



**MICHELE LUIZA DO AMARAL**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO  
PULGÃO *APHIS GOSSYPHII* GLOVER, 1877 E  
SUA INTERAÇÃO COM O PARASITOIDE  
*LYSIPHLEBUS TESTACEIPES* (CRESSON, 1880)  
EM ALGODOAL (*GOSSYPHIUM HIRSUTUM* L.)**

**LAVRAS - MG**

**2013**

MICHELE LUIZA DO AMARAL

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *APHIS GOSSYPHII*  
GLOVER, 1877 E SUA INTERAÇÃO COM O PARASITOIDE  
*LYSIPHLEBUS TESTACEIPES* (CRESSON, 1880) EM ALGODOAL  
(*GOSSYPIUM HIRSUTUM* L.)**

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

Orientadora  
Profa. Dra. Solange Gomes Faria Martins

LAVRAS - MG  
2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e Serviços  
da Biblioteca Universitária da UFLA**

Amaral, Michele Luiza do.

Dinâmica espaço-temporal do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 e sua interação com o parasitoide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) em algodão (*Gossypium hirsutum* L.) / Michele Luiza do Amaral. – Lavras : UFLA, 2013.

86 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Solange Gomes Faria Martins.

Bibliografia.

1. Modelo Penna. 2. Afídeos. 3. Simulação computacional. 4. Controle biológico. 5. Autômatos celulares. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 519.5

**MICHELE LUIZA DO AMARAL**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *APHIS GOSSYPHII*  
GLOVER,1877 E SUA INTERAÇÃO COM O PARASITOIDE  
*LYSIPHLEBUS TESTACEIPES* (CRESSON,1880) EM ALGODOAL  
(*GOSSYPIUM HIRSUTUM* L.)**

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

APROVADA em 01 de agosto de 2013.

Dra. Maria do Carmo Pacheco de Toledo Costa UFLA

Dr. Maurício Sérgio Zacarias EMBRAPA

Dra. Thelma Sáfydi UFLA

Dra. Solange Gomes Faria Martins  
Orientadora

**LAVRAS - MG  
2013**

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .	19
2.1	Importância histórica e econômica do algodão . . . . .	19
2.2	Fenologia do algodão <i>Gossypium hirsutum</i> L. . . . .	20
2.3	Biologia dos Afídeos . . . . .	22
2.4	Controle biológico . . . . .	28
2.4.1	Controle biológico do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) pelo parasitoide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> (Cresson, 1880) . . . . .	29
2.5	Modelo Penna . . . . .	32
2.6	Autômatos celulares . . . . .	36
2.7	Índice de Morisita . . . . .	37
3	METODOLOGIA . . . . .	38
3.1	Modelo Penna adaptado à biologia de <i>A. gossypii</i> em algodoeiro <i>Gossypium hirsutum</i> L. com estrutura espacial . . . . .	38
3.1.1	Dinâmica espaço-temporal com capacidade de carga variável (com ciclo de folhagem) . . . . .	40
3.1.2	Dinâmica espaço-temporal com capacidade de carga fixa (sem ciclo de folhagem) . . . . .	43
3.1.3	Parasitismo por <i>L. testaceipes</i> . . . . .	43
3.1.4	Parâmetros do modelo . . . . .	44
3.2	Cenários . . . . .	44
3.3	Apresentação dos resultados . . . . .	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	47
4.1	Análise temporal da dinâmica espaço-temporal de <i>A. gossypii</i> sem ciclo de folhagem (capacidade de carga fixa) e sem parasitismo . . . . .	47
4.1.1	Tamanho populacional . . . . .	47
4.1.2	Curvas de sobrevivência . . . . .	48
4.1.3	Taxa intrínseca de crescimento . . . . .	48
4.1.4	Duração de uma geração . . . . .	51
4.2	Análise temporal da dinâmica espaço-temporal de <i>A. gossypii</i> sem ciclo de folhagem (capacidade de carga fixa) e com parasitismo por <i>L. testaceipes</i> . . . . .	54
4.2.1	Tamanho populacional . . . . .	55
4.2.2	Curvas de sobrevivência . . . . .	55
4.2.3	Taxa intrínseca de crescimento . . . . .	56

4.2.4	Duração de uma geração . . . . .	58
4.3	Análise temporal da dinâmica espaço-temporal de <i>A. gossypii</i> com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e sem parasitismo . . . . .	59
4.3.1	Tamanho populacional . . . . .	59
4.3.2	Plantas infestadas . . . . .	60
4.3.3	Probabilidade de gerar alados . . . . .	61
4.4	Análise temporal da dinâmica espaço-temporal de <i>A. gossypii</i> com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e com parasitismo por <i>L. testaceipes</i> . . . . .	63
4.4.1	Tamanho populacional . . . . .	63
4.4.2	Plantas infestadas . . . . .	63
4.4.3	Probabilidade de gerar alados . . . . .	64
4.5	Análise espacial da dinâmica espaço-temporal de <i>A. gossypii</i> com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e sem parasitismo . . . . .	65
4.6	Análise espacial da dinâmica espaço-temporal de <i>A. gossypii</i> com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e com parasitismo por <i>L. testaceipes</i> . . . . .	73
5	CONCLUSÕES . . . . .	77
	REFERÊNCIAS . . . . .	78

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e pela conclusão deste trabalho. Aos meus pais e à minha irmã pelo apoio e amor. Também agradeço ao Paulo, pelo incentivo e compreensão. Agradeço especialmente à professora Solange pelos ensinamentos e amizade. À Universidade Federal de Lavras pela oportunidade de estudo e à FAPEMIG pelo apoio financeiro. Aos membros da banca pela contribuição. Aos funcionários, professores e amigos do Departamento de Ciências Exatas. Aos meus amigos em geral, mas de maneira especial à Aninha pelo amparo e à Giulia por toda a ajuda e disponibilidade.

## RESUMO

O algodão herbáceo é considerado a fibra têxtil mais importante da atualidade, o que torna sua cultura uma das mais visadas no mercado agrícola. Porém, um dos principais problemas enfrentados pelos agricultores é a disseminação de pragas e doenças que danificam suas plantações. Entre a diversidade de pragas do algodoeiro, o pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) tem se destacado, pois essa espécie é responsável pela transmissão de um grande número de viroses às plantas, podendo provocar grandes reduções na produção. O interesse comercial em criar um controle satisfatório para o pulgão impulsiona os estudos sobre o comportamento de sua dinâmica populacional. Um modelo simples para o envelhecimento e particularmente adequado para aplicação em computadores é o "Modelo Penna", baseado em variáveis booleanas e técnicas de manipulação de bits. Devido à fácil implementação em computadores, o modelo de envelhecimento Penna (PENNA, 1995) é extremamente apropriado para simulações numéricas da dinâmica populacional dos afídeos. Este trabalho tem como objetivo mostrar a utilização do modelo Penna modificado baseado no trabalho de Souza, Martins e Zacarias (2009) para o estudo do pulgão *A. gossypii* em plantação de algodão *Gossypium hirsutum* L. em temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C e sua interação com o parasitoide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) na temperatura de 25 °C, considerando-se estrutura espaço-temporal, para compreender a dinâmica do pulgão nessas diferentes faixas de temperatura. Os resultados obtidos indicam que os dados gerados a partir de simulações computacionais com o ajuste dos parâmetros populacionais desse afídeo é uma boa ferramenta para estudos do comportamento ao longo do tempo e espaço dessa espécie, sendo próximos aos dados experimentais.

Palavras-chave: Modelo Penna. Afídeos. Controle biológico. Simulação computacional. Autômatos celulares.

## ABSTRACT

The herbaceous cotton is considered the most important textile fiber nowadays, its culture being one of the most targeted in the agricultural market. However, one of the main problems faced by farmers is the spread of pests and diseases that damage their crops. Among the diversity of cotton pests, the aphid *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) has been highlighted because this species is responsible for transmitting a large number of viral diseases to plants, possibly causing large reductions in production. Commercial interest in creating a satisfactory control for aphid has driven behavior studies of dynamic population. A simple model for aging, and particularly suitable for application on computers is the "Penna Model", based on Boolean variables and techniques of bit manipulation. Due to the easy implementation on computers, the Penna aging model (PENNA, 1995) is extremely suitable for numerical simulations of the dynamics of aphid populations. This paperwork had as a goal the utilization of the modified Penna model based on the work of Souza, Martins e Zacarias (2009) for the study of the aphid *A. gossypii* on cotton plantation *Gossypium hirsutum* L. at temperatures of 10, 15, 20, 25, 30 and 35 C and its parasitoid interaction *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) in the temperature 25 ° C, considering spatio-temporal structure, to understand the aphid dynamics in these different temperature ranges. The results indicate that data generated from computer simulations with adjustment population parameters of this aphid is a good tool to study the behavior over time and space of this specie, being close to the experimental data.

Keywords: Penna Model. Aphids. Biological control. Computer simulation. Cellular automata.

### Lista de Figuras

Figura 1	Algodoeiros já desfolhados e prontos para a colheita . . . . .	21
Figura 2	Pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) . . . . .	22
Figura 3	<i>Aphis gossypii</i> Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) áptero na fase ninfa . . . . .	24
Figura 4	<i>Aphis gossypii</i> Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) áptero na fase adulta . . . . .	25
Figura 5	<i>Aphis gossypii</i> Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) alado . . . . .	25
Figura 6	Ciclo de vida holocíclico (completo) de pulgões . . . . .	26
Figura 7	Ciclo de vida anolocíclico (incompleto) de pulgões . . . . .	26
Figura 8	Exemplo de controle por inimigo natural. <i>Hippodamia convergens</i> (Guérin, 1842) predando pulgão . . . . .	29
Figura 9	Fêmea adulta (acima) e macho adulto (abaixo) do parasitoide <i>Lysiphlebus testaceipes</i> (Cresson, 1880) . . . . .	30
Figura 10	<i>Lysiphlebus testaceipes</i> (Cresson, 1880) parasitando <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera: Aphididae) . . . . .	30
Figura 11	Esquema do ciclo de vida do parasitoide <i>Lysiphlebus Testaceipes</i> (Cresson, 1880) em <i>Aphis Gossypii</i> Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) . . . . .	31
Figura 12	Exemplo de tira de bits. Cada posição representa um intervalo de tempo na vida do indivíduo. Nesse exemplo, mutações deletérias irão se manifestar nas idades 4, 5 e 7. A leitura é feita da direita para esquerda e iniciando em zero, inspirada pela representação dos bits no computador . . . . .	34

Figura 13	Exemplo do "genótipo" do filho, as idades sorteadas foram 2 e 6. Na posição 2 havia o bit setado em 1 e assim ele permaneceu, já na posição 6 o bit era setado em 0 e a mutação deletéria foi inserida	35
Figura 14	Exemplos das regras de vizinhança de Von Neumann (esquerda) em que os vizinhos são aqueles autômatos que possuem arestas coincidentes e de Moore (direita) em que os vizinhos são aqueles autômatos que possuem vértices e arestas coincidentes . . . . .	37
Figura 15	Exemplo das opções de migração quando o pulgão se encontra em algum dos sítios extremos da rede de acordo com as regras de vizinhança de Von Neumann . . . . .	40
Figura 16	Exemplo das opções de migração quando o pulgão se encontra em algum dos sítios pertencentes à borda da rede de acordo com as regras de vizinhança de Von Neumann . . . . .	40
Figura 17	Exemplo das opções de migração quando o pulgão se encontra em algum dos sítios centrais da rede de acordo com as regras de vizinhança de Von Neumann . . . . .	41
Figura 18	Gráfico da capacidade de carga da planta em função da idade (dias) considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem . . . . .	42
Figura 19	Curvas de sobrevivência de <i>Aphis gossypii</i> Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) para as diferentes temperaturas . . . . .	49
Figura 20	Longevidade do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) em função de cada temperatura. Curva da dinâmica espaço-temporal (círculo), curva da dinâmica temporal (estrela) e curva experimental (quadrado) . . . . .	50

Figura 21	Valor médio da taxa intrínseca de crescimento de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) no algodoeiro nas diferentes temperaturas. Curva da dinâmica espaço-temporal (círculo), curva da dinâmica temporal (estrela) e curva experimental (quadrado)	52
Figura 22	Duração média (em dias) de uma geração de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) nas diferentes temperaturas. Curva da dinâmica espaço-temporal (círculo), curva da dinâmica temporal (estrela) e curva experimental (quadrado)	53
Figura 23	Duração média (em dias) de uma geração de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) em função da longevidade. Curva da dinâmica espaço-temporal (círculo), curva da dinâmica temporal (estrela) e curva experimental (quadrado)	54
Figura 24	Evolução temporal do tamanho populacional de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) na temperatura de 25 °C sem parasitismo (cinza) e com parasitismo (preto)	56
Figura 25	Curvas de sobrevivência de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para 25 °C. Curva sem parasitismo (linha contínua) e com parasitismo (linha pontilhada)	57
Figura 26	Evolução temporal da taxa intrínseca de crescimento de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) na temperatura de 25 °C sem parasitismo (cinza) e com parasitismo (preto)	58
Figura 27	Evolução temporal do tamanho da população de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para todas as temperaturas considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem	60

Figura 28	Evolução temporal da porcentagem de plantas infestadas por <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para todas as temperaturas considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem . . . . .	61
Figura 29	Evolução temporal da probabilidade de gerar alados para todas as temperaturas considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem . . . . .	62
Figura 30	Curvas da evolução temporal do tamanho da população de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para a temperatura de 25 °C sem (círculo) e com (estrela) a presença do parasitoide <i>L. testaceipes</i> considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem . . . . .	64
Figura 31	Curvas da porcentagem de plantas infestadas por <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para a temperatura de 25 °C sem (círculo) e com (estrela) a presença do parasitoide <i>L. testaceipes</i> (Cresson,1880) considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem . . . . .	65
Figura 32	Curvas da evolução temporal da probabilidade de gerar alados para a temperatura de 25 °C sem (círculo) e com (estrela) a presença do parasitoide <i>L. testaceipes</i> considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem . . . . .	66
Figura 33	Distribuição espacial da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem (d) na temperatura de 10 °C . . . . .	67

Figura 34	Distribuição espacial da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem (d) na temperatura de 15 °C . . . . .	69
Figura 35	Distribuição espacial da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 20 °C . . . . .	70
Figura 36	Distribuição espacial da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 25 °C . . . . .	71
Figura 37	Distribuição espacial da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 30 °C . . . . .	73
Figura 38	Distribuição espacial da população do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 35 °C . . . . .	74

Figura 39 Distribuição espacial da população do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 dias após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 25 °C com presença de parasitismo . . . . . 75

### Lista de Tabelas

Tabela 1	Duração do estágio ninfal ( $\alpha$ ), período pré-reprodutivo ( $\beta$ ), longevidade ( $L$ ), em dias, fecundidade total por fêmea ( $B$ ) e fecundidade diária por fêmea ( $b$ ) de <i>Aphis gossypii</i> Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) no algodoeiro em diferentes temperaturas (médias $\pm$ o intervalo de confiança 95 %). . . . .	27
Tabela 2	Taxa intrínseca de crescimento ( $r_m$ ) e duração em dias de uma geração ( $\tau$ ) de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) no algodoeiro em diferentes temperaturas. . . . .	27
Tabela 3	Porcentagem de parasitismo e período da ovoposição à formação da múmia (em dias) à temperatura de $25 \pm 1$ °C(médias $\pm$ semi-amplitude do intervalo de confiança a 95%). . . . .	32
Tabela 4	Idade mínima de reprodução ( $R$ ), idade máxima de reprodução ( $RX$ ), em dias, e fecundidade diária ( $b$ ) do pulgão <i>Aphis Gossypii</i> em diferentes temperaturas. . . . .	45
Tabela 5	Tamanho da população de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) na ausência de parasitismo para diferentes temperaturas (médias $\pm$ o intervalo de confiança a 95%). . . . .	48
Tabela 6	Longevidade, em dias, do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para cada temperatura (médias $\pm$ o intervalo de confiança a 95%). . . . .	49
Tabela 7	Valor médio da taxa intrínseca de crescimento do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para as diferentes temperaturas (médias $\pm$ o intervalo de confiança a 95%). . . . .	51
Tabela 8	Média de duração de uma geração em dias do pulgão <i>Aphus gossypii</i> Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae). . . . .	53

Tabela 9	Média do tamanho populacional de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera: Aphididae) no algodoeiro sem parasitismo e com parasitismo por <i>Lysiphlebus testaceipes</i> (Cresson, 1880) (médias $\pm$ o intervalo de confiança a 95%). . . . .	55
Tabela 10	Valor médio da taxa intrínseca de crescimento para <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) no algodoeiro sem parasitismo e com parasitismo por <i>Lysiphlebus testaceipes</i> (Cresson, 1880) (médias $\pm$ os intervalos de confiança a 95%) . . . . .	57
Tabela 11	Duração (em dias) de uma geração de <i>Aphis gossypii</i> Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) no algodoeiro sem parasitismo e com parasitismo por <i>Lysiphlebus testaceipes</i> (Cresson, 1880) (médias $\pm$ as semi-amplitudes do intervalo de confiança a 95%) . . . . .	59
Tabela 12	Índice de Morisita calculado para os 10 dias após o surgimento de folhagem, 20 dias após o surgimento de folhagem, 54 dias após o surgimento de folhagem e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C . . . . .	68
Tabela 13	Índice de Morisita calculado para os 10 dias após o surgimento de folhagem, 20 dias após o surgimento de folhagem, 54 dias após o surgimento de folhagem e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura de 25 °C com presença de parasitismo . . . . .	76

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura do algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L.) é uma das maiores riquezas do setor agrícola mundial, sendo a pluma a mais importante fibra têxtil (BRITO, 2005). O Brasil se encontra como um dos maiores produtores mundiais. A região centro-oeste destaca-se na produção nacional, sendo Mato Grosso e Goiás os maiores produtores de algodão herbáceo (FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO - FNP, 2004).

Em 2013, estimou-se uma produção de aproximadamente 1.400 mil toneladas de algodão em pluma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE ALGODÃO - ABRAPA, 2013). Vale ainda ressaltar que a participação do consumo da fibra de algodão no contexto geral da produção de fios foi da ordem de 80%. No segmento de tecelagem, 58% do fio utilizado na fabricação de tecidos são de algodão, 39% de fios artificiais e sintéticos e 3% de fios oriundos de outras fibras naturais. Por outro lado, no segmento de fabricação de malharia, 51,2% do fio utilizado é de algodão, 48,7% de fibras artificiais ou sintéticas e 0,01% de outras fibras naturais (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2012).

Entre a diversidade de pragas do algodoeiro, o pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) tem se destacado pelo aumento da resistência aos inseticidas e escape à predação e ao parasitismo por inimigos naturais, podendo provocar reduções na produção (PESSOA et al., 2004). Segundo Pereira, Albuquerque e Bastos (2006), quando não controlado, *Aphis gossypii* pode reduzir a produção do algodoeiro em cerca de 44%, considerando-se apenas as perdas qualitativas e quantitativas, sem contabilizar as perdas decorrentes da transmissão de viroses. Esses insetos-pragas são responsáveis pela transmissão de um grande número de viroses às plantas, causando os maiores danos em áreas protegidas e

culturas no campo (SOUZA; MARTINS; ZACARIAS, 2009).

O endoparasitoide solitário *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson: 1880) é uma das espécies mais comuns na América do Sul (STARÝ; SAMPAIO; BUENO, 2007) e com grande potencial para ser usado na manutenção em sistemas de criação aberta (RODRIGUES; BUENO; BUENO FILHO, 2001) e em programas de controle biológico de afídeos, além de ser responsável por taxas de parasitismo acima de 50 % em *A. gossypii* (RODRIGUES; BUENO, 2001; RODRIGUES et al., 2004).

Neste trabalho, tratar-se-á da dinâmica populacional espaço-temporal do pulgão *A. gossypii* em temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C em culturas de algodão e também sua interação com o parasitoide *L. testaceipes* na temperatura de 25 °C. A evolução espaço-temporal de uma população de pulgões *Aphis Gossypii* no algodoeiro em diferentes temperaturas será representada considerando-se sua área foliar (BRITO, 2005), na qual cada planta em uma rede quadrada  $n \times n$  é chamada de sítio. Para cada temperatura verificar-se-á os efeitos nas curvas de sobrevivência e mortalidade, as taxas de crescimento intrínseco, os efeitos na capacidade de carga das plantas e tamanho populacional, considerando-se as formas ápteras e aladas do *A. gossypii*. Além disso, pretende-se trabalhar com o índice de Morisita, a fim de explorar a dependência espacial e determinar o tipo de padrão espacial com a finalidade de colaborar com as pesquisas relacionadas ao manejo de pragas e uso de inimigos naturais em plantações de algodão.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, é apresentada uma revisão de literatura acerca da cultura do algodão, da biologia do pulgão *A. gossypii*, do controle biológico do pulgão pelo parasitoide *L. testaceipes*, da modelagem e do índice de Morisita representado nos resultados.

### 2.1 Importância histórica e econômica do algodão

A cultura do algodão (Figura 1), desde o seu descobrimento, passou por diferentes situações, momentos de crise e sucesso. Nos meados do século *XVIII*, com a revolução industrial, o algodão foi transformado na principal fibra têxtil e no produto mais importante das Américas. Em seguida o Brasil voltou a se projetar como grande produtor de algodão, devido à Guerra Civil Americana nos Estados Unidos. Todavia, esta fase foi passageira, e com a restauração da produção algodoeira norte-americana a cultura regrediu em todo o Brasil. Até esta fase, a produção brasileira era dedicada essencialmente ao cultivo de algodoeiro arbóreo (perene). No final do século *XIX*, com a introdução de algodão herbáceo (ciclo anual), iniciou-se o seu cultivo. A produção de algodão no Brasil se destacou em duas regiões distintas: a região meridional, onde se concentrou o algodoeiro herbáceo (anual) e a região setentrional, onde se concentrou o algodoeiro arbóreo (perene) (YAMAOKA, 2013).

Uma das grandes vantagens dessa atividade é que mais de 75% do custo de produção é com mão-de-obra, o que significa ocupação para milhares de trabalhadores rurais. O algodão produzido pelas pequenas propriedades na região Nordeste é todo colhido a mão, o que proporciona, quando essa operação é bem feita, a obtenção de um produto de elevada qualidade intrínseca. Os pequenos

produtores de algodão herbáceo no Nordeste têm grande tradição com o cultivo dessa malvácea e utilizam muito pouco insumos, principalmente fertilizantes inorgânicos, herbicidas e inseticidas. Essa região apresenta grande vantagem com relação às demais áreas de produção do Brasil, devido ao custo de produção bem menor, o que eleva a rentabilidade. O algodão é um produto que tem mercado garantido dentro da própria região Nordeste e não é perecível, o que se constitui em uma grande vantagem para o produtor (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2012).

A fertilidade do solo, a incidência de pragas e o aparecimento de doenças são fatores controláveis que interferem fortemente no desenvolvimento do algodoeiro. As pragas constituem, dentre outros fatores, como as doenças causadas por fungos e bactérias, um dos limitantes para a exploração e produção do algodão. Se não forem tomadas medidas eficientes de controle, podem ocasionar perdas consideráveis à produção de algodão (EMBRAPA, 2008).

Dentre as pragas, *Aphis gossypii*, Glover 1877 (Hemiptera: Aphididae) é o mais comum e prejudicial entre os pulgões que infestam a cultura do algodoeiro, ocorrendo logo após a germinação das plantas e permanecendo até o fim do ciclo da cultura (MICHELOTTO; BUSOLI, 2003).

## **2.2 Fenologia do algodão *Gossypium hirsutum* L.**

O êxito da cultura do algodão é assegurado através da dependência das interações de fatores genéticos, além de fatores controláveis e incontroláveis do ambiente (FUZZATO, 1987).

Para se ter sucesso na germinação do algodoeiro devem prevalecer condições térmicas e hídricas que permitam à semente, em suas condições normais, emergir entre 5 e 10 dias. Essa malvácea necessita para emergência e estabelecimento,



Figura 1 Algodoeiros já desfolhados e prontos para a colheita

temperaturas do solo superior a 20°C e temperaturas do ar entre 25 e 30°C (MARUR, 1993).

Após a emergência do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) inicia-se o desenvolvimento vegetativo com formação de folhas que tem como principal função a interceptação da luz solar e produção de fotoassimilados (BELTRÃO; AZEVEDO, 2008).

O surgimento dos botões florais e a formação das flores são funções do crescimento vegetativo, devido ao aparecimento sucessivo de ramos frutíferos e de pontos florais nos ramos existentes. Para o bom desenvolvimento do algodoeiro, é preciso interação entre o crescimento vegetativo e o frutífero que são afetados pelas condições do ambiente, umidade e fertilidade do solo (MAUNEY, 1966). Uma seca nessa fase faz com que a planta estacione o seu crescimento. Se a seca não for muito severa poderá haver recuperação do crescimento. O estresse hídrico, em determinadas fases fenológicas, pode comprometer o rendimento e a qualidade do produto (NÁPOLES et al., 1999).

Durante a fase compreendida entre o aparecimento da primeira flor ao

primeiro capulho tem-se como principal objetivo a fixação do maior número possível de maçãs, as quais já se encontram, em sua maioria, em fase de maturação. Nesse período, a competição entre crescimento vegetativo e reprodutivo é o principal ponto a ser levado em consideração. O crescimento da planta continua ocorrendo de forma linear, a qual atinge sua altura máxima e também a máxima interceptação de luz (SILVA et al., 2011).

O desenvolvimento da cultura finaliza na fase entre o surgimento do primeiro capulho à colheita e dura de 4 a 6 semanas, dependendo da produtividade, suprimento de água, nutrientes e temperatura. É nessa fase também, que se faz a aplicação de desfolhantes/maturadores (ROSOLEM, 2001). Os desfolhantes reduzem a umidade, o amarelecimento, impureza e incidência de manchas na fibra do algodão melhorando, assim, a sua classificação (SILVA et al., 2011).

### 2.3 Biologia dos Afídeos



Figura 2 Pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae)

Os afídeos são insetos vivíparos que, nas condições climáticas tropicais, se reproduzem principalmente por partenogênese telítoca, tipo de reprodução em que não há participação do macho e todos os descendentes são fêmeas (BLACKMAN, 1987; DIXON, 1977; GALLO et al., 2002).

O aparelho bucal dos pulgões é formado por dois pares de estiletos (mandíbu-

lares e maxilares) e classifica-se como picador sugador, sendo adaptado para penetração de tecidos e extração de nutrientes (COSTA, 1998; PONSEN, 1977). A alimentação dos pulgões é altamente especializada. A penetração dos estiletos se dá intercelularmente e, algumas poucas vezes, intracelularmente, buscando atingir os tecidos do floema das suas plantas hospedeiras. Assim, a seiva supre toda a necessidade nutricional desses insetos. Por outro lado, essa dependência inseto/planta é revertida em limitações, do ponto de vista evolutivo de ambos, devido aos danos causados às plantas e, conseqüentemente, à evolução da espécie e sua distribuição geográfica pela falta de alimento de boa qualidade (DIXON, 1998).

O aparelho digestivo dos afídeos difere, anatomicamente, dos demais insetos pela presença da câmara-filtro, necessária para armazenar nutrientes e substâncias antes da digestão. Essa câmara permite que o excesso de líquido sugado passe diretamente da parte inicial para a parte final do tubo digestivo, sendo eliminado pelo ânus em forma de gotículas. Por esta razão é possível a sucção contínua da seiva, pois só é aproveitado pelos insetos um suco alimentar concentrado e de fácil absorção (GALLO et al., 2002).

A sucção da seiva causa o definhamento e enfezamento (fraqueza) das plantas, e assim compromete a produção e a qualidade da fibra, que também é comprometida devido à excreção de solução açucarada pelos pulgões, permitindo o desenvolvimento da fumagina que interfere na fotossíntese. O principal dano que causam é a transmissão de doenças viróticas. Estes insetos são vetores causadores de doenças virais como o vermelhão-do-algodoeiro e o mosaico-das-nervuras (DEGRANDE, 1998).

Os pulgões possuem um meio eficiente de dispersão e colonizam rapidamente novas plantas. Ninfas e adultos ápteros (sem asas) podem caminhar sobre as

folhas ou solo, e isso causa redistribuição demográfica da população. Já os alados (com asas) podem voar e serem levados a notáveis distâncias por correntes de ar, sendo assim responsáveis pela dispersão da espécie (ROBERT, 1987).

A reprodução de pulgões é maior quando as temperaturas são ideais, quando as monoculturas de plantas hospedeiras favorecidas são cultivadas e quando esses hospedeiros estão em seu estágio de desenvolvimento mais nutritivo (TATCHELL; PARKER, 1990).

O pulgão *A. gossypii* (Figura 2) possui alta capacidade de se reproduzir e todos os indivíduos são ápteros (Figuras 3 e 4) no início da formação de colônias, mas devido ao alto número de indivíduos e, por consequência, a diminuição da qualidade do alimento, esses pulgões liberam um feromônio que induz a formação de indivíduos alados (Figura 5) (BUENO, 2005).



Figura 3 *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) áptero na fase ninfa

Fonte: Souza (2007)

Em lugares onde o clima é temperado, o pulgão *A. gossypii* se reproduz também de forma sexuada, enquanto lugares que, assim como o Brasil e casas de vegetação, possuem clima tropical, a reprodução ocorre de forma assexuada. Na reprodução sexuada, antes de se reproduzirem, as fêmeas são fecundadas,



Figura 4 *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) áptero na fase adulta

Fonte: Souza (2007)



Figura 5 *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) alado

Fonte: Souza (2007)

originando descendentes com ciclo de vida holocíclico (Figura 6). Já na reprodução assexuada, sem que tenham sido fecundadas as fêmeas procriam, originando apenas descendentes fêmeas geneticamente iguais às mães, conhecidas como clones e com ciclo de vida anolocíclico (Figura 7) (ILHARCO, 1992).

Dixon (1987) relata que uma mudança na temperatura resulta em uma alteração na taxa reprodutiva, assim como na longevidade dos afídeos. Segundo

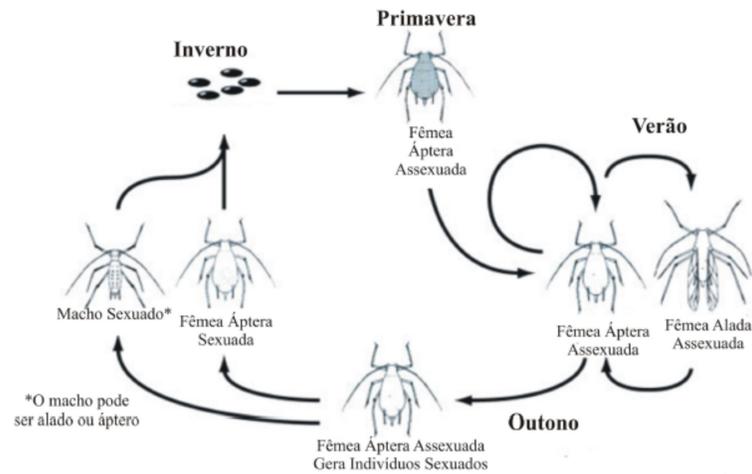


Figura 6 Ciclo de vida holocíclico (completo) de pulgões  
Fonte: Souza (2007)

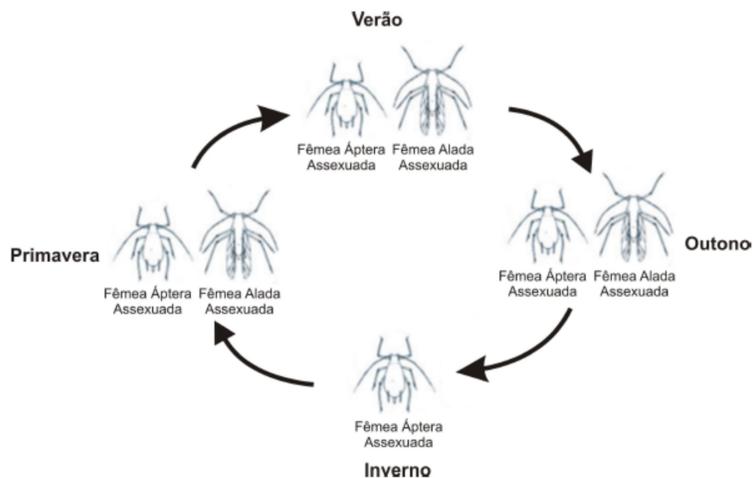


Figura 7 Ciclo de vida anolocíclico (incompleto) de pulgões  
Fonte: Souza (2007)

Pedigo e Zeiss (1996 citados por RODRIGUES et al., 2004), para a maioria das espécies a faixa tolerável está entre 10°C e 38°C e, com o incremento da temperatura até um determinado limite, a taxa de desenvolvimento e a duração em

um estágio específico diminuam.

Alguns parâmetros biológicos de *A. gossypii* sobre o algodoeiro em diferentes temperaturas foram obtidos através de experimentos conduzidos em laboratório por Xia, Werf e Rabbinge (1999). Esses valores estão representados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 Duração do estágio ninfal ( $\alpha$ ), período pré-reprodutivo ( $\beta$ ), longevidade ( $L$ ), em dias, fecundidade total por fêmea ( $B$ ) e fecundidade diária por fêmea ( $b$ ) de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) no algodoeiro em diferentes temperaturas (médias  $\pm$  o intervalo de confiança 95 %).

Fonte: Xia, Werf e Rabbinge (1999)

$\theta(^{\circ}\text{C})$	$\alpha$	$\beta$	$L$	$B$	$b$
10	23,00 $\pm$ 1,76	3,20 $\pm$ 0,55	53,40 $\pm$ 7,06	6,10 $\pm$ 1,69	0,40 $\pm$ 0,27
15	13,00 $\pm$ 1,00	2,40 $\pm$ 0,47	38,40 $\pm$ 4,90	21,40 $\pm$ 2,50	1,20 $\pm$ 0,20
20	8,50 $\pm$ 0,39	1,00 $\pm$ 0,20	24,20 $\pm$ 2,94	24,60 $\pm$ 2,00	2,20 $\pm$ 0,24
25	5,00 $\pm$ 0,20	0,60 $\pm$ 0,08	15,80 $\pm$ 1,96	28,30 $\pm$ 2,50	3,10 $\pm$ 0,25
30	4,60 $\pm$ 0,18	0,60 $\pm$ 0,12	12,00 $\pm$ 1,37	14,60 $\pm$ 1,40	2,70 $\pm$ 0,39
35	5,40 $\pm$ 0,39	0,90 $\pm$ 0,20	10,20 $\pm$ 0,78	4,00 $\pm$ 0,35	1,70 $\pm$ 0,41

Tabela 2 Taxa intrínseca de crescimento ( $r_m$ ) e duração em dias de uma geração ( $\tau$ ) de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) no algodoeiro em diferentes temperaturas.

Fonte: Xia, Werf e Rabbinge (1999)

$\theta(^{\circ}\text{C})$	$r_m$	$\tau$
10	0,03	28,90
15	0,14	18,50
20	0,25	11,40
25	0,39	8,30
30	0,36	6,40
35	0,09	7,60

## 2.4 Controle biológico

Segundo Parra et al. (2002), o controle biológico assume importância cada vez maior em programas de Manejo Integrado de Pragas (MIP), principalmente em um momento que se discute muito a produção integrada rumo a uma agricultura sustentável. O Manejo Integrado de Pragas é a concomitância dos métodos de controle com princípios ecológicos, econômicos e sociais, procurando menor interferência possível no agroecossistema e tem como conceito o controle ambiental racional das pragas infestantes, com o intuito de eliminar as infestações utilizando o mínimo possível de defensivos químicos (BOARETTO; BRANDÃO, 2012).

Os afídeos são considerados um problema na agricultura por várias razões, mas essencialmente por causa dos grandes e devastadores danos que causam a culturas cultivadas (DION; POLIN, 2011), sendo o principal deles a transmissão de viroses às plantas. A capacidade de dano desses insetos é elevada devido ao alto potencial biótico e toxidez da saliva para as plantas. Em ataques intensos, podem levar as plantas à morte (GASSEN, 1984; SALVADORI; TONET, 2001).

O uso intensivo de inseticidas químicos para o controle de pragas-chave frequentemente causa distúrbios nas cadeias tróficas que previnem a explosão populacional de pragas secundárias, alterando interações importantes na regulação populacional de espécies fitófagas (SUJII et al., 2007).

A preservação e manutenção dos inimigos naturais (Figura 8) são imprescindíveis para estabelecer o equilíbrio biológico e reduzir os custos de produção (GRAVENA, 1983). A adaptabilidade às condições climáticas está entre os fatores chaves, influenciando o sucesso de parasitoides em programas de controle biológico (RODRIGUES et al., 2004).



Figura 8 Exemplo de controle por inimigo natural. *Hippodamia convergens* (Guérin, 1842) predando pulgão

#### 2.4.1 Controle biológico do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) pelo parasitoide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880)

Parasitoide, de acordo com a entomologia, é um inseto que completa o seu ciclo em um hospedeiro e, normalmente, mata esse hospedeiro. Dentre os inimigos naturais de pulgões, destaca-se o endoparasitoide solitário *L. testaceipes* (Figura 9) (CARNEVALE; BUENO; SAMPAIO, 2003).

*L. testaceipes* é uma espécie de grande potencial para controle biológico de diferentes espécies de pulgões, sendo um deles o *A. gossypii* (Figura 9). Esse potencial se justifica por apresentar propriedades importantes para um efetivo inimigo natural, como alta capacidade reprodutiva, curto tempo de geração, boa capacidade de dispersão e ciclo de vida bem sincronizado com aquele de seus afídeos hospedeiros (MACKAUER; WAY, 1976).

Esse afidiíneo parasita todos os estágios dos pulgões, exceto os ovos, e não demonstra preferência por ínstares específicos do hospedeiro (HAGVAR; HOF SVANG, 1991; STARÝ, 1988). Sendo assim, ele faz com que a população de pulgões diminua por meio da mortalidade direta causada pelo parasitismo e pela redução na taxa reprodutiva dos hospedeiros (KRING; KRING, 1988; STARÝ,

1988).



Figura 9 Fêmea adulta (acima) e macho adulto (abaixo) do parasitoide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880)



Figura 10 *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) parasitando *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae)

Intencionada a parasitar o pulgão, a fêmea do parasitoide o encontra, avalia e deposita um ovo no corpo do hospedeiro através de um ovipositor (Figura 10). A larva passa por quatro ínstares no interior do pulgão (Figura 11). 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, na superfície onde ele se encontra. Ao final desse ínstar, tece um casulo dentro do afídeo e se transforma em pupa. O pulgão parasitado passa a ser chamado de múmia. O adulto emerge dessa múmia cortando um pequeno orifício circular no topo do abdômen do pulgão mumificado. Os adultos se dispersam caminhando pelas plantas que estejam próximas ou por meio de vôo (BUENO, 2005; SOUZA, 2007).

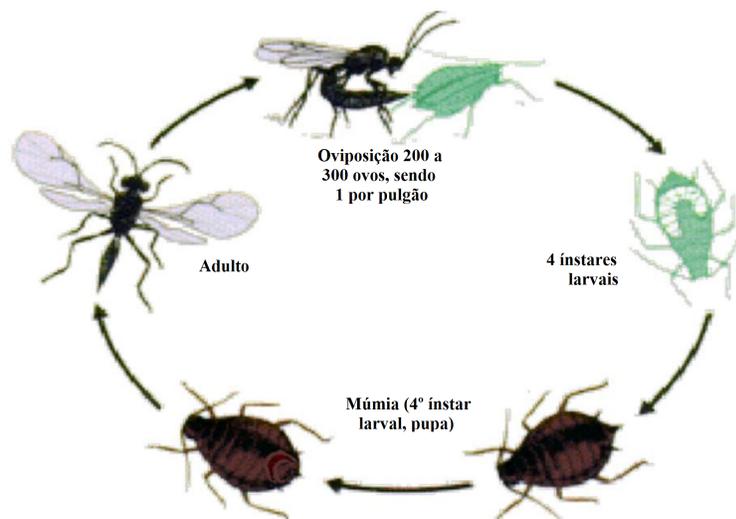


Figura 11 Esquema do ciclo de vida do parasitoide *Lysiphlebus Testaceipes* (Cresson, 1880) em *Aphis Gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae)

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, é importante conhecer a influência desse fator ecológico (RODRIGUES, 2003). A adaptabilidade às condições climáticas está entre os fatores chave, influenciando o sucesso de parasitoides em programas de controle biológico (RODRIGUES, 2004). Na tabela 3 são apresentados alguns

parâmetros relativos ao parasitismo de *L. testaceipes* sobre *A. gossypii*, à temperatura de 25 °C.

Tabela 3 Porcentagem de parasitismo e período da ovoposição à formação da múmia (em dias) à temperatura de 25 ± 1 °C (médias ± semiamplitude do intervalo de confiança a 95%).

Fonte: Carnevale, Bueno e Sampaio (2003)

Porcentagem de parasitismo	44,20±4,48
Período da oviposição-múmia	6,50±0,13

Para o Manejo Integrado de Pragas (MIP) é relevante o que ocorre nos primeiros 60 dias após o plantio. O nível de controle do pulgão é de 70% de plantas atacadas (GALLO et al., 2002).

## 2.5 Modelo Penna

As teorias de envelhecimento são muitas e estão embasadas em estudos em diferentes áreas do conhecimento. O biólogo Peter B. Medawar propôs uma teoria que explicasse o envelhecimento através da acumulação de danos no genoma. Esse acúmulo ocorre devido à diminuição da força de seleção para remover alelos danosos da população. Genes deletérios que se expressam após o período reprodutivo, escapam da seleção natural por já terem sido transmitidos às gerações seguintes, acumulando-se na população e comprometendo a sobrevivência nas idades avançadas (MEDEIROS, 2001).

Alguns modelos para o estudo do envelhecimento já foram propostos, como por exemplo o modelo de Partridge e Barton (1993), o de Heumann e Hotzel (1993) e o modelo Penna (1995).

O modelo de Partridge e Barton (PARTRIDGE; BARTON, 1993) trata populações com estrutura etária sendo estas constituídas por três tipos de indiví-

duos: bebês com idade 0, jovens com idade 1 e adultos com idade 2, mas esse modelo leva a um crescimento exponencial da população e tem sido estudado usando as técnicas de simulação Monte Carlo.

Já o modelo de Heumann e Hotzel (1995) generaliza o modelo de Partridge e Barton. As idades dos indivíduos assumem valores  $0, 1, 2, \dots, k$  sendo  $k > 2$ . Durante a evolução temporal, os indivíduos nascem, reproduzem, tornam-se mais velhos e morrem. A reprodução ocorre a partir da idade 1 e, nesse modelo, a reprodução é implementada transferindo-se completamente o genoma do pai para o filho (COSTA, 2011).

Um modelo simples para o estudo do envelhecimento e particularmente adequado para aplicação em computadores é o "Modelo Penna", que baseia-se na teoria de acúmulo de mutações deletérias através da implementação de variáveis booleanas e técnicas de manipulação de bits. Devido à fácil implementação em computadores, o modelo de envelhecimento Penna (PENNA, 1995) é extremamente apropriado para simulações numéricas da dinâmica populacional das espécies em geral.

O Modelo Penna foi proposto em 1995 por T. J. P. Penna e é também conhecido por modelo "Bit-String" (PENNA, 1995).

De acordo com Haddad e Penna (2008), o modelo é baseado em tiras de bits, comum em modelagem computacional. Vamos considerar uma população de indivíduos, cada um desses indivíduos é representado por uma tira de bits, isto é, uma sequência de 0's e 1's.

Cada bit, ou posição, representa um intervalo de tempo na vida do indivíduo. A tira de bits é, às vezes, chamada de genoma, mas ela representa uma leitura do genoma levando em conta o tempo em que uma mutação ruim vai se expressar. O valor "1" do bit em uma posição representa a expressão de uma

mutação deletéria naquela idade e que a mesma vai diminuir a probabilidade do indivíduo permanecer vivo. Sendo importante notar que a história do indivíduo está praticamente determinada no nascimento.

Na Figura 12, é mostrado um exemplo para um indivíduo com até oito idades. O tamanho da tira de bits pode ser qualquer, desde que maior do que o número de vezes em que o indivíduo vai ser "recenseado". No exemplo da Figura 12, se a tira representasse humanos que vivem até 96 anos, cada idade deveria corresponder a 12 anos. Como pode ser visto adiante, o tamanho da tira de bits também define outra escala de tempo, a de ocorrência de novas mutações (BIECEK; CEBRAT, 2006).

Idade	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor	1	0	1	1	0	0	0	0

Figura 12 Exemplo de tira de bits. Cada posição representa um intervalo de tempo na vida do indivíduo. Nesse exemplo, mutações deletérias irão se manifestar nas idades 4, 5 e 7. A leitura é feita da direita para esquerda e iniciando em zero, inspirada pela representação dos bits no computador

A cada intervalo de tempo, o indivíduo envelhece. O indivíduo permanece vivo se o número de mutações que se expressaram até a idade corrente for menor que um limite  $T$  (de "threshold"). Na versão original do modelo, este limite é o mesmo para toda a população (GIAROLA; MARTINS, 2006).

A reprodução é a etapa mais importante. Caso o indivíduo permaneça vivo até a idade da maturidade sexual  $R$ , ele poderá gerar um descendente. O descendente terá a mesma tira da mãe, exceto por  $M$  bits, que representam novas mutações. Uma posição da tira é sorteada ao acaso e o valor do bit naquela posição ou idade é modificado. Portanto pode-se ter boas mutações  $1 \rightarrow 0$  (ou reversões),

ou deletérias  $0 \rightarrow 1$ . Mutações boas são raramente encontradas na natureza e por esse motivo não são consideradas nesta modelagem. A probabilidade de ocorrências de mutação, na concepção, será então  $M/B$ , onde  $B$  é o tamanho da tira. A cada intervalo de tempo, após a maturidade sexual, o indivíduo pode gerar  $b$  descendentes. No modelo original, não foi acrescentado nenhum dado para modelar a queda da fertilidade com a idade.

Idade	31	...	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Mãe	0	...	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
Filho	0	...	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0

Figura 13 Exemplo do "genótipo" do filho, as idades sorteadas foram 2 e 6. Na posição 2 havia o bit setado em 1 e assim ele permaneceu, já na posição 6 o bit era setado em 0 e a mutação deletéria foi inserida

Bensing e Ekerdt (2002) dizem que se o número de descendentes por unidade de tempo  $b$  for alto e/ou a idade de maturidade sexual  $R$  for baixa, a população poderia crescer rapidamente tomando toda a memória do computador (em 1994, isso não era tão difícil). Para evitar a superpopulação e para incluir a competição entre os indivíduos, foi adicionado um termo logístico "Verhulst" para dar conta da capacidade do ambiente (competição intraespecífica): o ambiente (sítio) possui uma capacidade de carga máxima  $N_{\max,k,l}$ , sendo  $k$  a linha e  $l$  a coluna da rede em que o sítio se encontra. Se a população em um dado instante  $t$  é  $N_{k,l}(t)$ , então o indivíduo será retirado da população com probabilidade  $N_{k,l}(t)/N_{\max,k,l}$  (CHEN; LI, 2001; COE; MAO, 2005; HE et al., 2006,2007; HE; WANG, 2006).

Para cada indivíduo o modelo pode ser visto através das seguintes etapas: nascimento; reprodução, se já tiver atingido a maturidade sexual; teste de morte por fatores genéticos (depende da idade); teste de morte por competição (inde-

pende da idade); envelhecimento.

Penna (1995) diz que a reprodução mais tardia aumenta a longevidade, porém a população se estabiliza em tamanhos menores, portanto expectativas de vida maiores não são a melhor estratégia para manutenção da espécie, considerando apenas a competição intraespécie.

## 2.6 Autômatos celulares

Modelos com estrutura espacial baseados em autômatos celulares estão sendo muito utilizados, devido à sua facilidade de implementação, habilidade em mimetizar formas e capacidade de serem readaptados para reproduzir vários tipos de fenômenos espaciais (SOARES-FILHO et al., 2010).

Um autômato celular consiste num arranjo  $n$ -dimensional de células. O estado de cada célula depende de seu estado prévio e de um conjunto de regras de transição, de acordo com a vizinhança, sendo todas elas atualizadas simultaneamente a passos discretos de tempo (SIRAKOULIS; KARAFYLLIDIS; THANAILAKIS, 2000). Cada célula de um autômato celular pode possuir um único valor e esse valor variar com o tempo de acordo com os valores das células vizinhas (GOMES; FERRACIOLI, 2006).

Para qualquer uma das células de uma rede, a vizinhança é formada por um conjunto de outras células que podem ou não interferir no seu estado e que pode ser definida a partir da dimensão do autômato e a geometria de suas ligações. Os dois critérios mais usados (Figura 14) para uma rede bidimensional são a vizinhança de Von Neumann, em que são consideradas como vizinhas as células que compartilham as arestas; e a vizinhança de Moore, em que são acrescentados os vizinhos que têm vértices em comum com a célula que está sendo considerada (MIRANDA et al., 2008).

O autômato celular é, nesse modelo, considerado como cada sítio da rede e este é constituído por uma planta.

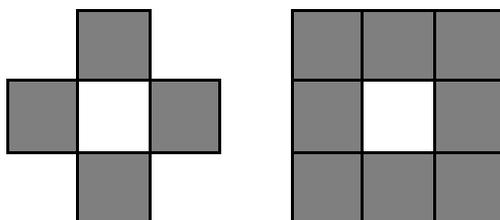


Figura 14 Exemplos das regras de vizinhança de Von Neumann (esquerda) em que os vizinhos são aqueles autômatos que possuem arestas coincidentes e de Moore (direita) em que os vizinhos são aqueles autômatos que possuem vértices e arestas coincidentes

## 2.7 Índice de Morisita

O índice de Morisita (1962) mede a agregação espacial, e é dado pela expressão:

$$I = n \frac{\sum_{i=1}^n w_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i}{\left( \sum_{i=1}^n w_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n w_i} \quad (2.1)$$

em que  $n$  é o tamanho da amostra e  $w$  é o número de indivíduos em cada unidade amostral.

No índice de Morisita (1962), valores iguais a 1 indicam uma distribuição aleatória, menores que 1 indicam uma distribuição regular e maiores que 1 a distribuição possui agrupamento.

### 3 METODOLOGIA

Costa (2011) simulou a dinâmica temporal de interação do pulgão *A. gossypii* e seu parasitoide *L. testaceipes* em algodoeiro *G. hirsutum* L. em diferentes temperaturas (10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C), utilizando o Modelo Penna (PENNA, 1995) e dados experimentais de Xia, Werf e Rabbinge (1999). Para cada temperatura ela obteve as curvas de sobrevivência, taxa de crescimento intrínseco, tamanho populacional e duração de uma geração, considerando a presença e a ausência da forma alada do pulgão. Os resultados obtidos foram comparados com os experimentais obtidos por Xia, Werf e Rabbinge (1999). Ela simulou também a dinâmica populacional da interação parasitoide-hospedeiro considerando dados experimentais de Carnevale, Bueno e Sampaio (2003) para a temperatura de 25 °C na presença e ausência da forma alada.

Dando continuidade e contribuições ao estudo realizado por Costa (2011), foi desenvolvido neste trabalho um modelo para a dinâmica espaço-temporal do pulgão *A. gossypii* em cultivar resistente (imune à doenças viróticas) do algodoeiro *G. hirsutum*. Este modelo foi aplicado a diferentes cenários, inclusive aqueles que tratam da interação desse afídeo com o parasitoide *L. testaceipes*. Esse modelo e os diversos cenários serão descritos a seguir.

#### **3.1 Modelo Penna adaptado à biologia de *A. gossypii* em algodoeiro *Gossypium hirsutum* L. com estrutura espacial**

A população de cada sítio ("planta") numa rede quadrada 20 x 20 foi constituída de fêmeas. Maiores detalhes sobre a população inicial serão apresentados nas seções seguintes. Cada uma das fêmeas é caracterizada por um "genótipo", representado por duas palavras computacionais de 64 *bits*. Para a modelagem,

diferente do que acontece na natureza, no momento em que a fêmea se torna adulta, ela assumirá a forma alada com uma probabilidade que depende da densidade populacional (HOLST; RIGGLE, 1997), dada pela seguinte equação:

$$\phi_{k,l}(t) = \frac{N_{k,l}(t-1)}{N_{\max,k,l}} \quad (3.1)$$

sendo,  $N_{k,l}(t-1)$  o tamanho populacional no tempo  $t-1$  e  $N_{\max,k,l}$  a capacidade de carga do sítio  $(k, l)$ .

Ao se tornar adulta, a fêmea (áptera ou alada) dará origem a  $b$  descendentes ápteros (sem asas) a cada idade adicional, até que atinja a idade máxima de reprodução  $RX$  (soma de  $R$  com o período reprodutivo do pulgão). No entanto, fêmeas aladas apresentam uma taxa reprodutiva menor que as fêmeas ápteras, como consequência do maior gasto de energia devido à capacidade de voar. Nesse caso, considerou-se no modelo que as fêmeas ápteras geram descendentes com probabilidade  $\sigma_1$  e fêmeas aladas, com probabilidade  $\sigma_2$ , sendo  $\sigma_2 < \sigma_1$ .

Pulgões ápteros e alados podem se deslocar sobre a rede, porém de maneira diferente devido a diferenças morfológicas. A migração de pulgões ápteros de um sítio para outro acontece da seguinte forma: em cada etapa temporal, o pulgão áptero irá migrar com uma probabilidade  $\alpha_1$ . Dado que ele migrará, é sorteada a posição para onde o pulgão irá se mover de acordo com as regras de vizinhança de Von Neumann. A probabilidade de ocupação de qualquer um dos sítios vizinhos é a mesma. Se o pulgão se encontra em um dos quatro sítios que compõem os extremos da rede (Figura 15), ele terá somente duas opções para migrar. Caso se encontre em um dos sítios centrais das bordas das redes (Figura 16), ele terá três opções para migrar. Já se estiver em qualquer sítio fora das bordas (Figura 17), ele terá quatro opções para migrar. No caso do pulgão alado, este poderá migrar com probabilidade  $\alpha_2$  para qualquer sítio da rede, escolhido aleatoriamente.

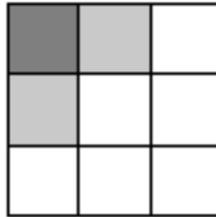


Figura 15 Exemplo das opções de migração quando o pulgão se encontra em algum dos sítios extremos da rede de acordo com as regras de vizinhança de Von Neumann

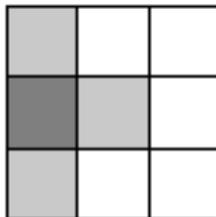


Figura 16 Exemplo das opções de migração quando o pulgão se encontra em algum dos sítios pertencentes à borda da rede de acordo com as regras de vizinhança de Von Neumann

### 3.1.1 Dinâmica espaço-temporal com capacidade de carga variável (com ciclo de folhagem)

Nesse caso, cada sítio de uma rede quadrada  $20 \times 20$  representa uma planta com capacidade de carga dada por:

$$N_{max,k,l} = y_{k,l} z_{k,l} \quad (3.2)$$

sendo  $N_{max,k,l}$  a capacidade de carga do sítio correspondente à linha  $k$  e coluna



Figura 17 Exemplo das opções de migração quando o pulgão se encontra em algum dos sítios centrais da rede de acordo com as regras de vizinhança de Von Neumann

$l$ ,  $y_{k,l}$  a área foliar e  $z_{k,l}$  o número de folhas por planta.  $y_{k,l}$  e  $z_{k,l}$  são funções da idade da planta, definidas pelas seguintes equações (BRITO, 2005):

$$y_{k,l} = 11,23 + 1,2649x - 0,0087x^2 \quad (3.3)$$

$$z_{k,l} = -8,2483 + 0,6833x - 0,0043x^2 \quad (3.4)$$

sendo  $x$  a idade da planta. O gráfico da capacidade de carga em função da idade da planta é apresentado na Figura 18.

Cada sítio da rede foi ocupado com probabilidade  $\gamma$  por fêmeas ápteras e aladas oriundas de uma população com estrutura etária estável. A população inicial em cada sítio ( $N_{k,l}(0)$ ) corresponde à população em  $t' = 99.998$  (tempo suficiente para que a população total atinja uma estrutura etária estável) obtida com a dinâmica espaço-temporal sem ciclo de folhagem (idade da planta fixada em 16 dias) e populações fechadas, ou seja, sem migração entre os sítios. Em  $t' = 0$ , o tamanho da população em cada sítio ocupado foi definido como 10% da

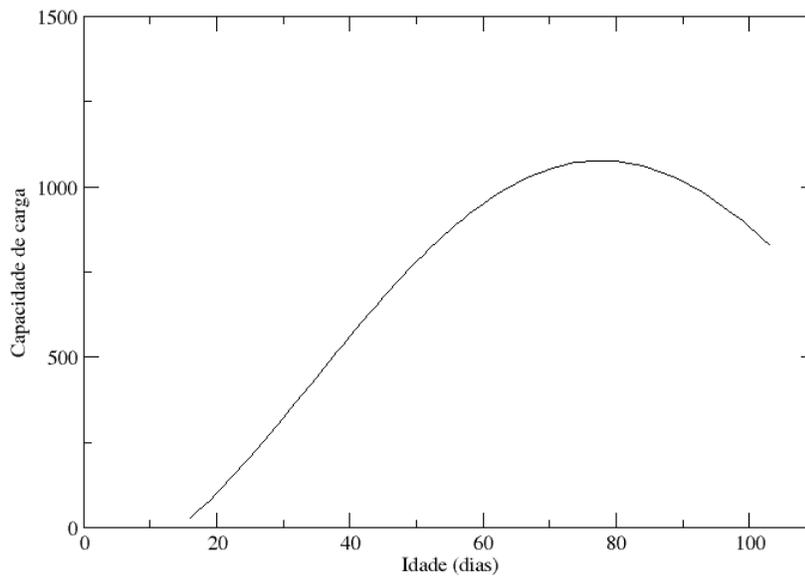


Figura 18 Gráfico da capacidade de carga da planta em função da idade (dias) considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem

capacidade de carga do sítio. A etapa temporal seguinte ( $t' = 99.999$ ) corresponde à primeira etapa temporal ( $t = 0$ ) da dinâmica com ciclo de folhagem, momento a partir do qual as plantas passam a envelhecer e as populações deixam de ser fechadas, ou seja, ocorre migração de pulgões entre os sítios, conforme regras anteriormente definidas. Cada simulação consistiu de 86 dias, período correspondente ao ciclo do algodoeiro, contado a partir do surgimento das primeiras folhas.

### 3.1.2 Dinâmica espaço-temporal com capacidade de carga fixa (sem ciclo de folhagem)

Cada sítio ("planta") numa rede quadrada 20 x 20 é ocupado com probabilidade  $\gamma$ , por  $N_0$  fêmeas ápteras. Nesse caso não foi considerado o envelhecimento do algodoeiro. A idade foi fixada em 16 dias e, portanto, a capacidade de carga foi fixada em 46, 31. O tamanho da população inicial ( $N_0$ ) por sítio foi definida como 10% da capacidade de carga do sítio. Cada simulação consistiu de 100.000 etapas temporais. Cabe esclarecer que, em todas as etapas temporais, os pulgões podem migrar de um sítio para o outro, de acordo com as regras anteriormente definidas.

### 3.1.3 Parasitismo por *L. testaceipes*

Segundo Rodrigues et al. (2004), o parasitoide *L. testaceipes* é generalista, pois parasita outras espécies de pulgões. Sendo assim, além de reduzir os custos computacionais, assumiu-se que a população de parasitoides não é regulada pela população de pulgões. Portanto, o parasitismo foi inserido na dinâmica como uma probabilidade dada pela taxa de parasitismo ( $w$ ) e pelo período de desenvolvimento do parasitoide até a formação da múmia, denominado período de mumificação do pulgão ( $v$ ). Decorrido esse período, o qual é contado a partir do momento em que o pulgão é parasitado, tal inseto é levado à morte. Os parâmetros  $w$  e  $v$  assumiram os valores 0, 44 e 7, respectivamente, de acordo com o experimento realizado por Carnevale, Bueno e Sampaio (2003), quando estudou o parasitismo de *A. gossypii* por *L. testaceipes* na temperatura de 25<sup>o</sup> C.

Na ausência de parasitismo foram realizadas simulações nas temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C. Quando considerado o parasitismo por *L. testaceipes* foram realizada apenas simulações na temperatura de 25 °C, por falta de dados experimentais para as demais temperaturas. Considerou-se a presença de parasitismo em todos os sítios da rede.

Na dinâmica espaço-temporal com capacidade de carga fixa, o parasitismo foi inserido em  $t' = 60.000$ . Quando a capacidade de carga foi considerada variável (com ciclo de folhagem), o parasitismo foi inserido em  $t = 11$  dias, o que corresponde a plantas com 26 dias de idade.

### 3.1.4 Parâmetros do modelo

Os parâmetros do modelo independentes da temperatura assumiram os seguintes valores:

$M = 1$  (número de mutações deletérias);

$T = 1$  (limite de mutações deletérias)

$\sigma_1 = 1,0$  (taxa reprodutiva de ápteros)

$\sigma_2 = 0,8$  (taxa reprodutiva de alados)

$\alpha_1 = 0,1$  (probabilidade de migração de formas ápteras)

$\alpha_2 = 0,5$  (probabilidade de migração de formas aladas)

$\gamma = 0,02$  (probabilidade de ocupação inicial dos sítios)

Os parâmetros dependentes da temperatura, referentes ao *A. gossypii*, são apresentados na tabela seguinte:

## 3.2 Cenários

O modelo proposto foi aplicado aos seguintes cenários:

1. Dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* sem ciclo de folhagem (capacidade de carga fixa) e sem parasitismo.
2. Dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* sem ciclo de folhagem (capacidade de carga fixa) e com parasitismo por *L. testaceipes*.

Tabela 4 Idade mínima de reprodução ( $R$ ), idade máxima de reprodução ( $RX$ ), em dias, e fecundidade diária ( $b$ ) do pulgão *Aphis Gossypii* em diferentes temperaturas.

$\theta$ (°C)	R	RX	b
10	26	40	1
15	15	32	1
20	10	20	2
25	6	14	3
30	5	9	3
35	6	7	2

3. Dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e sem parasitismo.
4. Dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e com parasitismo por *L. testaceipes*.

### 3.3 Apresentação dos resultados

Os resultados das simulações são apresentados através de curvas de sobrevivência, índices de Morisita e valores médios do tamanho populacional, da taxa intrínseca de crescimento e da duração de uma geração. Para cálculo dos valores médios na dinâmica sem ciclo de folhagem (capacidade de carga fixa) foram desprezadas as primeiras 80.000 etapas temporais.

As curvas de sobrevivência foram obtidas pelo cálculo das taxas de sobrevivência a cada idade  $j$  através da função definida por Odum (1988):

$$S_j = \frac{N_{j+1,t+1}}{N_{j,t}} \quad (3.5)$$

sendo  $S_j$  a taxa de sobrevivência dos indivíduos na idade  $j$  e  $N_{j,t} = \sum_{k,l=1}^{20} n_{k,l}(j, t)$ ,

o número total de indivíduos com idade  $j$  na etapa temporal  $t$  e  $n_{k,l}(j, t)$  o número de indivíduos no sítio  $(k, l)$  com idade  $j$  na etapa temporal  $t$ .

As taxas intrínsecas de crescimento em cada etapa temporal foram obtidas pela função também definida por Odum (1988):

$$r_m(t) = \ln(\lambda(t)) \quad (3.6)$$

sendo,

$$\lambda(t) = \frac{N_{t+1}}{N_t \left[ 1 - \frac{N_t}{N_{\max}} \right]} \quad (3.7)$$

sendo  $N_t = \sum_{k,l=1}^{20} N_{k,l}(t)$ , o número total de indivíduos na etapa temporal  $t$  e  $N_{\max} = \sum_{i=1}^{20} N_{\max,k,l}$ , a capacidade de carga do ambiente.

Os índices de Morisita (1962) foram obtidos através da função:

$$I = n \frac{\sum_{i=1}^{400} w_i^2 - \sum_{i=1}^{400} w_i}{\left( \sum_{i=1}^{400} w_i \right)^2 - \sum_{i=1}^{400} w_i} \quad (3.8)$$

sendo  $w_i = N_{k,l}(t)$  o número de indivíduos do  $i$ -ésimo sítio da rede e  $n = 400$  (corresponde ao tamanho da rede ou número de plantas).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos em todos os cenários envolvidos, separadamente, bem como as discussões acima desses resultados.

### 4.1 Análise temporal da dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* sem ciclo de folhagem (capacidade de carga fixa) e sem parasitismo

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos nas simulações computacionais da dinâmica espaço-temporal do pulgão *A. gossypii* nas temperaturas 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C. Alguns resultados serão comparados com os experimentais e com aqueles obtidos pela dinâmica temporal proposta por Costa (2011).

#### 4.1.1 Tamanho populacional

Na Tabela 5 se encontram os valores médios do tamanho da população de *A. gossypii* no algodoeiro para as diferentes temperaturas e os intervalos de confiança. Segundo Papa (2006), lavouras de algodão sob boas condições nutricionais e de cultivares resistentes a viroses, podem suportar, sem prejuízos, a presença de 20 a 30 pulgões por folha. Na temperatura de 25 °C, em que o tamanho populacional é maior, temos uma média de 90, 53 pulgões por planta (são 36211, 90 pulgões para 400 plantas) e, para cada planta, uma média de 4, 89 pulgões por folha. Portanto, para as condições definidas no modelo, o número de pulgões por folha está bem abaixo do valor apresentado por Papa (2006).

Tabela 5 Tamanho da população de *Aphis gossypii* Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) na ausência de parasitismo para diferentes temperaturas (médias  $\pm$  o intervalo de confiança a 95%).

$\theta$ (°C)	Tamanho populacional
10	8866,68 $\pm$ 262,81
15	14193,20 $\pm$ 243,25
20	23602,20 $\pm$ 318,20
25	36211,90 $\pm$ 345,58
30	33452,40 $\pm$ 387,12
35	21675,10 $\pm$ 315,65

#### 4.1.2 Curvas de sobrevivência

A seguir tem-se o gráfico das curvas de sobrevivência (Figura 19) e as longevidades (Tabela 6) para as diferentes temperaturas. Na Figura 20 são apresentadas as curvas dos valores das longevidades em função de cada temperatura. Podemos perceber a sobreposição dos valores para as curvas simuladas, a proximidade destas com a curva dos valores experimentais e que, para todas elas, a longevidade diminui enquanto a temperatura aumenta. Para a temperatura de 25 °C os valores das longevidades para as dinâmicas estão contidos no intervalo de confiança da longevidade experimental. Com isso conclui-se que eles não possuem diferença significativa.

#### 4.1.3 Taxa intrínseca de crescimento

Os resultados apresentados na Tabela 7 são os valores médios das taxas intrínsecas de crescimento do pulgão *A. gossypii* em algodoeiro para as diferentes temperaturas.

Pela Tabela 7 podemos verificar ao comparar as diferentes dinâmicas que,

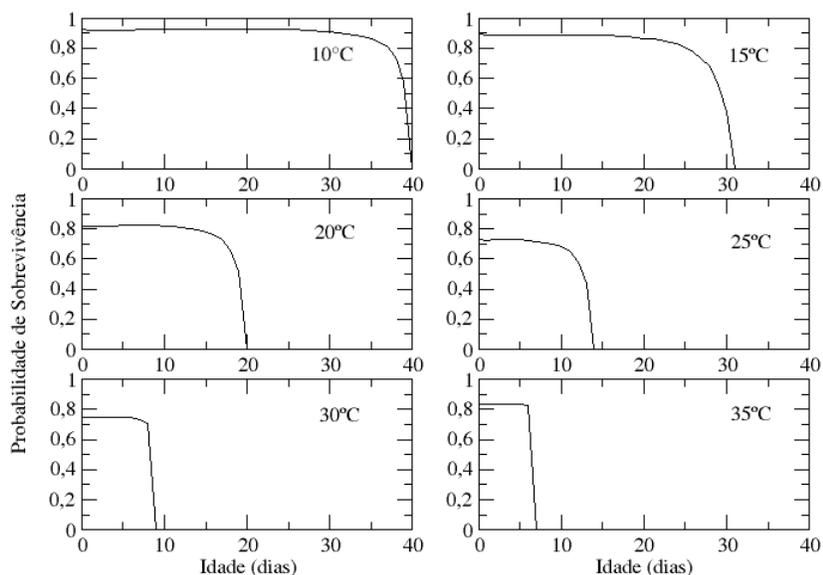


Figura 19 Curvas de sobrevivência de *Aphis gossypii* Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para as diferentes temperaturas

Tabela 6 Longevidade, em dias, do pulgão *Aphis gossypii* Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para cada temperatura (médias  $\pm$  o intervalo de confiança a 95%).

$\theta$ (°C)	Dinâmica espaço-temporal	Dinâmica temporal	Experimental
10	40	40	53,4 $\pm$ 7,06
15	31	31	38,4 $\pm$ 4,90
20	20	20	24,2 $\pm$ 2,94
25	14	14	15,8 $\pm$ 1,96
30	9	9	12,0 $\pm$ 1,37
35	7	7	10,2 $\pm$ 0,78

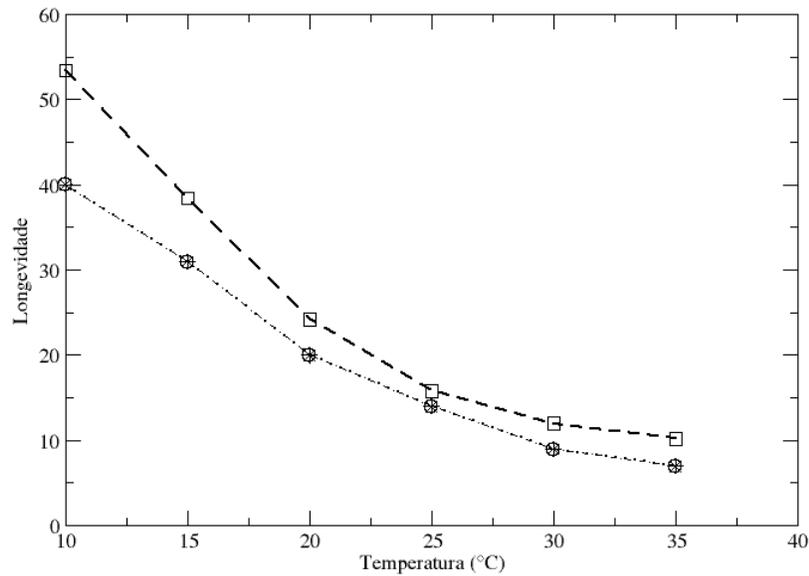


Figura 20 Longevidade do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) em função de cada temperatura. Curva da dinâmica espaço-temporal (círculo), curva da dinâmica temporal (estrela) e curva experimental (quadrado)

os valores da taxa intrínseca de crescimento estão dentro do mesmo intervalo de confiança, logo eles não possuem diferença significativa.

Na Figura 21 podemos observar o gráfico que nos dá o valor da taxa intrínseca de crescimento em função das diferentes temperaturas, sendo possível notar a semelhança entre os comportamentos das curvas da dinâmica espaço-temporal (círculo), dinâmica temporal (estrela) e experimental (quadrado).

Tabela 7 Valor médio da taxa intrínseca de crescimento do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) para as diferentes temperaturas (médias  $\pm$  o intervalo de confiança a 95%).

$\theta$ (°C)	Dinâmica espaço-temporal	Dinâmica temporal	Experimental
10	0,07 $\pm$ 0,01	0,07 $\pm$ 0,01	0,03
15	0,11 $\pm$ 0,01	0,11 $\pm$ 0,01	0,14
20	0,19 $\pm$ 0,01	0,18 $\pm$ 0,01	0,25
25	0,30 $\pm$ 0,01	0,29 $\pm$ 0,01	0,39
30	0,28 $\pm$ 0,01	0,27 $\pm$ 0,01	0,36
35	0,17 $\pm$ 0,01	0,16 $\pm$ 0,01	0,09

#### 4.1.4 Duração de uma geração

Na Tabela 8 encontram-se os valores das durações, em dias, de uma geração de *A. gossypii* nas diferentes temperaturas. Para as temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C a dinâmica espaço-temporal conseguiu um pequeno decréscimo no valor da duração de uma geração em relação à dinâmica temporal, o que torna esses valores mais próximos dos obtidos experimentalmente. Para a temperatura de 30 °C, houve um pequeno aumento e já para a temperatura de 35 °C os valores obtidos nas dinâmicas foram os mesmos.

Pela Figura 22 pode-se observar que os comportamentos das curvas simuladas são bem semelhantes ao da curva experimental para os valores da duração de uma geração nas diferentes temperaturas. Verifica-se para as curvas experimental e da dinâmica temporal que a duração de uma geração diminui à medida que a temperatura aumenta até a temperatura de 30 °C, ocorrendo um pequeno aumento de valor para a temperatura de 35 °C. Já na dinâmica espaço-temporal a curva não apresenta o mesmo comportamento na temperatura de 35 °C.

Na Figura 23 são apresentadas as curvas com dados experimentais e simu-

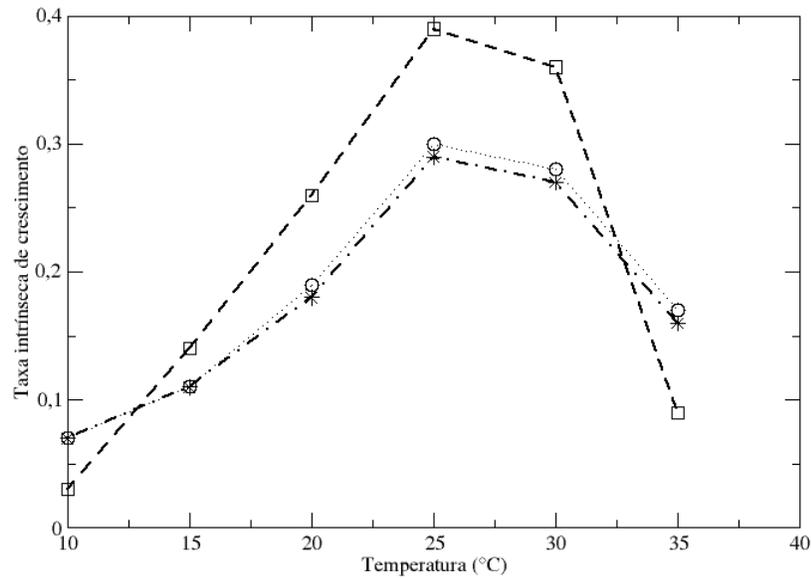


Figura 21 Valor médio da taxa intrínseca de crescimento de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) no algodoeiro nas diferentes temperaturas. Curva da dinâmica espaço-temporal (círculo), curva da dinâmica temporal (estrela) e curva experimental (quadrado)

lados de duração de uma geração em função da longevidade. O comportamento das curvas experimental e da dinâmica temporal é, exceto para o início delas, de aumento na duração de uma geração à medida que a longevidade também aumenta. Já para a curva da dinâmica espaço-temporal o comportamento é sempre de aumento na duração de uma geração enquanto a longevidade aumenta.

Tabela 8 Média de duração de uma geração em dias do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae).

$\theta$ (°C)	Dinâmica espaço-temporal	Dinâmica temporal	Experimental
10	32,69	32,96	28,9
15	21,34	21,66	18,5
20	14,19	14,34	11,4
25	9,15	9,22	8,30
30	8,16	7,38	6,40
35	7,46	7,46	7,6

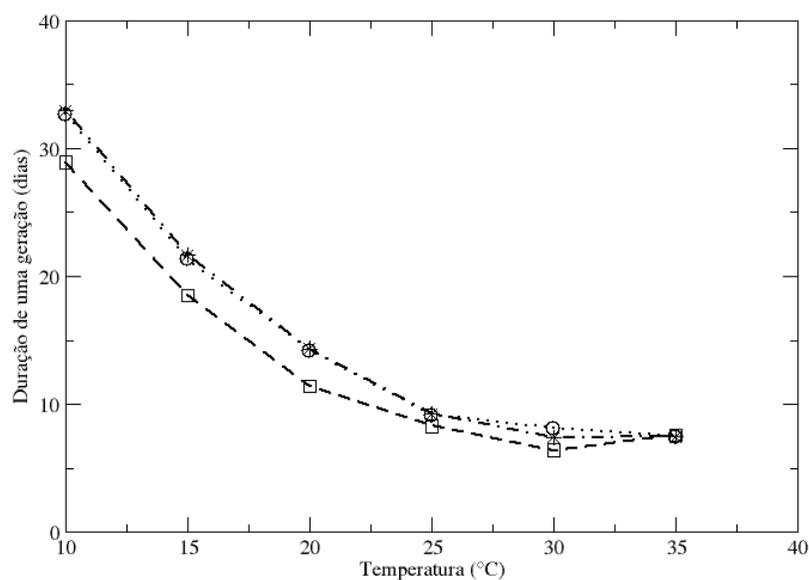


Figura 22 Duração média (em dias) de uma geração de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) nas diferentes temperaturas. Curva da dinâmica espaço-temporal (círculo), curva da dinâmica temporal (estrela) e curva experimental (quadrado)

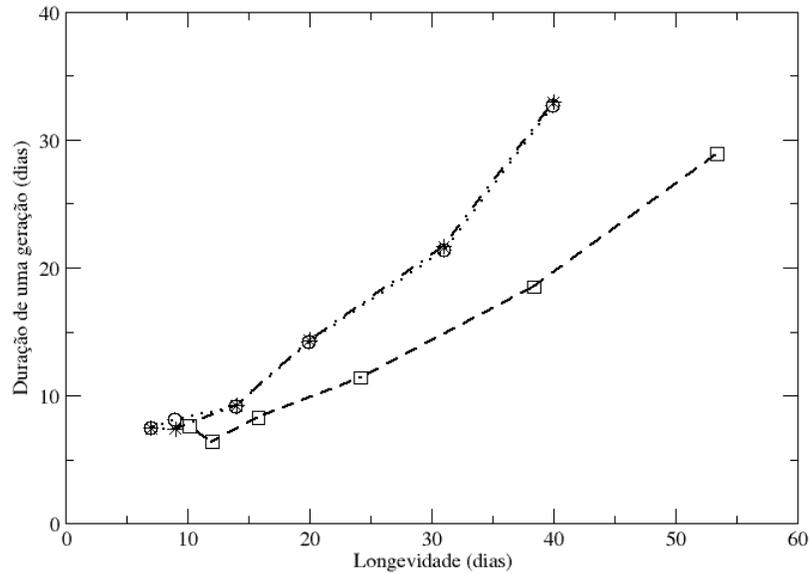


Figura 23 Duração média (em dias) de uma geração de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) em função da longevidade. Curva da dinâmica espaço-temporal (círculo), curva da dinâmica temporal (estrela) e curva experimental (quadrado)

#### 4.2 Análise temporal da dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* sem ciclo de folhagem (capacidade de carga fixa) e com parasitismo por *L. testaceipes*

Nesta seção, serão apresentados os resultados para as simulações computacionais da dinâmica espaço-temporal do pulgão *A. gossypii* com o parasitismo de *L. testaceipes* para a temperatura de 25 °C. Alguns resultados serão comparados com os experimentais e com aqueles obtidos pela dinâmica temporal proposta por Costa (2011).

#### 4.2.1 Tamanho populacional

Na Tabela 9 encontram-se os valores médios do tamanho da população de *A. gossypii* no algodoeiro para a temperatura de 25 °C sem parasitismo e com parasitismo por *L. testaceipes* (médias  $\pm$  as semi-amplitudes do intervalo de confiança a 95%). Observa-se que, a partir de  $t' = 60.000$  etapas temporais (Figura 24), ou seja, para as últimas 40.000 etapas temporais em que o parasitismo foi inserido, houve um decréscimo de 32,29% no número de indivíduos da população.

Tabela 9 Média do tamanho populacional de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) no algodoeiro sem parasitismo e com parasitismo por *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (médias  $\pm$  o intervalo de confiança a 95%).

Temperatura 25( °C)	
	Tamanho populacional
Sem parasitismo	36211,90 $\pm$ 345,58
Com parasitismo	24304,50 $\pm$ 579,16
Redução(%)	32,29

#### 4.2.2 Curvas de sobrevivência

As curvas de sobrevivência para *A. gossypii* sem parasitismo e com parasitismo por *L. testaceipes* são apresentadas na Figura 25. Ao contrário da dinâmica temporal, em que a longevidade reduziu de 14 para 12 dias com a presença de parasitismo, a longevidade na dinâmica espaço-temporal se manteve aos 14 dias. Isso provavelmente ocorreu devido à capacidade do afídeo escapar do parasitismo através da migração, favorecendo assim a permanência de bons genótipos na população.

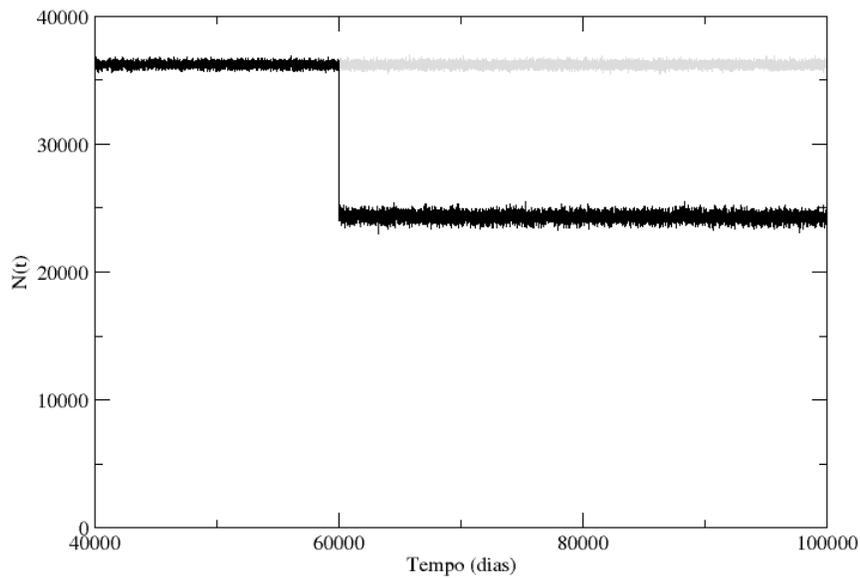


Figura 24 Evolução temporal do tamanho populacional de *Aphis gossypii* Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) na temperatura de 25 °C sem parasitismo (cinza) e com parasitismo (preto)

#### 4.2.3 Taxa intrínseca de crescimento

Na Tabela 10 pode-se verificar o valor médio da taxa intrínseca de crescimento para *A. gossypii* no algodoeiro sem parasitismo e com parasitismo por *L. testaceipes*. Com a ação do parasitismo observa-se um decréscimo de 36,67% na taxa intrínseca de crescimento. A evolução temporal da taxa intrínseca de crescimento nas últimas 20.000 etapas pode ser observada na Figura 26.

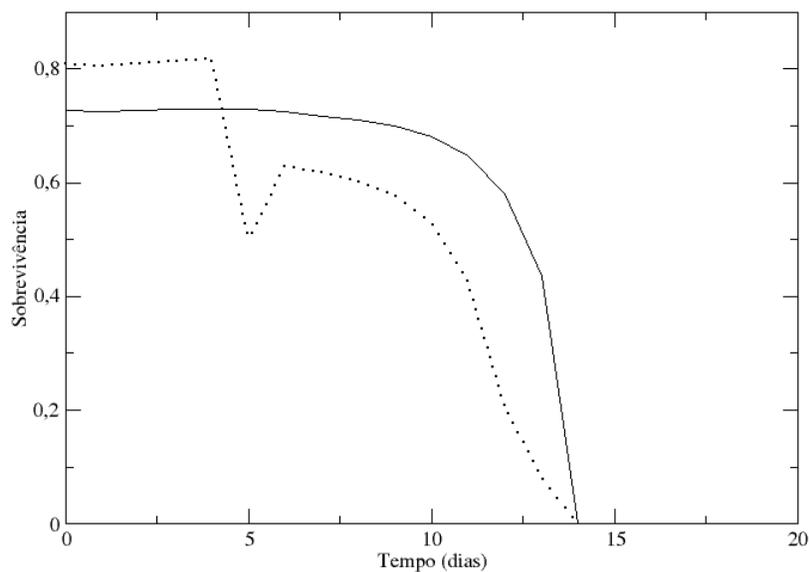


Figura 25 Curvas de sobrevivência de *Aphis gossypii* Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) para 25 °C. Curva sem parasitismo (linha contínua) e com parasitismo (linha pontilhada)

Tabela 10 Valor médio da taxa intrínseca de crescimento para *Aphis gossypii* Glover,1877 (Hemiptera:Aphididae) no algodoeiro sem parasitismo e com parasitismo por *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (médias  $\pm$  os intervalos de confiança a 95%)

Temperatura 25(°C)		
	Dinâmica espaço-temporal	Dinâmica temporal
Sem parasitismo	0,30 $\pm$ 0,01	0,29 $\pm$ 0,01
Com parasitismo	0,19 $\pm$ 0,01	0,22 $\pm$ 0,01
Redução(%)	36,67	24,14

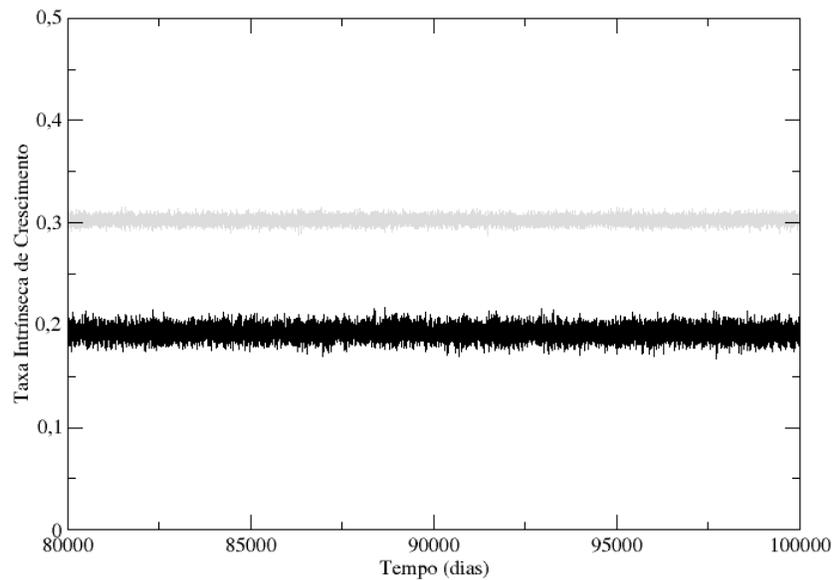


Figura 26 Evolução temporal da taxa intrínseca de crescimento de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) na temperatura de 25 °C sem parasitismo (cinza) e com parasitismo (preto)

#### 4.2.4 Duração de uma geração

Na Tabela 11 encontram-se os valores das durações, em dias, de uma geração de *A. gossypii* sem parasitismo e com parasitismo, na temperatura de 25 °C. Observa-se que na dinâmica espaço-temporal esses valores estão muito próximos, apresentando uma redução de apenas 7,10% quando inserido o parasitismo. Isso é bastante diferente do que ocorreu na dinâmica temporal, onde observa-se uma redução de 14,8%. A redução na duração de uma geração está relacionada à diminuição na longevidade sob a ação do parasitismo, pois quando a longevidade é reduzida, o ciclo de vida dos pulgões fica menor e, conseqüentemente, o número de

gerações anuais aumenta, logo o tempo que há entre uma geração e outra diminui. Como a longevidade não se alterou na dinâmica espaço-temporal, a redução na duração de uma geração sofreu menor redução que na dinâmica temporal.

Tabela 11 Duração (em dias) de uma geração de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) no algodoeiro sem parasitismo e com parasitismo por *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (médias  $\pm$  as semi-amplitudes do intervalo de confiança a 95%)

Temperatura 25(°C)		
	Dinâmica espaço-temporal	Dinâmica temporal
Sem parasitismo	9,15	9,22 $\pm$ 0,02
Com parasitismo	8,50	7,85 $\pm$ 0,02
Redução(%)	7,10	14,8

### 4.3 Análise temporal da dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e sem parasitismo

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes à análise temporal dos pulgões na rede para as 86 etapas temporais referentes ao tempo no qual a planta do algodoeiro possui folhas no seu ciclo de vida sem a influência do parasitoide *L. testaceipes*.

#### 4.3.1 Tamanho populacional

Na Figura 27 são apresentados os gráficos da evolução temporal do número de indivíduos por planta infestada nas 86 etapas temporais do ciclo de folhagem do algodoeiro. Percebe-se um crescimento da população com o aumento da temperatura até 25 °C, ocorrendo um decréscimo logo após, para as temperaturas de 30 e 35 °C. Em todos os gráficos observa-se, nas primeiras etapas temporais, pouca

variação no número de afídeos por planta infestada. A partir de etapas temporais próximas à idade mínima de reprodução, observa-se, em cada temperatura, um aumento gradual do número de indivíduos por plantas infestadas.

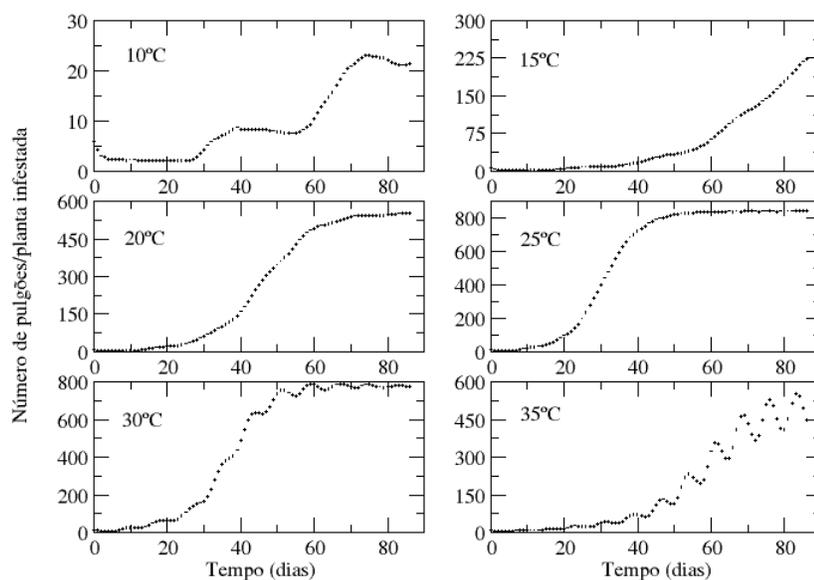


Figura 27 Evolução temporal do tamanho da população de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) para todas as temperaturas considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem

#### 4.3.2 Plantas infestadas

A evolução temporal do percentual de plantas infestadas, em cada temperatura, nas 86 etapas temporais do ciclo de folhagem do algodoeiro, são apresentadas na Figura 28. Como as temperaturas de 20°C, 25°C e 30°C são consideradas temperaturas mais favoráveis para o desenvolvimento do pulgão

*A. gossypii*, percebe-se que a infestação de toda a rede ocorre mais rapidamente nessas temperaturas.

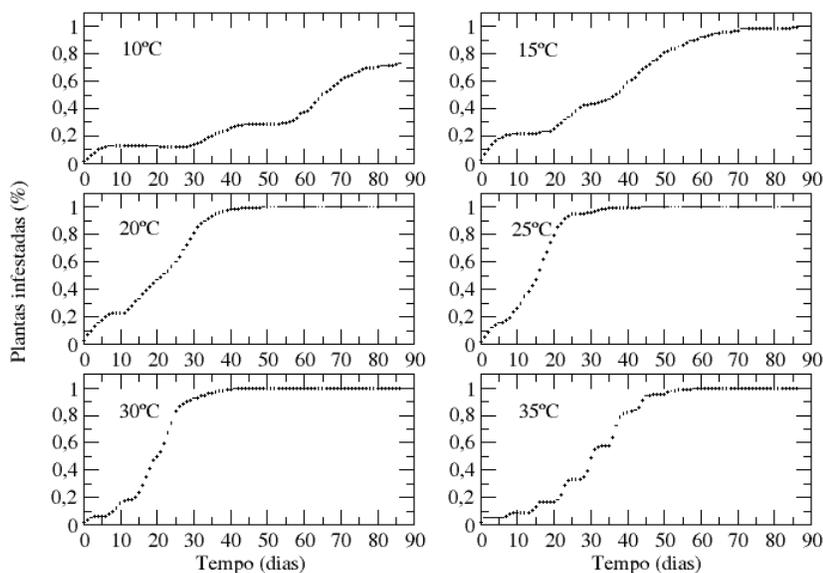


Figura 28 Evolução temporal da porcentagem de plantas infestadas por *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) para todas as temperaturas considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem

### 4.3.3 Probabilidade de gerar alados

Na Figura 29 são apresentadas as curvas de evolução temporal da probabilidade de gerar pulgões *A. gossypii* em sua forma alada, nas 86 etapas temporais do ciclo de folhagem do algodoeiro. Como a probabilidade de gerar formas aladas depende da densidade de indivíduos em cada sítio, observa-se comportamento

semelhante ao da evolução temporal do tamanho populacional. A probabilidade de gerar alados começa a aumentar a partir do momento em que surgem novos indivíduos adultos na população e, conseqüentemente, o aumento da população em decorrência da reprodução.

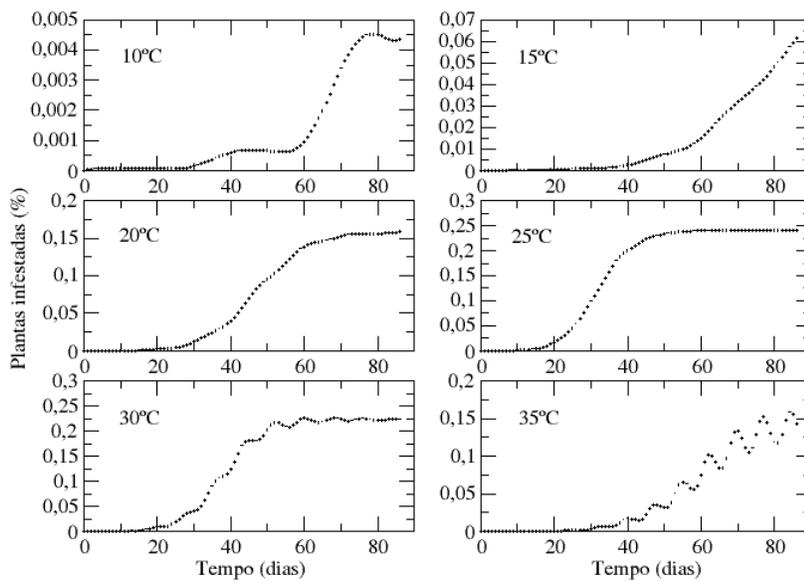


Figura 29 Evolução temporal da probabilidade de gerar alados para todas as temperaturas considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem

#### **4.4 Análise temporal da dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e com parasitismo por *L. testaceipes***

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes à análise temporal dos pulgões na rede para as 86 etapas temporais do ciclo de folhagem do algodoeiro, considerando a influência do parasitoide *L. testaceipes*.

##### **4.4.1 Tamanho populacional**

Na Figura 30 apresenta-se a evolução temporal do número de pulgões por planta infestada nas 86 etapas temporais do ciclo de folhagem, à temperatura de 25 °C, sem e com a presença do parasitoide *L. testaceipes*.

Percebe-se uma redução significativa do número de indivíduos por planta infestada quando se insere o parasitoide. Essa redução chega a 75,13% no final da simulação. Observe que o controle pelo parasitoide em  $t = 11$  ocasionou um decréscimo evidente a partir de  $t = 18$  dias. Isso é explicado pelo período de 7 dias para a mumificação do pulgão.

##### **4.4.2 Plantas infestadas**

Na Figura 31 apresenta-se a evolução temporal do percentual de plantas infestadas pelo pulgão *A. gossypii* nas 86 etapas temporais do ciclo de folhagem do algodoeiro, à temperatura de 25°C, sem e com a presença do parasitoide *L. testaceipes*. Para o Manejo Integrado de Plantas (MIP) o nível de controle é a infestação de 70% das plantas e o que ocorre após os 60 dias da emergência das plantas (44 dias após o surgimento das folhas) não é relevante no que diz respeito ao controle biológico. Observe que sem o controle, em  $t = 34$  a infestação já

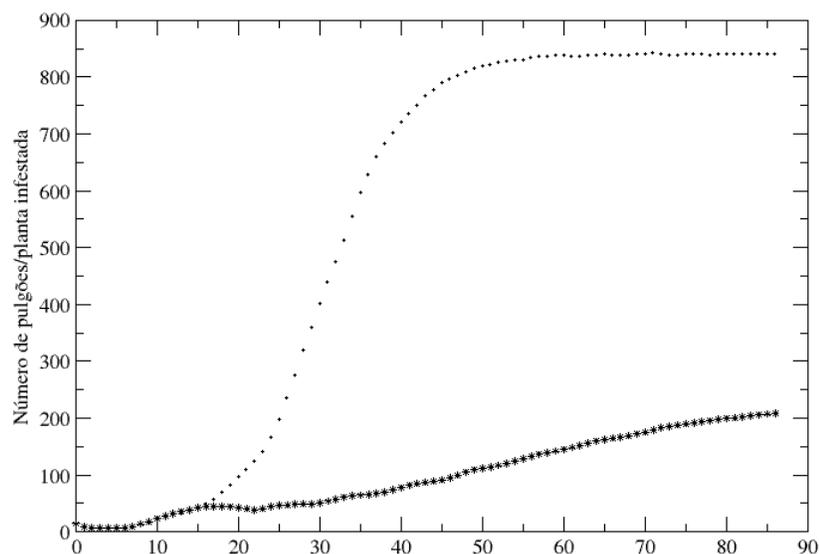


Figura 30 Curvas da evolução temporal do tamanho da população de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) para a temperatura de 25 °C sem (círculo) e com (estrela) a presença do parasitoide *L. testaceipes* considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem

atingiu 100%. Por essa razão, o controle foi aplicado aos 11 dias contados a partir do surgimento da primeira folha para evitar que, após os 18 dias, a infestação atingisse 70% das plantas, como ocorre na ausência de controle.

#### 4.4.3 Probabilidade de gerar alados

Na figura 32 são apresentadas as curvas de evolução temporal da probabilidade de gerar *A. gossypii* alados na temperatura de 25 °C, sem e com a presença do parasitoide *L. testaceipes*. Com a redução do número de indivíduos

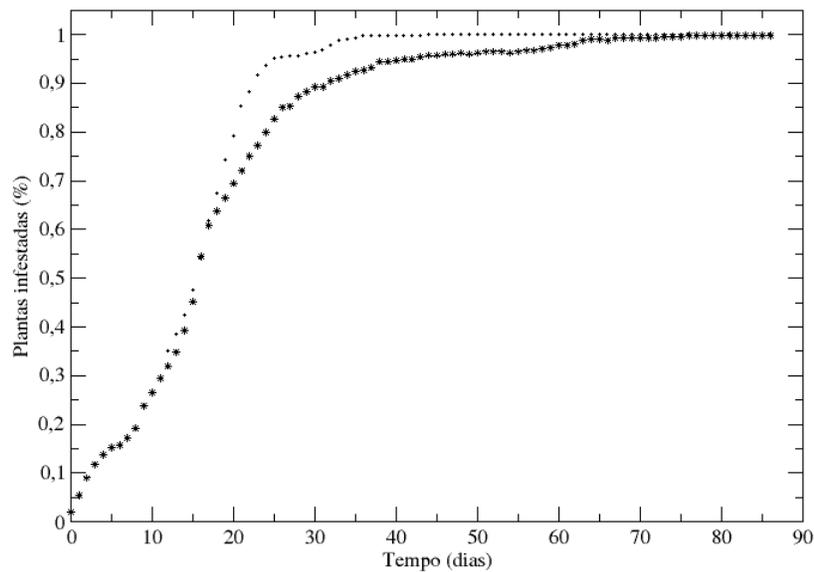


Figura 31 Curvas da porcentagem de plantas infestadas por *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) para a temperatura de 25 °C sem (círculo) e com (estrela) a presença do parasitoide *L. testaceipes* (Cresson, 1880) considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem

por planta, quando o parasitoide foi inserido, observa-se também uma redução na probabilidade de gerar alados, que atinge 45, 83% no final da simulação.

#### 4.5 Análise espacial da dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e sem parasitismo

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes à análise espacial dos pulgões na rede sem a interferência do parasitoide, através dos gráficos de distribuição espacial gerados pelo programa *R*.

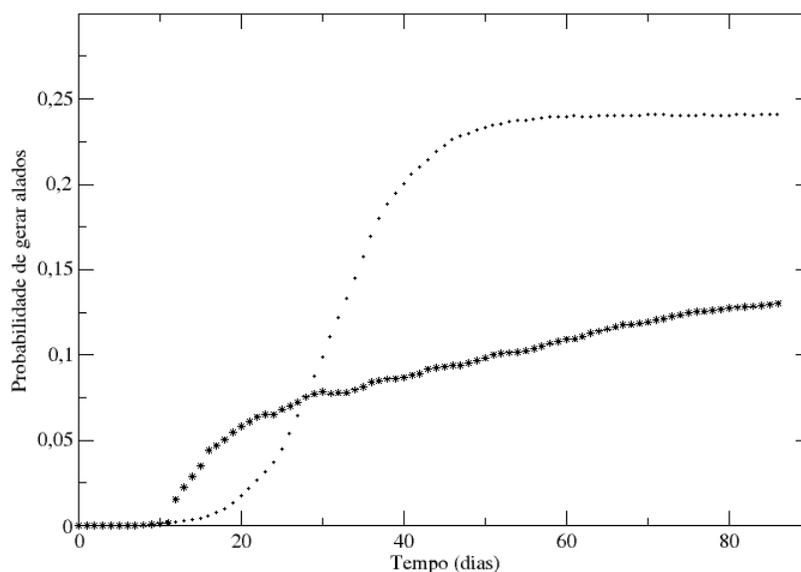


Figura 32 Curvas da evolução temporal da probabilidade de gerar alados para a temperatura de 25 °C sem (círculo) e com (estrela) a presença do parasitoide *L. testaceipes* considerando as 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem

Na Figura 33 são apresentados os mapas da distribuição espacial da população de *A. gossypii*, à temperatura de 10 °C, nos 10, 20, 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem. Percebe-se um aumento no número de indivíduos a cada mapa, à medida em que  $t$  aumenta. Como nessa temperatura a taxa reprodutiva é baixa e a idade mínima de reprodução é alta, o aumento no número de indivíduos é lento.

Na Tabela 12 têm-se os valores do índice de Morisita referentes ao mapa. Verifica-se que todos os valores são maiores que 1 o que significa distribuição agregada. Ao comparar os mapas com os valores obtidos pelo índice, claramente se percebe que a população vai se espalhando e o índice diminuindo seu valor com o passar do tempo.

Na Figura 34 são apresentados os mapas da distribuição espacial da po-

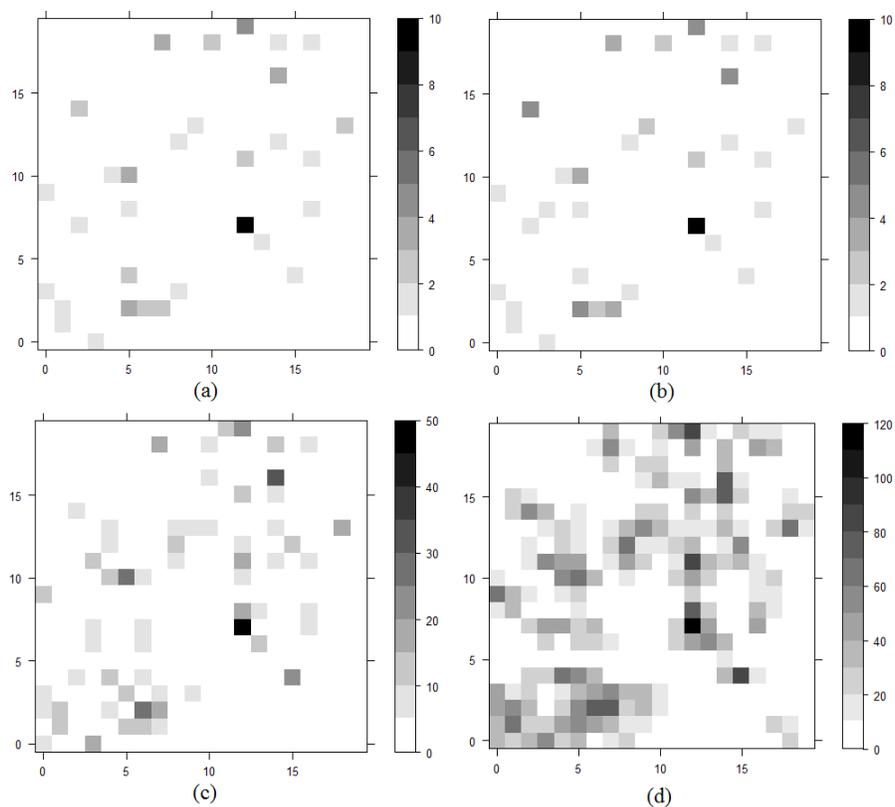


Figura 33 Distribuição espacial da população do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem (d) na temperatura de 10 °C

pulação de *A. gossypii*, à temperatura de 15 °C, nos 10, 20, 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem. Entre as figuras (a) e (b) a diferença é bem pequena, sendo ela mais notável a partir da figura (c).

Na Tabela 12 têm-se os valores do índice de Morisita referentes ao mapa. Nas figuras (a) e (b) percebe-se a presença de agregação (índices de Morisita maiores que 1), uma vez que a população se localiza em alguns pontos. Na figura

Tabela 12 Índice de Morisita calculado para os 10 dias após o surgimento de folhagem, 20 dias após o surgimento de folhagem, 54 dias após o surgimento de folhagem e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C

Dias	10	15	20	25	30	35
10	8,39	4,77	7,68	16,30	29,35	22,62
20	8,32	6,56	5,24	3,90	7,76	16,68
54	6,12	2,03	1,06	1,00	1,01	1,52
86	2,52	1,14	1,00	1,00	1,00	1,00

(d), aos 86 dias após o surgimento de folhagemos, os indivíduos já estão mais dispersos, mais sítios da rede passam a ser ocupados. Nesse caso, o índice assumiu o valor 1,14, bem próximo de 1, o que implica numa distribuição aleatória, mas ainda com indícios de agregação.

Na Figura 35 são apresentados os mapas da distribuição espacial da população de *A. gossypii*, à temperatura de 20 °C, aos 10, 20, 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem. O aumento da população é observado a cada mapa. Apesar da figura (c) ser mais escura que a (d) e por isso dar a impressão de maior população, atenta-se para a escala que, na figura (c) vai de 0 a 600 e na (d) vai de 450 a 600, o que implica numa maior população os 86 dias após o surgimento de folhagem.

Na Tabela 12 são apresentados os valores do índice de Morisita referentes ao mapa. Os valores maiores que 1 significam distribuição agregada, aos 10 e 20 dias após o surgimento de folhagem. Aos 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem, o índice assumiu os valores 1,06 e 1,00 o que implica em distribuições aleatórias. Nas figuras (a) e (b) a presença de agregação é bem nítida, já que alguns poucos pontos da rede se mostram ocupados. Nas figuras (c) e (d), os indivíduos se encontram bem dispersos, sendo que na figura (d) toda a rede foi ocupada.

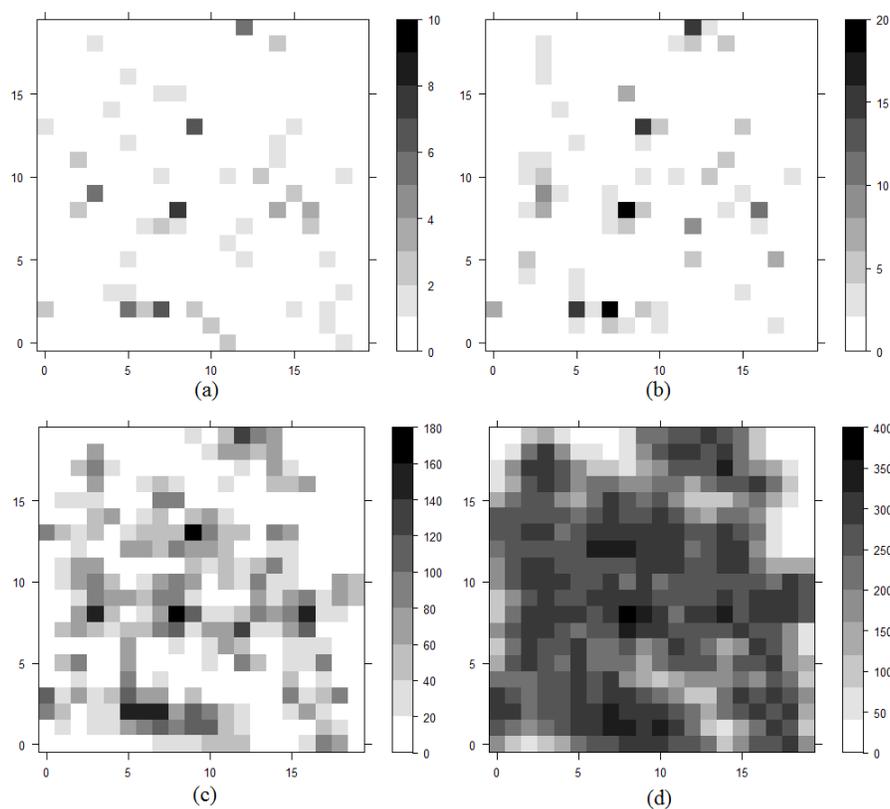


Figura 34 Distribuição espacial da população do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem (d) na temperatura de 15 °C

A Figura 36 apresenta os mapas da distribuição espacial da população de *A. gossypii*, à temperatura de 25 °C, aos 10, 20, 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem. A população apresenta aumento a cada mapa. Cabe novamente observar que a escala da figura (c) vai de 300 a 950 e da (d) vai de 680 a 950, o que implica numa maior população aos 86 dias após o surgimento de folhagem.

Na Tabela 12 apresentam-se os valores do índice de Morisita referentes ao

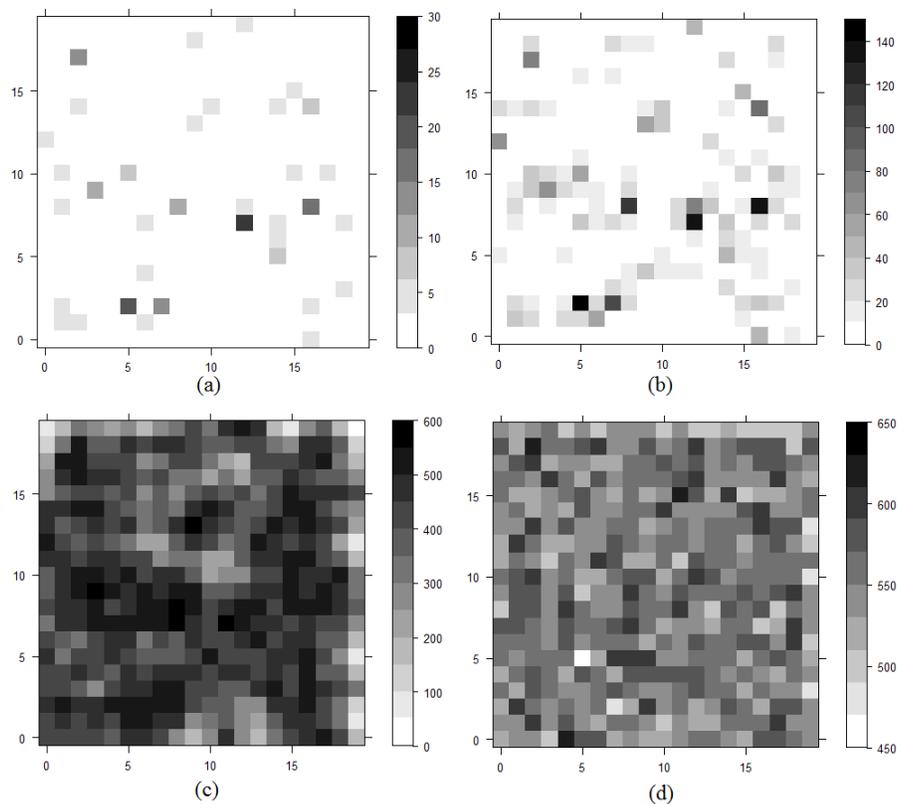


Figura 35 Distribuição espacial da população do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 20 °C

mapa. Os valores maiores que 1 significam distribuição agregada, o que ocorre aos 10 e 20 dias após o surgimento de folhagem, assim como na temperatura de 20 °C. Aos 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem, o índice assumiu valor 1,00, o que significa distribuição aleatória. O índice, aos 10 dias, após o surgimento de folhagem, teve seu valor significativamente mais alto que aos 20 dias após o surgimento da mesma, e a causa dessa diferença pode ser percebida pelo mapa.

Enquanto na figura (a) poucos sítios da rede são habitados, na figura (b) a rede já está em boa parte ocupada por pulgões. Nas figuras (c) e (d), os indivíduos se encontram bem dispersos.

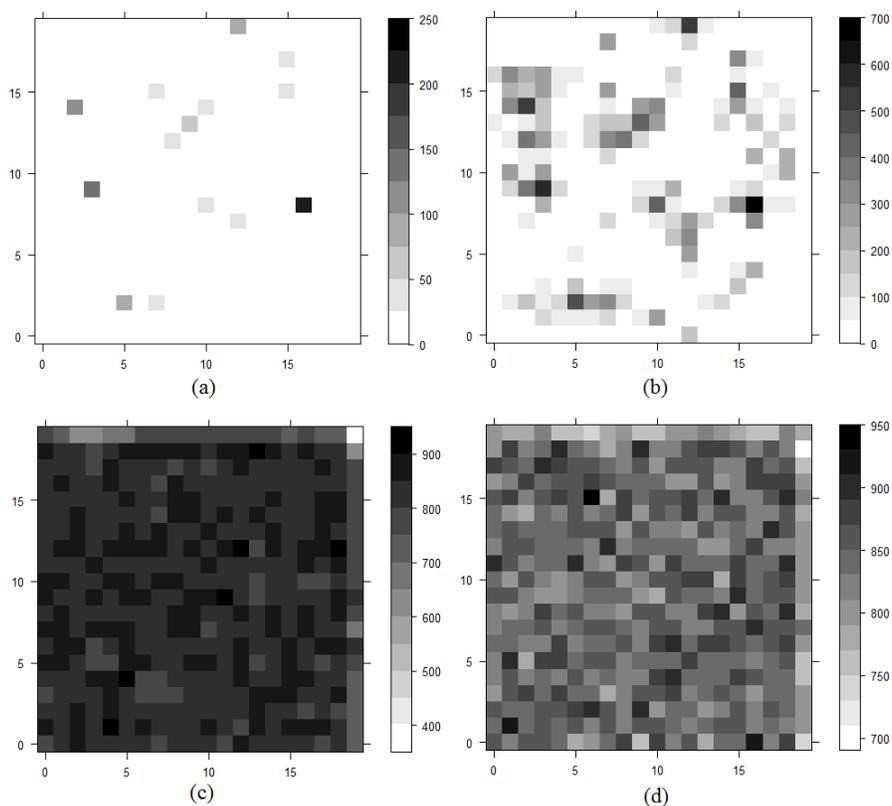


Figura 36 Distribuição espacial da população do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 25 °C

Na Figura 37 são apresentados os mapas da distribuição espacial da população de *A. gossypii*, à temperatura de 30 °C, aos 10, 20, 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem. O mesmo que nas temperaturas de 20 e 25 °C, ocorre na

de 30 °C, a figura (c) é mais escura que a (d), mas a escala da figura (c) vai de 100 a 900 e da (d) vai de 650 a 900, o que implica uma maior população aos 86 dias após o surgimento de folhagem.

Na Tabela 12 são apresentados os valores do índice de Morisita referentes ao mapa. Os valores maiores que 1 significam distribuição agregada, o que ocorre aos 10 e 20 dias após o surgimento de folhagem. Aos 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem, o índice assumiu valores 1,00 e 1,01, o que significam distribuições aleatórias. Na figura (a) somente alguns poucos sítios da rede são ocupados, na figura (b) a rede ainda não está muito ocupada, mas parte da população já se dispersou o que fez o índice de Morisita ser reduzido.

Na Figura 38 encontram-se os mapas da distribuição espacial da população de *A. gossypii* na temperatura de 35 °C para os 10, 20, 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem. A população sofre aumento a cada mapa. Como a taxa reprodutiva é mais baixa que das temperaturas de 20, 25 e 30 °C, o aumento do número de indivíduos é mais lento e por isso não acontece diferença nas figuras (c) e (d).

Na Tabela 12 têm-se os valores do índice de Morisita referentes ao mapa. Os valores maiores que 1 significam distribuição agregada, que ocorre para os 10 e 20 dias após o surgimento de folhagem assim como na temperatura de 20 °C. Para os 86 dias após o surgimento de folhagem, o índice atribuiu valor 1,00 que significa distribuição aleatória. Para 54 dias após o surgimento de folhagem o índice atribuiu valor 1,52 que é bem próximo de 1 e por isso também pode ser considerada distribuição aleatória. Ao comparar os mapas com os valores obtidos pelo índice, claramente se percebe que a população vai se espalhando e o índice diminuindo seu valor com o passar do tempo.

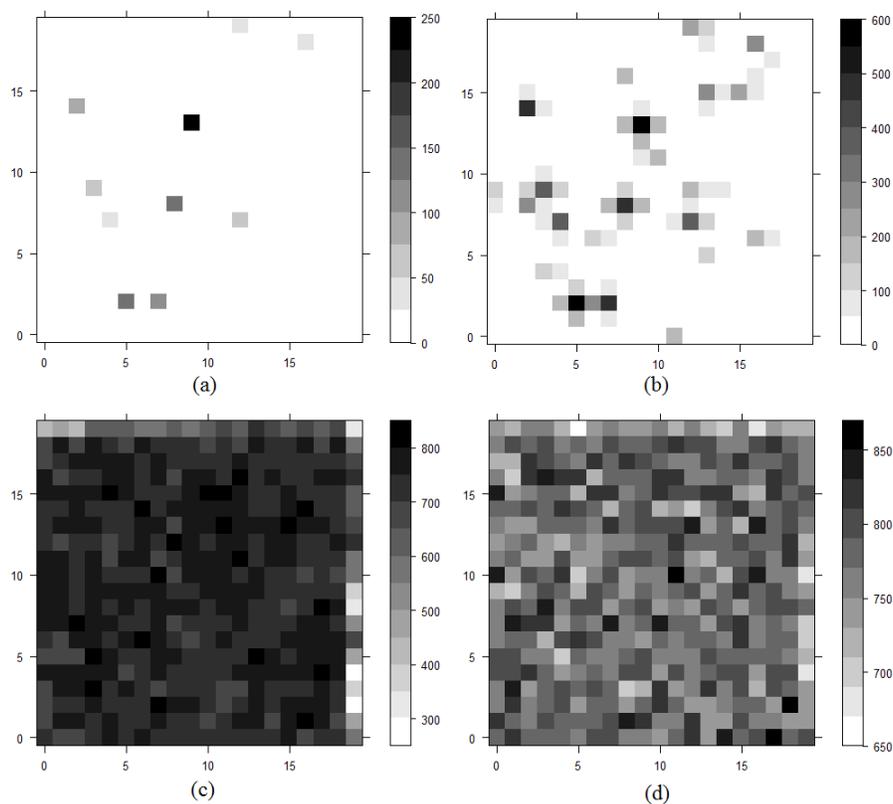


Figura 37 Distribuição espacial da população do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 30 °C

#### 4.6 Análise espacial da dinâmica espaço-temporal de *A. gossypii* com ciclo de folhagem (capacidade de carga variável) e com parasitismo por *L. testaceipes*

Na Figura 36 encontram-se os mapas da distribuição espacial da população de *A. gossypii* na temperatura de 25 °C para os 10, 20, 54 e 86 dias após o

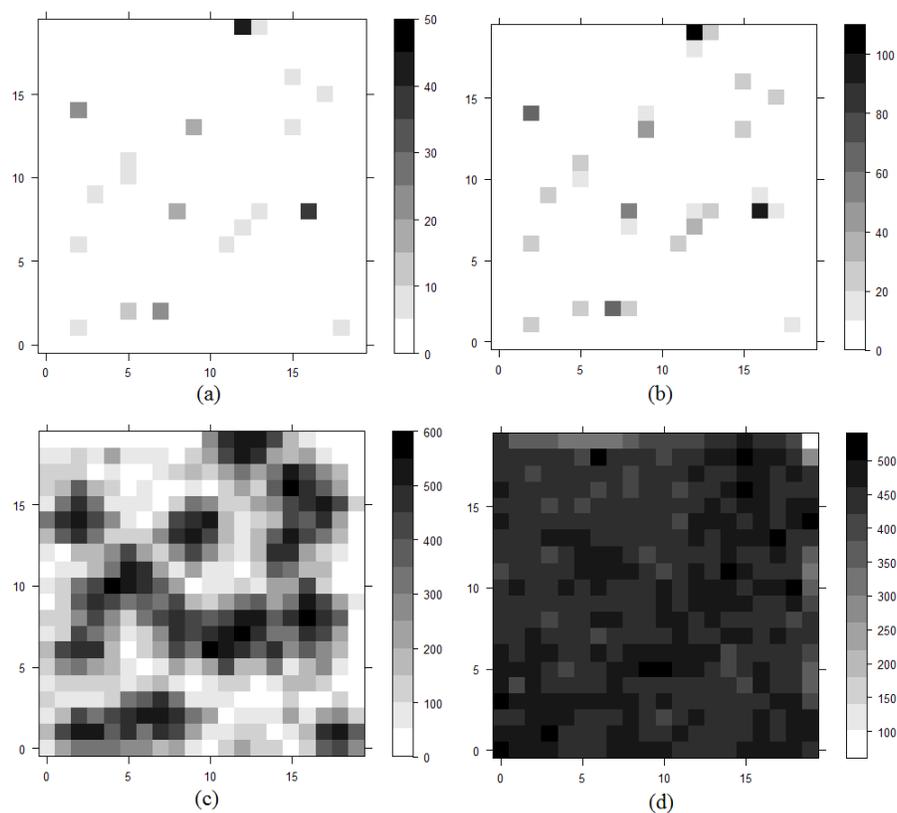


Figura 38 Distribuição espacial da população do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera:Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 35 °C

surgimento de folhagem na ausência do parasitoide *L. testaceipes*. Já a Figura 39 apresenta os mapas da distribuição espacial da população de *A. gossypii* na temperatura de 25 °C para os 10, 20, 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem com a influência do parasitoide *L. testaceipes*.

Percebe-se que a figura (a) de ambos os mapas são iguais devido ao fato do parasitoide ter sido inserido 11 dias após o surgimento de folhagem e, portanto,

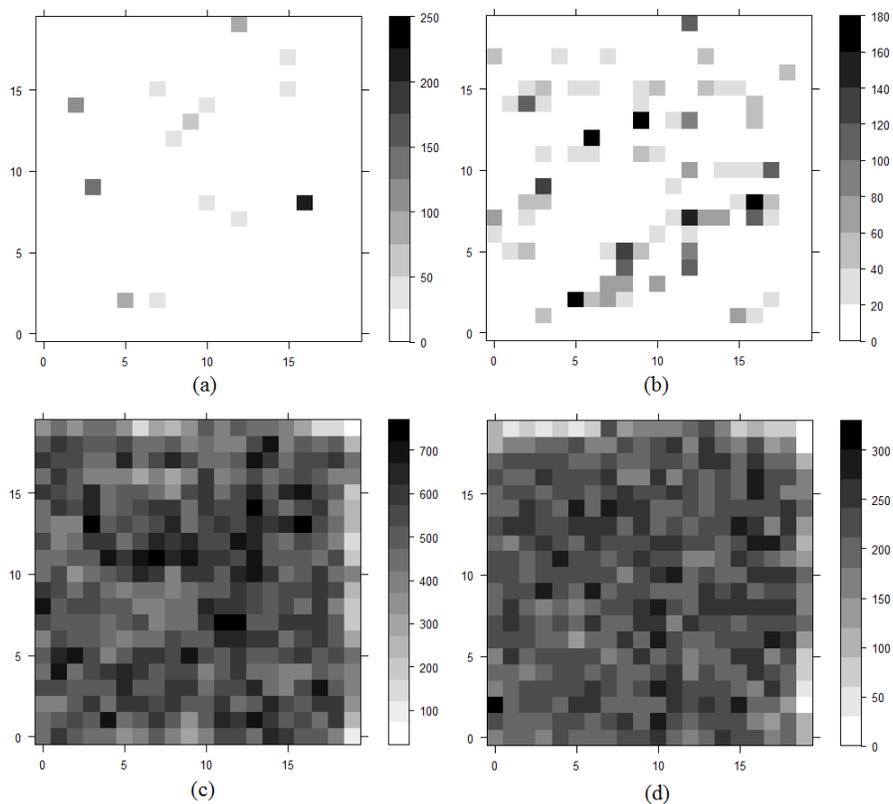


Figura 39 Distribuição espacial da população do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) para os 10 dias após o surgimento de folhagem (a), 20 dias após o surgimento de folhagem (b), 54 dias após o surgimento de folhagem (c) e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura (d) de 25 °C com presença de parasitismo

na figura (a) dos mapas com parasitismo a população ainda não havia sofrido o efeito do parasitoide. Comparando os mapas sem e com parasitismo, verifica-se a diminuição da população e a desocupação de alguns sítios que, nos mapas sem parasitismo aparecem ocupados.

Na Tabela 13 tem-se os valores do índice de Morisita referentes a cada mapa. Os valores maiores que 1 significam distribuição agregada, que ocorre para

Tabela 13 Índice de Morisita calculado para os 10 dias após o surgimento de folhagem, 20 dias após o surgimento de folhagem, 54 dias após o surgimento de folhagem e 86 após o surgimento de folhagem na temperatura de 25 °C com presença de parasitismo

Dias	Índice
10	13,57
20	5,70
54	1,05
86	1,02

os 10 e 20 dias após o surgimento de folhagem assim como na temperatura de 20 °C. Para os 54 e 86 dias após o surgimento de folhagem, o índice atribuiu valores 1,05 e 1,02 que significam distribuições aleatórias. Para os 20 dias após o surgimento de folhagem, quando não havia parasitismo, o índice de Morisita assumiu valor menor do que quando se insere o parasitismo, ou seja, a população se tornou mais agregada com a presença do parasitoide. Além disso, no mapa, quando há parasitismo ocorre maior diferença entre as cores dos sítios o que também é uma maneira de perceber a agregação.

## 5 CONCLUSÕES

O modelo proposto, baseado na biologia do pulgão *A. gossypii* em algodoeiro *G. hirsutum* e nas características relativas ao parasitismo por *L. testaceipes*, apresenta uma riqueza de detalhes e diferentes aspectos a serem analisados, além daqueles já tratados na dinâmica puramente temporal proposta por Costa (2011). Representa com bons resultados o comportamento dos parâmetros biológicos do pulgão, tais como taxa intrínseca de crescimento, duração de uma geração e as curvas de sobrevivência.

A simulação usando, autômatos celulares como forma de mimetizar as plantas e, ainda, implementar seu ciclo fenológico, deixa o modelo mais próximo da realidade das plantações de algodão. Portanto, foi possível verificar a evolução da porcentagem de plantas infestadas e a probabilidade de gerar indivíduos alados. Neste trabalho, diferentes cenários foram tratados e as análises dos resultados foram apresentadas a fim de colaborar com trabalhos futuros. Porém, entendemos que este modelo, assim como os resultados gerados da consideração de diferentes cenários, possam ainda ser explorados com maior profundidade.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE ALGODÃO (ABRAPA). **Distribuição do algodão no Brasil**. Disponível em: <<http://www.abrapa.com.br/estatisticas/Paginas/distribuicao-algodao-brasil.aspx>>. Acesso em: 28 ago. 2013.

BELTRÃO, N. E. M.; AZEVEDO, D. M. P. **O Agronegócio do Algodão no Brasil**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008, v. 2, 570 p.

BENSING, K. M.; EKERDT, D. J. Encyclopedia of aging. **Library Journal**, New York, v. 127, n. 18, p. 78-78, 2002.

BIECEK, P.; CEBRAT, S. . Immunity in the noisy Penna model. **International Journal of Modern Physics C**, Singapore, v. 17, n. 12, p. 1823-1829, 2006.

BLACKMAN, R.L. Reproduction, cytogenetics and development. In: MINKS, A. K., HARREWIJN, P. (Ed.). **Aphids: their biology, natural enemies and control**. Amsterdam: Elsevier, 1987, p 193-191. (World Crop Pests, 2A).

BOARETTO, M. A. C.; BRANDÃO, A. L. S. **Manejo Integrado de Pragas**. Disponível em: <<http://www.uesb.br/entomologia/manejo.html>>. Acesso em: 11 dez. 2012.

BRITO, D. R. **Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 201, em função de nitrogênio, densidade de plantas e cloreto de mepiquat**. 2005. 116 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

BUENO, V. H. P. Controle biológico de pulgões ou afídeos-praga em cultivos protegidos. **Informe Agropecuário**, v. 26, n. 225, p. 9-17, 2005.

CARNEVALE, A. B.; BUENO, V. H.; SAMPAIO, M. V. Parasitismo e desenvolvimento de *Lysiphlebus Testaceipes* (Cresson) (hymenoptera: Aphidiidae) em *Aphis Gossypii* Glover e *Myzus Persicae* (Sulzer) (hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, v. 32, n. 2, p. 293-297, 2003.

CHEN, F.; LI, C. Transmission of sexually transmitted disease in complex network of the Penna model. **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, Bristol, v. 4, abr. 2007. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/1742-5468/2007/04/P04006>>

COE, J. B. and Y. MAO. Gompertz mortality law and scaling behavior of the Penna model. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, New York, v. 72, n. 5, p. 1-5, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Algodão**. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/camaras\\_setoriais/Algodao/27RO/App\\_Propespecção\\_safr\\_a\\_Algodão.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/Algodao/27RO/App_Propespecção_safr_a_Algodão.pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2013.

COSTA, C. L. Vetores de vírus de plantas:1, insetos. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, Brasília, v. 6, p. 103 - 171, 1998.

COSTA, L. A. **Simulação computacional da dinâmica temporal de formas ápteras e aladas do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 em algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.)**. 2011. 70 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

DEGRANDE, P.E. **Guia prático de controle das pragas do algodoeiro**. Dourados: UFMS, 1998, 60 p.

DION, E. et al. Symbiont infection affects aphid defensive behaviours. **Biology Letters**, London, v. 7, n. 5, p. 743-746, 2011.

DIXON, A. F. G. **Aphid ecology**. London: Chapman & Hall, 1998, 286 p.

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.

\_\_\_\_\_. Parthenogenetic reproduction and the rate of increase in aphids. p. 269-287. In: A. K MINKS; HARREWINJN, P. (Ed.). **World Crop Pest-Aphids: their biology, natural enemies and control**. Amsterdam: Elsevier, 1987. v. 2A, p. 269-287.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília, 2008. 519 p.

\_\_\_\_\_. **Cultivo do algodão herbáceo na agricultura familiar**. Disponível em: <[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoAgriculturaFamiliar\\_2ed/index.html](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoAgriculturaFamiliar_2ed/index.html)>. Acesso em: 14 ago. 2012.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. Agriannual 2004: Anuário da agricultura brasileira. In: \_\_\_\_\_. **Algodão**. São Paulo, 2004. p. 131-144.

FUZATTO, M.G. Objetivos e resultados obtidos nos trabalhos de pesquisa conduzidos no Instituto de Campinas com respeito à qualidade da fibra de algodão. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE TECNOLOGIA TÊXTIL, 1., 1987, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETICT/SENAI, 1987. p. 1-28.

GALLO, D. et al. **Entomologia Agrícola**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 920 p.

GASSEN, D. N. **Insetos associados à Cultura do Trigo no Brasil**. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, 1984. 39 p. (Circular Técnica).

GIAROLA, L. T. P. et al. Computer simulation of *Aphis gossypii* insects using Penna aging model. **Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications**, London, v. 368, n. 1, p. 147-154, 2006.

GOMES, T.; FERRACIOLI, L. A investigação da construção de modelos no estudo de um tópico de Física utilizando um ambiente de modelagem computacional qualitativo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Porto Alegre, v. 28, n. 4, p. 453-461, 2006.

GRAVENA, S. O controle biológico na cultura algodoeira. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.9, p.3-15, 1983.

HADDAD, D. N.; PENNA, T. J. P. Anomalous relaxation of the Penna model. **International Journal of Modern Physics C**, Singapore, v. 19, n. 4, p. 671-676, 2008.

HAGVAR, E.B.; HOFVANG, T. Aphid parasitoids (Hymenoptera, Aphidiidae): biology, host selection and use in biological control. **Biocontrol News and Information**, New Jersey, v. 12, p. 13-41, 1991.

HE, M. et al. A cellular automata model of learning based on bit-string with intelligence. **International Journal of Modern Physics C**, Singapore, v. 17, n. 5, p. 677-683, 2006.

\_\_\_\_\_. A prey-predator model of learning based on bit string with intelligence. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, London, v. 377, n. 1, p. 131-137, 2007.

HE, M.; WANG, S. A study of immunity based on Penna aging model. **International Journal of Modern Physics C**, Singapore, v. 17, n. 4, p. 479-492, 2006.

HOLST, N.; RIGGLE, P. A physiologically based model of pest-natural enemy interactions. **Experimental Applied Acarology**, Amsterdam, v. 21, n. 6/7, p. 325-341, June 1997.

ILHARCO, F. A. **Equilíbrio biológico de afídeos**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1992. 303 p.

KRING, T.J.; KRING, J.B. Aphid fecundity, reproductive longevity, and parasite development in the *Schizaphis graminum* (Rondani) (Homoptera: Aphididae) - *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hymenoptera: Braconidae) system. **Canadian Entomology**, Ottawa, v. 120, p. 1079-1083, 1988.

MACKAUER, M.; WAY, M. J. *Myzus persicae*, an aphid of world importance. In: DELUCCHI, V.L. (Ed.), **Studies on biological control**. Cambridge: Cambridge University, 1976. p. 51-117.

MARUR, C.J. Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Recomendações para cultura do algodoeiro no Paraná**. Londrina, 1993. p. 2-7.

MAUNEY, J.R. Floral initiation of upland cotton *Gossypium hirsutum* L. **Journal Experimental Botany**, v.17, p.452-459, 1966.

MEDEIROS, N. G. F. **Modelos evolucionários de envelhecimento biológico**. Tese (Doutorado em Física). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001. 119 p.

MICHELOTTO, M. D.; BUSOLI, A. C. Eficiência de ninfas e adultos de *Aphis gossypii* Glover na transmissão do vírus mosaico-das-nervuras do algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 2, p. 255-259, 2003.

MIRANDA, B. et al. Autômatos celulares aplicados à epidemiologia da esquistossomose em Pernambuco - uma análise comparativa de processos de coleta de moluscos. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 31., 2008, Belém. **Anais...** Belém: SBMAC, 2008. 1 CD-ROM.

MORISITA, M. Is index, a measure of dispersion of individuals. **Researches on Population Ecology**, Kyoto, v.4, n.20, p.1-7, 1962.

NÁPOLES, F. A. M. et al. Efeito da época da supressão da irrigação sobre parâmetros morfo-fisiológicos do algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 1., 1999, Ribeirão Preto. **Anais...** Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, 1999. p.507-512.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988. 434 p.

PAPA, G. Pragas e seu controle. In: FUNDO DE APOIO À CULTURA DO ALGODÃO. **Algodão: Pesquisas e resultados para o campo**. Cuiabá: FACUAL, 2006, p. 206-239.

PARRA, J. R. P. et al. **Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores**. São Paulo: Manole, 2002. 609 p.

PARTRIDGE, L.; BARTON, N. H. On measuring the rate of ageing. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. 263, n. 1375, p. 1365-1371, Oct. 1996.

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, M.J.B.; ALBUQUERQUE, F.A.; BASTOS, C.S. Pragas do algodoeiro: identificação, biologia e sintomas de ataque. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 1073-1117, set./dez. 2006.

PESSOA, L.G.A. et al. Aspectos da biologia de *Aphis gossypii*, 1877 (Hemiptera: Aphididae) em quatro cultivares de algodoeiro, em laboratório. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 6, p. 1235-1239, nov./dez. 2004.

PONSEN, M. B. Anatomy of an aphid vector: *Myzus persicae*. In: HARRIS, K. F.; MARAMOSH, K. (Ed.). **Aphids as virus vectors**. New York: Academic, 1977. p. 6-79.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

ROBERT, Y. Aphids and their environment: dispersion and migration. In: MINKS, A. K.; HARREWIJN, P. (Ed.). **Aphids**: their biology, natural enemies and control. New York: Elsevier, 1987. p. 299-313. (Word Crop Pests, 2A).

RODRIGUES, S. et al. Influência da temperatura no desenvolvimento e parasitismo de *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae) em *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 33, n. 3, p. 341-346, 2004.

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, 2003.

RODRIGUES, S. M. M.; BUENO, V. H. P. Parasitism rate of *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hym.: Aphidiidae) on *Schizaphis graminum* (Rond.) and *Aphis gossypii* Glover (Hem.: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 30, n. 4, p. 625-629, Dec. 2001.

RODRIGUES, S. M. M.; BUENO, V. H. P.; BUENO FILHO, J. S. S. Desenvolvimento e avaliação do sistema de criação aberta no controle de *Aphis gossypii* Glover (Hem.: Aphididae) por *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) (Hym.: Aphidiidae) em casa-de-vegetação. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 30, n. 3, p. 433-436, set. 2001.

ROSOLEM, C. A. Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 95, p. 1-9, 2001

SALVADORI, J. R.; TONET, G. E. L. **Manejo Integrado dos Pulgões de Trigo**. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, 2001. 52 p. (Circular Técnica).

SILVA, I. P. F. et al. Estudo das fases fenológicas do algodão (*Gossypium hirsutum* L.). **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, n. 20, p. 1-10, 2011.

SIRAKOULIS, G. C.; KARAFYLLIDIS, I.; THANAILAKIS, A. A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 133, p. 209-223, Apr. 2000.

SOARES-FILHO, B. S. et al. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. **Megadiversidade**, São Paulo, v. 3, n. 1/2, p. 74-86, dez. 2010.

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

SOUZA, A. A.; MARTINS, S.G.F.; ZACARIAS, M.S. Computer simulation applied to the biological control of the insect *Aphis gossypii* for the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes*. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 8, n. 200, p. 756-763, Jan. 2009.

STARÝ, P. Aphidiidae, p.171-184. In: MINKS A. K.; HARREWIJN P. (Ed.), **Aphids: their biology, natural enemies and control**. Amsterdam: Elsevier, 1988. p. 171-184.

STARÝ, P.; SAMPAIO, M. V.; BUENO, V. H. P. Aphid parasitoids (Hymenoptera, Braconidae, Aphidiinae) and their associations related to biological control in Brazil. **Revista Brasileira de Entomologia**, São Paulo, v. 51, n. 1, p. 107-118, jan./mar. 2007.

SUJII, E.R. et al. Comunidade de inimigos naturais e controle biológico natural do pulgão, *Aphis gossypii* glover (hemiptera: aphididae) e do Curuquerê, alabama argillacea hübner (lepidoptera: Noctuidae) na cultura do algodoeiro no distrito federal. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 74, n. 4, p. 329-336, out./dez. 2007.

TATCHELL, G. M.; PARKER, S. J. Host plant-selection by migrant rhopalosiphum-padi in autumn and the occurrence of an intermediate morph. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, Dordrecht, v. 54, n. 3, p. 237-244, 1990.

XIA, J. Y.; WERF, W. van der; RABBINGE, R. Influence of temperature on bionomics of cotton aphid, *Aphis gossypii*, on cotton. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, Dordrecht, n. 1, v. 20, p. 25-35, Jan. 1999.

YAMAOKA, R. S. **O algodão na agricultura familiar**. Disponível em: <[http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/trabalhos\\_cba4/426.pdf](http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/trabalhos_cba4/426.pdf)>. Acesso em: 03 set. 2012.