

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA POPULACIONAL DO
PULGÃO *Aphis gossypii* Glover, 1877 E SUA
INTERAÇÃO COM O PARASITÓIDE *Lysiphlebus
testaceipes* (Cresson, 1880)**

ADEMÁRIA APARECIDA DE SOUZA

2007

ADEMÁRIA APARECIDA DE SOUZA

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA POPULACIONAL DO PULGÃO *Aphis*
gossypii Glover, 1877 E SUA INTERAÇÃO COM O PARASITÓIDE
Lysiphlebus testaceipes (Cresson, 1880)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Strictu-Sensu em Estatística e Experimentação Agropecuária para a obtenção do título de "Mestre".

Orientadora: Prof.^a Dra. Solange Gomes Faria Martins
Co-orientador: Mauricio Sergio Zacarias

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2007

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Souza, Ademária Aparecida de

Simulação da dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 e sua interação com parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) / Ademária Aparecida de Souza. – Lavras : UFLA, 2007.

74p. : il.

Orientador: Solange Gomes Faria Martins.

Dissertação (Mestrado) - UFLA.

Bibliografia.

1. Modelo Penna. 2. *Aphis gossypii*. 3. *Lysiphlebus testaceipes*. 4. Dinâmica populacional. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-595.752

ADEMÁRIA APARECIDA DE SOUZA

SIMULAÇÃO DA DINÂMICA POPULACIONAL DO PULGÃO *Aphis gossypii* Glover, 1877 E SUA INTERAÇÃO COM O PARASITÓIDE *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880)

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Strictu-Sensu em Estatística e Experimentação Agropecuária para a obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 27 de fevereiro de 2007

Prof.^a Dra. Brígida de Souza

UFLA

Dr. Mauricio Sergio Zacarias

EMBRAPA Café

Prof. Dr. Thadeu Josino Pereira Penna

UFF

Prof.^a Dra. Solange Gomes Faria Martins

UFLA

(Orientadora)

**LAVRAS
MINAS GERAIS-BRASIL**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antônio e Elza; aos meus irmãos, Adânia, Antônio Dias, Adeel e Aline, por todo o amor, por sempre terem acreditado, por terem feito que eu acreditasse; por viverem, sofrerem, rirem comigo; por tudo o que puderam fazer (e fizeram) para me ensinar, para sempre me apoiar, pelos exemplos de vida, de ética... Afinal, pelas maravilhosas pessoas que são e por tudo que hoje sou. Ao meu sobrinho, Gabriel, pela capacidade de transmitir paz e alegria.

A vocês dedico com carinho mais esta conquista, como forma de reconhecimento por tudo quanto sempre recebi.

AGRADECIMENTO

Acima de tudo, agradeço a Deus, por todas as oportunidades que a vida me proporciona.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Exatas, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa de estudos.

À professora Solange, por ter sido mais que uma orientadora, pelo incentivo, carinho e, sobretudo, pela sua paciência. Obrigada por tudo o que me ensinou nesta jornada.

Ao pesquisador Mauricio Sergio Zacarias, pela co-orientação e disposição. Sua compreensão, dedicação, agradável convivência e amizade foram fundamentais: muito obrigado, Zaca.

Aos membros da banca, professores Thadeu Penna e Brígida.

Aos professores da Pós-Graduação do Departamento de Ciências Exatas, pela amizade e ensinamentos transmitidos durante o curso.

Aos funcionários do DEX: Edila, Josi, Maria, Selminha e Vânia, pela simpatia e boa vontade no atendimento.

Aos meus amigos e companheiros de mestrado, Anderson, Elisa, Patrícia Paranaíba, Patrícia Siqueira, Patrícia Neves, Melissa, Luciene, Quintiliano, Rafael, Osvaldo e Maria de Lurdes, pela amizade, única palavra que pode descrever essa turma que, sem dúvida, ficará para sempre marcada em minha memória.

Ao meu amigo Anderson, pela cumplicidade oferecida a cada dia e por me ajudar nas horas mais difíceis.

Ao nosso grupo de estudos, Lu, Paty (Ipatinga), Paty (Campo Belo) e Anderson, amigos que foram essenciais, que torceram, acreditaram, ajudaram, riram,

ouviram, falaram... que fizeram cada dia ser diferente e especial;

A Melissa e Robson, que gentilmente cederam material e se dispôs a ajudar.

Agradeço, também, aos amigos das outras turmas de mestrado, doutorado, especialmente Verônica e Ricardo, pela amizade, pela força e companheirismo de sempre.

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para que este trabalho se realizasse: a vocês, o meu muito obrigada.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	iv
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
CAPÍTULO 1:	1
1 INTRODUÇÃO GERAL	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 Importância econômica dos afídeos	5
2.2 Aspectos biológicos e comportamentais dos afídeos	6
2.3 Influência da temperatura sobre o desenvolvimento de <i>Aphis gossypii</i>	10
2.4 Controle biológico	13
2.5 Aspectos biológicos e importância do parasitóide como inimigo natural	14
2.6 Influência da temperatura sobre o desenvolvimento e parasitismo de <i>Lysiphlebus testaceipes</i> em <i>Aphis gossypii</i>	16
2.7 Modelo Penna	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
CAPÍTULO 2: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA POPULACIONAL DO PULGÃO <i>APHIS GOSSYPHII</i> GLOVER, 1877, USANDO AS VERSÕES ORIGINAL E MODIFICADA DO MODELO PENNA	26
RESUMO	27
ABSTRACT	28

1 INTRODUÇÃO	29
2 METODOLOGIA	30
2.1 Curvas de sobrevivência	34
2.2 Tamanho populacional	34
2.3 Taxa intrínseca de crescimento	35
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
3.1 Curvas de sobrevivência	37
3.2 Tamanho médio populacional	39
3.3 Taxa intrínseca de crescimento	42
4 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

CAPÍTULO 3: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA POPULACIONAL DE INTERAÇÃO DO PULGÃO *APHIS GOSSYPHII* GLOVER, 1877 E SEU PARASITÓIDE *LYSIPHLEBUS TESTACEIPES* (CRENSON, 1880), COMO SUBSÍDIO AO CONTROLE BIOLÓGICO 47

RESUMO	48
ABSTRACT	49
1 INTRODUÇÃO	50
2 METODOLOGIA	51
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
3.1 Dinâmica de uma população fechada ($\lambda = 0$) constituída de formas ápteras ($\alpha_2 = 0$)	56
3.1.1 Curvas de sobrevivência	56
3.1.2 Tamanho populacional	58
3.1.3 Taxa intrínseca de crescimento	64

3.2 Dinâmica de uma população fechada ($\lambda = 0$) constituída de formas ápteras e aladas ($\alpha_2 \neq 0$)	64
3.2.1 Curvas de sobrevivência	65
3.2.2 Tamanho populacional	66
3.3 Dinâmica de uma população em interação com a <i>vizinhança</i> ($\lambda \neq 0$) constituída de formas ápteras e aladas ($\alpha_2 \neq 0$)	68
3.3.1 Curvas de sobrevivência	68
3.3.2 Tamanho populacional	69
4 CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
CONSIDERAÇÕES FINAIS	74

LISTA DE TABELAS

1.1	Duração média (em dias) do 1 ^o , 2 ^o , 3 ^o e 4 ^o ínstaes de <i>Aphis gossypii</i> criado em crisântemo, em função da temperatura (Soglia et al., 2002).	12
1.2	Duração (em dias) (média± δ) do período reprodutivo de fêmeas de <i>Aphis gossypii</i> , em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia et al., 2002).	12
1.3	Fecundidade diária (número de ninfas) (média± δ) de <i>Aphis gossypii</i> , em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia et al., 2003).	12
1.4	Duração (em dias) (média± δ) do período pós-reprodutivo de fêmeas de <i>Aphis gossypii</i> , em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia, 2001).	13
1.5	Longevidade (em dias) (média± δ) de fêmeas de <i>Aphis gossypii</i> , em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ :Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia et al., 2003).	13
1.6	Período de desenvolvimento (em dias) (média± δ), da oviposição à formação da múmia, de <i>Lysiphlebus testaceipes</i> sobre <i>Aphis gossypii</i> , em função das temperaturas (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Rodrigues et al., 2004).	17
1.7	Parasitismo (%) de <i>Lysiphlebus testaceipes</i> , sobre <i>Aphis gossypii</i> em função da temperatura (Rodrigues et al., 2004).	18

2.1	Parâmetros do modelo Penna para o pulgão <i>Aphis gossypii</i> criado na cultivar Yellow Snowdon, em função das temperaturas (Soglia et al., 2002, 2003).	32
2.2	Parâmetros do modelo Penna para o pulgão <i>Aphis gossypii</i> criado na cultivar White Reagan, em função das temperaturas (Soglia et al., 2002, 2003).	33
2.3	Parâmetros do modelo Penna para o pulgão <i>Aphis gossypii</i> criado na cultivar Dark S. Reagan, em função das temperaturas (Soglia et al., 2002, 2003).	33
2.4	Valores de R_X (idade máxima de reprodução) do pulgão <i>Aphis gossypii</i> obtidos por Soglia et al. (2002) e longevidades obtidos pela simulação utilizando-se o Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM).	39
2.5	Longevidade (em dias) (média $\pm\delta$) de fêmeas ápteras de <i>Aphis gossypii</i> , em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia et al., 2003).	39
2.6	Tamanho médio da população de <i>Aphis gossypii</i> (média $\pm\delta$) utilizando-se os Modelos Penna tradicional (MP) e modificado (MPM) (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%).	41
2.7	Valor médio da taxa intrínseca de crescimento para a população de <i>Aphis gossypii</i> utilizando o Modelo Penna original (MP) e o Modelo Penna Modificado (MPM).	42
2.8	Valores experimentais das taxas intrínsecas de crescimento, obtidos por Soglia et al. (2005) e pela simulação por meio do Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM), na temperatura de 25°C.	43

3.1	Parâmetros do modelo independentes da temperatura	54
3.2	Parâmetros dependentes da temperatura (em dias) (Soglia et al., 2002, 2003).	55
3.3	Parâmetros dependentes da temperatura (Rodrigues et al., 2004). .	55
3.4	Longevidade (em dias) do pulgão <i>Aphis gossypii</i> , referente à di- nâmica sem e com parasitismo de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, nas temperaturas de $15^{\circ}C$, $20^{\circ}C$, $25^{\circ}C$ e $30^{\circ}C$, obtidas por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM). .	58
3.5	Tamanhos médios (média $\pm\delta$) da população de <i>Aphis gossypii</i> an- tes da ação do parasitóide e após a sua retirada (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%).	61
3.6	Valores médios das taxas intrínsecas de crescimento da população de <i>Aphis gossypii</i> utilizando o Modelo Penna original (MP) e mo- dificado (MPM).	64

LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquema do ciclo de vida holocíclico (completo) de pulgões. . . .	7
1.2	Esquema do ciclo de vida anolocíclico (incompleto) de pulgões. .	7
1.3	Ninfas (esquerda) e adulto áptero (direita) do pulgão <i>Aphis gossypii</i> . 8	
1.4	Adulto alado do pulgão <i>Aphis gossypii</i>	8
1.5	Ciclo de vida dos afídeos anolocíclicos.	9
1.6	Adultos do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> . Fêmea (acima) e macho (abaixo).	15
1.7	Esquema do ciclo de vida do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> em um afídeo.	15
1.8	"Genótipo" do indivíduo, representado por uma palavra computacional de 32 bits. Os bits setados em 1 representam mutações deletérias e os bits setados em 0 ausência de mutações.	20
1.9	Obtenção do "genótipo" do filho, em que foram escolhidos, aleatoriamente, os bits 4 e 7, para inserir as mutações deléterias. . . .	20
2.1	Probabilidade de morte de pulgão <i>Aphis gossypii</i> em função do número de bits 1 para o Modelo Penna com $T = 1$ (\circ) e Modelo Penna modificado com $\epsilon = 0,6$ (Δ) e $\epsilon = 0,7$ (*).	31
2.2	Esquema de entrada e saída de indivíduos na dinâmica populacional do pulgão <i>Aphis gossypii</i>	32

2.3	Curvas de sobrevivência, em função da idade do pulgão <i>Aphis gossypii</i> nas temperaturas de 15°C (preto), 20°C (vermelho), 25°C (verde) e 30°C (azul), alimentado com diferentes cultivares de crisântemo: (a) Yellow Snowdon, (b) White Reagan e (c) Dark S. Reagan, obtidas por meio de simulação de até 50.000 etapas temporais (dias) pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM).	38
2.4	Evolução temporal do tamanho populacional de <i>Aphis gossypii</i> nas temperaturas de 15°C (preto), 20°C (vermelho), 25°C (verde) e 30°C (azul), alimentado com diferentes cultivares de crisântemo: (a) Yellow Snowdon, (b) White Reagan e (c) Dark S. Reagan, obtida por meio de simulação até 50.000 etapas temporais (dias) pelo Modelo Penna tradicional (MP) e pelo Modelo Penna modificado (MPM).	40
3.1	Esquema de reprodução de fêmeas ápteras e aladas na dinâmica populacional do pulgão <i>Aphis gossypii</i>	52
3.2	Esquema da entrada e saída de indivíduos na dinâmica populacional do pulgão <i>Aphis gossypii</i> com parasitismo e migração.	53
3.3	Curvas de sobrevivência, em função da idade do pulgão <i>Aphis gossypii</i> obtidas, por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) nas temperaturas de (a) 15°C, (b) 20°C, (c) 25°C e (d) 30°C, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> de $t = 7.000$ a $t = 20.000$	57

3.4	Evolução temporal do tamanho da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> obtida, por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) nas temperaturas de: (a) $15^{\circ}C$, (b) $20^{\circ}C$, (c) $25^{\circ}C$ e (d) $30^{\circ}C$, sob ação do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> de $t = 7.000$ a $t = 20.000$	59
3.5	Evolução temporal do tamanho da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> , obtida, por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) nas temperaturas de (a) $15^{\circ}C$, (b) $20^{\circ}C$, (c) $25^{\circ}C$ e (d) $30^{\circ}C$, em população sem (linhas vermelhas) e com (linhas pretas) ação do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> , de 3.000 em 3.000 etapas temporais.	62
3.6	Evolução temporal do tamanho da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> , obtida, por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) nas temperaturas de (a) $15^{\circ}C$, (b) $20^{\circ}C$, (c) $25^{\circ}C$ e (d) $30^{\circ}C$, em população sem (linhas vermelhas) e com (linhas pretas) ação do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> , de 500 em 500 etapas temporais.	63
3.7	Curvas de sobrevivência em função da idade do pulgão <i>Aphis gossypii</i> , de forma áptera e alada, obtidas por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0, 10$ e $\lambda = 0$	65

3.8	Curvas de sobrevivência do pulgão <i>Aphis gossypii</i> , com formas ápteras e aladas, obtidas por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0,30$ e $\lambda = 0$	66
3.9	Evolução temporal do tamanho da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> de formas ápteras e aladas, obtida por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0,10$ e $\lambda = 0$	67
3.10	Evolução temporal do tamanho da população de pulgão <i>Aphis gossypii</i> de formas ápteras e aladas, obtida por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0,30$ e $\lambda = 0$	67
3.11	Curvas de sobrevivência do pulgão <i>Aphis gossypii</i> , obtidas por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0,0001$ e $\lambda = 0,002$	69
3.12	Evolução temporal do tamanho da população de <i>Aphis gossypii</i> , obtida por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (linhas vermelhas) e com (linhas pretas) ação de <i>Lysiphlebus testaceipes</i> de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0,0001$ e $\lambda = 0,002$	70

RESUMO

SOUZA, Ademária Aparecida de. **Simulação da dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 e sua interação com o parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880)**. 2007. 74 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Recentemente, Giarola et al. (2006) simularam a dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877, em diferentes temperaturas e cultivares de crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev), utilizando o Modelo Penna (Penna, 1995) e dados de biologia obtidos por Soglia et al. (2002, 2003). Embora os resultados sejam satisfatórios, o período pós-reprodutivo observado para os pulgões não foi reproduzido. Na primeira parte deste trabalho, propõe-se uma nova versão para o Modelo Penna e simula-se a dinâmica populacional de *A. gossypii*. Comparando-se os resultados de ambos modelos, embora a versão modificada reproduza longevidades mais satisfatórias, pode-se concluir que ambos podem ser utilizados de forma eficiente em programas de manejo integrado de pragas (MIP). Na segunda parte deste trabalho, com o objetivo de fornecer subsídios para programas MIP, simula-se a dinâmica populacional de *A. gossypii* em interação com o parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880), usando as versões original e modificada do Modelo Penna e dados biológicos obtidos por Soglia et al. (2002, 2003) e Rodrigues et al. (2004). Considerando diferentes aspectos, tais como migração e produção de formas aladas dos pulgões, sobre a dinâmica de interação, conclui-se que ambos os modelos podem ser utilizados com sucesso em programas de controle biológico.

*Comitê Orientador: Solange Gomes Faria Martins (Orientadora) – UFLA e Mauricio Sergio Zacarias (Co-orientador) – EMBRAPA

ABSTRACT

SOUZA, Ademária Aparecida de. ***Aphis gossypii* Glover, 1877 populational dynamics simulation and its interaction with the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880), using original and modified versions of the Penna Model.** 2007. 74p. Master Dissertation (Statistics and Agricultural Experimentation) - Federal University of Lavras, Lavras, MG*

Recently, Giarola *et al.* (2006) have simulated the populational dynamics of *Aphis gossypii* Glover, 1877 in different temperatures and chrysanthemum cultivares (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev), by using the Penna Model (Penna, 1995) and experimental data from Soglia *et al.* (2002, 2003). Though the results are satisfactory, the post reproductive period, observed in plat louses, is not reproduced. In the first part of this work we propose a new modification for the Penna Model to simulate the populational dynamics of *A. gossypii*. Al though the modified version have yielded more adequate longeivities, both models can be used efficiently in biological control programmes. In the second part, in ordem to help the integrated pest management, we have simulated the *A. gossypii* populational dynamics interacti with the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880), using both original and modified versions of Penna Model and experimental data from Soglia *et al.* (2002, 2003) and Rodrigues *et al.* (2004). Considering aspects such as migration and winged forms production in interaction dynamics, we conclude that both models can be used successfully in biological control programmes.

*Guidance committee: Solange Gomes Faria Martins (Adviser) - UFLA and Mauricio Sergio Zacarias (Co-adviser) - EMBRAPA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

Em grande parte das vezes, pragas agrícolas são controladas e, eventualmente, mantidas em níveis economicamente aceitáveis por meio da aplicação de produtos inseticidas. Os efeitos colaterais dessas substâncias, no entanto, costumam ser desastrosos, inclusive para a saúde humana. Nos últimos anos, uma parcela cada vez mais expressiva de consumidores tem percebido os malefícios que os produtos químicos podem trazer ao seu bem-estar, o que tem gerado uma demanda crescente por produtos agrícolas livres de agrotóxicos (incluindo os chamados "alimentos orgânicos"), embora esses produtos ainda sejam relativamente raros. Com a elevação no nível de exigência dos consumidores, a aplicação massiva, descontrolada e irregular de agrotóxicos tende a ser reduzida ou, até mesmo, substituída pelo controle biológico, no qual a liberação periódica de inimigos naturais tais como patógenos (fungos, nematóides), parasitóides e predadores, tem a missão de controlar essas pragas.

O pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) é uma praga encontrada no mundo inteiro e se alimenta de várias espécies de plantas. Várias pesquisas em laboratório (Soglia et al., 2002, 2003; Carnevale, 2002; Rodrigues et al., 2004) e em campo (Calvo & Fuentes, 1980; Carvalho et al., 2002) têm sido desenvolvidas com essa e outras espécies de pulgões, com o objetivo de compreender melhor a dinâmica populacional desses insetos, assim como avaliar o impacto de inimigos naturais sobre suas populações.

Dentre os inimigos naturais mais usados como agentes de controle biológico de pulgões destacam-se os parasitóides da família Aphididae, entre eles, *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880). Estes parasitóides apresentam características essenciais a um efetivo inimigo natural, tais como alta capacidade repro-

dutiva, curto tempo de geração, boa capacidade de dispersão e ciclo de vida bem sincronizado com aqueles de seus afídeos hospedeiros (Rodrigues, 2003).

Modelos de previsão da ocorrência de insetos fitófagos e seus inimigos naturais baseados em exigências térmicas têm sido aplicados em programas de manejo integrado de pragas, fornecendo subsídios para um melhor entendimento da dinâmica populacional desses insetos. Tais resultados têm sido aplicados para orientar sobre a época mais adequada para a implementação de medidas de controle nos sistemas agrícolas (Zambolim, 2000; Peck, 2000).

Recentemente, Giarola et al. (2006) simularam a dinâmica populacional de *A. gossypii*, considerando-se uma população fechada, ou seja não saem nem chegam indivíduos por migração, e sem a presença de inimigos naturais. Para isto, utilizou-se o Modelo Penna (Penna, 1995), na sua versão assexuada. Embora os resultados obtidos sugiram que o modelo possa vir a ser um instrumento útil de previsão, verifica-se que este não reproduz o período pós-reprodutivo observado em pulgões. Isto ocorre pois no Modelo Penna, versão assexuada, após muitas gerações, ou seja, quando a população atinge uma estrutura etária estável, nenhum indivíduo sobrevive além da idade máxima de reprodução (Oliveira et al., 2004).

Neste trabalho é proposta uma nova versão para o Modelo Penna para simulação da dinâmica populacional do pulgão *A. gossypii* e sua interação com o parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hymenoptera: Aphidiidae). Aspectos como migração e produção de formas aladas são tratados nas simulações. Os resultados são comparados aos da versão original e observações experimentais.

Assim, este trabalho está estruturado em três capítulos: no primeiro foram apresentadas as informações relativas ao pulgão *Aphis gossypii* e seu parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* e a descrição do modelo Penna, na sua versão assexuada, no segundo foram realizadas simulações da dinâmica do pulgão *Aphis gossypii*,

utilizando o Modelo Penna original e uma modificação proposta. O terceiro trata de simulações da dinâmica populacional de *Aphis gossypii* e da sua interação com o parasitóide *Lysiphlebus testaceipes*, utilizando as versões original e modificada do Modelo Penna.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância econômica dos afídeos

Os pulgões são insetos sugadores pertencentes à Ordem Hemiptera e Família Aphididae. Esta família é considerada a maior e mais comum da superfamília Aphidoidea, com, aproximadamente, 4.000 espécies distribuídas ao redor do mundo (Dixon, 1987). As principais espécies de afídeos que ocorrem em cultivos sob sistema de proteção são *Mysus persicae* (Sulzer, 1776), *Aphis gossypii* Glover, 1877 *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas, 1878), *Macrosiphum rosae* (Linnaeus, 1758) e *Aulacorthum solani* (Kaltenbach, 1843) (Bueno, 2005). A espécie *A. gossypii* tem ampla distribuição mundial e é extremamente polífaga (Blackman & Eastop, 1984), tendo sido observada em mais de 90 famílias de plantas (Soglia, 2001). Em ambientes protegidos tem como plantas hospedeiras o crisântemo, o melão, o pepino, o pimentão e o tomate (Rodrigues, 2003).

Os afídeos estão entre os insetos-praga que causam maiores danos, tanto em ambientes protegidos quanto em cultivos no campo. Culturas atacadas por grandes populações de afídeos sofrem perdas diretas na sua produção, podendo atingir os 100% (Ilharco, 1992).

Pulgões causam grandes prejuízos às plantas devido à sucção da seiva, tanto na fase de ninfa quanto adulta, provocando um atraso no crescimento, murchamento generalizado, encardilhamento das folhas e paralisação do desenvolvimento. Outro dano causado por estes insetos é o comprometimento das taxas fotossintética e respiratória da planta por meio do desenvolvimento da fumagina (fungo de coloração negra) sobre as folhas. A fumagina ocorre devido à excreção do "honeydew", substância açucarada e pegajosa que é o alimento favorito de muitas espécies de formigas (Bueno, 2005).

Os afídeos podem também transmitir mais de 50 tipos de vírus de plantas que podem levá-las ao depauperamento total. A transmissão de vírus de planta para planta, inoculados pelos afídeos que os adquirem ao se alimentarem de plantas infectadas e os transmitem ao se alimentarem de plantas saudáveis. O inseto pode perder rapidamente a capacidade infectiva ou tornar-se infectivo durante toda a sua vida, transmitindo o vírus por longo tempo e longas distâncias. Além de reduzir a produção da planta, esta praga, quando não controlada eficientemente, pode afetar a qualidade do produto, provocando grandes prejuízos econômicos (Soglia, 2001).

Devido aos prejuízos advindos do ataque dos pulgões em diferentes regiões do mundo, diversos estudos são feitos, a fim de conhecer o seu comportamento no campo e em laboratório, determinar picos e variações populacionais destas pragas, bem como conhecer aspectos de seus inimigos naturais. Agentes de controle biológico minimizam o uso de produtos químicos e, conseqüentemente, são produzidos alimentos mais saudáveis, além de favorecer a produção e a comercialização das plantas (Rodrigues, 2003). Assim, a compreensão da dinâmica de populações das pragas é muito importante para a previsão de seus picos populacionais.

2.2 Aspectos biológicos e comportamentais dos afídeos

Em regiões de clima temperado, a reprodução predominante dos afídeos é sexuada e partenogenética telítoca (assexuada) em regiões de clima tropical, como o Brasil e em casas de vegetação. Na reprodução sexuada, as fêmeas são fecundadas antes de se reproduzirem, originando descendentes com ciclo de vida holocíclico (completo) (Figura 1.1). Na reprodução assexuada, as fêmeas procriam sem terem sido fecundadas, dando origem apenas a descendentes fêmeas geneticamente iguais às suas mães, conhecidas como clones e com ciclo de vida anolocíclico (incompleto) (Figura 1.2) (Ilharco, 1992).

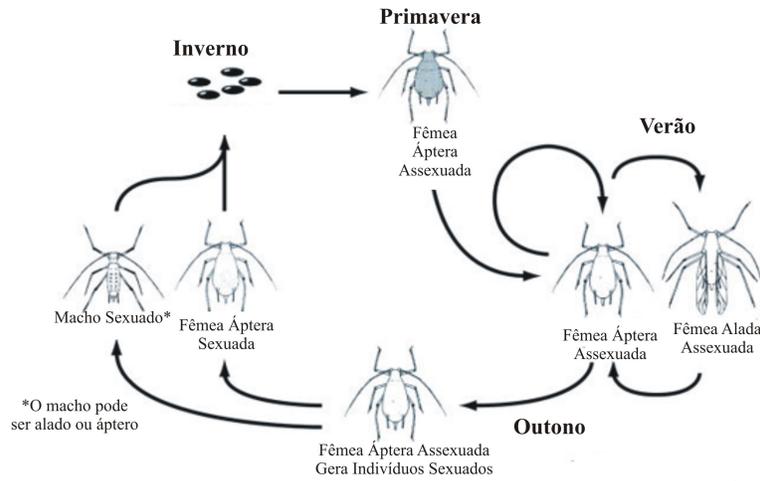


FIGURA 1.1: Esquema do ciclo de vida holocíclico (completo) de pulgões.

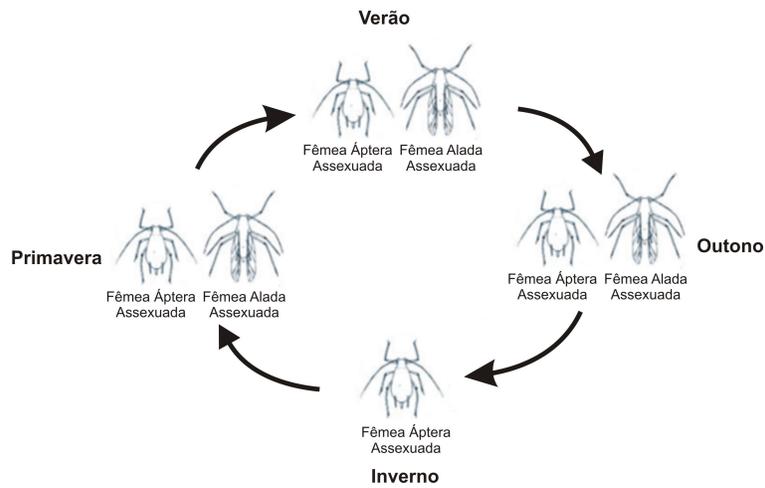


FIGURA 1.2: Esquema do ciclo de vida anolocíclico (incompleto) de pulgões.

No início da formação das colônias, os indivíduos são ápteros (Figura 1.3) e, posteriormente, devido ao elevado número de indivíduos, declínio da qualidade nutricional das plantas hospedeiras ou mudanças climáticas sazonais, os afídeos li-

beram um feromônio de alarme que induz à formação de indivíduos alados (Figura 1.4) (Bueno, 2005).

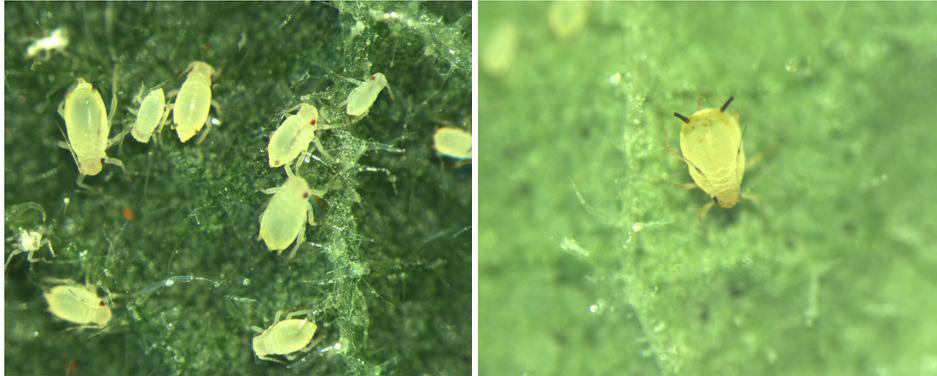


FIGURA 1.3: Ninfas (esquerda) e adulto áptero (direita) do pulgão *Aphis gossypii*.



FIGURA 1.4: Adulto alado do pulgão *Aphis gossypii*.

A presença de inimigos naturais (parasitóides e predadores) é outro fator que induz à formação de indivíduos alados. Isso pode ser considerado como mecanismo de defesa, pois pulgões alados são estrategicamente capazes de manter a sobrevivência dos seus descendentes, escapando pelo vôo e colonizando outras plantas hospedeiras (Pereira & Lomônaco, 2003). Podem, ainda, ser levados pelo

vento com grande facilidade e, dessa forma, são capazes de migrar grandes distâncias, chegando até a 1.300 km (Dixon, 1997).

No entanto, a produção de formas aladas em afídeos e sua dispersão demandam custos em termos de sobrevivência e fecundidade, pois o migrante investirá parte dos recursos energéticos e do tempo para o seu deslocamento (Pereira & Lomônaco, 2003).

Os afídeos anolocíclicos apresentam um ciclo biológico composto de duas fases: ninfal e adulta. A fase ninfal apresenta, em, geral 4 ínstars (estádios de desenvolvimento) ou seja, as ninfas desenvolvem-se rapidamente e sofrem quatro mudas (trocas de tegumento) antes de tornarem-se adultas (Figura 1.5). Quando adultos, esses insetos medem cerca de 2mm de comprimento (Bueno, 2005).

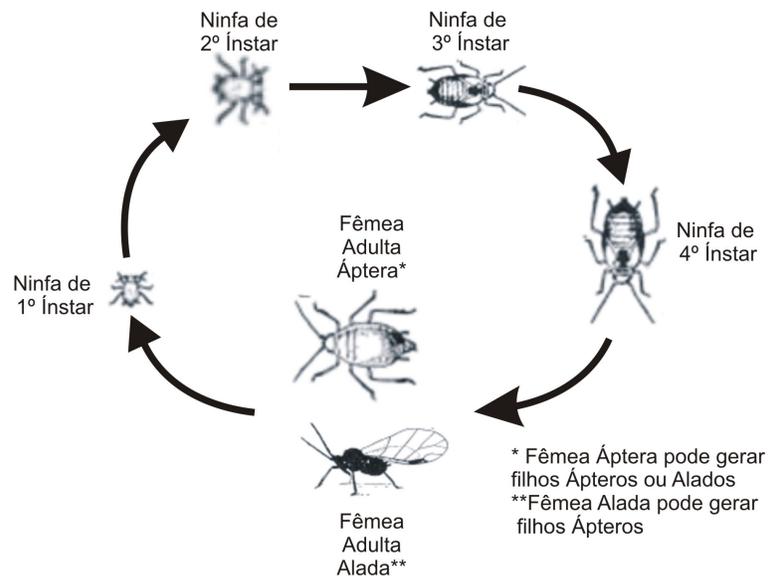


FIGURA 1.5: Ciclo de vida dos afídeos anolocíclicos.

Os pulgões apresentam policromismo, ou seja, sua coloração varia de verde-escuro ao amarelo-claro, em função da fonte de alimento, da densidade populaci-

onal e da temperatura a que estão submetidos. O adulto vive de 2 a 3 semanas, produzindo de 3 a 10 descendentes em um dia (Malais & Ravensberg, 1992).

Os afídeos apresentam curto período de desenvolvimento ninfal e longo período reprodutivo, sob condições de casa de vegetação, isto é, com temperatura mais ou menos constante e na ausência de inimigos naturais. Nessas condições, as populações de afídeos são capazes de crescer exponencialmente, por um período considerável (Rabasse, 1980). A grande capacidade de reprodução desse grupo de insetos proporciona condições para que, muito facilmente, as populações atinjam níveis prejudiciais, colocando em risco a cultura que lhe serve como hospedeira (Bueno, 2005).

2.3 Influência da temperatura sobre o desenvolvimento de *Aphis gossypii*

A temperatura é um fator climático que afeta o desenvolvimento dos insetos, pois estes são organismos pecilotérmicos, ou seja, são incapazes de manter a temperatura corporal constante e cada espécie apresenta um requerimento térmico que pode variar entre populações vivendo em regiões geográficas diferentes. Em geral, o tempo médio de desenvolvimento desses organismos decresce com o aumento da temperatura dentro da amplitude térmica requerida para a sobrevivência de cada espécie (Soglia, 2001).

Segundo Eastop (1977), citado por Soglia et al. (2002), a influência da temperatura não é somente no comportamento individual dos afídeos, mas condiciona o tamanho das populações, ocasionando mudanças em sua ocorrência sazonal e dinâmica populacional.

Nos estudos de Soglia (2001) e Soglia et al. (2002, 2003) avaliou-se a influência da temperatura e fotofase no desenvolvimento de *A. gossypii* alimentado em folhas de três cultivares comerciais de crisântemo: Yellow Snowdon, White

Reagan e Dark Splendid Reagan. Os autores constataram que, de modo geral, sob condições térmicas constantes, a duração de cada ínstar, o período reprodutivo, a fecundidade, o período pós-reprodutivo e a longevidade são influenciados pela temperatura, podendo-se destacar os seguintes resultados:

- a duração de cada ínstar de *A. gossypii* foi reduzida com o incremento da temperatura (Tabela 1.1);
- o período reprodutivo das fêmeas de *A. gossypii* decresceu com o aumento da temperatura, nas três cultivares de crisântemo estudadas (Tabela 1.2);
- a maior produção diária de ninfas foi obtida a 25°C, nas três cultivares de crisântemo e as menores fecundidades diárias foram observadas nas temperaturas de 15°C e 30°C (Tabela 1.3). Observou-se uma diferença significativa na fecundidade total das fêmeas criadas na cultivar Yellow Snowdon, em relação às outras, obtendo-se uma maior produção de ninfas nesta cultivar;
- a duração média do período pós-reprodutivo de *A. gossypii* decresceu no intervalo compreendido entre 15°C e 25°C. A 30°C, a duração média aumentou significativamente (Tabela 1.4). Avaliando-se o efeito das cultivares de crisântemo, verifica-se que a cultivar Yellow Snowdon proporcionou uma menor duração desse período e maior duração nas cultivares White Reagan e Dark S. Reagan;
- a longevidade das fêmeas de *A. gossypii* decresceu com o aumento da temperatura (Tabela 1.5), tendo, a 25°C e 30°C, sido significativamente menor. Não houve diferença significativa, entre as cultivares, para esse parâmetro avaliado;
- a temperatura de 25°C foi a mais favorável ao desenvolvimento da fase ima-

tura de *A. gossypii*, reduziu a duração do período pré-reprodutivo e incrementou a capacidade diária e total de produção de ninfas.

TABELA 1.1: Duração média (em dias) do 1^o, 2^o, 3^o e 4^o ínstar de *Aphis gossypii* criado em crisântemo, em função da temperatura (Soglia et al., 2002).

Fase ninfal	15°C	20°C	25°C	30°C
1 ^o ínstar	3,6	1,8	1,8	1,3
2 ^o ínstar	3,4	1,5	1,3	1,2
3 ^o ínstar	3,2	1,9	1,1	1,1
4 ^o ínstar	3,2	1,7	1,3	1,3

TABELA 1.2: Duração (em dias) (média $\pm\delta$) do período reprodutivo de fêmeas de *Aphis gossypii*, em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia et al., 2002).

Cultivar	15°C	20°C	25°C	30°C
Yellow Snowdon	17,5 \pm 1,80	15,2 \pm 2,42	14,3 \pm 1,20	3,8 \pm 0,79
White Reagan	18,8 \pm 3,49	12,0 \pm 5,98	10,4 \pm 3,02	2,4 \pm 1,20
Dark S. Reagan	15,8 \pm 2,55	16,2 \pm 4,96	9,0 \pm 3,34	3,1 \pm 0,94

TABELA 1.3: Fecundidade diária (número de ninfas) (média $\pm\delta$) de *Aphis gossypii*, em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia et al., 2003).

Cultivar	15°C	20°C	25°C	30°C
Yellow Snowdon	1,8 \pm 0,10	2,6 \pm 0,28	3,1 \pm 0,22	1,7 \pm 0,18
White Reagan	1,2 \pm 0,21	2,4 \pm 0,95	2,8 \pm 0,38	1,5 \pm 0,44
Dark S. Reagan	1,2 \pm 0,19	2,3 \pm 0,40	3,6 \pm 0,38	1,4 \pm 0,41

TABELA 1.4: Duração (em dias) (média $\pm\delta$) do período pós-reprodutivo de fêmeas de *Aphis gossypii*, em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia, 2001).

Cultivar	15°C	20°C	25°C	30°C
Yellow Snowdon	9,3 \pm 3,8	6,2 \pm 2,0	3,1 \pm 1,0	7,9 \pm 1,8
White Reagan	20,9 \pm 9,4	2,5 \pm 2,2	2,1 \pm 1,8	4,9 \pm 3,8
Dark S. Reagan	21,6 \pm 6,6	11,7 \pm 5,6	2,5 \pm 1,4	7,7 \pm 2,8

TABELA 1.5: Longevidade (em dias) (média $\pm\delta$) de fêmeas de *Aphis gossypii*, em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ :Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia et al., 2003).

Cultivar	15°C	20°C	25°C	30°C
Yellow Snowdon	27,9 \pm 4,31	21,8 \pm 2,03	18,0 \pm 1,41	12,5 \pm 2,11
White Reagan	40,8 \pm 9,54	14,9 \pm 7,13	12,5 \pm 4,49	8,7 \pm 4,92
Dark S. Reagan	38,5 \pm 6,88	28,2 \pm 10,73	12,0 \pm 3,76	11,9 \pm 3,03

2.4 Controle biológico

A crescente demanda pela produção mundial de alimentos tem levado à utilização de grandes áreas de monocultura e à aplicação cada vez maior de produtos fitossanitários, o que tem favorecido o aumento das populações de pragas. O uso irracional de inseticidas, além dos organismos-alvo, elimina também os seus inimigos naturais, interferindo no equilíbrio das populações. Atualmente, busca-se utilizar estratégias de controle que restabeleçam e favoreçam o equilíbrio natural nos agroecossistemas. Uma das estratégias para o sucesso de tal equilíbrio é o controle biológico, que pode ser realizado por meio da liberação de predadores e parasitóides ou da aplicação de microrganismos entomopatogênicos (fungos, vírus, bactérias, nematóides e outros microrganismos capazes de causar doenças nos

insetos). Assim, o controle biológico tem se tornado uma estratégia de controle bastante empregada para estes insetos (Leite, 2006).

2.5 Aspectos biológicos e importância do parasitóide como inimigo natural

Dentre os inimigos naturais mais usados como agentes de controle biológico de pulgões destacam-se os parasitóides da família Aphidiidae (Hymenoptera). Estes insetos apresentam características essenciais a um efetivo inimigo natural, tais como alta capacidade reprodutiva, curto tempo de geração, boa capacidade de dispersão e ciclo de vida bem sincronizado com aqueles de seus afídeos hospedeiros (Rodrigues, 2003).

Na família Aphidiidae, a espécie *L. testaceipes* (Figura 1.6) se destaca por ser um agente de controle biológico promissor para diversas espécies de pulgões, entre eles *A. gossypii*. Esse afidiídeo parasita todos os estágios de desenvolvimento dos pulgões, exceto os ovos, sendo as formas aladas as menos atacadas (Hagen e Bosch, 1968), citados por Rodrigues (2003).

O parasitóide *L. testaceipes* é um endoparasitóide (a larva desenvolve-se dentro do hospedeiro) solitário (apenas uma larva se desenvolve em cada hospedeiro) de afídeos e mede cerca de 2mm de comprimento (Bueno, 2005).

A fim de parasitar um pulgão, a fêmea do parasitóide o encontra, avalia e por meio do ovipositor, deposita um ovo no corpo do hospedeiro (Figura 1.7). A larva passa por quatro ínstaras no interior do afídeo; nos três primeiros, alimenta-se de substâncias líquidas e, no último ínstar, dos tecidos do hospedeiro. Nesse estágio, corta uma fenda na cutícula do afídeo aderindo-o, por meio de uma seda, à superfície onde ele se encontra. Ainda nesse ínstar, tece um casulo dentro do afídeo e se transforma em pupa. O pulgão parasitado passa a ser chamado de múmia (devido à aparência). O adulto emerge dessa múmia cortando um orifício

circular no topo do abdômen do pulgão mumificado. Os adultos dispersam-se por meio de vôo ou caminhando pelas plantas que estejam próximas (Bueno, 2005).



FIGURA 1.6: Adultos do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes*. Fêmea (acima) e macho (abaixo) .

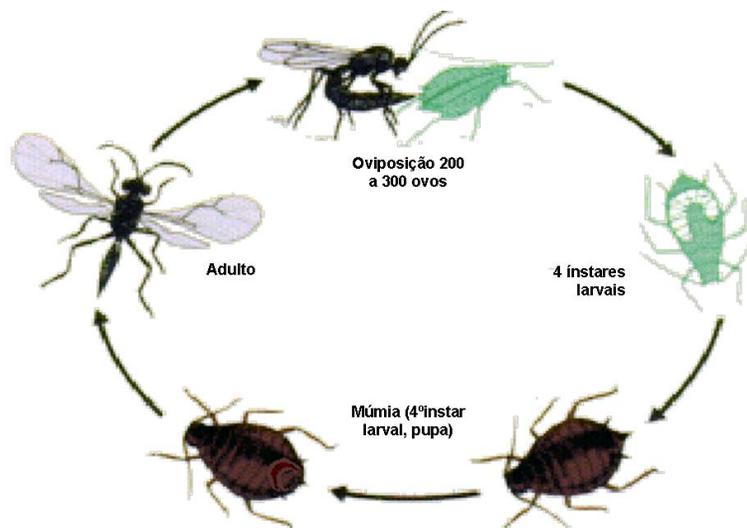


FIGURA 1.7: Esquema do ciclo de vida do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* em um afídeo.

Após a emergência, a oviposição ocorre independentemente de a fêmea estar acasalada ou alimentada. A reprodução geralmente é bipolar; ovos fertilizados dão origem a fêmeas e não fertilizados, a machos (Carnevale, 2002).

Segundo Steenis (1995), citado por Carnevale (2002), uma fêmea da espécie *L. testaceipes* coloca de 128 a 180 ovos durante sua vida (um ovo por hospedeiro) e sua longevidade é de 2,6 dias. A única função do macho, no que se refere à reprodução, é o acasalamento.

De acordo com Starý (1988), citado por Carnevale (2002), o parasitóide adulto tem vida livre, isto é, não é parasita. Um dos principais alimentos do adulto é o "honeydew" eliminado pelos pulgões, que é rico em carboidratos e proteínas.

2.6 Influência da temperatura sobre o desenvolvimento e parasitismo de *Lysiphlebus testaceipes* em *Aphis gossypii*

Várias características biológicas de *L. testaceipes* vêm sendo estudadas, visando a sua utilização em ambientes protegidos no controle de *A. gossypii* (Carnevale, 2002; Bueno, 2005).

A temperatura é um dos fatores abióticos que compõem o clima de um determinado lugar e, quando se deseja que um inimigo natural se estabeleça e seja efetivo em uma determinada área, o conhecimento deste fator ecológico é um requisito importante (Rodrigues, 2003).

O desenvolvimento e o parasitismo de *L. testaceipes* em diferentes temperaturas, tendo como hospedeiro o pulgão *A. gossypii*, foram avaliados por Rodrigues et al. (2004), em condições de laboratório. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Controle Biológico do Departamento de Entomologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em câmaras climatizadas mantidas sob temperaturas constantes de 15°C, 20°C, 25°C e 30°C. O material vegetal e os insetos

utilizados no experimento foram obtidos de plantas de crisântemo (*Dentranthema grandiflora* Tzvelev), cultivar Yellow Snowdon. Verifica-se que, de modo geral, a duração do período de desenvolvimento e a taxa de parasitismo foram influenciadas pela temperatura. Dos resultados obtidos destacam-se os seguintes:

- o período de desenvolvimento de *L. testaceipes*, compreendido entre a oviposição até a formação de múmia, apresentou um decréscimo à medida que a temperatura aumentou de 15°C até 30°C (Tabela 1.6);
- o parasitismo de *L. testaceipes* sobre *A. gossypii* decresceu com o aumento da temperatura (Tabela 1.7);
- a temperatura de 25°C é a mais adequada para o desenvolvimento e parasitismo de *L. testaceipes* tendo como hospedeiro o pulgão o *A. gossypii*, pois nessa temperatura foi obtido um curto período de desenvolvimento e também, uma porcentagem de emergência e taxa de parasitismo maiores que 60%.

TABELA 1.6: Período de desenvolvimento (em dias) ($\text{média} \pm \delta$), da oviposição à formação da múmia, de *Lysiphlebus testaceipes* sobre *Aphis gossypii*, em função das temperaturas (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Rodrigues et al., 2004).

Temperatura	Período de desenvolvimento (de ovo à múmia)
15°C	16,3 ± 0,32
20°C	9,8 ± 0,33
25°C	7,6 ± 0,25
30°C	7,5 ± 0,66

TABELA 1.7: Parasitismo (%) de *Lysiphlebus testaceipes*, sobre *Aphis gossypii* em função da temperatura (Rodrigues et al., 2004).

Temperatura	Taxa de parasitismo (%)
15°C	76
20°C	68
25°C	65
30°C	40

2.7 Modelo Penna

O Modelo Penna, também conhecido como modelo de “Bit-String”, foi proposto, em 1995, por T. J. P. Penna (Penna, 1995) e, desde então, tem sido amplamente utilizado para tratar diferentes aspectos referentes ao envelhecimento biológico, por meio das técnicas de Monte Carlo (Scherer, 2005). Este modelo é baseado na teoria da seleção natural de Darwin para a evolução das espécies e na teoria do acúmulo de mutações, segundo a qual o envelhecimento é uma consequência do balanço entre o acúmulo de mutações deletérias (maléficas) e a seleção natural (Rose, 1991).

A facilidade de implementação do Modelo Penna se deve ao fato de que cada indivíduo da população é representado por palavras computacionais cujos bits ou sítios são preenchidos por variáveis binárias setadas com valores 1 ou 0, o que possibilita armazenar informação de forma simples e compacta, não necessitando muito espaço de memória. Além disso, permite manipular, bit a bit, por meio de operações lógicas (AND, OR e XOR). Dessa forma, é possível simular populações com milhões de indivíduos, de forma simples e rápida, cujos tamanhos podem ser comparados aos de populações reais.

Vários estudos relativos à teoria evolutiva foram bem explicados pelo modelo Penna. Atualmente, é possível encontrar, na literatura especializada, uma

grande quantidade de trabalhos baseados nesse modelo, tais como: simulação da reprodução cíclica assexuada-sexuada (Sá Martins & Racco, 2001), previsão da esperança de vida humana (Laszkiewicz et al., 2003), o estudo de micro-evolução na população de cabras das Ram Mountain (Brigatti et al., 2005), simulação da dinâmica populacional do pulgão *A. gossypii* (Giarola et al., 2006). Outras aplicações podem ser encontradas em Moss et al. (1999). Embora o Modelo Penna tenha sido idealizado para implementação em computadores, estudos analíticos já foram realizados (Pizza, 1997).

Na versão assexuada do Modelo Penna, cada indivíduo de uma população de tamanho $N(t)$, sendo t uma etapa temporal, é representado por uma palavra computacional de A bits, a qual é interpretada como o seu "genótipo".

Esta palavra contém informações de quando o efeito de uma mutação deletéria estará presente (bit setado em 1) ou não (bit setado em zero), durante a vida do indivíduo. É assumido que cada bit corresponde a uma idade (hora, dia, mês, ano etc.) do indivíduo e que o mesmo poderá sobreviver, no máximo, até a idade $A - 1$. Assim, a idade é uma variável discreta que varia de 0 a $A - 1$. Se, na idade i da vida do indivíduo, o i -ésimo bit no "genótipo" for 1, ele sofrerá os efeitos de uma mutação deletéria naquela e em todas as idades seguintes da sua vida. Um indivíduo poderá permanecer vivo enquanto o número de mutações deletérias até a sua idade atual for menor que um limiar T .

Como ilustração, considere o "genótipo" de um indivíduo representado por uma palavra computacional de 32 bits (Figura 1.8). Nesse caso o indivíduo poderá sobreviver, no máximo, até a idade 31. Nas idades 1, 3, 5 e 7, o bit está setado em 1 e, conseqüentemente, o indivíduo sofre o efeito da mutação deletéria nessas idades e em todas as idades seguintes. Adotando-se por exemplo, $T = 3$, esse indivíduo morrerá na idade 5, pois, nessa idade ele atingiu o seu limite de

mutações deletérias.

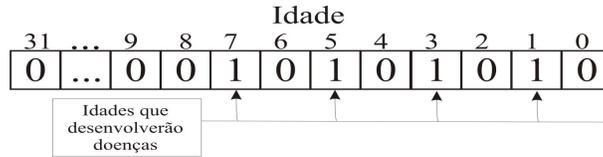


FIGURA 1.8: "Genótipo" do indivíduo, representado por uma palavra computacional de 32 bits. Os bits setados em 1 representam mutações deletérias e os bits setados em 0 ausência de mutações.

Quando o indivíduo (que são considerados fêmeas) atinge a idade mínima de reprodução, R , ele poderá gerar B filhos, com dada probabilidade a cada idade adicional. Para obter o "genótipo" do filho, é feita uma cópia do "genótipo" da mãe, onde é inserido um número M de mutações deletérias em diferentes bits escolhidos aleatoriamente. Se um bit, dentre os M escolhidos, for zero no "genótipo" da mãe, ele passará a ser 1 no "genótipo" do filho. Por outro lado, se for 1 no "genótipo" da mãe, ele permanecerá 1 no "genótipo" do filho. Dessa forma, o "genótipo" do filho, na melhor das hipóteses, será igual ao "genótipo" da mãe (Figura 1.9).

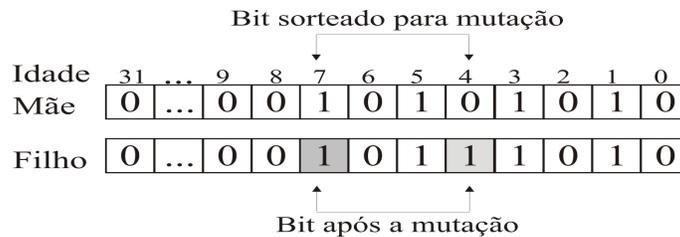


FIGURA 1.9: Obtenção do "genótipo" do filho, em que foram escolhidos, aleatoriamente, os bits 4 e 7, para inserir as mutações deletérias.

Mesmo permitindo apenas mutações ruins, a população que se obtém com a dinâmica até aqui descrita cresce exponencialmente, pois não existe competição entre os indivíduos. Para manter o tamanho populacional dentro dos limites de

memória computacional, bem como modelar as restrições ambientais, tais como espaço e alimento, incluímos o fator de Verhulst. A cada etapa temporal t , o indivíduo cujo número de mutações deletérias até a idade atual é menor que o limiar T irá sobreviver com probabilidade dada por:

$$P_l(t) = 1 - \frac{N(t)}{N_{max}}, \quad (1.1)$$

sendo $N(t)$ o tamanho da população no tempo t e N_{max} o número máximo de indivíduos que o ambiente suporta devido às restrições de espaço e alimento. Após todos os indivíduos terem sido testados para reprodução e morte, uma etapa temporal é concluída.

Resumindo, o modelo Penna trabalha com os seguintes parâmetros:

- $N(0) = N_0$: tamanho inicial da população (número de indivíduos no instante zero);
- N_{max} : capacidade de carga do ambiente;
- M : número de mutações;
- T : limite de mutações deletérias;
- R : idade mínima para reprodução;
- B : número de filhos, por indivíduo, a cada reprodução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLACKMAN, R. L.; EASTOP, V. P. **Aphids on the world's crops: an identification guide.** Chichester: J. Wiley, 1984. 466 p.
- BRIGATTI, E.; SÁ MARTINS, J. S.; RODITI, I. Sharp gene pool transition in a population affected by phenotype-based selective hunting. **The European Physical Journal B**, New York, v. 45, n. 4, p. 529-532, June 2005.
- BUENO, V. H. P. Controle biológico de pulgões ou afídeos-praga em cultivos protegidos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 26, n. 225, p. 9-17, 2005.
- CALVO, C. E.; FUENTES, G. Fluctuacion de la poblacion del afido *Mysus persicae* (Sulzer), en un bosque humedo premontano, alajuela, Costa Rica. **Agonomia costarricense**, v. 4, n. 1, p. 15-19, 1980.
- CARNEVALE, A. B. **Adequabilidade de *Aphis gossypii* Glover, 1877 e *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae) a *Lysiphlebus testaceipes* Cresson, 1880 (Hymenoptera: Aphididae).** 2002. 47 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- CARVALHO, L. M.; BUENO, V. H. P.; MARTINEZ, R. P. Levantamento de afídeos alados em plantas hortícolas em Lavras-M. G. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 3, p. 523-532, 2002.
- DIXON, A. F. G. The way of life of aphids: host specificity, speciation and distribution. In: MINKS, A. K.; HARREWINJN, P. **World Crop Pest-Aphids: Their biology, natural enemies and control.** Amsterdam: Elsevier, 1987. v. 2A, Cap. 4. 5, p. 197-207.

- DIXON, A. F. G. Aphid Ecology: Life Cycles, Polymorphism, and Population Regulation. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 8, p. 329-353, 1977.
- GIAROLA, L. T. P.; MARTINS, S. G. F.; TOLEDO COSTA, M. C. P. Computer simulation of *Aphis gossypii* insects using Penna ageing model. **Physica A-Statistical Mechanics And Its Applications**, Amsterdam, v. 368, n. 1, p. 147-154, Aug. 2006.
- ILHARCO, F. A. **Equilíbrio biológico de afídeos**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1992. 303p.
- LASZKIEWICZ, A.; SZYMCZAK, S. S.; CEBRAT, S. Prediction of the human life expectancy. **Theory in Biosciences**, Jena, v. 122, n. 4, p. 313-320, 2003.
- MALAIS, M. P.; RAVENSBERG, W. J. **The biology of glasshouse pest and their natural enemies**. Rodenrijs: Koppert, p. 61-72, 1992.
- LEITE, M. V. **Biologia de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) em cultivares de *Cucurbita* spp. e sua interação com o predador *Ceraeochrysa cubana* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae)**. 2006. 64 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia) Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- MOSS DE OLIVEIRA, S.; DE OLIVEIRA, P. M. C.; STAUFFER, D. **Evolution, Money, War and Computers**. B. G. Stuttgart/Leipzig: Teubner, v. 1, 1999..
- OLIVEIRA, S. M. de; STAUFFER, D.; OLIVEIRA, P. M. C. DE; MARTINS, J. S. S. Positive mutations and mutation-dependent Verhulst fator in Penna ageing model. **Physica A-Statistical Mechanics And Its Applications**, Amsterdam, v. 332, n. 1, p. 280-386, 2004.

- PECK, S. L. A tutorial for understaging ecological modeling papers for the non-modeler. **American Entomologist**. v.46, n.1 p. 40-49, 2000.
- PENNA, T. J. P. A bit string model for biological aging. **Journal of Statistical Physics**, New York, v. 78, n. 5/6, p. 1629-1633, 1995.
- PEREIRA, C.; LOMÔNACO, C. Produção de formas aladas em colônias de *Brevicoryne brassicae* (L.) (Hemiptera: Aphididae) por indução do parasitóide *Diaretella rapae* (McIntosh) (Hymenoptera: Aphidiidae) e alguns aspectos comportamentais da interação destas espécies. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 097-102, 2003.
- PIZZA, A. F. R. T. Dynamics of the bit-string model of age structured population. **Physica A-Statistical Mechanics And Its Applications**, Amsterdam, v. 242, p. 195-218, 1997.
- RABASSE, J. M. Dynamique des populations d'aphides sur aubergine en serre. Considérations générales sur la colonisation et le développement des populations de quatre espèces dans la sud de la France. **Bulletin IOBC/WPRS**, v. 3, p. 187-198, 1980.
- RODRIGUES, S. M. M. **Avaliação de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hym. : Aphidiidae) como agente de controle biológico de pulgões em cultivos protegidos**. 2003. 106 p. Tese (Doutorado em Entomologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- RODRIGUES, S. M. M.; BUENO, V. H. P.; SAMPAIO, M. V.; SOGLIA, M. C. M. Influência da temperatura no desenvolvimento e parasitismo de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiidae) em *Aphis gossy-*

- pii* Glover (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 33, n. 3, p. 341-346, 2004.
- ROSE, M. R. **Evolutionary biology of aging**. Oxford: Oxford University Press. 1991.
- SÁ MARTINS, J. S.; RACCO, A. Simulated emergence of cyclic sexual-asexual reproduction. **Physica A**, v. 297, p. 485-494, 2001.
- SCHERER, C. **Métodos computacionais da física**. São Paulo: Livraria da Física, 2005. 283 p.
- SOGLIA, M. C. M.; BUENO, V. H. P.; SAMPAIO, M. V. Desenvolvimento e sobrevivência de *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae) em diferentes temperaturas e cultivares comerciais de crisântemo. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 211-216, 2002.
- SOGLIA, M. C. M. **Biologia de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) em diferentes temperaturas e cultivares de crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev)** 2001. 67p. Dissertação (Mestrado em Entomologia)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- SOGLIA, M. C. M.; BUENO, V. H. P.; RODRIGUES, S. M. M. Fecundidade e longevidade de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera, Aphididae) em diferentes temperaturas e cultivares comerciais de crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev). **Revista Brasileira de Entomologia**, Curitiba, v. 47, n. 1, p. 49-54, 2003.
- ZAMBOLIM, L. **Manejo integrado doenças, plantas daninhas**. Viçosa-M. G: UFV, 2000. 416 p.

CAPÍTULO 2

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA
POPULACIONAL DO PULGÃO *APHIS GOSSYPHII*
GLOVER, 1877, USANDO AS VERSÕES ORIGINAL E
MODIFICADA DO MODELO PENNA**

RESUMO

SOUZA, Ademária Aparecida de. Simulação computacional da dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* glover, 1877, usando as versões original e modificada do modelo penna. 2007. Cap. 2. p. 26-46. **Simulação da dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 e sua interação com o parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880).** 2007. 74 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Neste capítulo, simulou-se a dinâmica populacional de formas ápteras (ninfas e adultos) do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877, considerando uma população fechada (não saem nem chegam indivíduos por migração), mantida nas temperaturas de 15°C, 20°C, 25°C e 30°C, alimentados em folhas de crisântemo (*Chrysanthemum grandiflora* Tzvelev) das cultivares Yellow Snowdon, White Reagan e Dark S. Reagan. Para isso foi utilizada uma versão modificada do Modelo Penna, cujos resultados foram comparados com o modelo, em sua forma original. A partir dos resultados obtidos, avaliou-se o papel dos indivíduos não reprodutivos na dinâmica populacional do pulgão.

*Comitê Orientador: Solange Gomes Faria Martins (Orientadora) – UFLA e Mauricio Sergio Zacarias (Co-orientador) – EMBRAPA

ABSTRACT

SOUZA, Ademária Aparecida de. Computational simulation of the pulgão dynamics *Aphis gossypii* Glover, 1877 using the original and modified versions of penna model. 2007. Chap. 2. p. 26-46. ***Aphis gossypii* Glover, 1877 populational dynamics simulation and its interaction with the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880), using original and modified versions of the Penna Model.** 2007. 74p. Master Dissertation (Statistics and Agricultural Experimentation) - Federal University of Lavras, Lavras, MG*

In this chapter we simulated the populacional dynamics of without wing forms (nymphs and adults) of *Aphis gossypii* (Glover, 1877), considering a closed population (they do not leave nor arrive individual for migrations), kept on the temperatures of 15° C, 20°C, 25°C e 30°C, fed in leaves of chrysanthemum (*Chrysanthemum grandiflora* Tzvelev) of the cultivares Yellow Snowdon, White Reagan and Dark S. Reagan. For this goal, it was utilized a modified version of the Penna model, whose results was compared with the model in your original version. From the gotten results, we evaluated the role of the not reproductive individuals in the populacional dynamics of the *Aphis gossypii*.

*Guidance committee: Solange Gomes Faria Martins (Adviser) - UFLA and Mauricio Sergio Zacarias (Co-adviser) - EMBRAPA.

1 INTRODUÇÃO

Entre as pragas que atacam diversas culturas em condições de campo e cultivados em sistemas protegidos, destaca-se o pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877, (Hemiptera: Aphididae) (Soglia et al., 2002).

Recentemente, Giarola et al. (2006) modelaram a dinâmica populacional de pulgões da espécie *A. gossypii* mantidos em condições de laboratório e de campo. A estrutura etária foi inserida na dinâmica através do Modelo Penna, proposto em 1995 (Penna, 1995). As influências de diferentes plantas hospedeiras e de fatores climáticos, tais como a temperatura, foram incorporadas ao modelo por meio de dados experimentais de Soglia et al. (2003). Embora os resultados obtidos por Giarola et al. (2006) sugiram que o modelo possa vir a ser um instrumento útil de previsão, verifica-se que este não reproduz o período pós-reprodutivo (período de tempo compreendido entre a última ninfa produzida e a morte da fêmea) observado em pulgões. Isso ocorre pois, no Modelo Penna, versão assexuada, após muitas gerações, ou seja, quando a população atinge uma estrutura etária estável, se uma idade máxima de reprodução é inserida no modelo, nenhum indivíduo sobrevive além dessa idade (Oliveira et al., 2004).

Para simular a evolução temporal de uma população de formas ápteras (ninfas e adultos) de *A. gossypii* submetida a diferentes temperaturas e cultivares de crisântemo, propõe-se uma versão modificada do Modelo Penna e comparam-se os resultados com os obtidos por Giarola et al. (2006), usando o modelo em sua versão original.

2 METODOLOGIA

Uma característica marcante do Modelo Penna é que a população assexuada (em regiões de clima tropical, os afídeos se reproduzem por partenogênese telítoca) sempre fixa $T - 1$ bits 1, antes da idade mínima de reprodução (R). Em consequência disso, se uma idade máxima de reprodução (R_X) é introduzida no modelo, os indivíduos não sobrevivem além dessa idade (Oliveira et al., 2004).

Na tentativa de solucionar esta questão, visto que os afídeos podem sobreviver além do período reprodutivo (Tabela 1.4), desconsiderou-se o limite de mutações deletérias e assumiu-se que o indivíduo morrerá com uma probabilidade que dependerá do número de bits 1 que ele possui até a sua idade atual. Esta probabilidade é dada pela função exponencial

$$P(\Psi) = 1.0 - \exp(-\epsilon * \Psi), \quad (2.1)$$

sendo $P(\Psi)$ a probabilidade de morte, Ψ o número de bits 1 até a idade atual do indivíduo e ϵ um parâmetro do modelo. Assim sendo, não existe mais um limite superior permitido para as mutações deletérias, tal como ocorre na versão original do Modelo Penna. O parâmetro T do modelo foi, então, substituído pelo parâmetro ϵ na versão modificada.

Na Figura 2.1 é apresentada a probabilidade de morte em função do número de bits 1 para os modelos Penna original (MP) e modificado (MPM). Os valores do parâmetro ϵ , tal como ocorre com o parâmetro T , foram escolhidos arbitrariamente, de maneira a proporcionar as melhores curvas de sobrevivência, comparadas àquelas obtidas experimentalmente por Soglia et al. (2003).

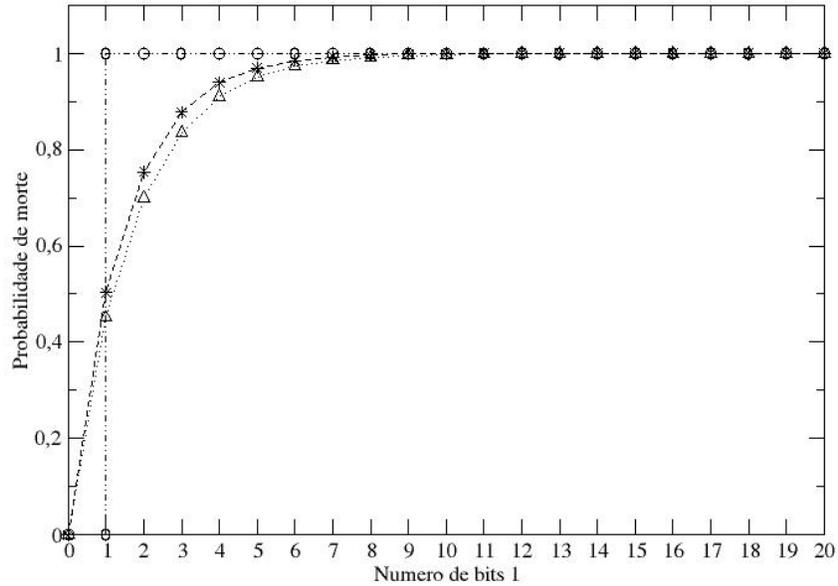


FIGURA 2.1: Probabilidade de morte de pulgão *Aphis gossypii* em função do número de bits l para o Modelo Penna com $T = 1$ (\circ) e Modelo Penna modificado com $\epsilon = 0,6$ (Δ) e $\epsilon = 0,7$ ($*$).

Considerando uma população fechada (sem migração), a entrada e a saída de indivíduos na dinâmica seguem, em ambos os modelos, o esquema apresentado na Figura 2.2.

Como o pulgão *A. gossypii* apresenta uma longevidade superior a 32 dias, considerou-se o "genótipo" constituído de quatro palavras computacionais de 32 bits. Neste caso, o pulgão poderá sobreviver, no máximo, até 127 dias. Inicialmente, o "genótipo" de todos os indivíduos da população inicial N_0 está livre de mutações, ou seja, todos os bits foram setados em zero.

Para cada simulação, fixado o valor de temperatura e definida a cultivar de

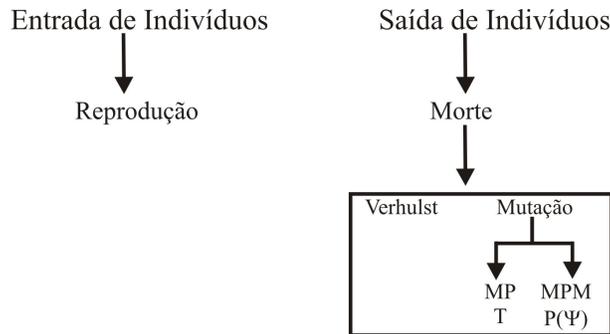


FIGURA 2.2: Esquema de entrada e saída de indivíduos na dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii*.

crisântemo onde foram criados os pulgões, os valores dos parâmetros dependentes da temperatura e cultivar foram obtidos a partir dos dados experimentais das Tabelas 1.1, 1.2 e 1.3. Estes valores são apresentados nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3.

TABELA 2.1: Parâmetros do modelo Penna para o pulgão *Aphis gossypii* criado na cultivar Yellow Snowdon, em função das temperaturas (Soglia et al., 2002, 2003).

Parâmetros	15°C	20°C	25°C	30°C
Idade mínima (R)	13	7	6	5
Idade máxima (RX)	30	21	19	8
Fecundidade (B)	2	3	3	2

Os outros parâmetros do modelo, os quais independem da temperatura e cultivar, assumiram, em nossas simulações, os seguintes valores:

- $N_0 = 10.000$ fêmeas;
- $N_{max} = 100.000$ indivíduos;
- $M=1$;

Na versão original do Modelo Penna:

TABELA 2.2: Parâmetros do modelo Penna para o pulgão *Aphis gossypii* criado na cultivar White Reagan, em função das temperaturas (Soglia et al., 2002, 2003).

Parâmetros	15°C	20°C	25°C	30°C
Idade mínima (R)	13	7	6	5
Idade máxima (RX)	31	18	15	6
Fecundidade (B)	1	2	3	2

TABELA 2.3: Parâmetros do modelo Penna para o pulgão *Aphis gossypii* criado na cultivar Dark S. Reagan, em função das temperaturas (Soglia et al., 2002, 2003).

Parâmetros	15°C	20°C	25°C	30°C
Idade mínima (R)	13	7	6	5
Idade máxima (RX)	28	22	14	7
Fecundidade (B)	1	2	4	1

- $T=1$;

Na versão modificada:

- $\epsilon=0,7$, para as cultivares Yellow Snowdon e White Reagan;
- $\epsilon=0,6$, para a cultivar Dark S. Reagan.

Com esses parâmetros, a dinâmica da população segue as regras simples do Modelo Penna. As simulações foram realizadas até 50.000 etapas temporais (dias), para ambos os modelos.

Obteve-se, por meio das simulações, as curvas de sobrevivência, a evolução temporal do tamanho populacional e as taxas intrínsecas de crescimento para a população do pulgão *A. gossypii*.

2.1 Curvas de sobrevivência

A noção de que a sobrevivência de um indivíduo diminui à medida que avança no tempo é intuitiva e mais ou menos óbvia; afinal, mais cedo ou mais tarde, todos morrem. No entanto, a forma e a velocidade dessa diminuição variam tremendamente de uma espécie para outra e até entre populações de uma mesma espécie. Assim, quando se estudam aspectos de ecologia populacional de uma espécie, um dos principais parâmetros a ser considerado é a sobrevivência, já que este interfere diretamente no tamanho populacional das próximas gerações (Odum, 1988).

A sobrevivência corresponde ao número de indivíduos de uma população que passam de intervalos de idade pré-estabelecidos para outros. Para construir as curvas de sobrevivência calculou-se a taxa de sobrevivência para cada idade j , definida por

$$S_j = \frac{N_{j+1,t+1}}{N_{j,t}} \quad (2.2)$$

em que

- S_j é a taxa de sobrevivência dos indivíduos na idade j ;
- $N_{j+1,t+1}$ é o número de indivíduos na idade $j + 1$ na etapa temporal $t + 1$;
- $N_{j,t}$, é o número de indivíduos na idade j na etapa temporal t .

2.2 Tamanho populacional

Admitindo-se que a população seja fechada (não saem nem chegam indivíduos por migração), o tamanho populacional é um balanço direto entre ganhos (nascimentos) e perdas (mortes) de indivíduos: quando os ganhos superam as perdas, a população cresce; quando as perdas são maiores, ela diminui.

É possível observar que, na natureza, ocorrem variações constantes na tem-

peratura. De acordo com resultados de diversas pesquisas em laboratório (Soglia et al., 2002, 2005; Carnevale, 2002; Rodrigues, 2003), observou-se que a temperatura influencia o desenvolvimento e a reprodução dos insetos. Dessa forma, no estudo da dinâmica de população, é importante conhecer a evolução temporal da população em diferentes temperaturas, assim como determinar a sua população média (\bar{N}).

2.3 Taxa intrínseca de crescimento

Segundo Odum (1988), a taxa específica de crescimento (r) de uma população depende de sua composição etária, podendo haver vários valores para uma mesma espécie. Entretanto, se, em uma população, existir uma distribuição etária estacionária e estável com condições ideais, a taxa específica de crescimento é máxima e é chamada de taxa intrínseca de crescimento (r_m). A capacidade de um indivíduo gerar descendentes sob condições de laboratório é dada pela taxa intrínseca, que mede a capacidade da população de aumentar em número, por meio da reprodução (Odum, 1988). Por meio dessa taxa é possível comparar organismos sob diferentes condições, como temperatura e planta hospedeira. Quanto maior for o valor de r_m , mais bem sucedida será a espécie em um determinado ambiente. O conhecimento da taxa intrínseca é importante também para verificar se um inimigo natural é um agente de controle biológico eficiente contra uma determinada praga. Para que ele seja eficiente, a sua taxa intrínseca deve, no mínimo, ser igual ao da praga em questão (Carnevale, 2002; Rodrigues, 2003).

Existe outro parâmetro de aumento populacional, chamado de taxa finita de aumento (λ), que representa o fator de crescimento da população por geração ou por outro período específico. Existe a seguinte relação entre a taxa intrínseca

de crescimento (r_m) e a taxa finita de aumento (λ):

$$r_m = \ln(\lambda) \quad \text{ou} \quad \lambda = \exp(r_m). \quad (2.3)$$

Segundo ?, a dinâmica do modelo Penna pode ser representada como uma aproximação do modelo logístico discreto dado pela equação:

$$N_{t+1} = \lambda_t N_t \left[1 - \frac{N_t}{N_{max}} \right] \quad (2.4)$$

em que N_t é o tamanho da população no tempo t ; N_{max} a capacidade de carga do ambiente e λ_t a taxa de aumento da população no tempo t .

Da equação 2.4, define-se a taxa de aumento da população para cada tempo t , como Odum (1988)

$$\lambda_t = \frac{N_{t+1}}{N_t \left[1 - \frac{N_t}{N_{max}} \right]} \quad (2.5)$$

Dessa forma, para cada tempo t , foi determinada uma taxa de aumento da população (λ_t). Ao final da simulação determinou-se, a partir de $t = 20.000$ (quando a população atinge a estrutura etária estável), o seu valor médio, que coincide com a taxa finita de aumento λ . Assim, a partir da equação 2.3, obteve-se a taxa intrínseca de crescimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados das simulações para a dinâmica de uma população fechada (não interage com a sua *vizinhança*), constituída exclusivamente de pulgões ápteros.

3.1 Curvas de sobrevivência

Na Figura 2.3 são apresentadas as curvas de sobrevivência obtidas com os MP e MPM. Pode-se observar que, no MPM, os indivíduos sobrevivem mais tempo. Assim, com o MPM, verifica-se que os indivíduos podem sobreviver além da idade máxima de reprodução (Tabela 2.4), em todas as temperaturas, quando criados na planta hospedeira White Reagan. Quanto à cultivar Dark S. Reagan, somente para a temperatura de $20^{\circ}C$ não foi possível reproduzir o período pós-reprodutivo e para a cultivar Yellow Snowdon, nas temperaturas de $15^{\circ}C$ e $20^{\circ}C$, os indivíduos morrem antes do período pós-reprodutivo, embora apresentem longevidades superiores às obtidas com o MP.

Pode-se verificar, pela Tabela 2.5, que as longevidades obtidas com o MPM (Figura 2.3) estão dentro do intervalo de confiança experimental (Soglia et al., 2003) para todas as temperaturas testadas, no caso das plantas hospedeiras Yellow Snowdon e White Reagan. Quanto à planta Dark S. Reagan, os resultados são satisfatórios em 75% dos casos. Utilizando-se o MP, as longevidades estão dentro do intervalo de confiança em 75% dos casos, no caso da planta White Reagan e em 50%, para as demais cultivares, como já verificado por Giarola et al. (2006).

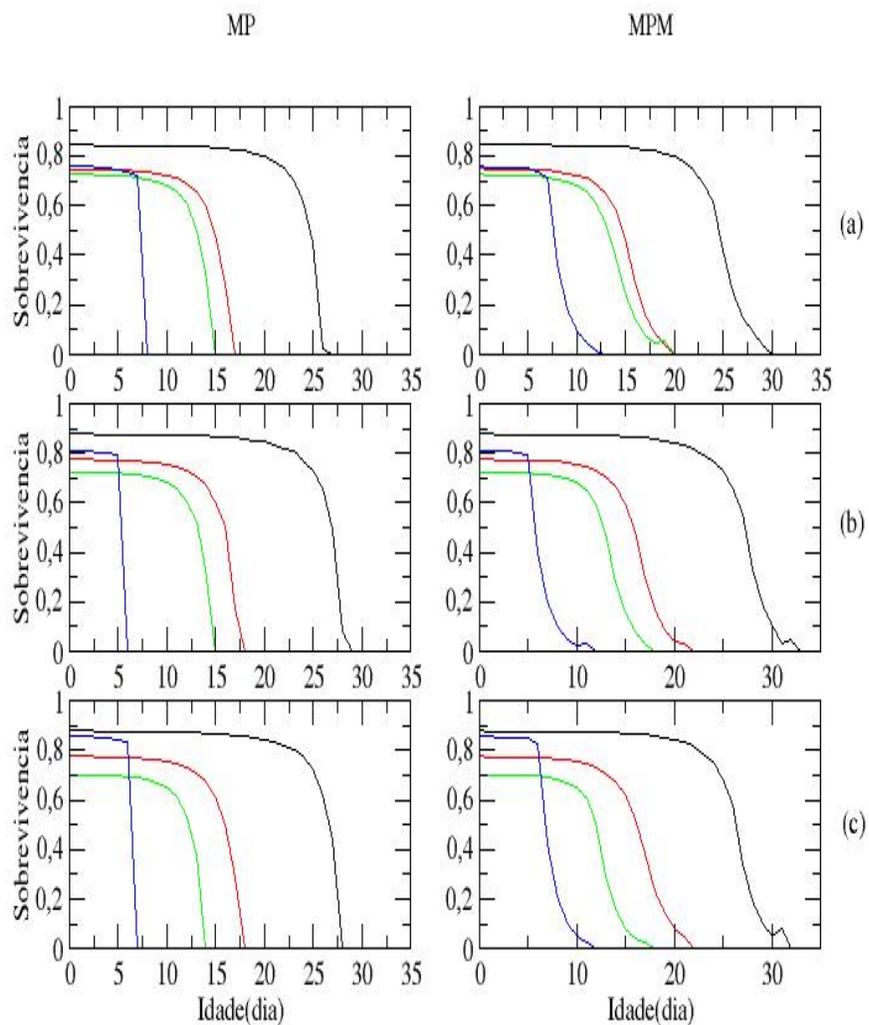


FIGURA 2.3: Curvas de sobrevivência, em função da idade do pulgão *Aphis gossypii* nas temperaturas de $15^{\circ}C$ (preto), $20^{\circ}C$ (vermelho), $25^{\circ}C$ (verde) e $30^{\circ}C$ (azul), alimentado com diferentes cultivares de crisântemo: (a) Yellow Snowdon, (b) White Reagan e (c) Dark S. Reagan, obtidas por meio de simulação de até 50.000 etapas temporais (dias) pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM).

TABELA 2.4: Valores de RX (idade máxima de reprodução) do pulgão *Aphis gossypii* obtidos por Soglia et al. (2002) e longevidades obtidos pela simulação utilizando-se o Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM).

		Yellow Snowdon	White Reagan	Dark S. Reagan
15 ^o C	RX	30	31	28
	MP	27	29	28
	MPM	30	33	32
20 ^o C	RX	21	18	22
	MP	17	18	18
	MPM	20	22	22
25 ^o C	RX	19	15	14
	MP	16	15	14
	MPM	20	18	18
30 ^o C	RX	8	6	7
	MP	8	6	7
	MPM	13	12	12

TABELA 2.5: Longevidade (em dias) (média $\pm\delta$) de fêmeas ápteras de *Aphis gossypii*, em função da temperatura e da cultivar de crisântemo (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%) (Soglia et al., 2003).

Cultivar	15 ^o C	20 ^o C	25 ^o C	30 ^o C
Yellow Snowdon	27,9 \pm 4,31	21,8 \pm 2,03	18,0 \pm 1,47	12,5 \pm 2,11
White Reagan	40,8 \pm 9,54	14,9 \pm 7,13	12,5 \pm 4,49	8,7 \pm 4,92
Dark S. Reagan	38,5 \pm 6,88	28,2 \pm 10,73	12,0 \pm 3,76	11,9 \pm 3,03

3.2 Tamanho médio populacional

Na Figura 2.4, é apresentada a evolução temporal do tamanho da população de pulgões *A. gossypii* obtida por meio de simulação pelo MP e pelo MPM. Para discutir esses resultados, calculou-se os tamanhos médios da população.

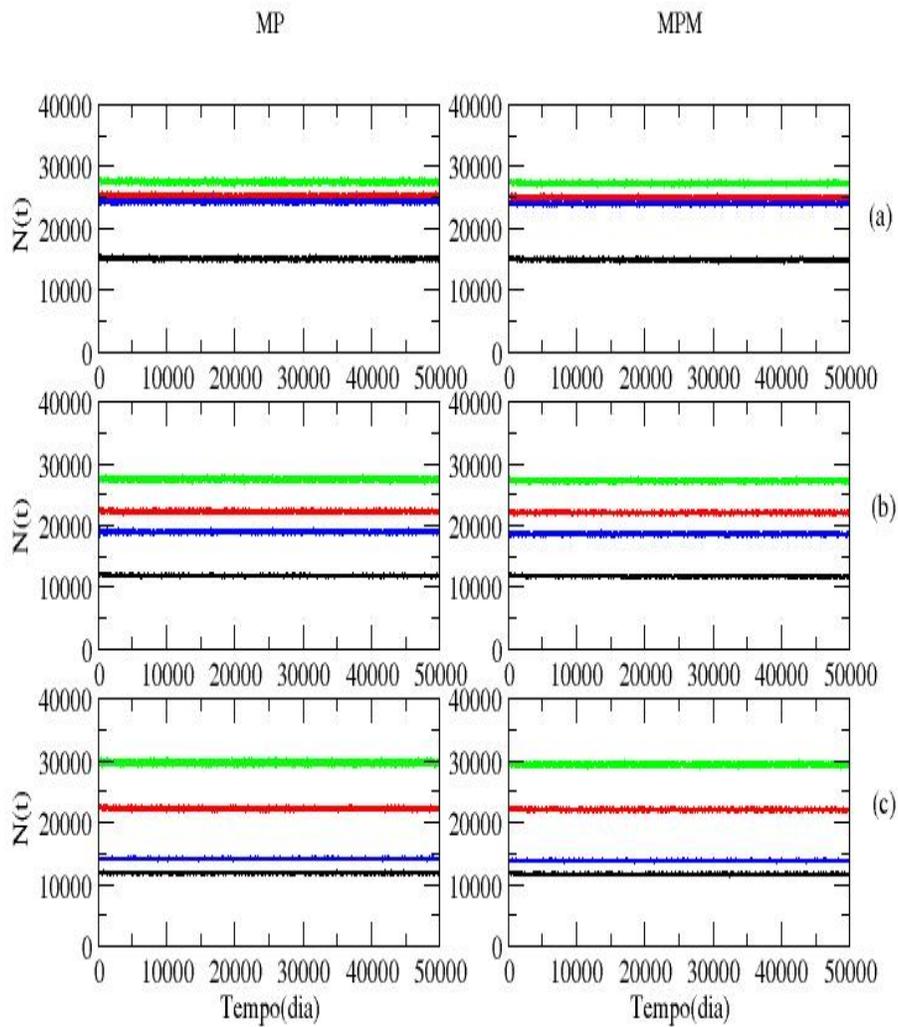


FIGURA 2.4: Evolução temporal do tamanho populacional de *Aphis gossypii* nas temperaturas de $15^{\circ}C$ (preto), $20^{\circ}C$ (vermelho), $25^{\circ}C$ (verde) e $30^{\circ}C$ (azul), alimentado com diferentes cultivares de crisântemo: (a) Yellow Snowdon, (b) White Reagan e (c) Dark S. Raegan, obtida por meio de simulação até 50.000 etapas temporais (dias) pelo Modelo Penna tradicional (MP) e pelo Modelo Penna modificado (MPM).

Na Tabela 2.6, são apresentados os valores dos tamanhos médios da população de *A. gossypii*, desprezando-se as 20.000 etapas temporais iniciais. Apesar de o MPM permitir que os indivíduos sobrevivam por mais tempo do que o MP, como pode ser observado na Figura 2.3. Esse aumento na longevidade é pequeno e a probabilidade de sobreviver além da idade máxima de reprodução é baixa. Assim, esses indivíduos não afetam os valores médios da população, tendo o maior deles, em ambos os modelos, verificados na temperatura de $25^{\circ}C$, para as três cultivares.

TABELA 2.6: Tamanho médio da população de *Aphis gossypii* (média $\pm\delta$) utilizando-se os Modelos Penna tradicional (MP) e modificado (MPM) (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%).

		Yellow Snowdon	White Reagan	Dark S. Raegan
$15^{\circ}C$	MP	15053,6 \pm 1,78	11914,5 \pm 1,26	11887,5 \pm 1,16
	MPM	14905,6 \pm 1,63	11781,2 \pm 1,17	11731,6 \pm 1,18
$20^{\circ}C$	MP	25175,9 \pm 1,21	22294,2 \pm 1,69	22295,4 \pm 1,71
	MPM	24939,2 \pm 1,75	22083,9 \pm 1,48	22130,2 \pm 1,50
$25^{\circ}C$	MP	27495,0 \pm 2,09	27498,3 \pm 2,04	29704,5 \pm 2,37
	MPM	27271,4 \pm 1,72	27220,3 \pm 1,70	29410,9 \pm 1,95
$30^{\circ}C$	MP	24302,1 \pm 1,75	18979,2 \pm 1,69	14232,0 \pm 1,10
	MPM	23990,1 \pm 1,53	18642,5 \pm 1,67	13917,0 \pm 1,09

Os resultados obtidos por meio das simulações estão de acordo com os resultados experimentais obtidos por Soglia et al. (2002) segundo os quais, dentre as temperaturas estudadas, a de $25^{\circ}C$ é a melhor para o desenvolvimento populacional de *A. gossypii*.

3.3 Taxa intrínseca de crescimento

Na tabela 2.7 são apresentados os valores médios da taxa intrínseca de crescimento da população de *A. gossypii*. Observando-se os valores das taxas intrínsecas, verifica-se que estes diferem muito pouco, comparando-se os dois modelos. A presença de indivíduos não reprodutivos não contribui de forma significativa para o crescimento populacional. Em ambos os modelos, verifica-se que a maior taxa intrínseca de crescimento ocorre nas três cultivares a 25°C, evidenciando, novamente, que esta temperatura é a melhor entre as estudadas para o desenvolvimento de *A. gossypii*, tal como observado por Soglia et al. (2002).

TABELA 2.7: Valor médio da taxa intrínseca de crescimento para a população de *Aphis gossypii* utilizando o Modelo Penna original (MP) e o Modelo Penna Modificado (MPM).

		Yellow Snowdon	White Reagan	Dark S. Reagan
15 ⁰ C	MPT	0,163	0,127	0,127
	MPM	0,160	0,125	0,124
20 ⁰ C	MPT	0,290	0,252	0,252
	MPM	0,287	0,249	0,250
25 ⁰ C	MPT	0,322	0,321	0,355
	MPM	0,321	0,318	0,349
30 ⁰ C	MPT	0,278	0,210	0,153
	MPM	0,274	0,206	0,150

Na Tabela 2.8 são apresentados os valores das taxas intrínsecas de crescimento de *A. gossypii* a 25°C, em diferentes cultivares de crisântemo, obtidos por Soglia et al. (2005). Comparando-se esses valores com os obtidos por simulações, verifica-se que, para a cultivar Yellow Snowdon, os valores simulados estão muito próximos dos valores experimentais. No entanto, para as cultivares White Reagan e Dark S. Reagan, os valores simulados são superiores aos valores experimentais.

Essas diferenças podem ser explicadas pelo fato de os valores médios das taxas intrínsecas terem sido obtidos com base somente na temperatura que, apesar de ser um importante elemento regulador da população, não é, de fato, o único. A taxa intrínseca depende de outros fatores, como, por exemplo, o ciclo fenológico do crisântemo, o qual não foi incorporado ao modelo.

TABELA 2.8: Valores experimentais das taxas intrínsecas de crescimento, obtidos por Soglia et al. (2005) e pela simulação por meio do Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM), na temperatura de 25°C.

Cultivar	Experimental	Simulação (MP)	Simulação (MPM)
Yellow Snowdon	0,31	0,32	0,32
White Reagan	0,24	0,32	0,32
Dark S. Raegan	0,22	0,35	0,35

4 CONCLUSÃO

O Modelo Penna modificado reproduz a longevidade dos indivíduos de uma população de forma mais satisfatória, comparado ao Modelo Penna original, pois reproduz o período pós-reprodutivo observado em pulgões oriundos das três cultivares de crisântemo estudadas.

Comparando-se os modelos que descrevem a dinâmica populacional, o MPM é mais realista, pelo fato de permitir que os pulgões sobrevivam além da idade máxima de reprodução e, daí, reproduzir o período pós-reprodutivo observado nestas espécies. Contudo, este aspecto, segundo o modelo proposto, não afeta o tamanho médio da população e a taxa intrínseca de crescimento. Sendo assim, conclui-se que ambos os modelos podem ser utilizados de forma eficiente, em simulações da dinâmica populacional de pulgões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARNEVALE, A. B. **Adequabilidade de *Aphis gossypii* Glover, 1877 e *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae) a *Lysiphlebus testaceipes* Cresson, 1880 (Hymenoptera: Aphididae).** 2002. 47 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- GIAROLA, L. T. P.; MARTINS, S. G. F.; TOLEDO COSTA, M. C. P. Computer simulation of *Aphis gossypii* insects using Penna ageing model. **Physica A-Statistical Mechanics And Its Applications**, Amsterdam, v. 368, n. 1, p. 147-154, Aug. 2006.
- ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988 434 p.
- OLIVEIRA, S. M. de; STAUFFER, D.; OLIVEIRA, P. M. C. DE; MARTINS, J. S. S. Positive mutations and mutation-dependent Verhulst fator in Penna ageing model. **Physica A-Statistical Mechanics And Its Applications**, Amsterdam, v. 332, n. 1, p. 280-386, 2004.
- PENNA, T. J. P. A bit string model for biological aging. **Journal of Statistical Physics**, New York, v. 78, n. 5/6, p. 1629-1633, 1995.
- RODRIGUES, S. M. M. **Avaliação de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hym. : Aphidiidae) como agente de controle biológico de pulgões em cultivos protegidos.** 2003. 106 p. Tese (Doutorado em Entomologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- SOGLIA, M. C. M.; BUENO, V. H. P.; SAMPAIO, M. V. Desenvolvimento e sobrevivência de *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae) em diferentes

temperaturas e cultivares comerciais de crisântemo. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 211-216, 2002.

SOGLIA, M. C. M.; BUENO, V. H. P.; RODRIGUES, S. M. M. Fecundidade e longevidade de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera, Aphididae) em diferentes temperaturas e cultivares comerciais de crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev). **Revista Brasileira de Entomologia**, Curitiba, v. 47, n. 1, p. 49-54, 2003.

SOGLIA, M. C. M.; BUENO, V. H. P.; SAMPAIO, M. V. Fertility life of *Aphis gossypii* on three commercial chrysanthemum cultivars. **Integrated Control in Protected Crops, Temperate Climate IOB/wprs Bulletin**, v. 28, n. 1, p. 41-244, 2005.

CAPÍTULO 3

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA
POPULACIONAL DE INTERAÇÃO DO PULGÃO *APHIS
GOSSYPHII* GLOVER, 1877 E SEU PARASITÓIDE
LYSIPHLEBUS TESTACEIPES (CRESSON, 1880), COMO
SUBSÍDIO AO CONTROLE BIOLÓGICO**

RESUMO

SOUZA, Ademária Aparecida de. Simulação computacional da dinâmica populacional de interação do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 e seu parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880), como subsídio ao controle biológico 2007. Cap. 3. p. 47-73. **Simulação da dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 e sua interação com o parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880).** 2007. 74 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

O uso de inimigos naturais para controle biológico de artrópodes-praga é cada vez mais aplicado em todo o mundo. Dada a importância de se compreender a dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 e do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880), simulou-se no presente trabalho a dinâmica populacional da sua interação, por meio das versões original e modificada do Modelo Penna, com pulgões alimentados em folhas de crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev) da cultivar Yellow Snowdon. Na primeira parte, sob temperaturas de 15°C, 20°C, 25°C e 30°C, considerou-se a população fechada (não interage com a sua vizinhança) constituída exclusivamente de pulgões ápteros. Na segunda e terceira, sob temperatura de 15°C, a população é constituída das formas áptera e alada, com população fechada e aberta (interage com a sua vizinhança), respectivamente. Os resultados correspondem, satisfatoriamente, àqueles obtidos em pesquisas de laboratório.

*Comitê Orientador: Solange Gomes Faria Martins (Orientadora) – UFLA e Mauricio Sergio Zacarias (Co-orientador) – EMBRAPA

ABSTRACT

SOUZA, Ademária Aparecida de. Computational simulation of the populational dynamics of interaction of the *Aphis gossypii* Glover, 1877 and your parasitoid *lysiphlebus testaceipes* (cresson 1880) as subsidy to the control. 2007. Chap. 3. p. 47-73. ***Aphis gossypii* Glover, 1877 populational dynamics simulation and its interaction with the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880), using original and modified versions of the Penna Model.** 2007. 74p. Master Dissertation (Statistics and Agricultural Experimentation) - Federal University of Lavras, Lavras, MG*

The use of natural enemies to biological control of artropedes-pest is each aplied time more in the whole world. Given the importance of understanding the populational dynamics of the *Aphis gossypii* (Glover, 1877) and of the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880), In the present theses it was simulated the populational dynamics of your interaction, through of the original and modified Penna model versions, with *Aphis gossypii* feds in leves of crysantemum (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev) of cultivar Yellow Snowdon. In the first part, under temperatures of 15° C, 20°C, 25°C e 30°C, it was considered the closed population (it does not interact with its neighborhood) constituted excludely of apteros. In the second and third one, under temperatures of 15° C, the population is constituted of without wing forms and winged, with closed and open population (it does interact with its neighborhood), respectively. The results correspond satisfactorily to those gotten in laboratory researchs.

*Guidance committee: Solange Gomes Faria Martins (Adviser) - UFLA and Mauricio Sergio Zacarias (Co-adviser) - EMBRAPA.

1 INTRODUÇÃO

O pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) é uma das principais pragas de diversas culturas em condições de campo e em sistemas protegidos. A introdução de parasitóides, ou mais raramente predadores, na tarefa de controle biológico de pragas tem obtido considerável sucesso. Para tanto, é de fundamental importância compreender a dinâmica da interação destes organismos. O parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hymenoptera: Aphididae) tem como hospedeiros diversas espécies de pulgões, dentre eles, *A. gossypii*. Este afidiídeo parasita todos os estágios do ciclo de vida dos pulgões, exceto os ovos e é considerado um agente de controle biológico muito promissor (Rodrigues et al., 2004).

Recentemente, Giarola et al. (2006) simularam a dinâmica populacional com estrutura etária de *A. gossypii* a diferentes temperaturas e plantas hospedeiras, na ausência de inimigos naturais, utilizando o Modelo Penna de envelhecimento biológico. No presente trabalho, com a versão original e modificada do Modelo Penna e dados experimentais relativos ao parasitismo de *L. testaceipes* sobre *A. gossypii* (Rodrigues et al., 2004), foi simulada a dinâmica populacional do pulgão.

2 METODOLOGIA

Cada indivíduo "haplóide" (em regiões de clima tropical, os pulgões se reproduzem por partenogênese) da população constituída de formas ápteras e aladas, foi representado por quatro palavras computacionais de 32 bits, interpretadas como o seu "genótipo". Foi assumido que cada bit corresponde a um dia da vida do pulgão que poderá sobreviver, no máximo, até 127 dias.

Quando o indivíduo atinge a idade mínima de reprodução (R), ele poderá gerar B filhos com uma dada probabilidade até a idade máxima de reprodução (RX). Como a produção de formas aladas em colônias de pulgões apresenta um custo energético que é geralmente manifestado por queda na fecundidade ou aumento no período de desenvolvimento, considerou-se que a probabilidade de reprodução de indivíduos ápteros β_1 é maior que a probabilidade de reprodução de indivíduos alados β_2 (Pereira & Lomônaco, 2003).

Indivíduos ápteros poderão gerar filhos ápteros com probabilidade $\beta_1\alpha_1$ e filhos alados com probabilidade $\beta_1\alpha_2$, sendo α_1 a probabilidade de gerar indivíduos ápteros e α_2 a probabilidade de gerar indivíduos alados. Como a produção de formas aladas é pequena, comparada à de formas ápteras, considerou-se $\alpha_2 < \alpha_1$ (Pereira & Lomônaco, 2003). Os alados geram apenas filhos ápteros com probabilidade $\beta_2\alpha_1$ (Mondor et al., 2005). Na Figura 3.1 é apresentado um esquema da reprodução de fêmeas ápteras e aladas, conforme Pereira & Lomônaco (2003) e Mondor et al. (2005).

Uma vez que o parasitóide *L. testaceipes* é generalista, ou seja, parasita também outras espécies de pulgões (Rodrigues et al., 2004), assumiu-se que a população de parasitóides não é regulada pela população de *A. gossypii*. Dessa forma, o parasitismo é inserido no modelo por meio de probabilidades dadas por

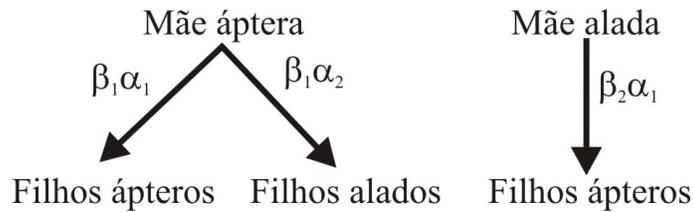


FIGURA 3.1: Esquema de reprodução de fêmeas ápteras e aladas na dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii*.

taxas de parasitismo obtidas experimentalmente (Tabela 1.7). Como os pulgões alados têm uma probabilidade baixa de serem parasitados, considerou-se apenas o parasitismo de formas ápteras.

Visto que *L. testaceipes* é um parasitóide solitário (uma larva por hospedeiro) (Rodrigues, 2003), considerou-se que cada pulgão será parasitado uma única vez, com probabilidade ζ . O indivíduo parasitado, desde que não morra por acúmulo de mutações ou competição (fator de Verhulst), irá, certamente, morrer após o período necessário para a mumificação do pulgão (OM), ou seja, o período de desenvolvimento do ovo do parasitóide à mumificação do pulgão (Tabela 1.6). Esse período é contado a partir da etapa temporal em que o pulgão é parasitado.

Uma vez que os afídeos alados podem ser levados pelo vento com grande facilidade, o que lhes permite migrar grandes distâncias (Dixon, 1987), considerou-se, nas simulações, uma probabilidade λ de migração. Neste caso, foi considerada uma segunda população de pulgões, denominada *vizinhança*, que não sofre ação do parasitóide. Cada pulgão alado e reprodutivo foi substituído, uma única vez com uma probabilidade λ , por um pulgão alado e reprodutivo da *vizinhança*, escolhido aleatoriamente. Ambas as populações são constituídas, inicialmente, de N_0 indivíduos.

Após todos os indivíduos terem sido testados para reprodução, parasitismo

(somente pulgões ápteros), migração (somente pulgões alados) e morte, a idade dos sobreviventes foi incrementada, concluindo-se uma etapa temporal.

Na Figura 3.2 é apresentado o esquema de entrada e saída de indivíduos da população.

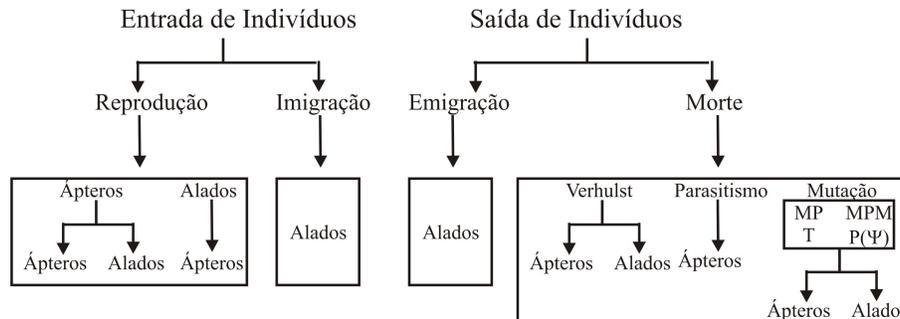


FIGURA 3.2: Esquema da entrada e saída de indivíduos na dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* com parasitismo e migração.

Foram utilizados dados biológicos obtidos para *A. gossypii* criado em folhas de crisântemo da cultivar Yellow Snowdon. As simulações foram realizadas até 50.000 etapas temporais ("dias"), com os modelos Penna (MP) e Penna modificado (MPM),

- sob temperaturas de $15^{\circ}C$, $20^{\circ}C$, $25^{\circ}C$ e $30^{\circ}C$, para a dinâmica de uma população fechada (não interage com a sua *vizinhança*), constituída exclusivamente de pulgões ápteros e sob ação do parasitóide;
- sob temperatura de $15^{\circ}C$, para a dinâmica de uma população fechada (não interage com a sua *vizinhança*) constituída das formas áptera e alada sob ação do parasitóide;
- sob temperatura de $15^{\circ}C$, para a dinâmica de uma população aberta (interage com a sua *vizinhança*), constituída das formas ápteras e aladas sob ação

do parasitóide.

Os parâmetros independentes da temperatura assumiram os valores apresentados na Tabela 3.1 .

TABELA 3.1: Parâmetros do modelo independentes da temperatura

Descrição das grandezas	Nome	Valor
Capacidade de carga do ambiente	N_{max}	100.000
Tamanho inicial da população	N_0	10.000
Número de mutações	M	1
Parâmetro para a cultivar Yellow Snowdon	ϵ	0,7
Probabilidade de reprodução ind. ápteros	β_1	1,0
Probabilidade de reprodução ind. alados	β_2	0,3
Probabilidade de gerar ind. ápteros	α_1	$1 - \alpha_2$
Probabilidade de gerar ind. alados	α_2	variável
Probabilidade de migração	λ	variável

Foram consideradas diferentes situações, nas quais as probabilidades de gerar alados (α_2) e de migração (λ) assumiram os seguintes valores

- $\alpha_2 = 0,0001$ e $\lambda = 0,002$;
- $\alpha_2 = 0,10$ e $\lambda = 0$;
- $\alpha_2 = 0,30$ e $\lambda = 0$;

Os parâmetros dependentes da temperatura (Tabelas 3.2 e 3.3) assumiram valores de acordo com os dados experimentais de Soglia et al. (2002, 2003) e Rodrigues et al. (2004).

TABELA 3.2: Parâmetros dependentes da temperatura (em dias) (Soglia et al., 2002, 2003).

<i>Aphis gossypii</i>	Temperatura			
	15°C	20°C	25°C	30°C
Idade mínima de reprodução(R)	13	7	6	5
Idade máxima de reprodução(RX)	30	21	19	8
Fecundidade(B)	2	3	3	2

TABELA 3.3: Parâmetros dependentes da temperatura (Rodrigues et al., 2004).

<i>Lysiphlebus testaceipes</i>	Temperatura			
	15°C	20°C	25°C	30°C
Probabilidade de parasitismo(ζ)	0,76	0,68	0,65	0,40
Período para mumificação do pulgão(OM)	16	10	8	8

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dinâmica de uma população fechada ($\lambda = 0$) constituída de formas ápteras ($\alpha_2 = 0$)

A seguir, são apresentados os resultados das simulações para a dinâmica de uma população fechada (não interage com a sua *vizinhança*) constituída exclusivamente de pulgões ápteros ($\alpha_2 = 0$) e sob ação do parasitóide.

3.1.1 Curvas de sobrevivência

Na Figura 3.3 são apresentadas as curvas de sobrevivência para o pulgão *A. gossypii*, desprezando-se as 20.000 etapas temporais iniciais. As curvas em vermelho referem-se à população sem ação do parasitóide e as curvas em preto sob ação do parasitóide, de $t = 7.000$ a $t = 20.000$. Observando-se os resultados de ambos modelos, nas temperaturas de $15^{\circ}C$, $20^{\circ}C$ e $25^{\circ}C$, verifica-se uma redução da longevidade e do período reprodutivo do pulgão devido à ação do parasitóide (curvas em preto), como observado por He et al. (2005). Essa redução pode ser explicada pela ação do parasitóide que seleciona os melhores "genótipos" para parasitar e, conseqüentemente, elimina dessa população os indivíduos mais fecundos e longevos. Já na temperatura de $30^{\circ}C$, não há pressão seletiva suficiente devido à baixa probabilidade de parasitismo, combinada com um período de mumificação grande, comparado à longevidade do pulgão.

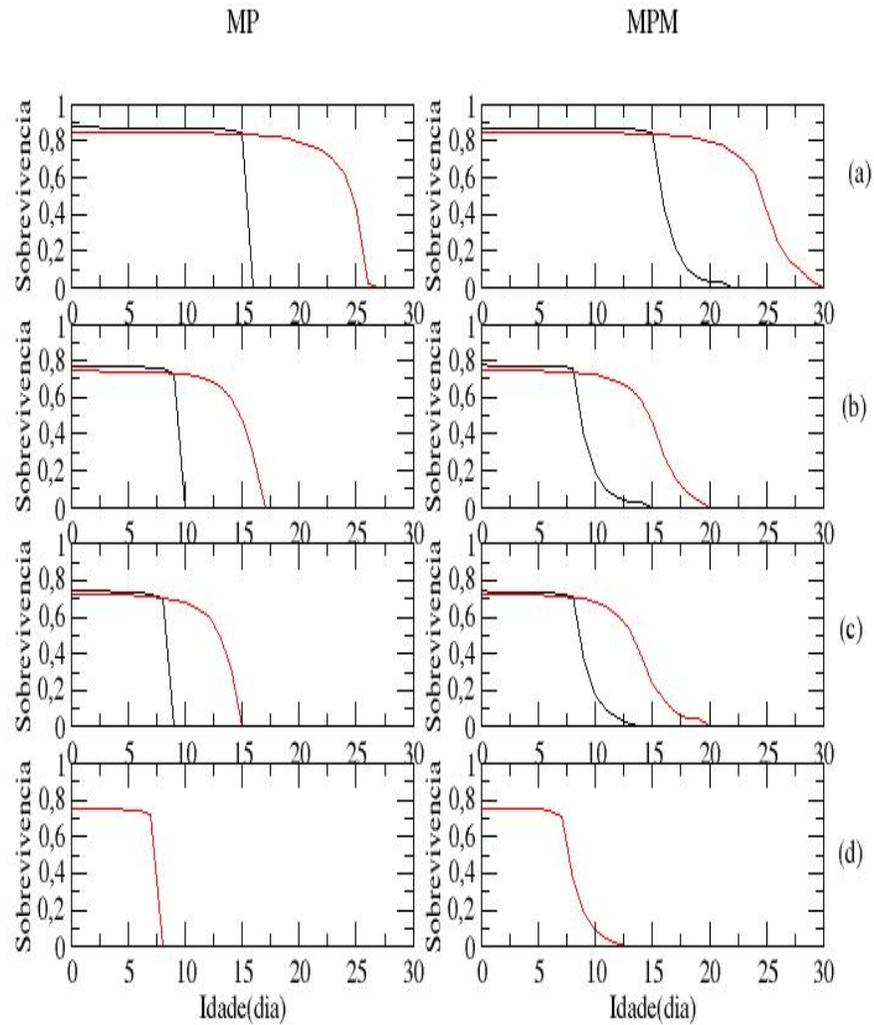


FIGURA 3.3: Curvas de sobrevivência, em função da idade do pulgão *Aphis gossypii* obtidas, por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) nas temperaturas de (a) 15°C , (b) 20°C , (c) 25°C e (d) 30°C , em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$.

Na Tabela 3.4 são apresentados os valores das longevidades do pulgão *A. gossypii*, a partir das curvas de sobrevivência apresentadas na Figura 3.3. Nas temperaturas de $15^{\circ}C$, $20^{\circ}C$ e $25^{\circ}C$, verifica-se maior redução com MP, uma vez que os indivíduos possuem maior probabilidade de sobrevivência com MPM.

TABELA 3.4: Longevidade (em dias) do pulgão *Aphis gossypii*, referente à dinâmica sem e com parasitismo de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, nas temperaturas de $15^{\circ}C$, $20^{\circ}C$, $25^{\circ}C$ e $30^{\circ}C$, obtidas por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM).

Temperatura	MP			MPM		
	sem	com	redução (%)	sem	com	redução (%)
$15^{\circ}C$	27	16	0.41	30	21	0.30
$20^{\circ}C$	17	10	0.41	20	15	0.25
$25^{\circ}C$	16	10	0.38	20	14	0.30
$30^{\circ}C$	8	8	0.00	13	13	0.00

3.1.2 Tamanho populacional

A evolução temporal do tamanho da população de *A. gossypii* mantidos em diferentes temperaturas, sob ação do parasitóide *L. testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, é apresentada na Figura 3.4. Pode-se verificar maior redução na população de pulgões, ou seja, maior eficiência do parasitóide, a $25^{\circ}C$, para ambos os modelos, embora, nessa temperatura, não ocorra a maior probabilidade de parasitismo (ver Tabela 3.2). Esses resultados estão de acordo com aqueles obtidos experimentalmente por Rodrigues et al. (2004) que concluíram ser a temperatura de $25^{\circ}C$ a condição ideal entre as demais estudadas para o desenvolvimento de *L. testaceipes*.

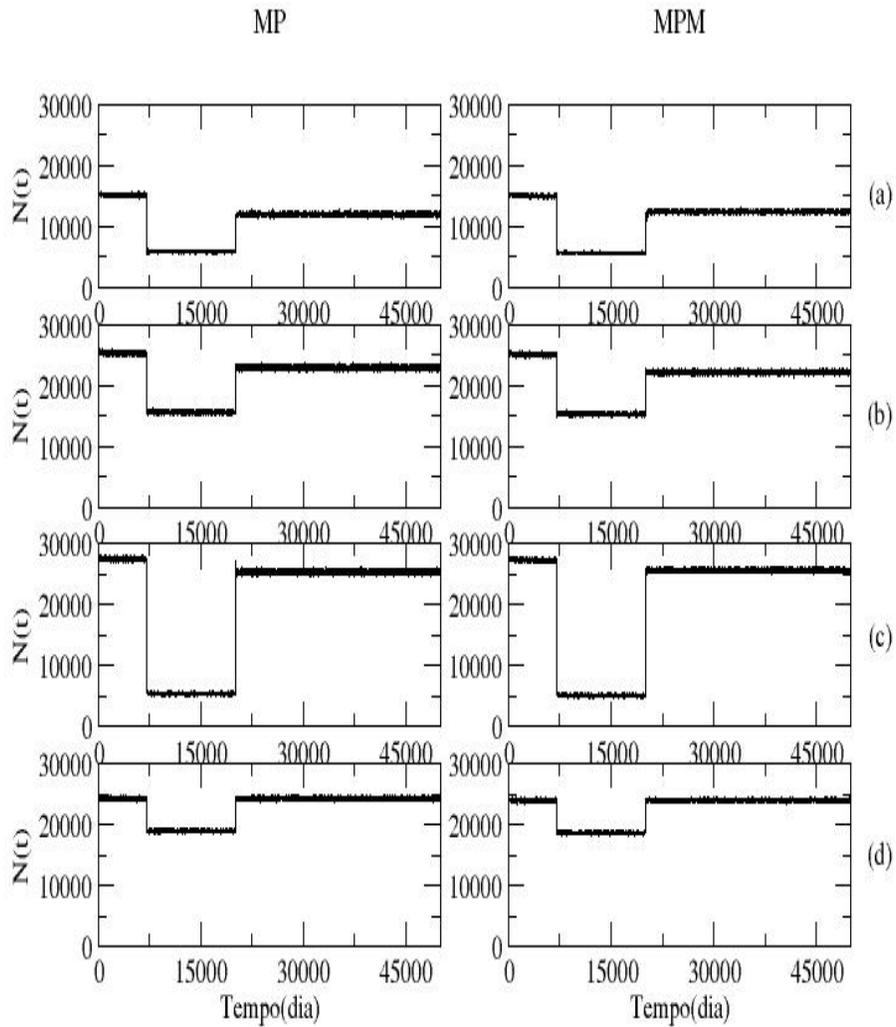


FIGURA 3.4: Evolução temporal do tamanho da população do pulgão *Aphis gossypii* obtida, por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) nas temperaturas de: (a) 15°C , (b) 20°C , (c) 25°C e (d) 30°C , sob ação do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$.

Soglia et al. (2002), avaliando o efeito da temperatura sobre *A. gossypii*, também constataram que $25^{\circ}C$ é a condição mais favorável para o desenvolvimento populacional desse pulgão. Como o sucesso do parasitóide depende da disponibilidade e da qualidade do pulgão, nessa temperatura tem-se um desenvolvimento sincronizado entre hospedeiro e parasitóide.

Embora as probabilidades de parasitismo sejam maiores a $15^{\circ}C$ e $20^{\circ}C$, nessas temperaturas, as reduções nos tamanhos populacionais, por ocasião da ação do parasitóide, foram menores em relação a $25^{\circ}C$ (Figura 3.4). Isto ocorre pois, nestas temperaturas, o parasitóide necessita de um tempo maior para completar seu ciclo (tempo de ovo a múmia). Na temperatura de $30^{\circ}C$, não houve redução no tamanho populacional, devido ao efeito combinado de baixa probabilidade de parasitismo e longo período de mumificação, demonstrando que ela foi prejudicial ao desenvolvimento do parasitóide.

Após a retirada do parasitóide ($t > 20.000$), verifica-se que a população de pulgões não restabelece seu tamanho inicial (antes da ação do parasitóide), devido à seleção dos melhores "genótipos" pelo inimigo natural. A $25^{\circ}C$, devido a uma probabilidade de parasitismo menor em relação às temperaturas de $15^{\circ}C$ e $20^{\circ}C$, a população quase restabelece seu tamanho inicial, pois neste caso existe uma probabilidade maior de bons "genótipos" escaparem da ação do parasitóide. Ao contrário, a $30^{\circ}C$, a população recupera seu tamanho inicial, e isto pode estar relacionado à baixa pressão de seleção. Sendo assim, persistem pulgões com "genótipos" bons e com alta taxa reprodutiva, restabelecendo, dessa forma, o tamanho populacional.

Na Tabela 3.5 são apresentados os tamanhos médios da população de *A. gossypii* em diferentes temperaturas, antes da ação do parasitóide e após a sua retirada. Observa-se que não existe, entre os modelos, diferença significativa na per-

centagem de redução do tamanho populacional. Como no MPM somente alguns indivíduos sobrevivem além do período reprodutivo, eles pouco afetam o tamanho médio da população de hospedeiros.

TABELA 3.5: Tamanhos médios (média $\pm\delta$) da população de *Aphis gossypii* antes da ação do parasitóide e após a sua retirada (δ : Semi-amplitude do intervalo de confiança 95%).

		Antes	Depois	Redução (%)
15 ⁰ C	MP	15131, 2 \pm 10, 85	12006, 2 \pm 2, 23	0,21
	MPM	15017, 2 \pm 10, 31	12429, 1 \pm 1, 94	0,17
20 ⁰ C	MP	25228, 6 \pm 14, 80	22895, 5 \pm 2, 41	0,09
	MPM	25000, 1 \pm 14, 45	22130, 0 \pm 2, 12	0,11
25 ⁰ C	MP	27534, 8 \pm 15, 11	25389, 3 \pm 2, 37	0,08
	MPM	27315, 4 \pm 14, 9	25693, 9 \pm 1, 85	0,06
30 ⁰ C	MP	24276, 7 \pm 12, 23	24295, 6 \pm 1, 80	0,00
	MPM	23971, 3 \pm 11, 85	23993, 5 \pm 1, 56	0,00

Nas Figuras 3.5 e 3.6 são apresentadas as evoluções temporais do tamanho populacional de *A. gossypii*, em que o parasitóide é liberado de 3.000 em 3.000 (3.000 com parasitóide e 3.000 sem parasitóide) e de 500 em 500 etapas temporais, respectivamente. Observa-se que a redução na população de pulgões após a retirada do parasitóide é maior quando as liberações são efetuadas de 3.000 em 3.000 etapas temporais (Figura 3.5). Sendo assim, essa situação em que o parasitóide é liberado a intervalos de tempo maiores (3.000 etapas temporais) e por uma quantidade menor de repetições é mais propícia para a eficiência do parasitismo. Esse fato pode ser justificado pela menor pressão de seleção verificada quando o parasitóide é liberado por um período menor (500 em 500 etapas temporais), o que permite ao "genótipo" resistente (o indivíduo não parasitado) reproduzir-se com eficiência, a ponto de restabelecer rapidamente o tamanho da população após a retirada do parasitóide (Konno et al., 2006).

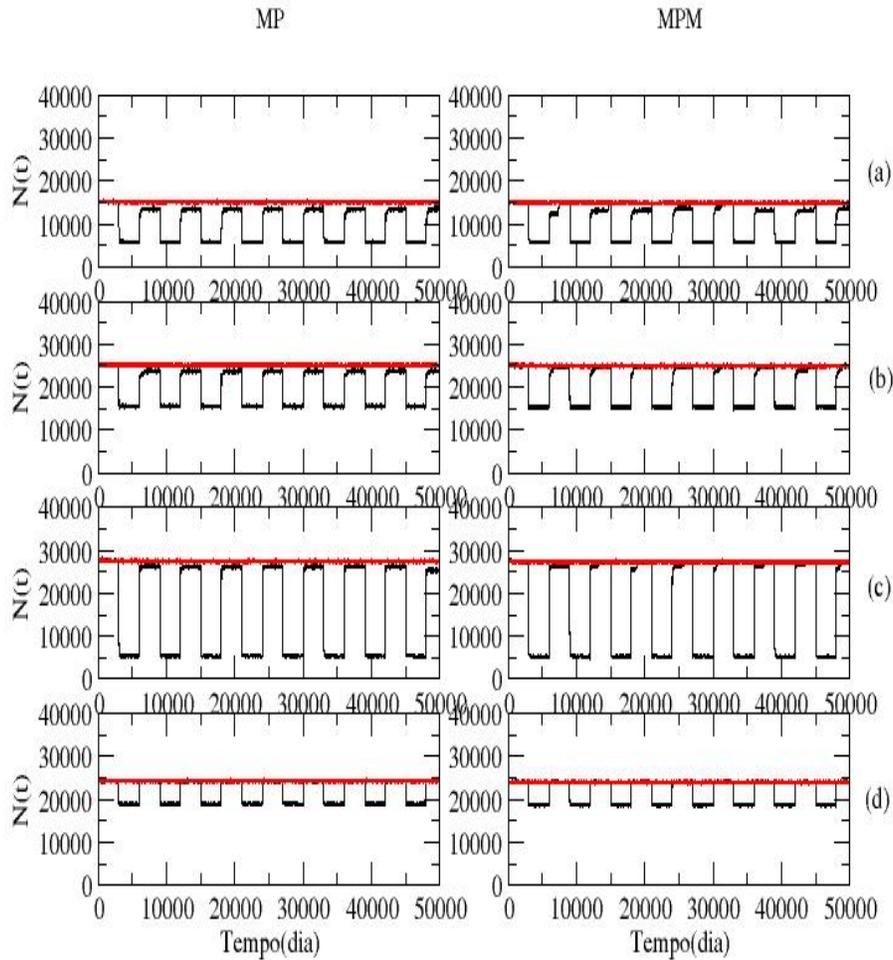


FIGURA 3.5: Evolução temporal do tamanho da população do pulgão *Aphis gossypii*, obtida, por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) nas temperaturas de (a) 15°C , (b) 20°C , (c) 25°C e (d) 30°C , em população sem (linhas vermelhas) e com (linhas pretas) ação do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes*, de 3.000 em 3.000 etapas temporais.

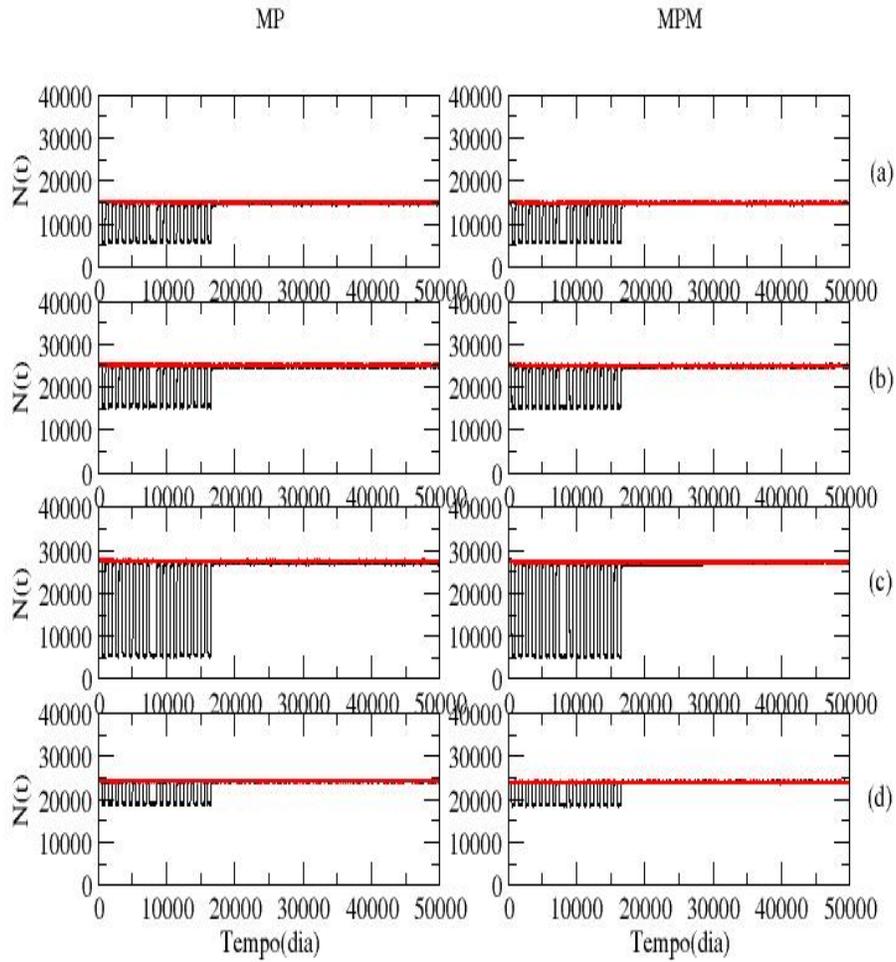


FIGURA 3.6: Evolução temporal do tamanho da população do pulgão *Aphis gossypii*, obtida, por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) nas temperaturas de (a) 15°C , (b) 20°C , (c) 25°C e (d) 30°C , em população sem (linhas vermelhas) e com (linhas pretas) ação do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes*, de 500 em 500 etapas temporais.

3.1.3 Taxa intrínseca de crescimento

Na Tabela 3.6 podem ser observados os valores médios das taxas intrínsecas de crescimento da população de *A. gossypii*. Em ambos os modelos constata-se uma redução nas taxas intrínsecas de crescimento por meio da mortalidade causada pelo parasitismo e a redução na taxa reprodutiva dos hospedeiros, conforme observado por He et al. (2005).

TABELA 3.6: Valores médios das taxas intrínsecas de crescimento da população de *Aphis gossypii* utilizando o Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM).

		Sem	Com	Redução (%)
15 ⁰ C	MP	0,163	0,118	0,27
	MPM	0,160	0,115	0,28
20 ⁰ C	MP	0,290	0,240	0,17
	MPM	0,287	0,233	0,19
25 ⁰ C	MP	0,322	0,240	0,25
	MPM	0,321	0,238	0,26
30 ⁰ C	MP	0,278	0,261	0,06
	MPM	0,274	0,255	0,07

3.2 Dinâmica de uma população fechada ($\lambda = 0$) constituída de formas ápteras e aladas ($\alpha_2 \neq 0$)

A seguir, são apresentados os resultados das simulações, na temperatura de 15⁰C, para a dinâmica de uma população fechada (não interage com a sua vizinhança) constituída das formas áptera e alada, com probabilidade de gerar alados de $\alpha_2 = 0,10$ e $\alpha_2 = 0,30$. Esses valores foram escolhidos arbitrariamente e $\alpha_2 = 0,30$ é um limiar que restabelece o tamanho da população após a retirada do parasitóide

3.2.1 Curvas de sobrevivência

Nas Figuras 3.7 e 3.8 são apresentadas as curvas de sobrevivência da população de *Aphis gossypii* para $\alpha_2 = 0, 10$ e $\alpha_2 = 0, 30$, respectivamente. Verifica-se que o aumento de produção de pulgões alados de 0, 10 para 0, 30, aumenta a probabilidade de sobrevivência desses indivíduos, visto que pulgões alados têm chances de escapar do parasitóide. Em os ambos modelos observa-se um acréscimo na longevidade quando a população sob ação do parasitóide é constituída de ápteros e alados em relação à população constituída exclusivamente de ápteros (Figura 3.3). Esse aumento se deve a redução da fecundidade devido à menor capacidade reprodutiva de formas aladas e a possibilidade de bons "genótipos" escaparem do parasitismo (Pereira & Lomônaco, 2003).

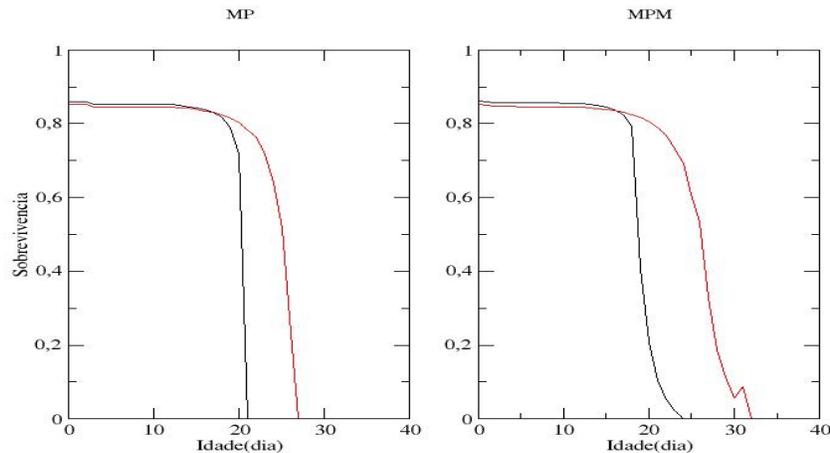


FIGURA 3.7: Curvas de sobrevivência em função da idade do pulgão *Aphis gossypii*, de forma áptera e alada, obtidas por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0, 10$ e $\lambda = 0$.

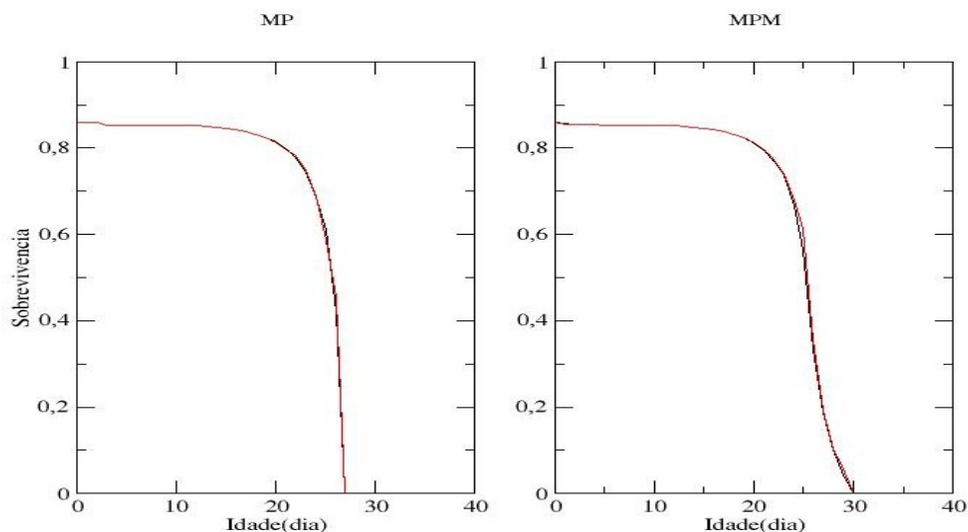


FIGURA 3.8: Curvas de sobrevivência do pulgão *Aphis gossypii*, com formas ápteras e aladas, obtidas por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de 15°C , em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0,30$ e $\lambda = 0$.

3.2.2 Tamanho populacional

Na Figura 3.9 é apresentada a evolução temporal do tamanho da população de *A. gossypii*, considerando a probabilidade de gerar alados $\alpha_2 = 0,10$. Observa-se que, após a retirada do parasitóide ($t > 20.000$), a população não restabelece seu tamanho inicial, por ocasião da ação do parasitóide, visto que, nesse caso, tem uma probabilidade menor de gerar alados ($\alpha_2 = 0,10$) e, conseqüentemente, a ação do parasitóide é maior. Observando-se a Figura 3.10, em que a probabilidade de gerar alados é maior ($\alpha_2 = 0,30$), verifica-se que, mesmo sem migração, a população é capaz de restabelecer seu tamanho. De acordo com Pereira & Lomônaco (2003), o aumento na produção de pulgões alados pode ser considerado um mecanismo de defesa, pois estes são estrategicamente capazes de manter a sobrevivência dos descendentes, escapando do parasitismo e colonizando outras plantas hospedeiras.

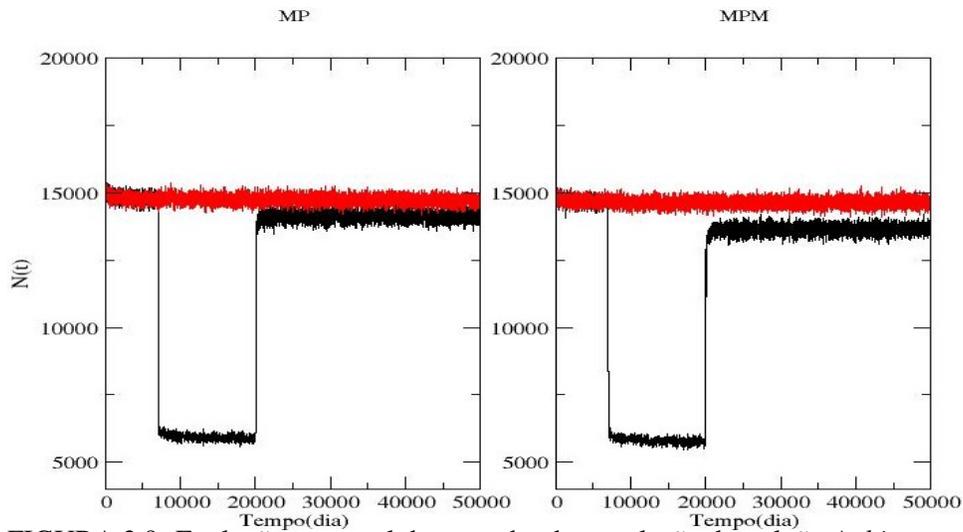


FIGURA 3.9: Evolução temporal do tamanho da população do pulgão *Aphis gossypii* de formas ápteras e aladas, obtida por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0, 10$ e $\lambda = 0$.

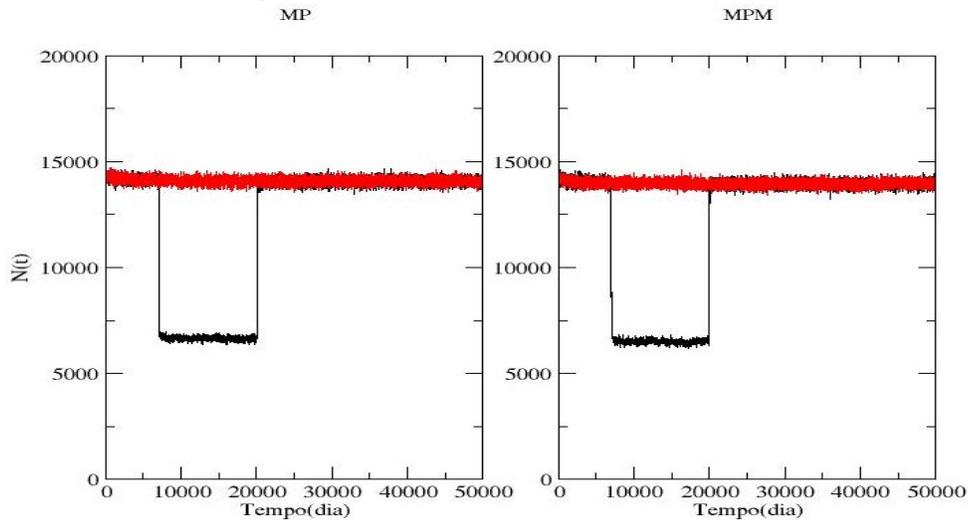


FIGURA 3.10: Evolução temporal do tamanho da população de pulgão *Aphis gossypii* de formas ápteras e aladas, obtida por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0, 30$ e $\lambda = 0$.

3.3 Dinâmica de uma população em interação com a vizinhança ($\lambda \neq 0$) constituída de formas ápteras e aladas ($\alpha_2 \neq 0$)

A seguir são apresentados os resultados das simulações para a dinâmica de uma população aberta (interage com a sua vizinhança), constituída das formas ápteras e aladas na temperatura de $15^{\circ}C$. Pulgões ápteros geram alados com probabilidade $\alpha_2 = 0,0001$. Cada pulgão alado e reprodutivo da população foi substituído, uma única vez com probabilidade $\lambda = 0,002$ (valor limiar capaz de restabelecer o tamanho da população após a retirada do parasitóide), por um pulgão alado e reprodutivo de sua vizinhança, escolhido aleatoriamente.

3.3.1 Curvas de sobrevivência

Na Figura 3.11 são apresentadas as curvas de sobrevivência de *A. gossypii*, obtidas por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) na temperatura de $15^{\circ}C$. As linhas pretas referem-se à população sob a ação do parasitóide *L. testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$ e as linhas vermelhas referem-se à sua vizinhança (população sem parasitóide). Pode-se observar que as longevidades de ambas populações não apresentam diferenças significativas, devido ao fluxo de indivíduos através do processo imigratório, que possibilita a introdução de indivíduos fecundos e longevos na população sob ação do parasitóide.

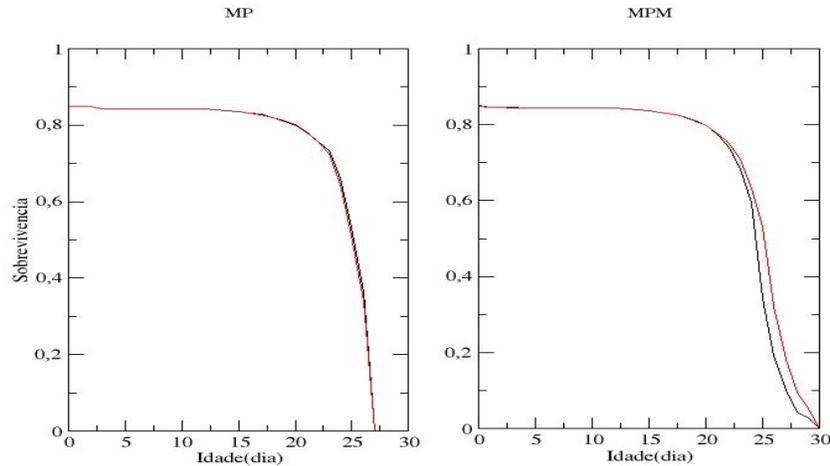


FIGURA 3.11: Curvas de sobrevivência do pulgão *Aphis gossypii*, obtidas por meio de simulação, pelo MP e MPM na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (curvas vermelhas) e com (curvas pretas) ação do parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0,0001$ e $\lambda = 0,002$.

3.3.2 Tamanho populacional

Na Figura 3.12 é apresentada a evolução temporal do tamanho da população de pulgão *A. gossypii*. As linhas pretas referem-se à população sob a ação do parasitóide *L. testaceipes* de $t = 7.000$ à $t = 20.000$ e as linhas vermelhas referem-se a sua vizinhança.

Em ambos modelos, observa-se que, após a retirada do parasitóide ($t > 20.000$), a população do pulgão recupera o seu tamanho inicial (linhas pretas) (Figura 3.12), mesmo com uma probabilidade de migração pequena ($\lambda=0,002$) e $\alpha_2 = 0,0001$. Esse restabelecimento é decorrente do processo imigratório, que possibilita a introdução de bons "genótipos" na população. Se indivíduos de mesma espécie migram de uma população para outra, poderão introduzir ali genes novos e aumentar a variabilidade genotípica da população para a qual migraram

(Dajoz, 1983).

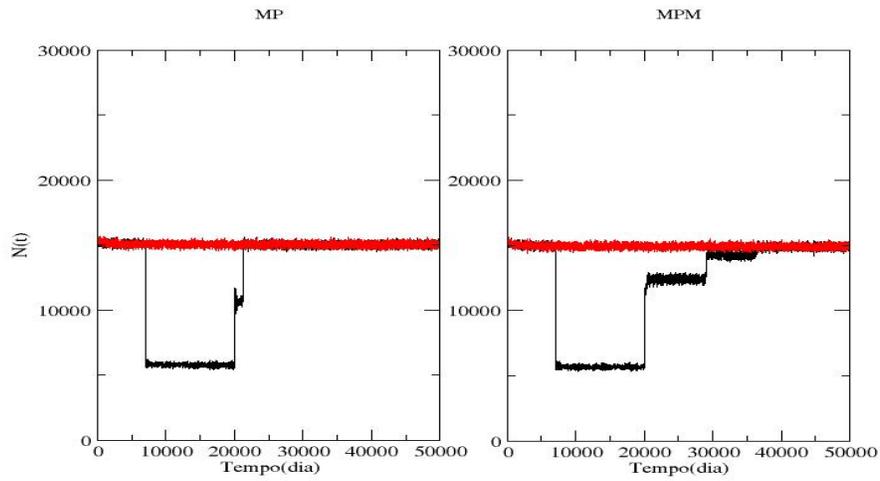


FIGURA 3.12: Evolução temporal do tamanho da população de *Aphis gossypii*, obtida por meio de simulação pelo Modelo Penna original (MP) e modificado (MPM) na temperatura de $15^{\circ}C$, em população sem (linhas vermelhas) e com (linhas pretas) ação de *Lysiphlebus testaceipes* de $t = 7.000$ a $t = 20.000$, $\alpha_2 = 0,0001$ e $\lambda = 0,002$.

4 CONCLUSÃO

Verifica-se que ambos os modelos reproduzem com eficiência aspectos da interação da dinâmica populacional hospedeiro-parasitóide. O aumento na produção de formas aladas pode ser considerado um mecanismo de defesa, como observado por Pereira & Lomônaco (2003). Em condições de campo (populações abertas), pequenas probabilidades de gerar alados devem viabilizar a sobrevivência dos descendentes. Tratando-se de casas de vegetação (populações fechadas ou migração pouco frequente), este mecanismo de defesa deve requerer um esforço maior na produção de alados, desde que os custos energéticos sejam os mesmos, em ambas as situações .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARNEVALE, A. B. **Adequabilidade de *Aphis gossypii* Glover, 1877 e *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae) a *Lysiphlebus testaceipes* Cresson, 1880 (Hymenoptera: Aphididae).** 2002. 47 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- DAJOZ, R. **Ecologia geral.** 4. ed. Petropolis: Vozes, 1983 472 p.
- DIXON, A. F. G. The way of life of aphids: host specificity, speciation and distribution. In: MINKS, A. K.; HARREWIND, P. **World Crop Pest-Aphids: Their biology, natural enemies and control.** Amsterdam: Elsevier, 1987. v. 2A, Cap. 4. 5, p. 197-207.
- GIAROLA, L. T. P.; MARTINS, S. G. F.; TOLEDO COSTA, M. C. P. Computer simulation of *Aphis gossypii* insects using Penna ageing model. **Physica A-Statistical Mechanics And Its Applications**, Amsterdam, v. 368, n. 1, p. 147-154, Aug. 2006.
- HE, X. Z.; WANG, Q.; TEULON, D. A. J. The effect of parasitism by *Aphidius ervi* on development and reproduction of the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*. **New Zealand Plant Protection**, v. 58, p. 202-207, 2005.
- KONNO, R. H.; OMOTO, E.; OMOTO, C. Custo adaptativo associado à resistência de *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae) ao inseticida carbosulfam. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 35, n. 2, p. 246-250, 2006.
- MONDOR, E. B.; ROSENHEIM J. A.; ADDICOTT J. F. Predator-induced transgenerational phenotypic plasticity in the cotton aphid. **Oecologia**, New York, v. 142, n. 1, p. 104-108, Jan. 2005.

- PEREIRA, C.; LOMÔNACO, C. Produção de formas aladas em colônias de *Brevicoryne brassicae* (L.) (Hemiptera: Aphididae) por indução do parasitóide *Diaretetiella rapae* (McIntosh) (Hymenoptera: Aphidiidae) e alguns aspectos comportamentais da interação destas espécies. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 097-102, 2003.
- RODRIGUES, S. M. M.; BUENO, V. H. P.; SAMPAIO, M. V.; SOGLIA, M. C. M. Influência da temperatura no desenvolvimento e parasitismo de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiidae) em *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 33, n. 3, p. 341-346, 2004.
- SOGLIA, M. C. M.; BUENO, V. H. P.; SAMPAIO, M. V. Desenvolvimento e sobrevivência de *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae) em diferentes temperaturas e cultivares comerciais de crisântemo. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 211-216, 2002.
- SOGLIA, M. C. M.; BUENO, V. H. P.; RODRIGUES, S. M. M. Fecundidade e longevidade de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera, Aphididae) em diferentes temperaturas e cultivares comerciais de crisântemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev). **Revista Brasileira de Entomologia**, Curitiba, v. 47, n. 1, p. 49-54, 2003.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se neste trabalho, uma versão modificada para o Modelo Penna que é capaz de reproduzir o período pós-reprodutivo observado em pulgões. No entanto, como se viu nos capítulos 3 e 4, embora a versão modificada seja mais realista, por reproduzir de maneira mais satisfatória a longevidade dos indivíduos, ambos os modelos descrevem com eficiência a dinâmica populacional de *A. gossypii*. Assim, é efetivamente possível, dessa forma, confrontar, com sucesso, os resultados dos modelos com dados experimentais.

No capítulo 4, verifica-se que a produção de formas aladas é uma estratégia defensiva, visando aumentar as chances de sobrevivência. A partir dos resultados obtidos nas simulações, verificou-se que os modelos reproduzem, com eficiência diferentes aspectos da interação hospedeiro-parasitóide, sendo, portanto, um instrumento útil de prognóstico em programas de controle biológico.

Sendo assim, pretende-se incluir outros aspectos na interação hospedeiro-parasitóide, como, por exemplo, temperatura variável, efeito da precipitação pluvial e estrutura espacial, para então confrontar os resultados com dados de campo, fornecer subsídios para modelos de previsão e obter um modelo mais realista.