. 35, p. 59-79, 1990.

VERHULST, P. F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. **Corr. Math. Phys.**, v. 10, p. 1-113, 1838.

VISCARRET, M. M.; LA ROSSA, R.; SEGURA, D. F.; OVRUSKI, S. M.; CLADERA, J. Evaluation of the parasitoid *Diachasmimorpha longicaudata*

(Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) reared on a genetic sexing strain of *Ceratitis capitata* (Wied.) (Diptera: Tephritidae). **Biological Control**, v. 36, 147-153, 2006.

VOLTERRA, V. Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. **Nature**, v. 118, p. 558-560, 1926.

WALDER, J. M. M.; LOPES, L. A.; COSTA, M. L. Z.; SESSO, J. N.; TONIN, G.; CARVALHO, M. L.; LARA, P. P. Criação e liberação do parasitóide *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) para controle de moscas-das-frutas no estado de São Paulo. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 16, n. 1, p. 149-153, 1995.

WALDER, J. M. M.; SARRIÉS, S. R. V. Introdução do parasitóide *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) para o controle de moscas-das-frutas no Estado de São Paulo. In: 15º Congresso Brasileiro de Entomologia, 1995, Caxambu. **Resumos...** Caxambu, 1995.

WALDER, J. M. M. Controle biológico de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) no Estado de São Paulo. In: 16º Congresso Brasileiro de Entomologia, 1997, Salvador. **Resumos...** Salvador, 1997.

WALDER, J. M. M. Produção de moscas-das-frutas e seus inimigos naturais: Associação de moscas estéreis e controle biológico. In: PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. (eds.). **Controle biológico no Brasil: Parasitóides e Predadores**, São Paulo: Manole, 1ª ed., p. 181-190, 2002.

WEBB, J. C.; CALKINS, C. O.; CHAMBERS, D. L.; SCHWIENBACHER, W; RUSS, K. Acoustical aspects of behavior of Mediterranean fruit fly, *Ceratitis*

capitata: Analysis and identification of courtship sounds. **Ent. Exp. Appl.** v. 33, p. 1-18, 1983.

WEBBER, H. J. History and development of the *Citrus* industry. In: **The Citrus industry**. Berkeley: Univ. Calif. Press, 1967.

WHARTON, R. A. Classical biological control of fruit-infesting Tephritidae. In: ROBBINSON, A. S.; HOOPER, G. **Fruit flies**. England, Oxford: Elsevier, 1989. p.303-314.

WHITE, I. M.; ELSON-HARRIS, M. M. **Fruit flies of economic significance: their identifications and bionomics**. Wallingford: CAB International, 1992. 601 p.

WONG, T. T. Y.; WHITEHAND, L. C.; KOBAYASHI, R. M.; OHINATA, K.; TANAKA, N.; HARRIS, E. J. Mediterranean fruit fly: dispersal of wild and irradiated and untreated laboratory-reared males. **Environ. Entomol.** v. 11, p. 339-343, 1982.

WONG, T. T. Y.; RAMADAN, M. M.; McINNIS, D. O.; MOCHIZUKI, N.; NISHIMOTO, J. I.; HERR, J. C. Augmentative releases of *Diachasmimorpha tryoni* (Hymenoptera: Braconidae) to suppress a Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) population in Kula, Maui, Hawaii. **Biological Control**, n. 1, p. 2-7, 1991.

WONG, T. T. Y.; RAMADAN, M. M.; HERR, J. C.; McINNIS, D. O. Suppression of a Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) population with concurrent parasitoid and sterile fly release in Kula, Maui, Hawaii. **J. Econ. Entomol.** v. 85, n. 5, p. 1671-1681, 1992.

ZUCCHI, R. A. Moscas-das-frutas (Dip., Tephritidae) no Brasil: taxonomia, distribuição geográfica e hospedeiros. In: Encontro sobre moscas-das-frutas, 1, 1998, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargil, 1988. p. 1-10.