



TIAGO MARTINS PEREIRA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA
ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *Aphis gossypii*
Glover, EM ALGODOEIRO (*Gossypium hirsutum* L.)
PLANTADO EM SISTEMA DE FILEIRAS SIMPLES**

LAVRAS - MG

2014

TIAGO MARTINS PEREIRA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA
ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *Aphis gossypii* Glover, EM
ALGODOEIRO (*Gossypium hirsutum* L.) PLANTADO EM SISTEMA DE
FILEIRAS SIMPLES**

Tese 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 Doutor.

Orientadora
Dra Solange Gomes Faria Martins

**LAVRAS - MG
2014**

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

Pereira, Tiago Martins.

Simulação computacional da dinâmica espaço-temporal do pulgão *Aphis gossypii* Glover, em algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) plantado em sistema de fileiras simples / Tiago Martins Pereira.
– Lavras : UFLA, 2014.

117 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Solange Gomes Faria Martins.

Bibliografia.

1. Algodão - Pragas - Dinâmica populacional. 2. Modelo Penna.
3. Algodão - Manejo Integrado de Pragas. 4. Distribuição espacial. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 519.5

TIAGO MARTINS PEREIRA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA
ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *Aphis gossypii* Glover, EM
ALGODOEIRO (*Gossypium hirsutum* L.) PLANTADO EM SISTEMA DE
FILEIRAS SIMPLES**

Tese 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 Doutor.

APROVADA em 07 de fevereiro de 2014.

Dr. Maurício Sérgio Zacarias	EPAMIG
Dr. João Domingos Scalon	UFLA
Dra Maria do Carmo Pacheco de Toledo Costa	UFLA
Dr. Joel Augusto Muniz	UFLA

Dra Solange Gomes Faria Martins
Orientadora

**LAVRAS - MG
2014**

*A Deus,
à minha esposa,
à minha família,
aos meus amigos,
ofereço.*

*À minha esposa, Diana; À minha Mãe, Luzia; ao meu Pai, José Raimundo, ao
meu irmão, Raphael.
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Embora uma tese seja, pela sua finalidade acadêmica, um trabalho individual, existem contribuições de natureza diversa que não podem e nem devem deixar de serem destacadas e reconhecidas. De alguma forma, tenho de organizar as menções, por isso, uns virão à frente de outros; no entanto, agradeço a todos com o mesmo sentimento. Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus, por ter me dado força e inspiração, durante esta longa caminhada, especialmente nos momentos mais difíceis.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Exatas, juntamente com todos os seus docentes, pela oportunidade no curso de Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária e pela estrutura oferecida para conclusão do mesmo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pelo suporte financeiro concedido para realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante parte do desenvolvimento desta pesquisa.

À Profa Dra Solange Gomes Faria Martins, por ter aceitado me orientar e planejar este trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Maurício Sérgio Zacarias, Dr. João Domingos Scalon, Dra Maria do Carmo Pacheco de Toledo Costa, Dr. Joel Augusto Muniz, pela disponibilidade e pelas críticas e sugestões que contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas, por sempre estarem à disposição quando era necessário.

À minha mãe, Luzia, pelo carinho, amor, incentivo e apoio permanente e ao meu pai, José Raimundo, por estar, apesar da distância, sempre presentes.

Ao meu irmão, Raphael, minha cunhada Bianca e a todos os meus familiares pela compreensão por todos esses anos longe.

Aos meus sogros, Neném e Cidinha, e minhas cunhadas e concunhados pelo incentivo nas horas incertas.

Aos meus “amigos de Lavras”, em especial Marcelo, Ênio, Manoel, Danilo, Josi, Vasquez, e tantos outros que fizeram parte dessa história.

Aos meus “amigos de Ouro Preto”, professores e funcionários do Departamento de Estatística e Departamento de Matemática da Universidade Federal de Ouro Preto, onde posso empregar todos os meus conhecimentos adquiridos durante a realização do meu Doutorado.

A todas as pessoas que aqui não foram mencionadas, por mero esquecimento, mas que de alguma forma contribuíram para a realização desta conquista.

E finalmente, um agradecimento especial: meu agradecimento mais profundo só poderia ser dedicado a uma pessoa: minha Esposa. O tempo todo ao meu lado, incondicionalmente. Nos momentos difíceis, que não foram raros, nos últimos anos, sempre me fazendo acreditar que chegaria ao final desta difícil, porém gratificante etapa. Este período nos mostrou a verdade sobre nosso relacionamento: somos uma Família! Sou grato por cada incentivo, cada sorriso, cada gesto de carinho, por cada dia de compreensão. Obrigado, Di! Sem seu apoio este momento nunca teria chegado! Te amo!

“O único lugar onde o sucesso vem
antes do trabalho é no dicionário”
Albert Einstein

“Feliz aquele que transfere o que
sabe e aprende o que ensina”
Cora Coralina

RESUMO

A agricultura no Brasil é, historicamente, uma das principais bases da economia do país, desde os primórdios da colonização até o século XXI, evoluindo das extensas monoculturas para a diversificação da produção. A cultura do algodão (*Gossypium hirsutum* L.) é uma das mais tradicionais do país e tem dado sinais de forte avanço nos últimos anos. Todavia, as pragas constituem-se um dos fatores limitantes para sua exploração, caso não sejam tomadas medidas eficientes de controle. Dentre as pragas que atacam o algodoeiro, o pulgão *Aphis gossypii* Glover é considerado praga-chave em diversas regiões produtoras do Brasil e do mundo, principalmente para variedades suscetíveis aos vírus por ele transmitidos. Na tentativa de solucionar esse problema, os agricultores fazem uso indiscriminado de agrotóxicos causando sérios danos ambientais. Nesta tese, foi proposto um novo modelo computacional, baseado no Modelo Penna, considerando o ciclo fenológico do algodoeiro, a fim de dar suporte ao Manejo Integrado de Pragas, filosofia de controle de pragas que procura preservar e incrementar os fatores de mortalidade natural, pelo uso integrado de todas as técnicas de combate possíveis, considerando parâmetros técnicos, econômicos, ecológicos e sociológicos, visando a manter a população das pragas abaixo do nível de dano econômico. Neste contexto, simulou-se a dinâmica espaço-temporal do pulgão *A. gossypii* em uma rede onde cada sítio foi considerado uma planta do algodoeiro *Gossypium hirsutum* L., baseada em dados experimentais. Os resultados encontrados mostraram que o modelo proposto conseguiu reproduzir as características populacionais dos pulgões, bem como o padrão espacial da população desses afídeos na natureza, indicando que esta pode ser uma importante ferramenta para o estabelecimento de estratégias de controle.

Palavras-chave: Modelo Penna. Pulgão do Algodoeiro. Algodoeiro. Manejo Integrado de Pragas. Dinâmica Populacional.

ABSTRACT

Agriculture in Brazil is, historically, one of the main basis of the country's economy since the beginning of the colonization up to the XXI century, evolving from the extensive monocultures to production diversification. Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) culture is one of the more traditional in the country and has been giving signs of a strong progress in recent years. However, the pests constitute one of the limiting factors for its exploitation, if efficient control measures are not taken. Among the pests which assail the cotton plant, the *Aphis gossypii* Glover aphid is considered the key-pest in many producing regions in Brazil and in the world, especially for varieties susceptible to the virus transmitted by them. In the attempt at solving this problem, the farmers perform indiscriminate use of agrochemicals, causing serious environmental problems. In this dissertation, we proposed a new computational model based on the Penna Model, considering the phenological cycle of the cotton plant, in order to support the Integrated Pest Management, pest control philosophy which seeks to preserve and increment natural mortality factors through the integrated use of all possible combat techniques, selected based on technological, economic, ecological and sociological parameters, aiming at maintaining the pest population below the level of economic damage. In this context, based on experimental data, we simulated the spatial-temporal dynamics of the *A. gossypii* aphid in a network in which each site was considered a plant of the *Gossypium hirsutum* L. cotton. The results showed that the proposed model was able to reproduce the characteristics of the aphid population, as well as their spatial patterns in nature, indicating that this may be an important tool in establishing control strategies.

Keywords: Penna Model. Cotton aphid. Cotton plant. Integrated Pest Management. Population Dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Plantio de algodão irrigado	24
Figura 2	Plantio de algodão irrigado em fileiras simples	27
Figura 3	Plantio de algodão irrigado em fileiras duplas	28
Figura 4	Estágios do desenvolvimento do algodoeiro em fase vegetativa. O ponto de mudança de cada estágio é determinado pelo comprimento da folha: 2,5 cm	29
Figura 5	Estágios do desenvolvimento do algodoeiro em fase reprodutiva. O ponto de mudança de cada estágio é determinado pelo aparecimento do primeiro botão floral em cada ramo frutífero	30
Figura 6	Estágios do desenvolvimento do algodoeiro em fase de abertura da flor. O ponto de mudança de cada estágio é determinado pelo aparecimento da primeira flor em cada ramo frutífero	31
Figura 7	Estágios do desenvolvimento do algodoeiro em fase de abertura do capulho. O ponto de mudança de cada estágio é determinado pelo aparecimento da primeira bola em cada ramo frutífero	32
Figura 8	Curvas ajustadas de altura média de plantas do algodoeiro, cultivar BRS 200 - Marrom, submetidos a diferentes lâminas de irrigação:(—) 411,6mm, (---) 514,5mm, (...) 617,4mm	34
Figura 9	Curvas ajustadas da área foliar do algodoeiro, cultivar BRS 200 - Marrom, submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (—) 411,6mm, (---) 514,5mm, (...) 617,4mm	35
Figura 10	Esquema do ciclo de vida completo dos pulgões com reprodução sexuada	37
Figura 11	Esquema do ciclo de vida incompleto dos pulgões com reprodução assexuada	37
Figura 12	Esquema do ciclo de vida dos afídeos anolocíclicos	38
Figura 13	Ninfas (esquerda) e adulto áptero (direita) do pulgão <i>Aphis gossypii</i>	38
Figura 14	Adulto alado do pulgão <i>Aphis gossypii</i>	39
Figura 15	Folhas de algodão deformadas pelo ataque de pulgões	41
Figura 16	Outras doenças transmitidas por pulgões em plantas de algodão	42

Figura 17	Tira de 64 <i>bits</i> representando o “genótipo” de um indivíduo. Os <i>bits</i> setados em 1 representam a presença de mutações	43
Figura 18	Tira de 64 <i>bits</i> representando o “genótipo” da mãe e a tira herdada pela filha, com uma mutação deletéria escolhida em um <i>bit</i> aleatório (idade três). Os <i>bits</i> setados em 1 representam a presença de mutações	44
Figura 19	Conexões em um grid regular. Os 16 pontos representam os sítios	49
Figura 20	Correlograma direcional de Moran	54
Figura 21	Representação da saída de simulações divididas em subamostras (“batches”)	55
Figura 22	Esquema de reprodução de fêmeas ápteras e aladas na dinâmica populacional do pulgão <i>A. gossypii</i>	58
Figura 23	Representação da rede 9×9 com fileiras simples, utilizada como base nas simulações	60
Figura 24	Representação da entrada de pulgões alados na rede a partir do SI	61
Figura 25	Representação das regras de migração para o caso do áptero situar-se nos cantos da rede	62
Figura 26	Representação das regras de migração para o caso do áptero situar-se nas bordas da rede	63
Figura 27	Representação das regras de migração para o caso do áptero situar-se no interior da rede	64
Figura 28	Representação da migração de pulgões alados saindo da rede para o SI	65
Figura 29	Representação da migração de pulgões alados dentro da rede	66
Figura 30	Curvas de sobrevivência em função da idade do pulgão <i>A. gossypii</i> Glover na temperatura de $25^{\circ}C$, alimentado por cultivares de algodoeiro (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (●) 411,6mm (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm, obtidas por meio de simulação e avaliadas fora (à esquerda) e dentro (à direita) da rede	68
Figura 31	Evolução temporal do tamanho populacional total (preto), de ápteros (vermelho) e de alados (azul) de <i>Aphis gossypii</i> Glover na temperatura de $25^{\circ}C$, alimentado por cultivares de algodoeiro (<i>Gossypium hirsutum</i> L.), obtidas por meio de simulação e avaliadas fora da rede	70

Figura 32	Evolução temporal do tamanho populacional total de <i>Aphis gossypii</i> Glover na temperatura de 25°C, alimentado por cultivares de algodoeiro (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (●) 411,6mm (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm, obtidas por meio de simulação e avaliadas dentro da rede	71
Figura 33	Número de plantas de algodoeiro (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (●) 411,6mm (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm, infestadas pelo pulgão <i>A. gossypii</i> em função do tempo (em dias), obtidos por meio de simulação	71
Figura 34	Número de ápteros por planta na temperatura de 25°C, alimentados por cultivares de algodoeiro (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (●) experimental (FERNANDES et al., 2012) (○) 411,6mm (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm	72
Figura 35	Número de alados por planta (esquerda) na temperatura de 25°C, alimentados por cultivares de algodoeiro (<i>Gossypium hirsutum</i> L.), submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (●) experimental (FERNANDES et al., 2012) (○) 411,6mm (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm	73
Figura 36	Taxa intrínseca de crescimento da população de <i>Aphis gossypii</i> na temperatura de 25°C, alimentado por cultivares de algodão <i>Gossypium hirsutum</i> L. submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (preto) 411,6mm, (azul) 515,5mm e (vermelho) 617,4mm, obtidas por meio de simulação e avaliadas fora da rede	75
Figura 37	Taxa intrínseca de crescimento da população de <i>Aphis gossypii</i> na temperatura de 25°C, alimentado por cultivares de algodão <i>Gossypium hirsutum</i> L. submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (●)411,6mm, (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm, obtidas por meio de simulação e avaliadas dentro da rede	76
Figura 38	Distribuição espacial da população total de pulgões <i>A. gossypii</i> na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em t = 30	79
Figura 39	Distribuição espacial da população total de pulgões <i>A. gossypii</i> na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em t = 78	80

Figura 40	Distribuição espacial da população total de pulgões <i>A. gossypii</i> na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 108$	81
Figura 41	Distribuição espacial da população de pulgões <i>A. gossypii</i> alados na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 30$	82
Figura 42	Distribuição espacial da população de pulgões <i>A. gossypii</i> ápteros na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 30$	83
Figura 43	Distribuição espacial da população de pulgões <i>A. gossypii</i> alados na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 78$	84
Figura 44	Distribuição espacial da população de pulgões <i>A. gossypii</i> ápteros na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 78$	85
Figura 45	Distribuição espacial da população de pulgões <i>A. gossypii</i> alados na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 108$	86
Figura 46	Distribuição espacial da população de pulgões <i>A. gossypii</i> ápteros na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 108$	87
Figura 47	Correlograma direcional de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 30$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. Círculos vermelhos indicam autocorrelação positiva significativa, círculos verdes indicam autocorrelação negativa significativa e círculos brancos indicam autocorrelação não-significativa	90
Figura 48	Correlograma direcional de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 78$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. Círculos vermelhos indicam autocorrelação positiva significativa, círculos verdes indicam autocorrelação negativa significativa e círculos brancos indicam autocorrelação não-significativa	91

Figura 49	Correlograma direcional de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 108$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. Círculos vermelhos indicam autocorrelação positiva significativa, círculos verdes indicam autocorrelação negativa significativa e círculos brancos indicam autocorrelação não-significativa	91
Figura 50	Correlograma de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 30$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. A linha tracejada indica o valor esperado do índice I_d de Moran sob hipótese nula de ausência de autocorrelação	93
Figura 51	Correlograma de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 78$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. A linha tracejada indica o valor esperado do índice I_d de Moran sob hipótese nula de ausência de autocorrelação	99
Figura 52	Correlograma de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 108$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. A linha tracejada indica o valor esperado do índice I_d de Moran sob hipótese nula de ausência de autocorrelação	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Duração do estágio ninfal (α), período pré-reprodutivo (β), longevidade em dias (L), fecundidade total por fêmea (B) e fecundidade diária por fêmea (b) de <i>Aphis gossypii</i> Glover em <i>Gossypium hirsutum</i> L. em diferentes temperaturas (médias \pm semiamplitude do intervalo de confiança 95%), obtidos experimentalmente por Xia, Werf e Rabbinge (1999)	40
Tabela 2	Taxa intrínseca de crescimento (r_m) e duração, em dias, de uma geração (τ) de <i>Aphis gossypii</i> Glover em <i>Gossypium hirsutum</i> L. em diferentes temperaturas, obtidos experimentalmente por Xia, Werf e Rabbinge (1999)	40
Tabela 3	Idade mínima de reprodução (R_M), idade máxima de reprodução (R_X) e fecundidade diária (b) do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover em <i>Gossypium hirsutum</i> L., utilizadas no modelo Penna	58
Tabela 4	Tamanho médio populacional do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover ápteros e alados (média \pm δ) alimentado por cultivares de algodoeiro (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação, avaliadas fora da rede (δ = semiamplitude do intervalo de confiança de 95% da média)	69
Tabela 5	Taxa intrínseca de crescimento da população de pulgões <i>Aphis gossypii</i> Glover (média \pm δ) alimentados em cultivares de algodoeiro (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação, avaliadas no Sítio Isolado e na Rede (δ = semiamplitude do intervalo de confiança de 95% da média)	74
Tabela 6	Valores médios do índice de Morisita (média $\pm \delta_b$) para a população de pulgões <i>A. gossypii</i> obtidos por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação (δ_b = semiamplitude do intervalo de confiança bootstrap de 95% da média)	78
Tabela 7	Estatísticas (média amostral, variância amostral e expoente k da distribuição binomial negativa) da população de pulgões <i>A. gossypii</i> em algodoeiro (<i>G. hirsutum</i>) submetidos a diferentes lâminas de irrigação	88

Tabela 8	Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões <i>A. gossypii</i> alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 411,6mm, mensurados em $t = 30$. . .	95
Tabela 9	Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões <i>A. gossypii</i> alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 515,5mm, mensurados em $t = 30$. . .	96
Tabela 10	Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões <i>A. gossypii</i> alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 617,4mm, mensurados em $t = 30$. . .	97
Tabela 11	Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões <i>A. gossypii</i> alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 411,6mm, mensurados em $t = 78$. . .	100
Tabela 12	Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões <i>A. gossypii</i> alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 515,5mm, mensurados em $t = 78$. . .	101
Tabela 13	Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões <i>A. gossypii</i> alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 617,4mm, mensurados em $t = 78$. . .	102
Tabela 14	Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões <i>A. gossypii</i> alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 411,6mm, mensurados em $t = 108$. . .	104

- Tabela 15 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 515,5mm, mensurados em $t = 108$. . 105
- Tabela 16 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 617,4mm, mensurados em $t = 108$. . 106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	23
2.1	Objetivos Específicos	23
3	REVISÃO DE LITERATURA	24
3.1	O algodoeiro	24
3.1.1	A história do algodão no mundo	24
3.1.2	A história do algodão no Brasil	25
3.1.3	Importância econômica	26
3.1.4	Plantio do algodoeiro	27
3.1.5	Escala de crescimento e desenvolvimento do algodão	29
3.2	O pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover, 1877	35
3.2.1	Importância econômica dos pulgões	35
3.2.2	Biologia e aspectos comportamentais do pulgão <i>A. gossypii</i>	36
3.3	O pulgão <i>A. gossypii</i> em algodoeiro	40
3.4	Modelo Penna	42
3.4.1	Modelo Penna assexuado	43
3.5	Autômatos celulares	45
3.6	Métodos de análise espacial	46
3.6.1	Índice de Morisita	46
3.6.2	Expoente k da distribuição binomial negativa	48
3.6.3	Índice de Moran	48
3.6.4	Correlograma de Moran	51
3.6.5	Correlograma direcional de Moran	53
3.7	Métodos de análise das simulações	54
4	METODOLOGIA	57
4.1	Modelo Penna adaptado à biologia do pulgão do algodoeiro com a inclusão de formas aladas e ciclo fenológico do algodoeiro	57

4.2	Regras de migração dos pulgões ápteros e alados	61
4.2.1	Pulgões ápteros	61
4.2.2	Pulgões alados	64
4.3	Parâmetros utilizados na simulação	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.1	Análise temporal da dinâmica espaço-temporal	68
5.1.1	Curvas de sobrevivência	68
5.1.2	Tamanho médio populacional	69
5.1.3	Taxa Intrínseca de Crescimento	73
5.2	Análise espacial da dinâmica espaço-temporal	76
5.2.1	Índice de Morisita	77
5.2.2	Expoente k da distribuição binomial negativa	87
5.2.3	Correlograma direcional de Moran	88
5.2.4	Correlogramas de Moran	92
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
7	CONCLUSÃO	108
	REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

A agricultura no Brasil é, historicamente, uma das principais bases da economia do país, desde os primórdios da colonização até o século XXI, evoluindo das extensas monoculturas para a diversificação da produção. Inicialmente produtora de cana-de-açúcar, passando pelo café, a agricultura brasileira apresenta-se como uma das maiores exportadoras do mundo em diversas culturas, caracterizando então, a expressão que diz ser o “*Brasil, celeiro do mundo*”, acentuando a vocação agrícola do país (SEIBEL, 2007).

Neste contexto, o ataque de doenças e pragas, além de fatores climáticos adversos, são os principais fatores responsáveis pela instabilidade e baixo rendimento na produção agrícola, tendo como consequência um impacto negativo na economia brasileira (MENEZES, 2001). Na tentativa de minimizar o problema, os agricultores fazem uso indiscriminado de agrotóxicos, o que pode provocar acúmulo de substâncias nocivas no solo, água (mananciais, lençol freático) e ar, provocando sérios problemas ecológicos. Além disso, outros danos relacionados ao uso de pesticidas são as pragas desenvolverem resistência aos compostos químicos, tornando-se invulneráveis, destruição dos inimigos naturais e surgimento de novas pragas até então de importância secundária (NECHET, 2006).

Uma solução mais econômica e ecologicamente viável, para contornar esses problemas, é o Manejo Integrado de Pragas (MIP). O MIP trata-se de uma filosofia de controle de pragas que procura preservar e incrementar os fatores de mortalidade natural, pelo uso integrado de todas as técnicas de combate possíveis, selecionadas considerando parâmetros técnicos, econômicos, ecológicos e sociológicos, visando a manter a população das pragas abaixo do nível de dano econômico (SMIDERLE, 2007).

Ainda segundo Smiderle (2007), o conhecimento da biologia e ecologia das pragas são fundamentais para que o MIP seja executado com sucesso. É importante conhecer o ciclo biológico da praga e seus inimigos naturais. É preciso salientar que a simples técnica de se utilizar o controle químico, sem os conhecimentos básicos de biologia e ecologia da praga, pode ter resultados negativos. Deve-se fazer o desenvolvimento de programas de manejo de pragas, nos quais

todos os fatores capazes de contribuir para diminuir a população da praga entrem em ação.

Segundo Oliveira (2010), seria mais adequado para um programa de monitoramento eficaz de uma praga e seus inimigos naturais conhecer os processos fundamentais que regulam a sua dinâmica populacional, tais como seu ciclo de vida, a flutuação populacional e o número de gerações anuais. Kuno (1991) lembra que este processo de monitoramento deve ainda levar em consideração um plano de amostragem amparado em fundamentos estatísticos e na distribuição espacial dos insetos. O padrão de distribuição espacial influencia diretamente a dinâmica populacional de pragas, podendo haver diferenças no impacto de diversos agentes em função das variações espaciais entre os indivíduos.

Cabe ressaltar que, segundo Rodrigues, Fernandes e Santos (2010), o conhecimento a respeito da distribuição espacial das pragas no habitat agrícola torna-se de suma importância na preparação de um programa de amostragem que busque minimizar o uso de inseticidas químicos, diminuindo riscos ambientais.

Conforme mencionado por Taylor (1984), três tipos de distribuição descrevem os arranjos espaciais de indivíduos na natureza: disposição aleatória, quando a disposição dos organismos ocorrem de maneira puramente casual, ou seja, todos os indivíduos têm a mesma probabilidade de ocupar um lugar no espaço e a presença de um indivíduo não afeta a presença do outro; disposição agregada, quando os organismos tendem a se reunir em grupos, ou seja, a presença de um indivíduo aumenta a probabilidade de ocorrência de indivíduos em plantas vizinhas; e distribuição regular ou uniforme, quando os organismos estão uniformemente distribuídos em uma área.

Young e Young (1998) afirmam que o padrão espacial de pragas pode variar, de acordo com o tempo, e no início da colonização, na cultura, a tendência é a distribuição espacial apresentar padrão aleatório, evoluindo para o padrão agregado, raramente atingindo a distribuição regular. Waters (1959) lembra que a maioria dos insetos não se distribuem aleatoriamente no habitat, tendo em vista que poucos ambientes são homogêneos e que os fatores etológicos que determinam sua distribuição são específicos. De acordo com Southwood e Henderson (2000), a tendência geral é a distribuição agregada em ambientes naturais.

Segundo Taylor (1984), o primeiro passo, quando se deseja estudar o comportamento espacial de determinada praga, é dividir a área em estudo em diversas unidades ou quadrados de mesmo tamanho e, posteriormente, descrever o modelo com uma distribuição de frequências dos indivíduos observados.

Com o objetivo de estudar a distribuição espacial de insetos, são utilizados diversos índices de agregação, cuja aplicação é imprescindível em estudos ecológicos ou métodos de amostragem. O índice de Morisita (I_δ) é um método muito utilizado para esse fim e tem a vantagem de ser relativamente independente do tipo de distribuição e do número de unidades amostrais (MORISITA, 1959). Outro índice, igualmente utilizado, é o expoente k da distribuição binomial negativa, que é um indicador da agregação de pragas, quando os dados se ajustam à distribuição binomial negativa (ELLIOTT, 1977).

Neste sentido, o uso de ferramentas matemáticas, estatísticas e computacionais se fazem cada vez mais presentes, em diversas áreas do conhecimento, com o objetivo de criar modelos que permitam compreender o comportamento de diferentes sistemas reais. A modelagem surge como resultado da investigação científica em qualquer campo e é notoriamente importante no mundo biológico, pondo-se como um instrumento considerável no estudo de padrões de comportamento dinâmico em populações, exercendo papel fundamental na descrição de processos demográficos importantes para a dinâmica populacional. De acordo com Renshaw (1991), essas ferramentas são importantes para prever, avaliar e compreender a dinâmica de populações de pragas em uma variedade de condições ambientais. Com esses modelos, diferentes estratégias de controle podem ser comparadas, sendo especialmente úteis para estimar a eficiência de métodos não químicos de controle.

Souza (2010) argumenta que a simulação computacional tem sido utilizada em diversas áreas do conhecimento por proporcionar um ambiente seguro para a investigação de propriedades intrínsecas do sistema de interesse, devido às suas características de flexibilidade e baixo custo, tornando-se uma alternativa para prever resultados experimentais.

Tal metodologia tem sido amplamente utilizada para tratar de assuntos biológicos (GIAROLA; MARTINS; COSTA, 2006; OLIVEIRA, 2010; OLIVEIRA;

MARTINS; ZACARIAS, 2008; SANTOS, 2008; SOUZA, 2007, 2010; SOUZA; MARTINS; ZACARIAS, 2009) e tem-se mostrado bastante útil para este fim, proporcionando ferramentas para o estabelecimento de estratégias de controle e práticas sustentáveis.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho tange à compreensão da dinâmica populacional, temporal e espaço-temporal, de um afídeo de grande importância para a agricultura, o pulgão *Aphis gossypii* Glover 1877 (Hemiptera:Aphididae) e sua relação com o ciclo fenológico da planta hospedeira, o algodoeiro *Gossypium hirsutum* L., submetido a diferentes lâminas de irrigação, com a finalidade de fornecer subsídios para programas de seu manejo integrado e sustentável. Para o cumprimento deste objetivo, será proposto um novo modelo computacional, baseado no modelo Penna, adaptado à biologia do pulgão, com inclusão de formas aladas e do ciclo fenológico do algodão plantado em fileiras simples.

2.1 Objetivos Específicos

- a) caracterizar os indivíduos presentes no sistema: afídeos alados, ápteros e plantas hospedeiras;
- b) simular e avaliar a dinâmica temporal da população de pulgões em uma planta com a interação com fatores externos (sistema aberto);
- c) simular e avaliar a dinâmica espaço-temporal da população de pulgões, em uma rede de plantas submetidas a diferentes lâminas de irrigação, com a interação com fatores externos (sistema aberto) e considerando o ciclo fenológico do algodoeiro;
- d) analisar o comportamento espacial da população de pulgões em plantas de algodão submetidas a diferentes lâminas de irrigação.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O algodoeiro

Nesta seção, aborda-se diversos temas referentes à planta hospedeira, o algodoeiro.

3.1.1 A história do algodão no mundo

O algodão (Figura 1), que é considerado a mais importante das fibras têxteis, naturais ou artificiais, é também, a planta de aproveitamento mais completo e que oferece os mais variados produtos de utilidade. Vainsencher (2009) lembra que muito antes de Cristo, há cerca de cinco mil anos, em escavações arqueológicas feitas no Paquistão, encontraram-se vestígios de tecidos de algodão. No Peru, na mesma época, foram encontrados vestígios da cultura e utilização do algodão para suprir as necessidades humanas. As Índias eram a principal região de cultura e o Egito, o Sudão e toda a Ásia menor já utilizavam o algodão como produto de primeira necessidade.



Figura 1 Plantio de algodão irrigado

De acordo com Mazoyer e Roudart (2010), somente a partir do segundo século de nossa era é que o algodão se tornou conhecido na Europa, quando foi introduzido pelos árabes. Foram os árabes os primeiros a fabricar tecidos e papéis com essa fibra, mas a Europa começou a usar regularmente o algodão na época das cruzadas, após o século X, quando as cidades de Gênova e Veneza começaram a manufaturá-lo como matéria-prima, sobretudo da Índia.

Ainda segundo Mazoyer e Roudart (2010), nos Estados Unidos, o algodão começou a ser praticado como cultura comercial na Carolina do Sul e na Geórgia, onde surgiram os primeiros descaroçadores de rolo. Mais tarde, com a invenção dos descaroçadores de serra, deflagrou-se uma verdadeira revolução na indústria de beneficiamento de algodão, tornando, então, os Estados Unidos o maior produtor mundial de algodão. Tempos depois, outros países, aproveitando as novas técnicas de plantio e benefício, passaram, também, a ser grandes produtores em escala comercial, como Rússia, China, Índia, Paquistão, Egito e Brasil.

3.1.2 A história do algodão no Brasil

No Brasil, pouco se sabe sobre a pré-história dessa malvácea (VAINSENCHER, 2009). Na época do descobrimento, os indígenas já cultivavam o algodão e convertiam-no em fios e tecidos para produção de redes. Além disso, o algodoeiro tinha para os indígenas também outras utilidades: com o caroço esmagado e cozido faziam mingau e com o sumo das folhas curavam feridas.

A cultura de algodão no Brasil começou no Norte e no Nordeste. Segundo Mazoyer e Roudart (2010), o Maranhão despontou como o primeiro grande produtor da malvácea e em 1760 já exportava para a Europa suas primeiras sacas do produto. Ao Maranhão seguiu-se todo o Nordeste tornando-se a primeira grande região produtora do país. De São Paulo, que mais tarde iria se firmar como grande centro produtor, o algodão expandiu para o Paraná, Mato Grosso e Goiás formando a zona meridional, responsável pela grande produção algodoeira do Brasil.

Porto, Oliveira Neto e Sousa (2013) citam que, atualmente, o centro algodoeiro brasileiro é composto, principalmente, por Mato Grosso, Goiás e algumas partes da Bahia. A cultura nos Estados de São Paulo e Paraná diminuiu em razão

dos altos custos das terras e a concorrência de outras culturas como a cana de açúcar e a soja que obrigaram o deslocamento do algodão para outras áreas agrícolas. Praticamente todos os maquinários agrícolas de beneficiamento foram transferidos para o Mato Grosso.

3.1.3 Importância econômica

A cultura do algodão (*Gossypium hirsutum L.*) é uma das mais tradicionais do Brasil e tem dado sinais de forte avanço nos últimos anos. A sua cadeia produtiva gera riquezas superiores a US\$30 bilhões de dólares anualmente, representando cerca de 1,5% do PIB nacional e mais de 11,0% do PIB industrial (NEVES et al., 2013).

Segundo Reetz (2013), o setor têxtil é um dos maiores empregadores do Brasil, com 1,7 milhão de trabalhadores diretos, chegando a 8 milhões de pessoas se forem consideradas as funções indiretas e o efeito renda, apesar da forte modernização tecnológica que se vem observando, desde a abertura da economia, no início da década de 1990. Esses números levam o segmento a ser o segundo maior empregador da indústria de transformação, atrás apenas da de alimentos e bebidas somados, representando 16,4% das vagas e 5,5% do faturamento.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Têxtil (ABIT), o crescimento estimado do setor têxtil e de confecção para 2013 está na ordem de 2,4% na indústria de transformação, além de 4% no varejo. O faturamento previsto é de US\$ 53 bilhões. De janeiro a março de 2013, o varejo teve desempenho positivo de 4,03% no volume vendido e de 9,04% na receita nominal, ambos em comparação com igual período de 2012 (REETZ, 2013).

Para a temporada 2013/2014, a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) estima que a produção brasileira de algodão em pluma alcance 1,633 milhão de toneladas, o que representaria aumento de 24,7% em relação à anterior. O aumento da área plantada é estimado em 20%, ultrapassando 1 milhão de hectares, refletindo a recuperação dos preços internos e a queda nas cotações do milho em 2013. Quanto à produtividade, o aumento no Brasil poderá chegar a 3,8%. Para a Bahia e Minas Gerais, espera-se recuperação de 18% e 10%, respectivamente, na

produtividade da temporada 2013/2014 sobre a anterior.

3.1.4 Plantio do algodoeiro

Segundo Araújo et al. (2006), entende-se por espaçamento o intervalo entre duas fileiras, e por densidade de plantio o espaço deixado entre plantas dentro da fileira de uma lavoura. O espaçamento e a densidade de plantio são aspectos tecnológicos que definem a população e o arranjo de plantas, podendo interferir no rendimento e nas operações a serem realizadas em uma lavoura.

Para o algodoeiro irrigado, quando houver condições de elevada disponibilidade de água e solos férteis, recomenda-se o uso de populações mais elevadas que no cultivo em regime de sequeiro, isto é, em condições de fornecimento natural de água ao solo (AZEVEDO; SILVA, 2007; BARRETO, 1994). Quando a água de irrigação for aplicada por meio de sistemas de sulcos, recomenda-se o uso de arranjos de fileiras simples (Figura 2) ou de fileiras duplas (Figura 3). Segundo Araújo et al. (2006), o arranjo de fileiras duplas tem a vantagem do melhor aproveitamento da umidade nos dois lados da secção de condução da água enquanto que no sistema de fileiras simples não há acamamento de plantas, tornando a condução da lavoura mais fácil.



Figura 2 Plantio de algodão irrigado em fileiras simples



Figura 3 Plantio de algodão irrigado em fileiras duplas

Durante a maior parte do ciclo da planta do algodão, o crescimento vegetativo e o reprodutivo (aparecimento das gemas produtivas, florescimento, crescimento e maturação dos frutos) ocorrem ao mesmo tempo. Os eventos precisam ocorrer de modo balanceado, em virtude da forte competição interna pelos carboidratos da fotossíntese, para que se atinja uma boa produção final.

3.1.5 Escala de crescimento e desenvolvimento do algodão

As escalas de crescimento e desenvolvimento de plantas são ferramentas úteis para determinação mais precisa do momento adequado de se efetuar práticas recomendadas de manejo de diversas culturas. Marur e Ruano (2004) descrevem a escala de crescimento e desenvolvimento do algodão caracterizada, basicamente em suas fases fenológicas, ou seja, vegetativa (V), formação de botões florais (B), abertura da flor (F) e abertura do capulho (C). Segundo esses autores, os diversos estágios de crescimento da planta em seu período vegetativo (V) são definidos de acordo com o comprimento da nervura principal das folhas verdadeiras. Neste período, entre a emergência da plântula até que a primeira folha verdadeira tenha 2,5 cm de comprimento, o estágio será V_0 . A partir do limite anterior até que a segunda folha verdadeira tenha 2,5 cm de comprimento, o estágio será V_1 . Sucessivamente, aplicando o mesmo critério, a planta avançará para os estágios V_2 , V_3 , V_4 , V_5 , etc., conforme mostrado na Figura 4. Nesta fase, considera-se folha verdadeira expandida quando o seu comprimento for maior que 2,5 cm.

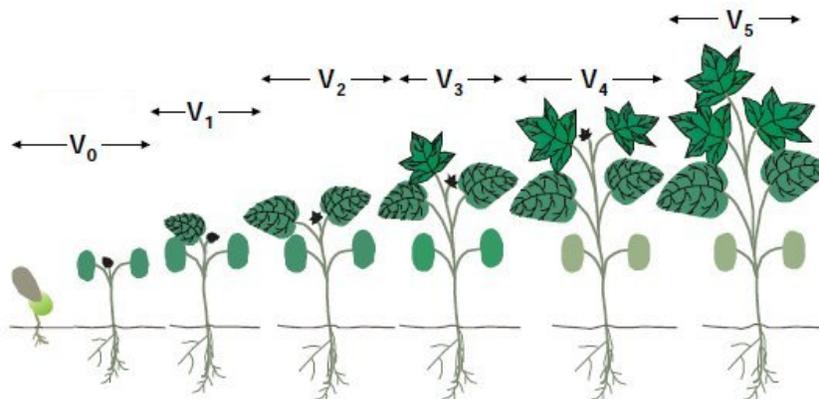


Figura 4 Estágios do desenvolvimento do algodoeiro em fase vegetativa. O ponto de mudança de cada estágio é determinado pelo comprimento da folha: 2,5 cm

A fase reprodutiva do algodoeiro (B) começa quando o primeiro botão

floral estiver visível (Figura 5). Nesta fase, quando o primeiro botão floral estiver visível, o estágio passa a ser B_1 (Figura 5(a)). Quando o primeiro botão floral do terceiro ramo reprodutivo estiver visível, a planta estará no estágio B_3 (Figura 5(b)). Neste momento, estará sendo formado, também, o segundo botão floral no primeiro ramo frutífero. Sucessivamente, à medida que o primeiro botão floral de um novo ramo frutífero estiver visível, o estágio passará a ser B_n . Na Figura 5(c), por exemplo, está representada uma planta no estágio B_7 .

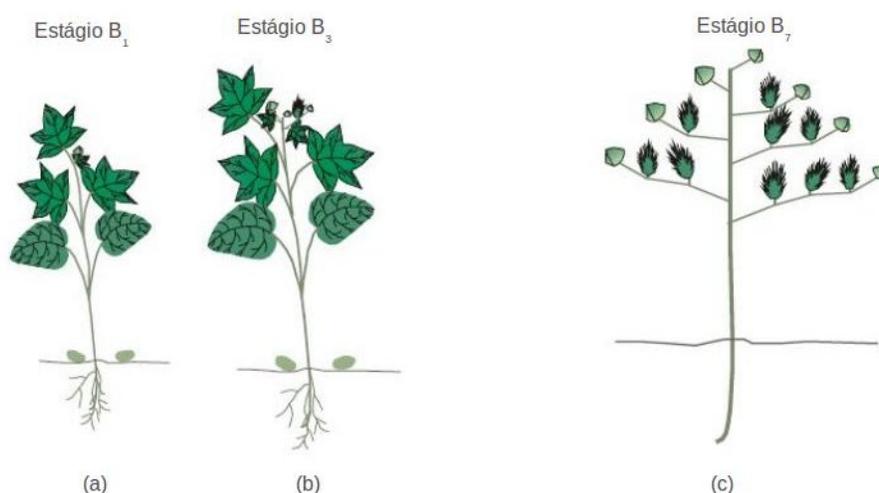


Figura 5 Estágios do desenvolvimento do algodoeiro em fase reprodutiva. O ponto de mudança de cada estágio é determinado pelo aparecimento do primeiro botão floral em cada ramo frutífero

A partir do momento em que o primeiro ramo frutífero se transforma em flor, tem-se início a fase de abertura da flor (F) e a planta passará ao estágio F_1 (Figura 6(a)). O estágio de desenvolvimento será F_3 na abertura da primeira flor do terceiro ramo frutífero (Figura 6(b)). Nota-se, nessa fase, também, a abertura da flor na segunda estrutura do primeiro ramo frutífero. Sucessivamente, à medida que ocorrer a abertura da primeira flor do n -ésimo ramo frutífero, o estágio passará a ser F_n . Ainda, na Figura 6, podemos verificar a sequência de abertura dos botões florais, representada pelas letras associadas a cada botão.

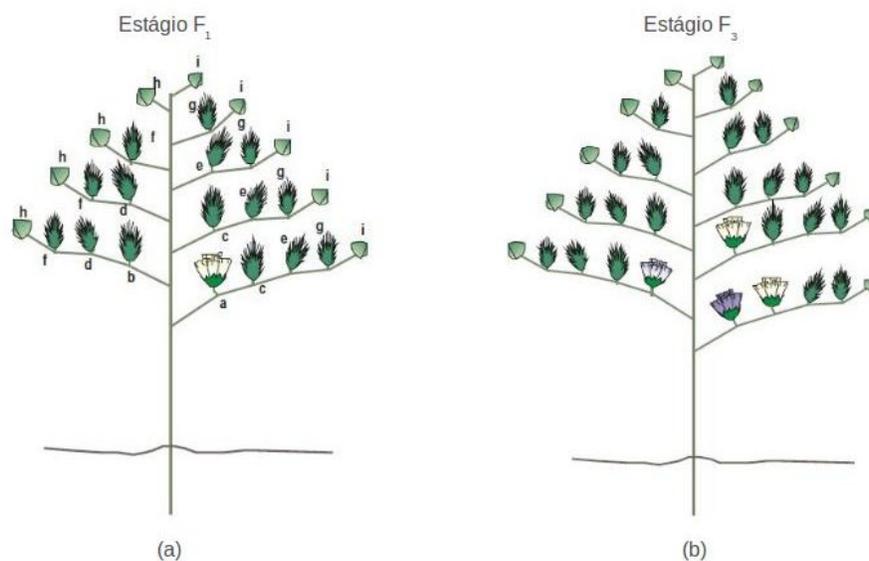


Figura 6 Estágios do desenvolvimento do algodoeiro em fase de abertura da flor. O ponto de mudança de cada estágio é determinado pelo aparecimento da primeira flor em cada ramo frutífero

Finalmente, quando a primeira bola do primeiro ramo transformar-se em capulho, dar-se-á início à fase de abertura do capulho (C) e a planta passará ao estágio C_1 (Figura 7(a)). O estágio de desenvolvimento será C_5 na abertura do primeiro capulho do quinto ramo frutífero (Figura 7(b)). Sucessivamente, à medida que ocorrer a abertura do primeiro capulho do n -ésimo ramo frutífero, o estágio passará a ser C_n .

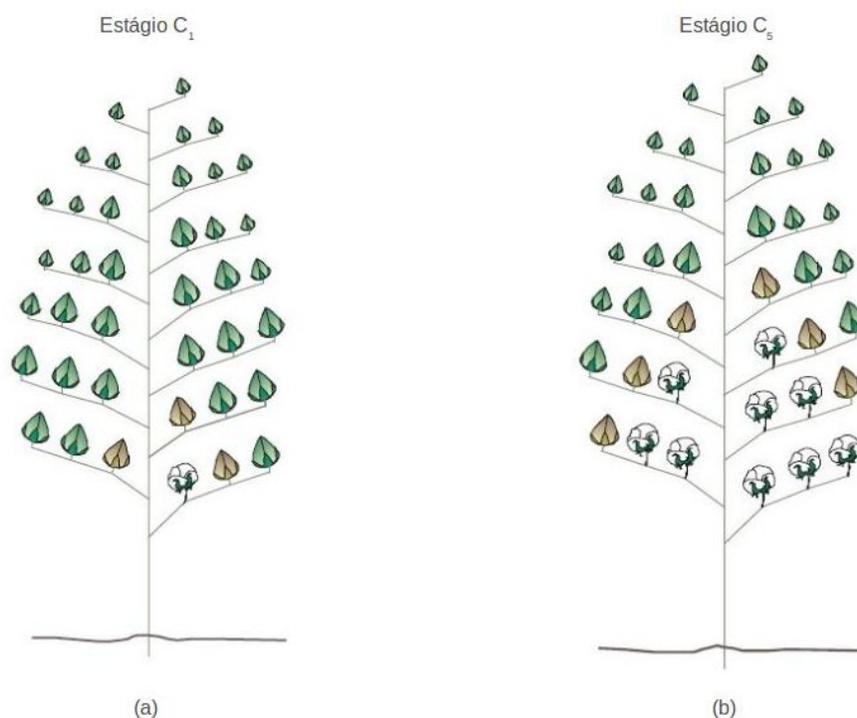


Figura 7 Estágios do desenvolvimento do algodoeiro em fase de abertura do capulho. O ponto de mudança de cada estágio é determinado pelo aparecimento da primeira bola em cada ramo frutífero

Conforme mencionado por Monteiro et al. (2005), a análise quantitativa do crescimento de plantas requer informações que podem ser obtidas sem a necessidade de equipamentos sofisticados. Para tanto, a quantidade de material contido na planta toda e em suas partes, ou seja, folhas, colmos, raízes e frutos e o tamanho do aparelho fotossintetizante, isto é, área foliar, devem ser conhecidos. Compreender o crescimento e o desenvolvimento do algodoeiro propicia uma implementação mais segura das técnicas do manejo integrado, possibilitando um maior rendimento dessas técnicas. Ainda, segundo esses autores, a área foliar da planta depende do número e do tamanho das folhas, bem como do seu tempo de permanência na planta.

Bezerra (2007), ao conduzir um experimento de campo na área experi-

mental da Embrapa, localizada no município de Barbalha-CE, trabalhando com o algodoeiro cultivar BRS 200 - Marrom, a uma temperatura média de $25,2^{\circ}C$, estimou a área foliar e a altura média destas plantas, sob efeito de três níveis de irrigação: lâminas de água de $411,6mm$, $515,5mm$ e $617,4mm$, identificadas por T_1 , T_2 e T_3 , respectivamente. Os dados primários, relativos ao crescimento da planta, foram analisados em blocos casualizados com parcelas divididas, dispostas no tempo, em 4 repetições. Nas parcelas principais, foram testados os tratamentos e nas subparcelas, as épocas de coleta, constituídas por cinco períodos, iniciando-se aos 20 dias após a emergência até os 100 dias após a emergência, com intervalos fixos, de 20 dias entre eles. A variável altura da planta foi analisada pelo modelo apresentado por Ratkowski (1983) e denominado por modelo de crescimento logístico. Modelos deste tipo são caracterizados pela equação:

$$y_i = \frac{\beta_1}{1 + \exp(\beta_2 - \beta_3 t_i)} + e_i, \quad (1)$$

em que o parâmetro β_1 representa a altura assintótica da planta, β_3 representa a velocidade de crescimento da planta e e_i são os erros aleatórios, independentes, com distribuição normal com média 0 (zero) e variância σ^2 . O parâmetro β_2 não possui interpretação prática, sendo este uma constante de integração.

Ainda, segundo Bezerra (2007), os modelos ajustados, dentro de cada tratamento, para a variável altura média das plantas, são dados pelo conjunto de equações (2), cujos gráficos são mostrados na Figura 8:

$$\begin{aligned} A_{mT_1} &= \frac{83,9467}{1 + \exp(2,6017 - 0,0755t)}, \\ A_{mT_2} &= \frac{77,4376}{1 + \exp(2,4334 - 0,0892t)}, \\ A_{mT_3} &= \frac{122,3}{1 + \exp(3,0279 - 0,0789t)}, \end{aligned} \quad (2)$$

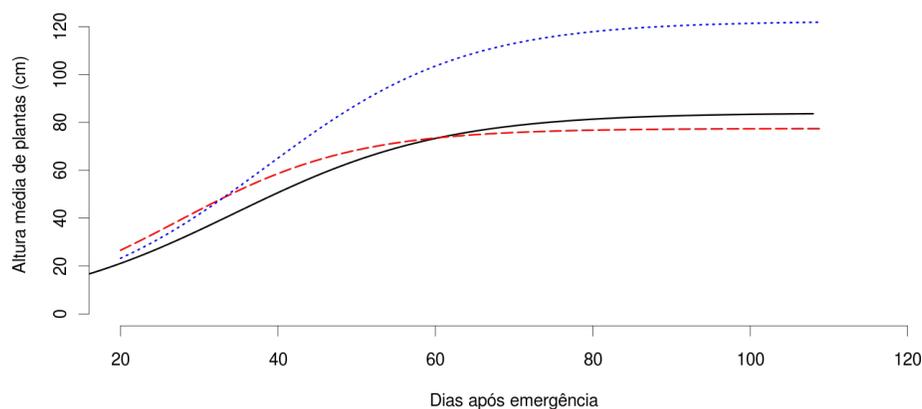


Figura 8 Curvas ajustadas de altura média de plantas do algodoeiro, cultivar BRS 200 - Marrom, submetidos a diferentes lâminas de irrigação:(—) 411,6mm, (---) 514,5mm, (...) 617,4mm

Para a área foliar, usou-se um modelo de regressão polinomial cúbica, uma vez que os modelos logísticos não representam o fenômeno da senescência foliar (CALBO; SILVA; TORRES, 1989). Segundo Bezerra (2007), os modelos ajustados, dentro de cada tratamento, para a variável área foliar (em cm^2) da planta, são dados pelo conjunto de equações (3):

$$\begin{aligned}
 A_{f_{T_1}} &= 178,15 - 63,0239t + 3,9474t^2 - 0,0,0301t^3, \\
 A_{f_{T_2}} &= -1.016,32 + 28,2949t + 2,7174t^2 - 0,0261t^3, \\
 A_{f_{T_3}} &= 2.491,92 - 300,9405t + 11,4705t^2 - 0,0817t^3,
 \end{aligned} \tag{3}$$

sendo $A_{f_{T_i}}$, $i = 1, 2, 3$ a área foliar (em cm^2) da planta, quando submetida à lâmina de água referente ao tratamento T_i e t , representa a idade da planta em dias após a emergência. Estas equações ajustadas podem ser representadas pelos gráficos dados pela Figura 9.

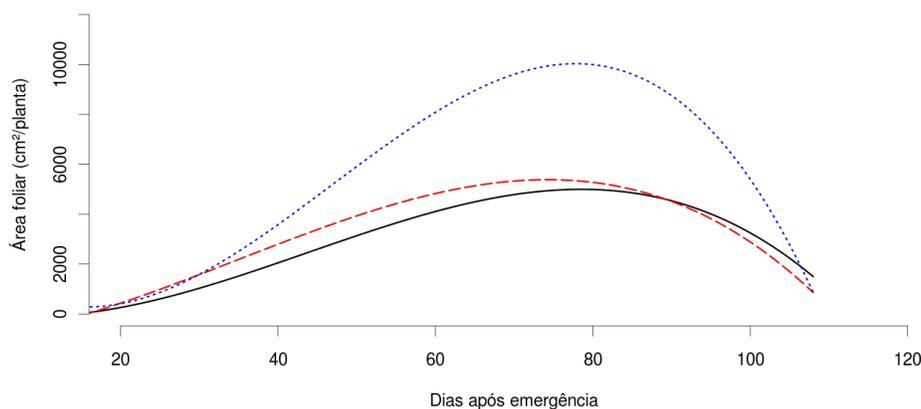


Figura 9 Curvas ajustadas da área foliar do algodoeiro, cultivar BRS 200 - Marrom, submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (—) 411,6mm, (---) 514,5mm, (...) 617,4mm

3.2 O pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877

Nesta seção, aborda-se diversos temas referentes a um afídeo de grande importância para a agricultura, o pulgão *Aphis gossypii* Glover 1877 (Hemiptera:Aphididae).

3.2.1 Importância econômica dos pulgões

Os pulgões são insetos sugadores pertencentes à ordem Hemiptera e Família Aphididae e são uma das pragas que mais preocupam os agricultores. Esses insetos constituem um dos grupos com maior geração de danos em espécies hospedeiras economicamente importantes, sejam danos diretos causados por sua alimentação ou indiretos causados pela transmissão de vírus (FABRICIO, 2003).

Dentre os danos causados às plantas cultivadas, podem ser destacados os prejuízos à floração, frutificação e formação de galhas ou cancrs. O “honeydew”, secreção doce ou açucarada eliminada por esses insetos, constitui um atrativo para

formigas, além de queimar as folhas e favorecer a proliferação de fungos, os quais, revestindo a superfície foliar, prejudicam a fotossíntese (ILHARCO, 1992).

Os afídeos podem transmitir mais de 50 tipos de vírus de plantas que podem levá-las ao depauperamento total. Nas regiões de clima temperado, constitui uma das principais pragas em ambientes de cultivo protegido, e é particularmente abundante e bem distribuída nos trópicos (SOGLIA; BUENO; SAMPAIO, 2002).

3.2.2 Biologia e aspectos comportamentais do pulgão *A. gossypii*

O pulgão *A. gossypii* é cosmopolita e polífago, tendo como plantas hospedeiras muitas espécies de importância agrícola, causando prejuízos econômicos em diversas culturas. Em regiões de clima temperado, a reprodução predominante é sexuada e, em regiões de clima tropical, como no Brasil e em casas de vegetação, partenogenética telítoca (fêmeas são reproduzidas por ovos não fertilizados) ou reprodução assexuada. Segundo Ilharco (1992), na reprodução sexuada, os descendentes são gerados com ciclo de vida completo (holocíclico), conforme Figura 10. Na reprodução assexuada, as fêmeas procriam sem ter sido fecundadas, dando origem apenas a descendentes fêmeas, geneticamente iguais às mães, conhecidas como clones e com ciclo de vida incompleto (anolocíclico), conforme Figura 11. Os indivíduos anolocíclicos apresentam um ciclo biológico composto de duas partes: ninfal e adulta (Figura 12). A fase ninfal apresenta 4 ínstaras antes de se tornarem adultas.

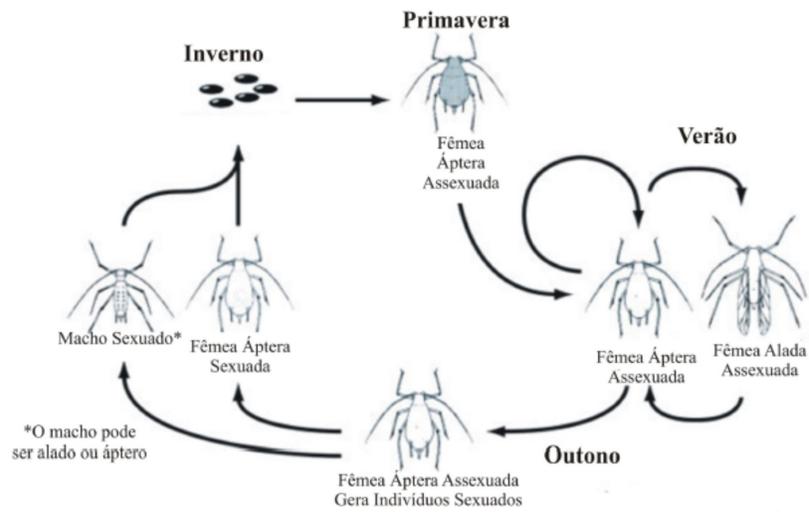


Figura 10 Esquema do ciclo de vida completo dos pulgões com reprodução sexuada

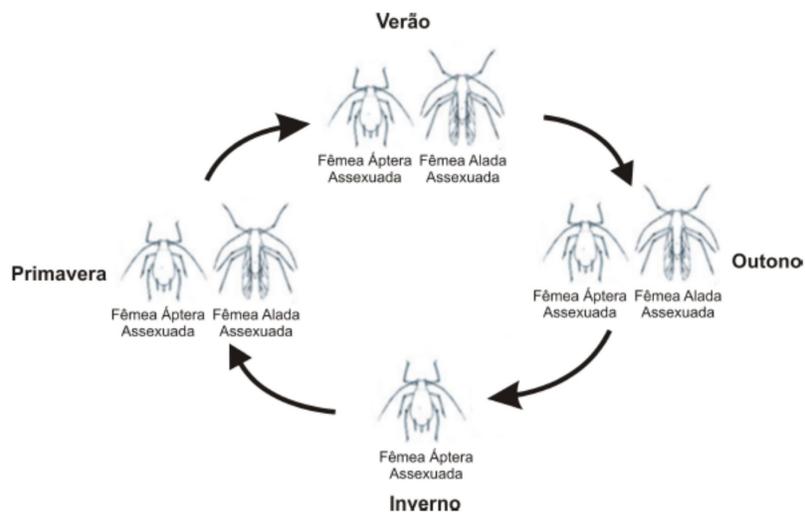


Figura 11 Esquema do ciclo de vida incompleto dos pulgões com reprodução assexuada

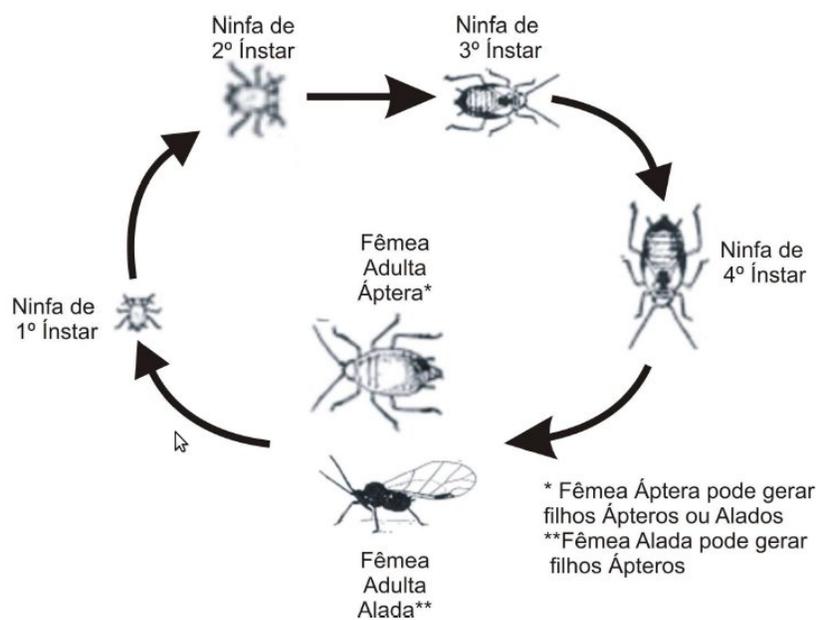


Figura 12 Esquema do ciclo de vida dos afídeos anolóclicos

No início da formação das colônias, todos os indivíduos são ápteros (Figura 13), porém, em função do aumento da densidade populacional, além de necessidades nutricionais e ambientais, esses afídeos liberam uma substância feromônica que estimula a geração de indivíduos alados (Figura 14) (BUENO, 2005).



Figura 13 Ninfas (esquerda) e adulto áptero (direita) do pulgão *Aphis gossypii*



Figura 14 Adulto alado do pulgão *Aphis gossypii*

De acordo com Xia, Werf e Rabbinge (1999), a temperatura é um fator que afeta o desenvolvimento dos afídeos, visto que estes são incapazes de manter a temperatura corporal constante e cada inseto apresenta uma demanda térmica distinta. Geralmente, o tempo médio de desenvolvimento desses organismos decresce com o aumento da temperatura dentro da amplitude térmica requerida para a sobrevivência de cada espécie. Além disso, a temperatura condiciona o tamanho das populações, ocasionando mudanças em sua dinâmica populacional (SOGLIA; BUENO; SAMPAIO, 2002).

As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores de alguns parâmetros biológicos de *A. gossypii* sobre o algodoeiro *G. hirsutum* em diferentes temperaturas, obtidos pelos experimentos conduzidos em laboratório (XIA; WERF; RABBINGE, 1999).

Tabela 1 Duração do estágio ninfal (α), período pré-reprodutivo (β), longevidade em dias (L), fecundidade total por fêmea (B) e fecundidade diária por fêmea (b) de *Aphis gossypii* Glover em *Gossypium hirsutum* L. em diferentes temperaturas (médias \pm semiamplitude do intervalo de confiança 95%), obtidos experimentalmente por Xia, Werf e Rabbinge (1999)

$\theta^{\circ}C$	α	β	L	B	b
10,00	23,0 \pm 1,76	3,2 \pm 0,55	53,4 \pm 7,06	6,1 \pm 1,69	0,4 \pm 0,27
15,00	13,0 \pm 1,00	2,4 \pm 0,47	38,4 \pm 4,90	21,4 \pm 2,50	1,2 \pm 0,20
20,00	8,5 \pm 0,39	1,0 \pm 0,20	24,2 \pm 2,94	24,6 \pm 2,00	2,2 \pm 0,24
25,00	5,0 \pm 0,20	0,6 \pm 0,08	15,8 \pm 1,96	28,3 \pm 2,50	3,1 \pm 0,25
30,00	4,6 \pm 0,18	0,6 \pm 0,12	12,0 \pm 1,37	14,6 \pm 1,40	2,7 \pm 0,39
35,00	5,4 \pm 0,39	0,9 \pm 0,20	10,2 \pm 0,78	4,0 \pm 0,35	1,7 \pm 0,41

Tabela 2 Taxa intrínseca de crescimento (r_m) e duração, em dias, de uma geração (τ) de *Aphis gossypii* Glover em *Gossypium hirsutum* L. em diferentes temperaturas, obtidos experimentalmente por Xia, Werf e Rabbinge (1999)

$\theta^{\circ}C$	r_m	τ
10,00	0,03	28,90
15,00	0,14	18,50
20,00	0,25	11,40
25,00	0,39	8,30
30,00	0,36	6,40
35,00	0,09	7,60

3.3 O pulgão *A. gossypii* em algodoeiro

Também chamado de pulgão do algodoeiro, o *A. gossypii* é um dos mais prolíficos de todos os insetos, uma vez que ele se multiplica muito rapidamente sob condições favoráveis, podendo de cinco em cinco dias ocorrer uma nova geração, durante o ciclo da cultura. Vendramim e Nakano (1981) observaram que o ataque de *A. gossypii* em plantas de algodão, em cultivo protegido, provocou redução na altura e no peso de matéria seca, mesmo com infestação apenas nos primeiros 15 dias após a emergência das plantas (DAE). Em condições de campo, a incidência

dos afídeos foi verificada até os 60 DAE, com pico populacional ocorrendo aos 35 DAE na cultivar IAC-17. O ataque provocou redução da ordem de 24,09% no peso do algodão em caroço, bem como atraso na maturação das plantas.

Os pulgões sugam a seiva da planta, fazem com que estas plantas atacadas fiquem murchas e posteriormente secas. Outro sintoma é o encarquilhamento das folhas, ou seja, elas ficam deformadas (Figura 15).



Figura 15 Folhas de algodão deformadas pelo ataque de pulgões

Outras doenças causadas pelo ataque dos pulgões em plantas de algodão são a doença azul do algodão, conhecida como “azulão” (Figura 16(a)), doença que faz com que a planta fique com pequeno porte, causando uma diminuição significativa na produção e o “vermelhão” (Figura 16(b)), doença que faz com que as folhas fiquem vermelhas entre as nervuras.



Figura 16 Outras doenças transmitidas por pulgões em plantas de algodão

Segundo Marur e Ruano (2004), o período crítico de ocorrência dos pulgões em culturas de algodão tem início na fase vegetativa (V), estendendo-se até a fase de abertura da flor (F).

3.4 Modelo Penna

O modelo Penna, também conhecido por modelo de *Bit-String*, por considerar sequências de bits, para representar o “genoma” de um indivíduo, foi proposto por Penna (1995), em sua versão assexuada e, desde então, tem sido amplamente utilizado em estudos referentes ao envelhecimento biológico, por meio de simulações de Monte-Carlo. Baseado na teoria da seleção natural de Darwin, para a evolução das espécies e na teoria do acúmulo de mutações, para explicar o envelhecimento biológico, o modelo Penna vem sendo usado na compreensão de muitos fenômenos evolucionários, observados na natureza, tais como a senescência catastrófica do Salmão do Pacífico (PENNA; DEOLIVEIRA; STAUFFER, 1995), efeitos da pesca seletiva do Surubim (SANTOS, 2008; SOUZA, 2010) e outros (GIAROLA; MARTINS; COSTA, 2006; HE; PAN; WANG, 2007; PAN; LI; HE, 2007).

Bernardes (1996) propôs uma versão sexuada para o modelo Penna, em que a população passa a ser constituída de machos e fêmeas e cada indivíduo é definido como um organismo “diploide”. Neste caso, o conceito de posições dominantes e recessivas é introduzido. Oliveira, Martins e Zacarias (2008) utilizaram

esta versão para simular a evolução temporal de uma população de bicho-mineiro do cafeeiro submetida a diferentes temperaturas.

No modelo Penna, a população é constituída de indivíduos cujo “genótipo” é representado por palavras computacionais cujas posições são preenchidas por variáveis binárias com valores 0 ou 1. Cada variável ou *bit* está associado a um “gene”, cujos efeitos podem ser deletérios (se assume valor 1) ou benéficos (se assume valor 0). A estrutura etária presente nesse modelo é definida pelas posições dos *bits* na palavra computacional. Cada posição corresponde a uma idade do indivíduo e seu valor determina uma mutação benéfica ou deletéria nesta idade. Um *bit* de valor 1 corresponde a um gene que sofreu uma mutação deletéria. Descrita dessa forma, a palavra computacional recebe o nome de “genótipo cronológico” do indivíduo (Figura 17).

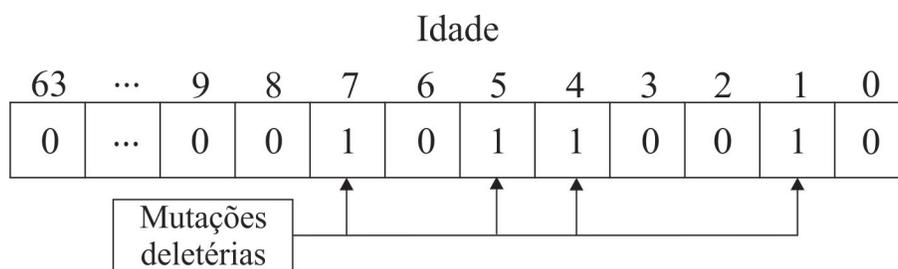


Figura 17 Tira de 64 *bits* representando o “genótipo” de um indivíduo. Os *bits* setados em 1 representam a presença de mutações

3.4.1 Modelo Penna assexuado

Em sua versão mais simples (PENNA, 1995), a que descreve populações assexuadas e “haploides”, cada indivíduo de uma população de tamanho $N(t)$ em uma etapa temporal t é representado por uma palavra computacional ou “genótipo” de “ A *bits*”. Esta palavra contém informações de quando o efeito de uma mutação deletéria estará presente ou não, durante a vida do indivíduo, que poderá viver até, no máximo, a idade $A-1$. Dessa forma, se em uma determinada idade i do indivíduo, i entre 0 e $A-1$, o *bit* correspondente for igual a um, ele sofrerá os

efeitos de uma mutação deletéria nessa e em todas as etapas seguintes de sua vida. Um indivíduo certamente morrerá quando o número de mutações deletérias até a sua idade atual atingir um valor limiar T .

A reprodução no modelo Penna acontece a partir do momento em que os indivíduos, considerados todos fêmeas, alcançam a idade mínima de reprodução R . Ao atingir tal idade, os indivíduos introduzem descendentes na população com probabilidade B . Na versão assexuada do modelo, cada novo indivíduo é obtido por uma cópia do genótipo da mãe, salvo M bits, no máximo, que são alterados em virtude da ação de mutações. As mutações ocorrem sobre descendentes e podem afetar qualquer um dos bits constituintes do genótipo, escolhidos de forma aleatória (Figura 18). Uma mutação no modelo Penna corresponde a uma alteração de valores dos bits na palavra computacional. Estes podem ter seu valores mudados de 0 para 1, no caso das mutações serem deletérias, ou de 1 para 0, caso elas sejam benéficas. Pelo fato de as mutações benéficas ocorrerem com uma probabilidade muito pequena na natureza, apenas as mutações deletérias são consideradas (PECK, 1994).

Idade	63	...	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Mãe	0	...	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0
Filha	0	...	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0

Figura 18 Tira de 64 bits representando o “genótipo” da mãe e a tira herdada pela filha, com uma mutação deletéria escolhida em um bit aleatório (idade três). Os bits setados em 1 representam a presença de mutações

A restrição ao espaço e à comida está inserida no modelo por um fator de mortalidade chamado Fator de Verhulst, que representa o aumento da mortalidade com a densidade populacional. A cada etapa temporal, os indivíduos têm que sobreviver a este fator, que atinge todas as idades igualmente. Assim, o indivíduo que não tiver morrido pelo acúmulo de mutações poderá envelhecer e sobreviver à etapa temporal seguinte, com probabilidade dada por:

$$P(t) = 1 - \frac{N(t)}{N_{max}}, \quad (4)$$

em que $N(t)$ representa o tamanho da população na etapa temporal t e N_{max} a capacidade de carga do ambiente, ou seja, o número máximo de indivíduos que o ambiente suporta, em função das restrições de espaço e alimento. Após todos os indivíduos terem sido testados quanto à reprodução e morte, uma etapa temporal é concluída.

3.5 Autômatos celulares

O estudo da distribuição espacial de populações permite verificar processos de dispersão e podem ser uma ferramenta útil na análise de padrões espaciais, permitindo testar hipóteses a respeito do mecanismo gerador da dinâmica de populações de pragas em uma variedade de condições ambientais (OLIVEIRA, 2010).

De acordo com Ermentrout e Edelstein-Keshet (1993), para a avaliação dos efeitos da inserção de estrutura espacial em simulações da dinâmica temporal de populações, vários tipos de modelos são encontrados na literatura. Dentre eles, destacam-se os modelos baseados em autômatos celulares que, por meio de regras simples, são amplamente utilizados para reproduzir sistemas físicos e biológicos de forma satisfatória.

Originalmente introduzidos por John von Neumann e Stanislaw Ulam em 1940 (WOLFRAM, 2002), esses modelos são uma ferramenta de grande auxílio para o estudo de sistemas que possuem fenômenos coletivos, como caos, ordenamento de fases e turbulência, tendo muitas aplicações na simulação de sistemas biológicos (processos de reprodução), fenômenos físicos (difusão) e sistemas sociais (formação de comunidades), dentre outras, por apresentarem a formação de padrões espaciais e temporais (ERMENTROUT; EDELSTEIN-KESHET, 1993).

Os autômatos celulares podem ser definidos como sistemas dinâmicos discretos cujo comportamento é especificado em termos de relações ou regras locais. Assim, em um autômato celular é necessário que o espaço seja criado para que este possa conter os indivíduos que formarão a população que se pretende estudar e, para isso, usualmente utilizamos uma rede regular, na qual cada sítio ou célula

assume um conjunto discreto de estados. Para a construção de autômatos celulares, deve-se estabelecer quais são as regras de transição que deverão ser seguidas e alguns fatores tais como dimensão e geometria da rede, vizinhança e condições de contorno.

3.6 Métodos de análise espacial

Um dos objetivos da análise da dinâmica espaço-temporal é identificar padrões espaciais de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço (OLIVEIRA, 2010). Lima (2005) lembra que, para determinar o tipo de padrão pontual espacial, é muito comum o uso de índices, baseados na relação entre variância e média e que tem como princípio básico a característica da distribuição de Poisson de que a média é igual à variância. Upton e Fingleton (1985) mencionam que estes índices apresentam a restrição de não considerarem a localização espacial das amostras, limitando sua capacidade de descrever padrões espaciais.

A dependência espacial é uma importante grandeza que deve ser considerada na análise espacial de amostras, por considerar como os valores da variável analisada estão correlacionados no espaço. A ideia básica é estimar a magnitude da autocorrelação espacial entre as subpopulações vizinhas e como essa medida de semelhança se modifica à medida que se altera a distância geográfica entre elas.

3.6.1 Índice de Morisita

O índice de Morisita (I_δ) (MORISITA, 1959) é uma medida que quantifica agregação espacial e é dado pela expressão:

$$I_\delta = n \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i}{\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n x_i}, \quad 0 \leq I_\delta \leq n, \quad (5)$$

em que n é o número de unidades amostrais e x_i é o número de indivíduos em cada sítio. Valores deste índice menores que um indicam a existência de regularidade na

distribuição espacial da amostra. Valores iguais a um indicam que a distribuição espacial é aleatória, enquanto que valores maiores que um indicam a presença de agregação na distribuição espacial da amostra.

Campbell e Madden (1990) apresentam uma estatística para testar a hipótese nula de aleatoriedade, dada por

$$\chi_{I_\delta}^2 = I_\delta \left(\sum_{i=1}^n x_i - 1 \right) + n - \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6)$$

em que $\chi_{I_\delta}^2 \sim \chi_{n-1}^2$, isto é, a estatística $\chi_{I_\delta}^2$ tem distribuição qui-quadrado com $n - 1$ graus de liberdade.

Uma alternativa para testar a hipótese nula de aleatoriedade espacial é utilizar algum método de computação intensiva, para obter a distribuição amostral do índice e , conseqüentemente, seu intervalo de confiança. O método bootstrap, proposto por Efron (1979), é um processo computacionalmente intensivo de reamostragem no próprio conjunto de dados, em que as amostras sucessivas são retiradas deste conjunto de dados. A estrutura do método consiste na ideia de que, na ausência de qualquer outro conhecimento da população, a distribuição dos valores encontrados em uma amostra de tamanho n é o melhor guia da distribuição da população (SCALON et al., 2011).

O processo é realizado inúmeras vezes e, de cada amostra, são obtidas as estimativas dos parâmetros de interesse, empregando-se os mesmos estimadores usados no conjunto de dados originais. A variância entre as estimativas obtidas nas várias amostragens é utilizada para caracterizar a distribuição dos estimadores, para a obtenção das estimativas dos desvios padrões e construção dos intervalos de confiança, que podem ser calculados de duas formas. A primeira delas, denominada de intervalo de confiança bootstrap, é dada por:

$$IC_{bootstrap} = I_\delta \pm t_{n-1} \times SE_{bootstrap}, \quad (7)$$

sendo t a distribuição de Student com $(n - 1)$ graus de liberdade, n o tamanho da amostra original e $SE_{bootstrap}$ o erro padrão das estatísticas nas n reamostras.

Uma segunda técnica para o cálculo do intervalo de confiança bootstrap é denominada de intervalo de confiança percentil. Para uma confiança $(1 - \alpha)$,

encontra-se o percentil $(1 - \alpha/2)100\%$ e o percentil $(\alpha/2)100\%$ da estatística nas reamostras, em que α é o nível de significância.

3.6.2 Expoente k da distribuição binomial negativa

O expoente k da distribuição binomial negativa é uma medida inversa do grau de agregação. Quando os valores são negativos, indicam uma distribuição regular ou uniforme; quando são baixos e positivos ($k < 2$), indicam uma disposição altamente agregada; valores de k variando de 2 a 8 indicam uma agregação moderada; e valores superiores a 8 ($k > 8$) indicam uma disposição ao acaso (ELLIOTT, 1977). Este índice é estimado por meio da expressão:

$$k = \frac{\bar{x}^2}{(s^2 - \bar{x})}, \quad (8)$$

em que \bar{x} e s^2 representam a média e a variância do número de pulgões presentes nas plantas.

3.6.3 Índice de Moran

Uma particularidade fundamental da análise exploratória espacial é a definição da dependência espacial, mostrando como os valores estão correlacionados no espaço. Neste contexto, a função utilizada para estimar quanto o valor observado de um atributo em uma região é dependente dos valores desta mesma variável nas localizações vizinhas é a autocorrelação espacial.

Segundo Sokal e Oden (1978), para se obter um índice que quantifique a autocorrelação espacial de uma variável deve-se correlacionar os valores dessa variável para pares de sub-áreas no plano. No entanto, nem todos os pares de devem ser considerados, apenas aqueles apontados como vizinhos. Ainda, segundo esses autores, os critérios para considerar duas sub-áreas no plano como sendo vizinhas são de responsabilidade do pesquisador. Para *grids* regulares, algumas formas simples de se caracterizar vizinhança são definidas, utilizando a terminologia aplicada a jogos de xadrez: movimentos de torre (somente conexões ortogonais, Figura 19(a)), movimentos de bispo (somente conexões diagonais, Figura 19(b)) e movi-

mentos de rainha (conexões ortogonais e diagonais, Figura 19(c)).

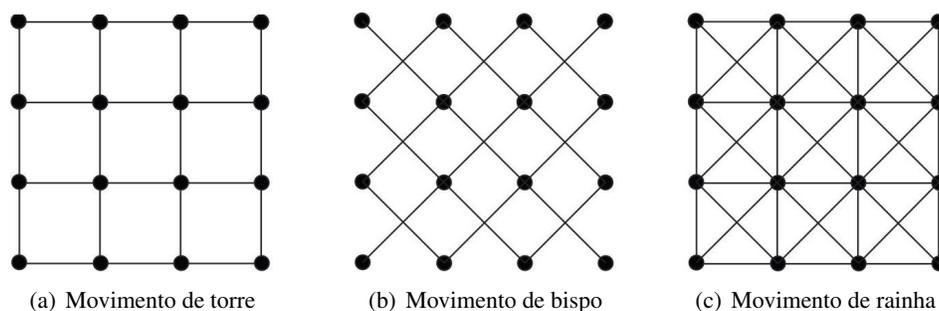


Figura 19 Conexões em um grid regular. Os 16 pontos representam os sítios

Outras possibilidades para definição de vizinhança, para casos mais gerais, são baseadas na contiguidade, onde áreas vizinhas são aquelas que compartilham fronteiras, na distância entre as áreas, onde são consideradas vizinhas somente aquelas que estejam à uma distância d previamente estabelecida, ou na definição do número de vizinhos mais próximos.

O Índice de Moran (I) mede a intensidade da autocorrelação espacial considerando a área em análise e os seus vizinhos subjacentes. A expressão do índice global de Moran é dada por:

$$I = n \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S_0 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (9)$$

em que $S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$, x_i e x_j são os valores observados nos sítios i e j , respectivamente, n é o número de unidades amostrais consideradas e w_{ij} é um elemento da matriz quadrada e simétrica \mathbf{W} chamada de matriz de vizinhança ou de proximidades, que assume valor 1 se os sítios i e j são considerados vizinhos e 0, caso contrário (pesos). De forma geral, o índice de Moran tende a variar entre -1 e 1 . Valores diferentes de zero para o índice indicam presença de autocorrelação entre

as unidades amostrais (positiva, se próximo de 1 e negativa, se próximo de -1). Valores próximos de zero indicam ausência de autocorrelação (CRESSIE, 1993).

Na equação (9), a autocorrelação é calculada somente para os vizinhos de primeira ordem, conforme estabelecidos pelos pesos w_{ij} . A mesma análise pode ser feita considerando-se uma matriz de proximidades de maior ordem, o que permite estimar a função de autocorrelação para cada ordem de vizinhança d . A equação (9) pode ser, então, adaptada para:

$$I_d = n \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}^{(d)} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S_0 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (10)$$

em que $w_{ij}^{(d)}$ é um elemento da matriz $\mathbf{W}(d)$, que representa os vizinhos dentro da classe de distância d .

Os elementos da matriz de vizinhança $\mathbf{W}(d)$ representam uma medida de proximidade entre os sítios i e j . De acordo com Bailey e Gatrell (1995), a escolha dos valores de w_{ij} pode ser feita, baseada nos dados em que está se trabalhando, levando em conta alguns aspectos de dependência espacial. Druck et al. (2004) recomendam a normalização das linhas da matriz $\mathbf{W}(d)$, dividindo cada elemento da matriz pelo total da linha, de forma que $w_{i.} = \sum_{j=1}^n w_{ij} = 1$. Segundo Fortin e Dale (2005), em processos ecológicos, o mais comum é a utilização de pesos dados pelo inverso da distância ($1/d$) ou seu quadrado ($1/d^2$).

Uma vez calculado o índice, faz-se necessário avaliar a sua significância estatística. Para estimar a significância do índice, é necessário associar a este uma distribuição estatística. Segundo Cliff e Ord (1981), o Índice de Moran segue, assintoticamente ($n > 30$), uma distribuição Normal com média e variância dadas, respectivamente, por:

$$E[I] = -\frac{1}{n-1}, \quad (11)$$

$$Var[I] = \frac{n^2 S_1 - n S_2 + 3 S_0^2}{(n-1)(n+1) S_0^2} - \left(\frac{1}{n-1} \right)^2, \quad (12)$$

em que S_0 foi definido acima,

$$S_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (w_{ij} + w_{ji})^2,$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (w_{i.} + w_{.j})^2$$

com $w_{i.} = \sum_{j=1}^n w_{ij}$ e $w_{.j} = \sum_{i=1}^n w_{ij}$.

Considerando esses resultados, a significância do Índice de Moran pode ser avaliada com base no teste de Wald, cuja estatística é dada por:

$$z = \frac{I - E[I]}{\sqrt{Var[I]}}. \quad (13)$$

O Índice de Moran será considerado significativamente diferente de zero, se o *valor-p* for inferior ao nível de significância previamente estabelecido.

Outra possibilidade, sem pressupostos em relação à distribuição, é um teste de pseudo-significância. Neste caso, são geradas diferentes permutações dos valores de atributos associados às regiões; cada permutação produz um novo arranjo espacial, onde os valores estão redistribuídos entre os sítios. Como apenas um dos arranjos corresponde à situação observada, pode-se construir uma distribuição empírica de I (ou I_d). Se o valor de I (ou I_d), medido originalmente, corresponder a um “extremo” da distribuição simulada, então, trata-se de valor com significância estatística (DRUCK et al., 2004).

3.6.4 Correlograma de Moran

O correlograma de Moran é uma representação gráfica da autocorrelação medida pelo índice de Moran para a mesma variável, em função de diversas classes de distância, permitindo a avaliação do comportamento da autocorrelação espacial em função da distância.

O número de classes de distâncias a ser considerado é, a princípio, arbi-

trário e podem ser consideradas diferentes possibilidades considerando um mesmo conjunto de dados. Segundo Legendre e Legendre (1998), para determinar o número k de classes de distâncias, pode-se utilizar a fórmula de Sturges, dada por:

$$k = 1 + \log_2 N, \quad (14)$$

em que N é o número de distâncias tomadas 2 a 2 na área amostral. De acordo com Rosenberg (2000), uma matriz de distâncias de ordem n , contém

$$N = C_2^n = \frac{n \times (n - 1)}{2},$$

distâncias tomadas 2 a 2. Os intervalos de cada classe de distância foram obtidos pela expressão:

$$I_k = \frac{d_{max} - d_{min}}{k}, \quad (15)$$

sendo d_{max} e d_{min} , respectivamente, a maior e a menor distância entre os sítios na área amostral.

Segundo Oliveira (2010), os valores obtidos pelo correlograma podem ser considerados significativos a um determinado nível de significância α , utilizando o critério de correção de Bonferroni. De acordo com Fortin e Dale (2005), essa correção consiste em ajustar o nível de probabilidade α em que se avalia a significância, dividindo pelo número de classes de distância k , de maneira que $\alpha' = \alpha/k$.

O uso do correlograma espacial pressupõe o comportamento espacial isotrópico dos dados, isto é, a autocorrelação independe da direção em que ela é medida. Entretanto, nem sempre este tipo de comportamento é encontrado na natureza. Em muitos casos, encontra-se um certo grau de anisotropia espacial em consequência das diferentes respostas às condições ambientais (OLIVEIRA, 2010). Segundo Fortin e Dale (2005), a anisotropia espacial pode ser verificada comparando a autocorrelação espacial para as classes de distância em diferentes direções. Ainda, segundo Oliveira (2010), para testar anisotropia espacial, podem-se criar classes de distâncias e direção em que o índice de Moran é obtido, com diferentes configurações de vizinhança para cada direção e plotado em um gráfico denominado de correlograma direcional. De acordo com Rosenberg (2000), a

existência de diferentes padrões de correlação espacial dos correlogramas obtidos para diferentes orientações mostra a existência de anisotropia.

3.6.5 Correlograma direcional de Moran

O correlograma direcional de Moran (ROSENBERG, 2000) é um método de análise da autocorrelação espacial, que considera não somente a informação da distância entre dois sítios, mas também a direção entre eles. Neste método, o autor apresenta uma modificação nos pesos da matriz de vizinhança dada por:

$$w'_{ij} = w_{ij} \cos^2(\alpha_{ij} - \theta), \quad (16)$$

em que w_{ij} são os pesos da matriz de vizinhanças original, w'_{ij} são os novos pesos da matriz de vizinhança, conforme definido acima, α_{ij} é o ângulo entre os sítios i e j e θ é o ângulo direcional fixado. O correlograma direcional é construído da mesma maneira que o correlograma habitual, descrito na subseção anterior, exceto pelo fato de que as distâncias passam a ser ponderadas pela direção entre os sítios considerados. Faixas de distâncias são consideradas na avaliação do comportamento da autocorrelação espacial. Para cada classe de distâncias, associa-se uma matriz de vizinhança $\mathbf{W}(d)$, indicando se a distância entre os pares de sítios considerados pertence a esta classe. A matriz de vizinhanças $\mathbf{W}(d)$ é convertida para uma nova matriz $\mathbf{W}'(d)$ transformando-se cada elemento, conforme equação (16). Pares de sítios que não se enquadram na classe de distância têm peso inicial igual a zero e não são afetados pela transformação. Tomando-se por base a nova matriz de vizinhanças $\mathbf{W}'(d)$, o índice I de Moran é calculado normalmente usando os novos pesos w'_{ij} . Segundo Rosenberg (2000), no correlograma direcional, a nova variável peso, w'_{ij} , incorpora informações sobre a contiguidade e direção entre dois sítios. A Figura 20 ilustra o correlograma direcional de Moran. Cada classe de distância é representada por um semicírculo concêntrico. Os coeficientes significativos são representados por círculos pretos, enquanto que coeficientes não significativos por círculos brancos.

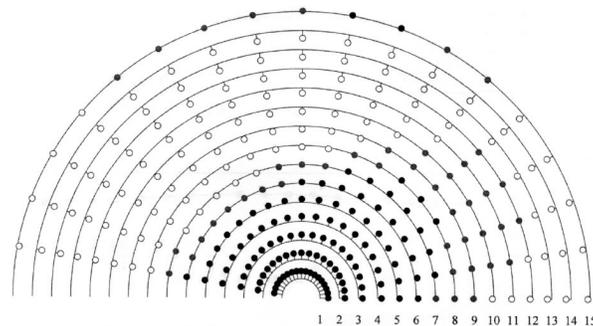


Figura 20 Correlograma direcional de Moran

O uso dessa metodologia tem se mostrado bastante útil no acompanhamento da deriva genética no Japão (SOKAL; THOMPSON, 1998) e na identificação de grupos e tendências de câncer de próstata na Europa (ROSENBERG, 2000). Ainda, segundo Rosenberg (2000), a vantagem do correlograma direcional está no fato de este ser diretamente comparável ao tradicional correlograma não-direcional, descrito na seção anterior, uma vez que ambos são baseados nas mesmas classes de distâncias, definidas conforme equação (15).

3.7 Métodos de análise das simulações

Segundo Pegden, Shannon e Sadowski (1990), simulação é um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento durante um período de tempo e avaliar estratégias para sua operação. Law e Kelton (2000) lembram que a proposta da simulação é produzir dados que, quando analisados, indentificarão importantes aspectos do sistema estudado, contribuindo para uma melhor compreensão do mesmo.

Os resultados da simulação, contendo as características de interesse do fenômeno estudado, são, em geral, computados em relação ao tempo, gerando séries temporais, na maioria dos casos, não-estacionárias e autocorrelacionadas, impossibilitando o uso dos métodos estatísticos clássicos para o cálculo de medidas que sintetizem com comportamento do sistema, tais como média, variância e intervalos de confiança, de forma que métodos específicos devem ser utilizados

(ALEXOPOULOS, 2006).

Law e Kelton (2000) afirmam que o método Batch é o mais utilizado na análise da saída de simulações. Esse método consiste em dividir os resultados da simulação para a variável de interesse x em n subamostras de tamanho k (Figura 21). Para cada subamostra, calcula-se a média das observações da forma usual, isto é:

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k}, \quad j = 1, \dots, n.$$

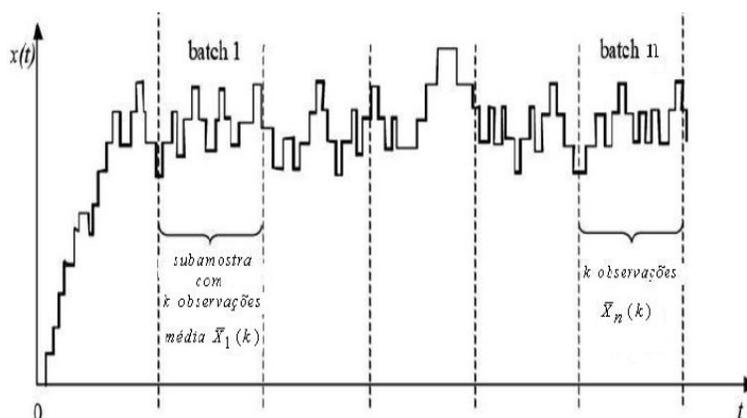


Figura 21 Representação da saída de simulações divididas em subamostras (“batches”)

Uma vez calculada todas as n médias, obtém-se a média total, dada por:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{x}_j}{n}.$$

Calcula-se, então, a variância das médias das subamostras \bar{x}_j :

$$Var(\bar{x}_j) = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{n - 1}.$$

De forma que o intervalo de confiança pode ser calculado como:

$$\bar{x} \pm t_{\nu, \frac{\alpha}{2}} \sqrt{Var(\bar{x}_j)}, \quad (17)$$

em que $\nu = n - 1$.

Uma dificuldade, na aplicação do método Batch, é a determinação do tamanho da subamostra. Se o valor de k for muito reduzido, as médias tendem a ser altamente correlacionadas. Schmeiser (1982) afirma que $10 \leq k \leq 30$ é um valor razoável para o tamanho da subamostra para a maioria das situações de simulação.

4 METODOLOGIA

4.1 Modelo Penna adaptado à biologia do pulgão do algodoeiro com a inclusão de formas aladas e ciclo fenológico do algodoeiro

Todas as simulações, realizadas neste trabalho, foram baseadas no Modelo Penna, descrito na seção 3.4. Em virtude de apresentar uma longevidade que não supera 62 dias (vide Tabela 1) e por reproduzirem-se por partenogênese em regiões tropicais, no presente trabalho, a população simulada foi constituída de fêmeas nas formas ápteras e aladas, sendo cada indivíduo representado por uma única palavra computacional de 64 *bits*, interpretada como seu “genótipo”, de forma que cada indivíduo poderá sobreviver, no máximo, até 63 dias, uma vez que cada *bit* foi associado a um dia de vida do pulgão.

A população foi constituída inicialmente por N_0 fêmeas, todas em sua forma áptera. Quando a fêmea atinge a idade mínima de reprodução (R_M), ela poderá gerar b descendentes com uma dada probabilidade, todas fêmeas, a cada idade adicional, até atingir a idade máxima de reprodução (R_X). A produção de formas aladas em colônias de pulgões apresenta um custo energético manifestando-se na queda de fecundidade ou aumento no período de desenvolvimento. Dessa forma, considerou-se que a probabilidade de reprodução dos indivíduos ápteros ω_1 é maior que a probabilidade de reprodução dos indivíduos alados ω_2 (PEREIRA; LOMONACO, 2003).

As fêmeas ápteras poderão gerar filhas ápteras com probabilidade $\omega_1\varphi_1$ e filhas aladas com probabilidade $\omega_1\varphi_2$, sendo φ_1 a probabilidade de um indivíduo gerar indivíduos ápteros e φ_2 , a probabilidade de gerar indivíduos alados. De acordo com Jingyuan (1997), a probabilidade de gerar alados pode ser dada em função da densidade de indivíduos em cada planta e denotada por:

$$\varphi_2[t] = -0,3485 + 0,3268 \times \exp\{D[t]/(-224,4)\}, \quad (18)$$

em que $D[t]$ é a densidade dos afídeos na etapa temporal t .

As fêmeas aladas geram somente filhas ápteras com probabilidade $\omega_2\varphi_1$

(MONDOR; ROSENHEIM; ADDICOTT, 2005). A Figura 22 apresenta um esquema de reprodução de fêmeas ápteras e aladas, conforme Mondor, Rosenheim e Addicott (2005) e Pereira e Lomonaco (2003).

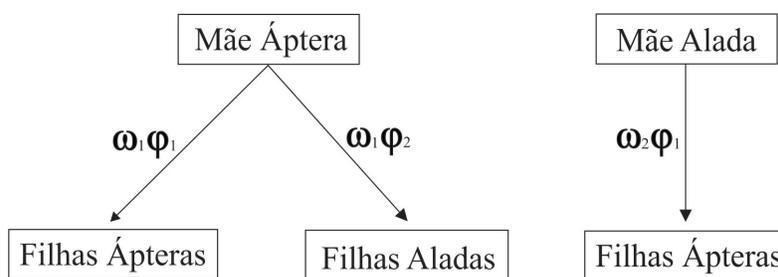


Figura 22 Esquema de reprodução de fêmeas ápteras e aladas na dinâmica populacional do pulgão *A. gossypii*

Foram utilizados os dados biológicos, obtidos para *A. gossypii*, criados em folhas de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.), publicados por Xia, Werf e Rabbinge (1999), para ajustar os parâmetros do modelo Penna e apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Idade mínima de reprodução (R_M), idade máxima de reprodução (R_X) e fecundidade diária (b) do pulgão *Aphis gossypii* Glover em *Gossypium hirsutum* L., utilizadas no modelo Penna

$\theta^{\circ}C$	R_M	R_X	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

As simulações foram realizadas até 50000 etapas temporais (em dias), sendo necessário o período de 40000 etapas temporais para termalização da população. Em cada simulação foram obtidas as curvas de sobrevivência e calculados os valores médios do tamanho populacional e taxa intrínseca de crescimento.

Para o cálculo dessas quantidades, foram desprezadas as 40000 primeiras etapas temporais. Na construção das curvas de sobrevivência, calculou-se a taxa de sobrevivência para cada idade j , definida por Odum (1988) como:

$$S_j = \frac{N_{j+1,t+1}}{N_{j,t}}, \quad (19)$$

em que S_j é a taxa de sobrevivência dos indivíduos na idade j e $N_{j,t}$ é o número de indivíduos na idade j na etapa temporal t .

A taxa intrínseca de crescimento (r_m) em cada etapa temporal foi calculada pela seguinte equação, definida por Odum (1988) como:

$$r_m(t) = \ln \left(\frac{N_{t+1}}{N_t \left[1 - \frac{N_t}{N_{max}} \right]} \right). \quad (20)$$

A dinâmica espaço-temporal de uma população do pulgão *A. gossypii* em algodoeiro, submetida a uma temperatura de $25^\circ C$ foi representada em um autômato celular, no qual cada célula em uma rede quadrada 9×9 foi denominada sítio. Neste trabalho, considerou-se que cada sítio representa uma planta do algodoeiro. A vizinhança de cada sítio (ou planta) foi definida, segundo a regra de “movimentos de torre”, ou seja, apenas sítios ortogonais foram considerados vizinhos (vide Figura 19(a)).

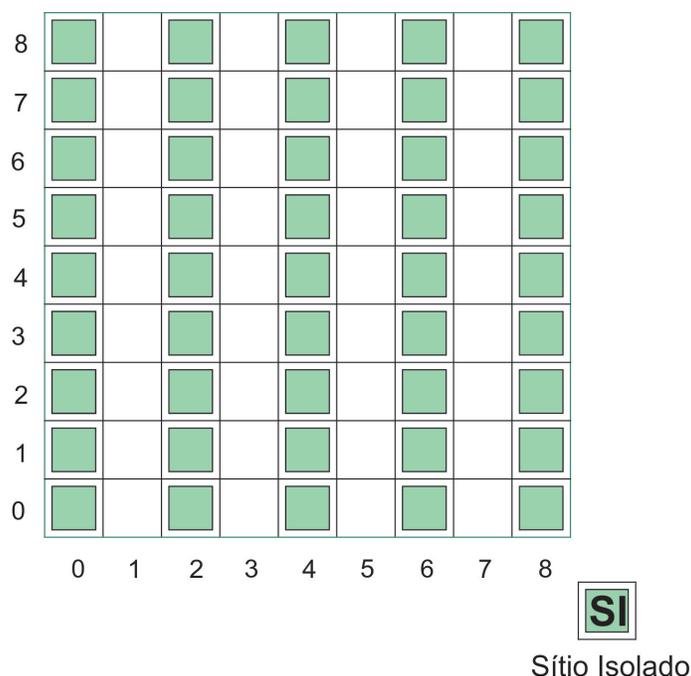


Figura 23 Representação da rede 9×9 com fileiras simples, utilizada como base nas simulações

Inicialmente, a dinâmica se passa exclusivamente de forma temporal em um único sítio, denominado Sítio Isolado (SI), conforme mostrado na Figura 23. Este sítio isolado representa qualquer situação externa à rede. Ainda, na Figura 23, temos a representação do plantio em fileiras simples da cultura, isto é, consideramos a existência de sítios sem plantas. Neste caso, supomos a existência de 45 plantas.

Considerando o ciclo fenológico do algodoeiro, nas últimas 108 etapas temporais, além da dinâmica temporal, ocorre de forma concomitante a dinâmica espacial. Nesta situação, para cada pulgão alado presente no SI, sorteiam-se dois números inteiros aleatórios, id_1 e id_2 , $0 \leq id_1 \leq 8$, $0 \leq id_2 \leq 8$ representando a posição da rede em que este indivíduo se instalará (Figura 24). Se a posição sorteada for ausente de plantas, o pulgão alado poderá morrer com probabilidade γ_2 . Caso contrário, sorteiam-se novamente dois números aleatórios para a entrada do alado na rede. Este processo é repetido até o pulgão morrer ou encontrar um

sítio com planta. A capacidade de carga em cada sítio decorreu-se da área foliar de uma planta na etapa temporal t e foi calculada de acordo com as equações (3).

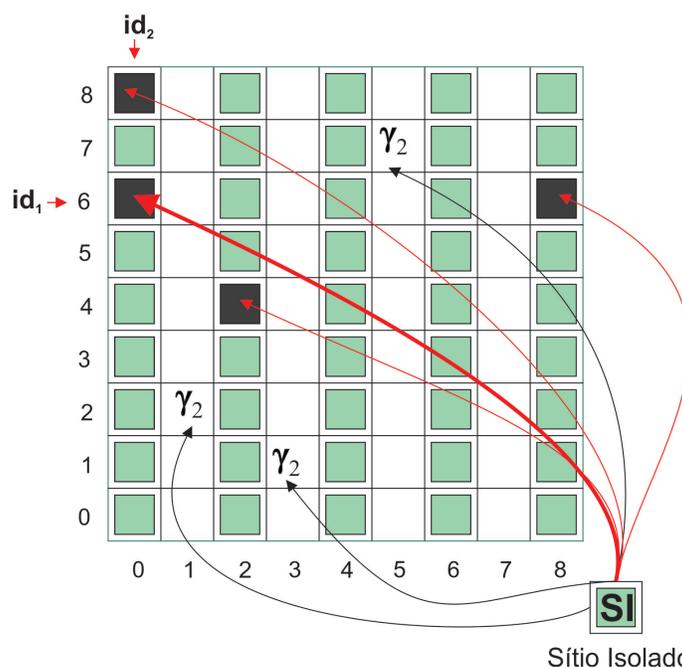


Figura 24 Representação da entrada de pulgões alados na rede a partir do SI

4.2 Regras de migração dos pulgões ápteros e alados

Após a entrada dos pulgões alados na rede, estes reproduzem-se gerando novos indivíduos ápteros, que podem reproduzir-se gerando descendentes ápteros e alados. Durante a dinâmica espacial, os pulgões podem transitar entre os sítios obedecendo às seguintes regras de migração:

4.2.1 Pulgões ápteros

As regras de migração para pulgões ápteros podem ser divididas em três situações de acordo com a posição do sítio dentro da rede em que o áptero se encontra. Quando o indivíduo se encontra nos cantos da rede, poderá migrar somente

em duas direções, conforme mostrado na Figura 25 (setas vermelhas). Nesta situação, o áptero poderá migrar entre linhas com probabilidade α e entre colunas com probabilidade $(1 - \alpha)$. Se a migração ocorrer entre colunas, o indivíduo poderá morrer com probabilidade γ (sítio vazio). Caso o indivíduo não morra, ele poderá migrar para a coluna seguinte ou voltar para a coluna anterior, ambas com probabilidade igual a $\frac{1}{2}$.

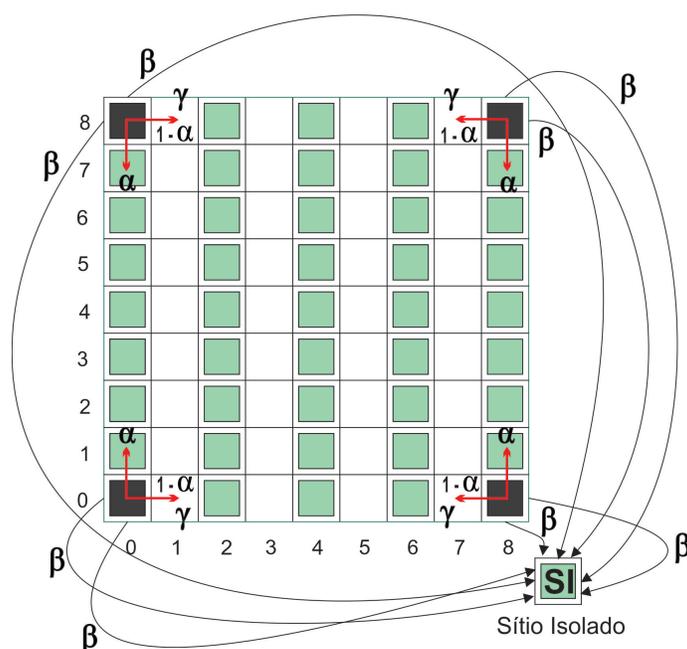


Figura 25 Representação das regras de migração para o caso do áptero situar-se nos cantos da rede

Além das migrações dentro da rede, o áptero também poderá sair da rede com probabilidade β . Neste caso, o indivíduo voltará para o sítio isolado (SI).

A Figura 26 ilustra a situação em que os indivíduos encontram-se em sítios localizados nas bordas da rede, exceto aqueles situados nos cantos, conforme visto anteriormente. O pulgão, nesta situação, poderá sair da rede com probabilidade β , caso em que voltará para o sítio isolado (SI). Se não houver a saída da rede, o pulgão poderá migrar em uma das duas direções possíveis: entre linhas com probabilidade α e entre colunas com probabilidade $(1 - \alpha)$. No caso de migração entre linhas, o áptero poderá migrar para o sítio vizinho de cima ou para o sítio vizinho de baixo, ambos com probabilidade $\frac{1}{2}$.

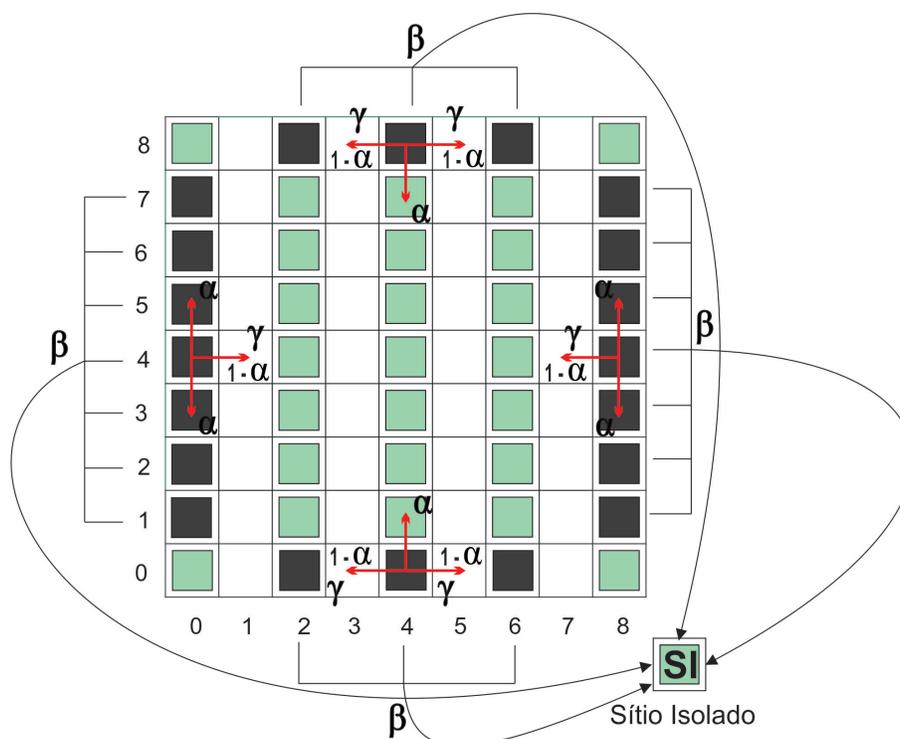


Figura 26 Representação das regras de migração para o caso do áptero situar-se nas bordas da rede

No caso de migração entre colunas, o indivíduo poderá morrer com probabilidade γ (sítio vazio), migrar para a coluna seguinte ou voltar para a coluna anterior, ambas com probabilidade igual a $\frac{1}{2}$.

Uma última situação a ser considerada é aquela que contempla os sítios

situados no centro da rede, conforme mostrado na Figura 27. Neste caso, não existe a possibilidade do pulgão áptero sair da rede. As migrações ocorrem da mesma forma descrita nas situações anteriores. O indivíduo poderá migrar entre linhas com probabilidade α e entre colunas com probabilidade $(1 - \alpha)$. No caso de migração entre linhas, o áptero poderá migrar para o sítio vizinho de cima ou para o sítio vizinho de baixo, ambos com probabilidade $\frac{1}{2}$. Da mesma maneira, se a migração for entre colunas, o áptero poderá morrer com probabilidade γ , caso permaneça em um sítio sem planta ou deslocar-se para o sítio seguinte ou anterior, ambos com probabilidade $\frac{1}{2}$.

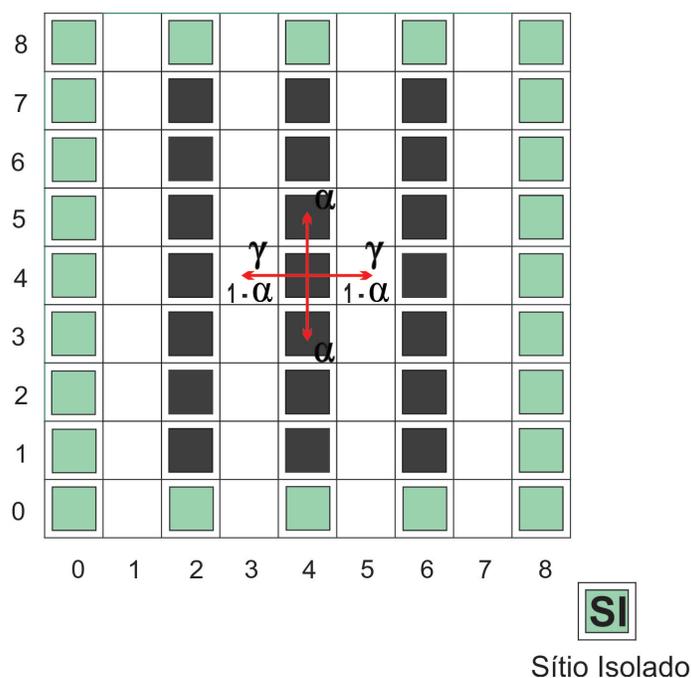


Figura 27 Representação das regras de migração para o caso do áptero situar-se no interior da rede

4.2.2 Pulgões alados

A entrada dos pulgões alados na rede se dá na forma descrita anteriormente e apresentada na Figura 24. Diferentemente dos pulgões ápteros, os alados

podem sair da rede a qualquer momento, independente de sua localização dentro da rede. Os alados podem sair da rede com probabilidade β_2 , conforme mostrado na Figura 28.

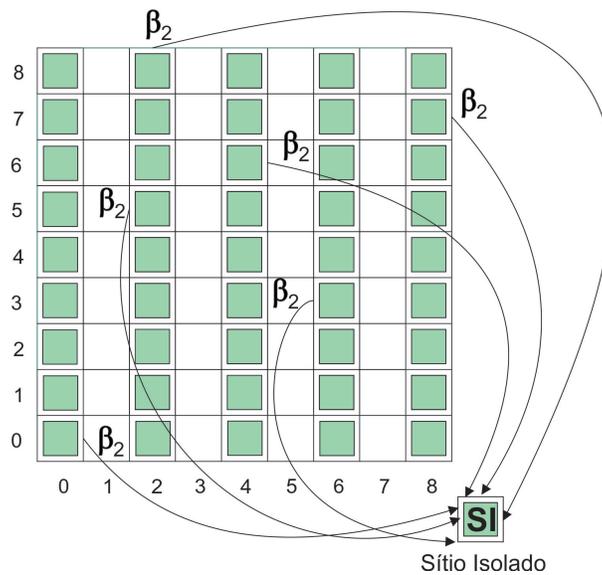


Figura 28 Representação da migração de pulgões alados saindo da rede para o SI

Para a migração desses indivíduos dentro da rede, sorteamos novos valores id_1^* e id_2^* , $0 \leq id_1^* \leq 8$, $0 \leq id_2^* \leq 8$ diferentes daqueles que representam o sítio atual do pulgão alado, para representar o sítio para o qual o indivíduo irá migrar, conforme mostrado na Figura 29.

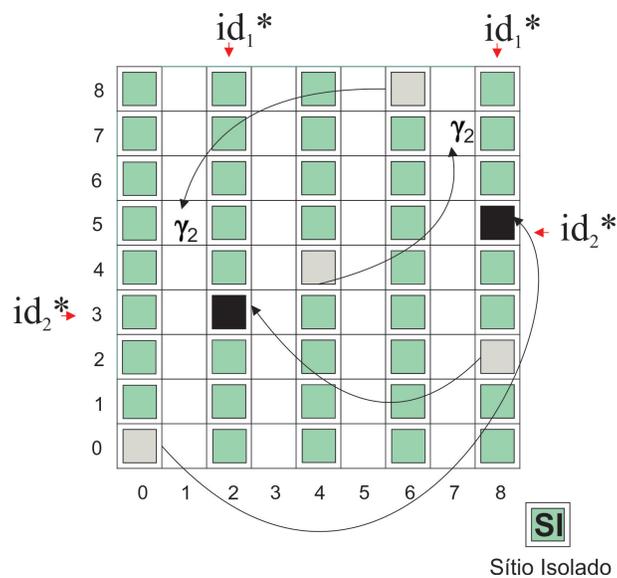


Figura 29 Representação da migração de pulgões alados dentro da rede

Se o sítio sorteado for vazio, isto é, não contiver plantas, o indivíduo alado poderá morrer com uma probabilidade γ_2 . Caso contrário, sorteiam-se novamente valores para id_1^* e id_2^* , discriminando o sítio para o qual o alado migrará. Este processo se repete até o indivíduo morrer ou encontrar um sítio com plantas.

4.3 Parâmetros utilizados na simulação

Os parâmetros utilizados no modelo, independentes da temperatura, relacionados com a dinâmica espacial dos afídeos foram:

- número de mutações: $M = 1$;
- limite de mutações deletérias: $T = 1$;
- tamanho inicial da população no sítio isolado (SI): $N_0 = 10000$;
- capacidade de carga do sítio isolado: $N_{max} = 100000$;
- probabilidade de fêmeas ápteras reproduzirem: $\omega_1 = 1,0$;

- f) probabilidade de fêmeas aladas reproduzirem: $\omega_2 = 0,8$;
- g) probabilidade de geração de indivíduos ápteros: $\varphi_1 = 1 - \varphi_2$;
- h) probabilidade de geração de indivíduos alados: $\varphi_2 = \text{variável}$;
- i) probabilidade do pulgão alado morrer caso migre para um sitio sem planta: $\gamma_2 = 0,1$;
- j) probabilidade de pulgão áptero migrar para sítios vizinhos com planta: $\alpha = 0,7$;
- k) probabilidade de pulgão áptero migrar para sítios vizinhos sem planta: $\alpha_2 = 1 - \alpha = 0,3$;
- l) probabilidade do pulgão áptero sair da rede (interação com o ambiente externo): $\beta = 0,3$;
- m) probabilidade do pulgão alado sair da rede (interação com o ambiente externo): $\beta_2 = 0,2$;
- n) probabilidade do pulgão áptero morrer ao migrar para um sítio sem planta: $\gamma = 0,3$;
- o) probabilidade do pulgão alado migrar: $\delta = 0,5$;
- p) probabilidade do pulgão áptero voltar para o sítio de origem caso migre para um sítio sem planta: $\delta_2 = 0,5$.

Para a realização das simulações e geração dos dados, foi desenvolvido um programa em linguagem de programação C. Os gráficos e as análises estatísticas foram realizadas, utilizando o software livre R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2010), e as análises espaciais foram realizadas, utilizando o software PAS-SaGE (ROSENBERG, 2000).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados das simulações para a dinâmica de uma população de pulgões em um sistema considerando a interação com sítios externos à rede e o ciclo fenológico do algodão.

5.1 Análise temporal da dinâmica espaço-temporal

Nesta seção, serão discutidos os resultados relativos à análise temporal da dinâmica espaço-temporal da população de pulgões em algodoeiro.

5.1.1 Curvas de sobrevivência

A Figura 30 apresenta as curvas de sobrevivência, obtidas pela da simulação da dinâmica espaço-temporal do pulgão *A. gossypii* em algodoeiro (*G. hirsutum*) considerando sistema com interação com o ambiente externo à rede e a presença do ciclo fenológico do algodoeiro.

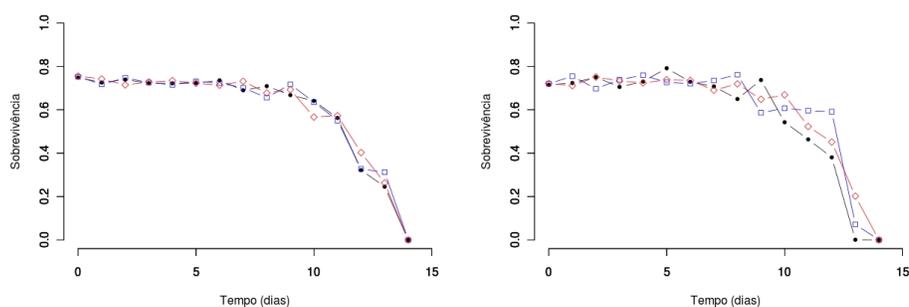


Figura 30 Curvas de sobrevivência em função da idade do pulgão *A. gossypii* Glover na temperatura de $25^{\circ}C$, alimentado por cultivares de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (•) 411,6mm (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm, obtidas por meio de simulação e avaliadas fora (à esquerda) e dentro (à direita) da rede

Pode-se observar o decaimento da probabilidade de sobrevivência, em todas as situações de irrigação, o que indica o envelhecimento da população de pulgões. As pequenas variações entre as taxas de sobrevivência, observadas no gráfico à esquerda, em relação às lâminas de irrigação, deve-se pela interação entre o sítio isolado e a rede. Neste caso, o número de pulgões sobreviventes à determinada idade é dependente da lâmina de irrigação adotada. Verifica-se, ainda, que a longevidade média dos afídeos, obtida por meio da simulação, foi de 14 dias nos três casos considerados. O valor encontrado está dentro dos intervalos de confiança de 95%, para a longevidade média dos pulgões apresentados por Xia, Werf e Rabbinge (1999) ($15,80 \pm 1,96$) e por Soglia et al. (2003) ($12,5 \pm 4,17$), indicando que o modelo é capaz de reproduzir a longevidade do pulgão *A. gossypii* para a temperatura estudada.

5.1.2 Tamanho médio populacional

Os valores médios do tamanho da população total de pulgões ápteros e alados, fora da rede (sítio isolado) para as três situações de irrigação propostas, são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 Tamanho médio populacional do pulgão *Aphis gossypii* Glover ápteros e alados (média $\pm \delta$) alimentado por cultivares de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação, avaliadas fora da rede (δ = semi-amplitude do intervalo de confiança de 95% da média)

Lâmina de irrigação	Ápteros	Alados
411,6mm	20299,51 \pm 22,90	5468,79 \pm 14,33
515,5mm	20299,51 \pm 22,90	5468,79 \pm 14,33
617,4mm	20299,51 \pm 22,90	5468,79 \pm 14,33

Pode-se observar que não houve diferenças entre os tamanhos médios populacionais, em relação à ápteros e alados, quando mensurados quanto às lâminas de irrigação e considerados no sítio isolado.

Na Figura 31 é apresentada a evolução temporal do tamanho da popula-

ção total de pulgões *A. gossypii* no sítio isolado, obtida por meio de simulações, considerando as três situações de irrigação.

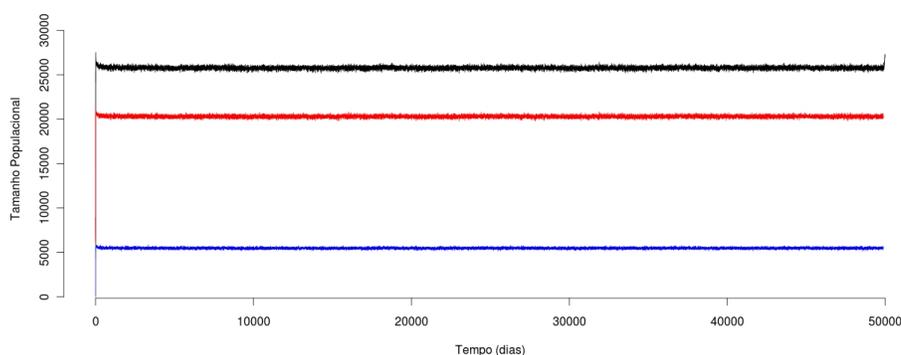


Figura 31 Evolução temporal do tamanho populacional total (preto), de ápteros (vermelho) e de alados (azul) de *Aphis gossypii* Glover na temperatura de 25°C , alimentado por cultivares de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.), obtidas por meio de simulação e avaliadas fora da rede

A Figura 32 apresenta a evolução temporal da população de pulgões dentro da rede. Podemos observar um aumento populacional, quando se considera a lâmina de irrigação de $617,4\text{mm}$, o que pode ser explicado pela maior área foliar da planta, proporcionada por esta situação, conforme apresentado na Figura 9. Verifica-se, ainda, em todos os casos considerados, um decaimento do tamanho médio da população de afídeos, considerando a idade da planta de, aproximadamente, 95 dias, período coincidente com a fase de senescência das plantas do algodoeiro (COSTA; SAUER, 1954).

Ainda, de acordo com o apresentado na Figura 32, observa-se que a maior infestação da rede tem início a partir dos 20 dias até, aproximadamente, 95 dias. Estes resultados estão de acordo com os apresentados por Marur e Ruano (2004), que evidenciaram o período crítico de ocorrência dos pulgões em culturas de algodão, com início na fase vegetativa, estendendo-se até a fase de abertura da flor. De acordo com a Figura 33, aproximadamente, 50% plantas de algodão são infestadas nos primeiros 20 dias de ataque do pulgão, em todas as situações de irrigação analisadas.

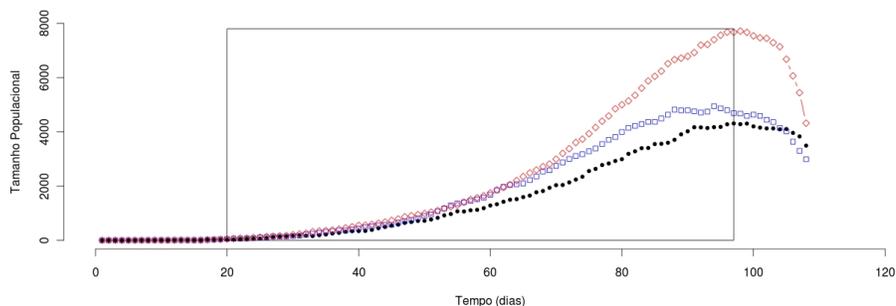


Figura 32 Evolução temporal do tamanho populacional total de *Aphis gossypii* Glover na temperatura de 25°C , alimentado por cultivares de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (•) $411,6\text{mm}$ (□) $515,5\text{mm}$ e (◇) $617,4\text{mm}$, obtidas por meio de simulação e avaliadas dentro da rede

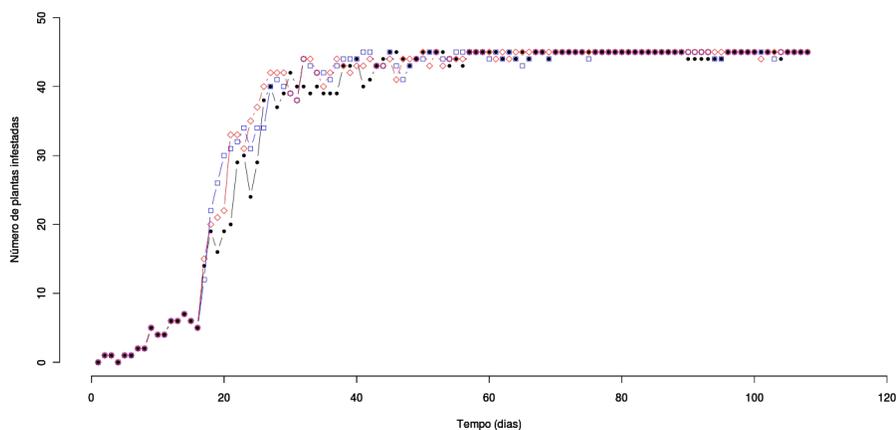


Figura 33 Número de plantas de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (•) $411,6\text{mm}$ (□) $515,5\text{mm}$ e (◇) $617,4\text{mm}$, infestadas pelo pulgão *A. gossypii* em função do tempo (em dias), obtidos por meio de simulação

As Figuras 34 e 35 apresentam o número de pulgões ápteros por planta e o número de pulgões alados por planta, respectivamente, considerando as três si-

tuações analisadas. Pode-se observar um comportamento análogo aos resultados, para o número de ápteros por planta, encontrados experimentalmente, por Fernandes et al. (2012) e apresentados na Figura 34, indicando que o modelo consegue reproduzir o comportamento desses afídeos na cultura do algodoeiro. Quanto aos afídeos alados, esta similaridade pode ser observada tomando-se por base os 49 dias, aproximadamente, conforme ilustrado pela Figura 35.

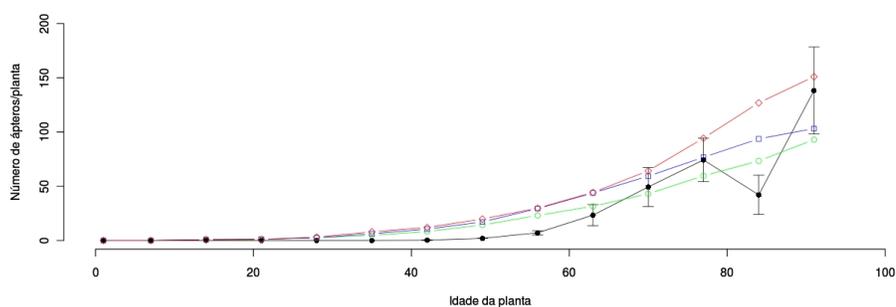


Figura 34 Número de ápteros por planta na temperatura de $25^{\circ}C$, alimentados por cultivares de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (•) experimental (FERNANDES et al., 2012) (○) 411,6mm (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm

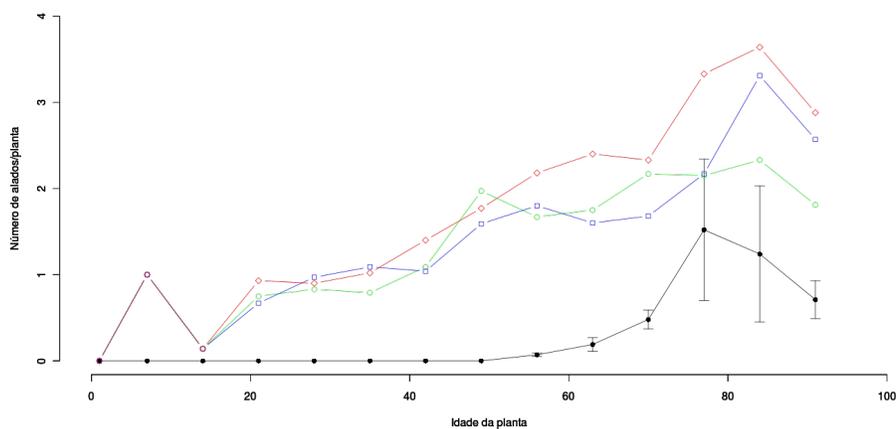


Figura 35 Número de alados por planta (esquerda) na temperatura de 25°C , alimentados por cultivares de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.), submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (•) experimental (FERNANDES et al., 2012) (○) 411,6mm (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm

Os resultados obtidos, por meio das simulações, estão de acordo com os resultados experimentais, obtidos por Fernandes et al. (2001), que investigaram o efeito da planta hospedeira no desenvolvimento de colônias de *A. gossypii*, em três cultivares de algodão, além da distribuição vertical dos insetos ao longo da planta. Segundo estes autores, o número médio de pulgões, encontrados por planta de algodão foi de, aproximadamente 130,2, com erro padrão igual a 21,6 pulgões por planta no período de maior infestação da planta.

5.1.3 Taxa Intrínseca de Crescimento

Os valores médios da taxa intrínseca de crescimento da população de pulgões *A. gossypii* na temperatura de 25°C , de acordo com as lâminas de irrigação propostas, são dados pela Tabela 5 e avaliados no sítio isolado e na rede. Para o cálculo dessa característica populacional, foram desprezadas as primeiras 40000 etapas temporais, período dispensado para a termalização da população.

Tabela 5 Taxa intrínseca de crescimento da população de pulgões *Aphis gossypii* Glover (média $\pm \delta$) alimentados em cultivares de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) submetidos a diferentes lâminas de irrigação, avaliadas no Sítio Isolado e na Rede (δ = semi-amplitude do intervalo de confiança de 95% da média)

Lâmina de irrigação	Fora da rede	Dentro da rede
411,6mm	0,2981 \pm 0,0005	0,0915 \pm 0,1269
515,5mm	0,2981 \pm 0,0006	0,0925 \pm 0,1374
617,4mm	0,2981 \pm 0,0007	0,0942 \pm 0,1489

Pode-se observar que os resultados estimados pela simulação fora da rede foram inferiores aos valores encontrados, experimentalmente, por Xia, Werf e Rabbinge (1999) para a temperatura de 25° ($r_m = 0,39$). De acordo com Souza (2007), as pequenas diferenças encontradas podem ser explicadas pelo fato de as taxas intrínsecas simuladas terem sido obtidas baseadas somente na temperatura que, apesar de ser importante elemento regulador da população, não é o único. Ainda, segundo esta autora, a taxa intrínseca depende de outros fatores, como por exemplo, o ciclo fenológico da planta. A evolução temporal da taxa intrínseca de crescimento é dada pela Figura 36. Nota-se que, ao ser considerado o ciclo fenológico da planta na rede, correspondendo às últimas 108 etapas temporais, houve pequenas alterações nos valores médios dessa característica populacional, conforme pode ser observado no gráfico da direita na Figura 36, corroborando com as afirmações de Souza (2007), de que o ciclo fenológico do algodoeiro atua como regulador da população de afídeos.

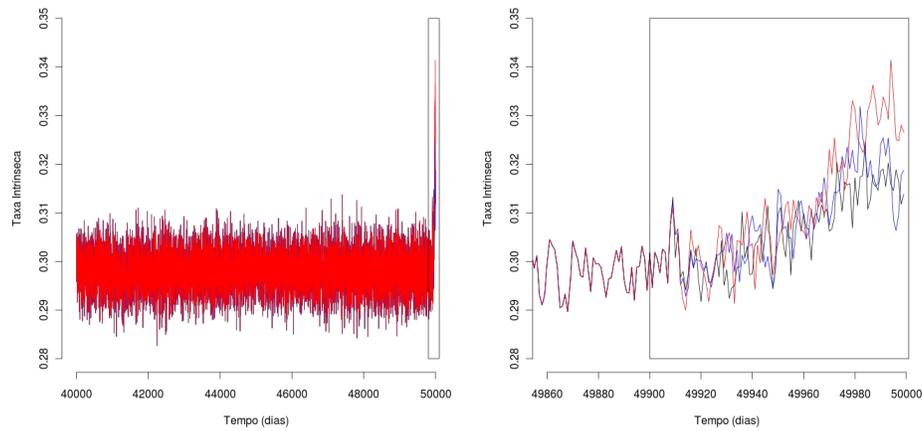


Figura 36 Taxa intrínseca de crescimento da população de *Aphis gossypii* na temperatura de $25^{\circ}C$, alimentado por cultivares de algodão *Gossypium hirsutum* L. submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (preto) 411,6mm, (azul) 515,5mm e (vermelho) 617,4mm, obtidas por meio de simulação e avaliadas fora da rede

A Figura 37 mostra a evolução temporal da taxa instrínseca de crescimento dentro da rede, considerando o ciclo fenológico do algodoeiro.

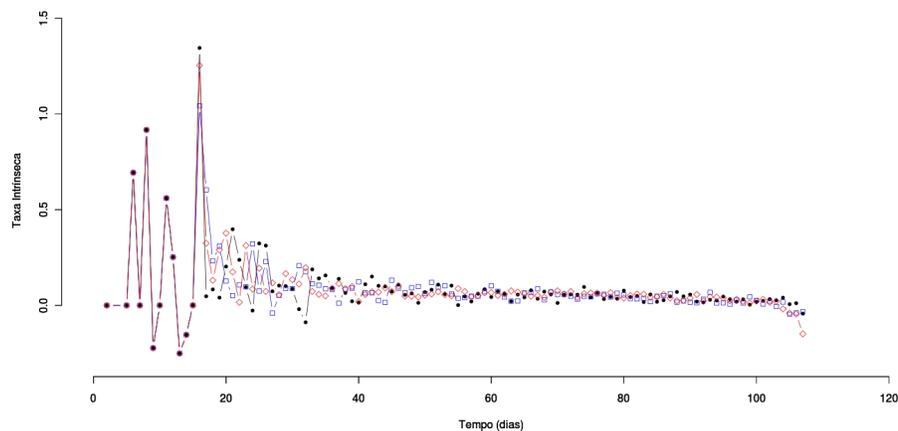


Figura 37 Taxa intrínseca de crescimento da população de *Aphis gossypii* na temperatura de 25°C , alimentado por cultivares de algodão *Gossypium hirsutum* L. submetidos a diferentes lâminas de irrigação: (●) 411,6mm, (□) 515,5mm e (◇) 617,4mm, obtidas por meio de simulação e avaliadas dentro da rede

Conforme mostrado na Tabela 5, os valores da taxa intrínseca de crescimento da população de pulgões estimados pela simulação, nesta situação, ficaram abaixo dos valores experimentais dados por Xia, Werf e Rabbinge (1999) para a temperatura de 25° ($r_m = 0,39$). Estes resultados podem ser explicados pelas variações na capacidade de carga de cada sítio, proporcionadas pela área foliar da planta, quando considerado o ciclo fenológico do algodoeiro e as lâminas de irrigação.

5.2 Análise espacial da dinâmica espaço-temporal

Nesta seção, serão discutidos os resultados relativos à análise espacial da dinâmica espaço-temporal da população de pulgões em algodoeiro.

5.2.1 Índice de Morisita

Foram calculados os Índices de Morisita para três configurações da rede: 30 dias de infestação (antes de estabilizar a população na rede), 78 dias de infestação e a configuração final da rede, isto é, 108 dias de infestação, a fim de analisar o comportamento espacial da população de pulgões ao longo do tempo de infestação.

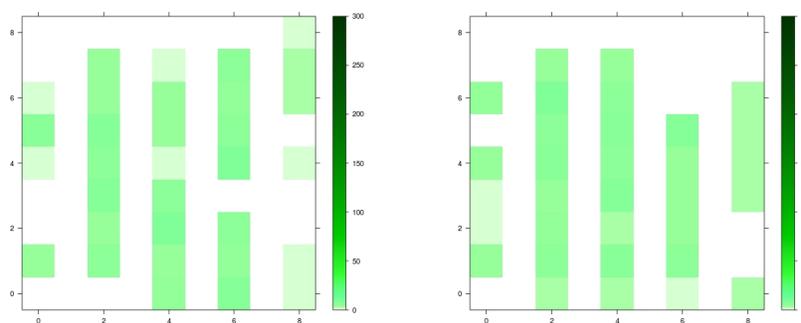
Na Tabela 6, são apresentados os valores médios do Índice de Morisita (I_δ), para a população de pulgões *A. gossypii*, alojados em uma rede de tamanho 9×9 , representando o plantio em fileiras simples, totalizando, portanto, 45 plantas (vide seção 4.1). As regras de migração seguiram o modelo de movimentos de torre (somente conexões ortogonais), conforme descritas na seção 4.2.

Tabela 6 Valores médios do índice de Morisita (média $\pm \delta_b$) para a população de pulgões *A. gossypii* obtidos por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação (δ_b = semiamplitude do intervalo de confiança bootstrap de 95% da média)

Situação	Lâmina		Índice de Morisita (I_δ)
$t = 30$	411,6mm	Afídeos	2,2128 \pm 0,0477
		Ápteros	2,8487 \pm 0,0819
		Alados	2,1741 \pm 0,1007
	515,5mm	Afídeos	2,1662 \pm 0,0507
		Ápteros	2,5311 \pm 0,0657
		Alados	1,8431 \pm 0,0726
	617,4mm	Afídeos	2,3788 \pm 0,0567
		Ápteros	2,5640 \pm 0,0683
		Alados	1,8195 \pm 0,0877
$t = 78$	411,6mm	Afídeos	2,9919 \pm 0,0741
		Ápteros	3,0592 \pm 0,0784
		Alados	2,1702 \pm 0,0645
	515,5mm	Afídeos	3,0868 \pm 0,0823
		Ápteros	3,1588 \pm 0,0880
		Alados	2,0994 \pm 0,0543
	617,4mm	Afídeos	2,9498 \pm 0,0692
		Ápteros	2,9909 \pm 0,0752
		Alados	1,8186 \pm 0,0414
$t = 108$	411,6mm	Afídeos	2,8451 \pm 0,0657
		Ápteros	2,9468 \pm 0,0733
		Alados	2,3039 \pm 0,0534
	515,5mm	Afídeos	2,7159 \pm 0,0632
		Ápteros	2,8156 \pm 0,0684
		Alados	2,3617 \pm 0,0514
	617,4mm	Afídeos	2,6256 \pm 0,0559
		Ápteros	2,7644 \pm 0,0682
		Alados	2,3349 \pm 0,0479

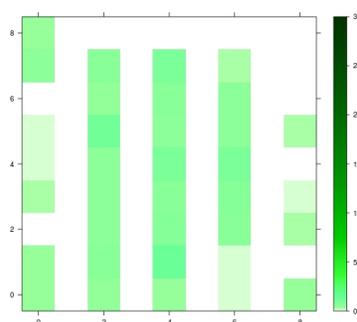
Verifica-se, em todas as situações, pela análise dos intervalos de confiança bootstrap de 95%, uma distribuição agregada ($I_\delta > 1$). Os resultados encontrados pela simulação, para o índice de Morisita nas diversas situações propostas, estão de acordo com os resultados experimentais obtidos por Rodrigues, Fernandes e

Santos (2010) e Silva et al. (2007) que encontraram distribuição espacial agregada dos pulgões *A. gossypii*, em diversas cultivares de algodoeiro, independente do nível de incidência da população.



(a) Lâmina de 411,6mm

(b) Lâmina de 515,5mm



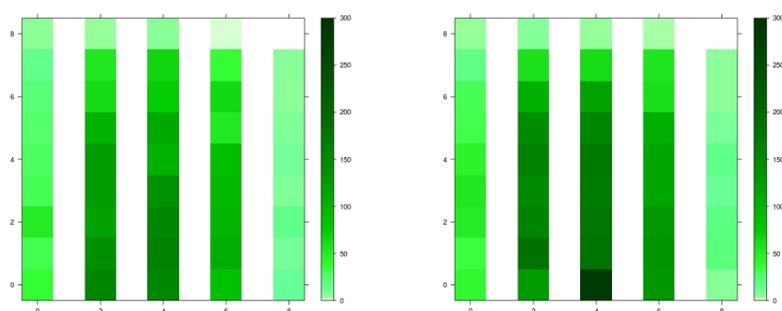
(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 38 Distribuição espacial da população total de pulgões *A. gossypii* na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 30$

A Figura 38 apresenta a distribuição espacial da população total de pulgões *A. gossypii* na rede, considerando as três situações de irrigação, avaliadas em $t = 30$. Podemos observar uma invasão dos pulgões, às fileiras centrais da plantação de algodoeiro simulada, evidenciando o comportamento agregado da população de

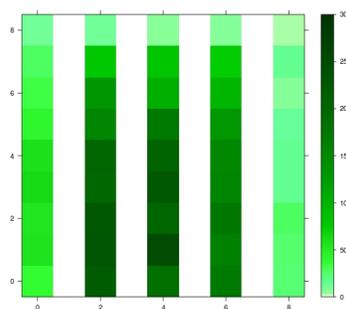
pulgões, apesar da ocupação da rede nesta etapa temporal ser relativamente baixa.

A ocupação da rede, em sua totalidade, pode ser notada ao analisarmos as Figuras 39 e 40, que apresentam as configurações da rede em $t = 78$ e $t = 108$, respectivamente. Pode ser observada, nestas etapas temporais, a infestação de todas as plantas de algodoeiro. Nota-se, também, o comportamento agregado da população dos afídeos, identificado por meio da densidade populacional evidenciada pela coloração escurecida dos sítios centrais da rede.



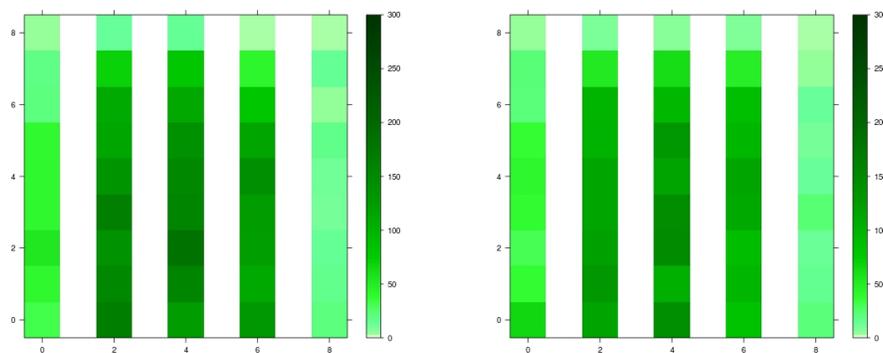
(a) Lâmina de 411,6mm

(b) Lâmina de 515,5mm



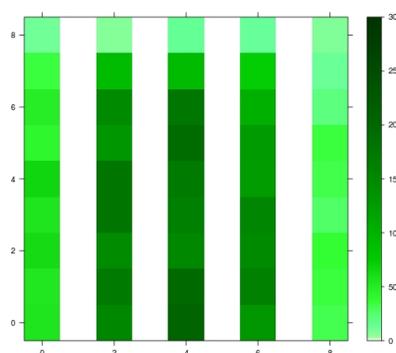
(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 39 Distribuição espacial da população total de pulgões *A. gossypii* na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 78$



(a) Lâmina de 411,6mm

(b) Lâmina de 515,5mm

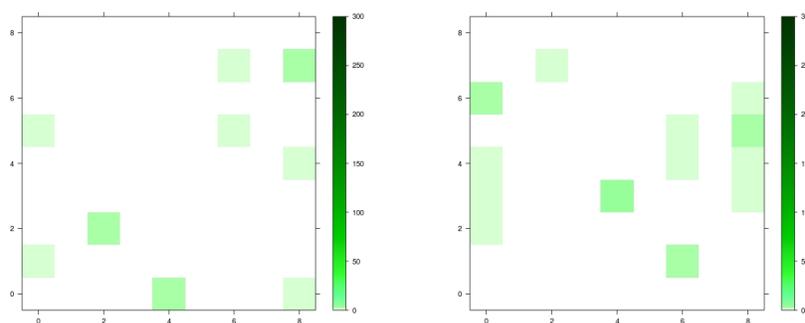


(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 40 Distribuição espacial da população total de pulgões *A. gossypii* na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 108$

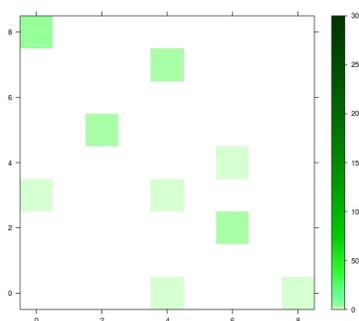
As regras de migração dentro da rede e interação com o ambiente externo, para pulgões ápteros e alados, diferem-se, conforme apresentado na seção 4.2. Analisando, separadamente, as formas do pulgão, pode ser constatado pelas Figuras 41 e 42 que, inicialmente, a rede foi infestada, basicamente, por pulgões ápteros. Esta situação pode ser explicada pelo fato de que, neste período, a den-

sidade de pulgões na rede ser relativamente baixa, favorecendo a manifestação de afídeos com esta forma.



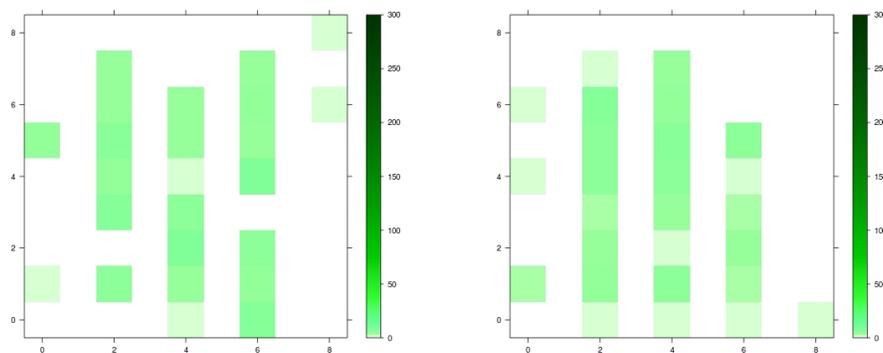
(a) Lâmina de 411,6mm

(b) Lâmina de 515,5mm



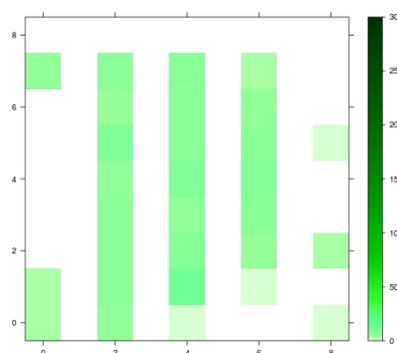
(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 41 Distribuição espacial da população de pulgões *A. gossypii* alados na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 30$



(a) Lâmina de 411,6mm

(b) Lâmina de 515,5mm

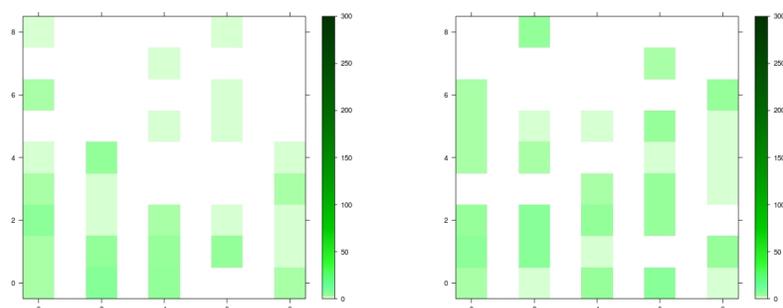


(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 42 Distribuição espacial da população de pulgões *A. gossypii* ápteros na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 30$

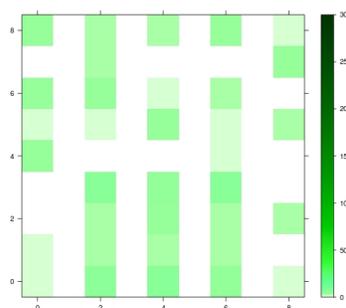
Nas Figuras 43 e 44 são apresentadas as configurações da rede, em relação a alados e ápteros, respectivamente, considerando as três situações de irrigação. Pode-se perceber a coloração de alguns sítios na Figura 43, indicando um pequeno aumento na população de afídeos alados nesta etapa temporal. Em relação aos afídeos ápteros, pode ser observada uma grande densidade de pulgões desta forma

nesta etapa temporal, principalmente, nas fileiras centrais da rede, corroborando o comportamento agregado da população de pragas (Figura 44).



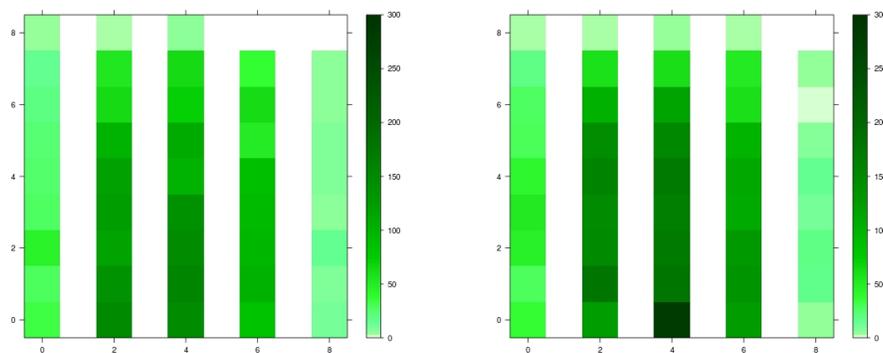
(a) Lâmina de 411,6mm

(b) Lâmina de 515,5mm



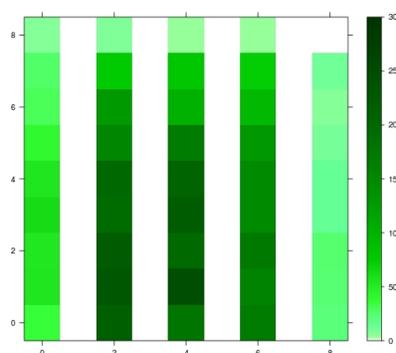
(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 43 Distribuição espacial da população de pulgões *A. gossypii* alados na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 78$



(a) Lâmina de 411,6mm

(b) Lâmina de 515,5mm

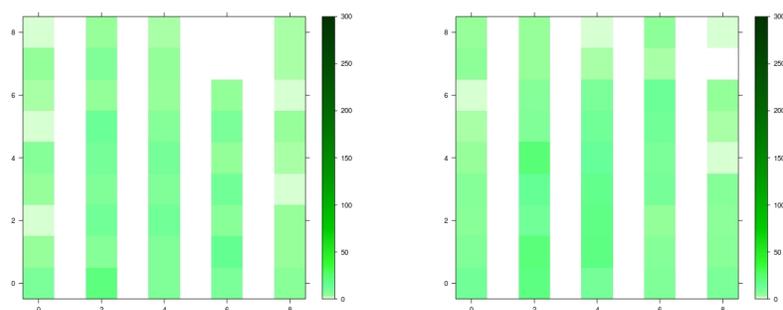


(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 44 Distribuição espacial da população de pulgões *A. gossypii* ápteros na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 78$

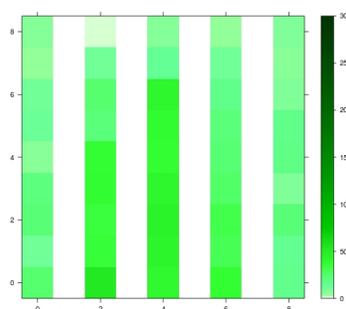
As Figuras 45 e 46 apresentam a configuração da rede ao final da simulação ($t=108$), para os pulgões alados e ápteros, respectivamente. Nota-se um aumento de plantas infestadas por alados e ápteros nesta etapa temporal. Observa-se, também, um aumento na densidade populacional dos pulgões alados (Figura 45(c)) e ápteros (Figura 46(c)) na rede, considerando a lâmina de irrigação de 617,4mm,

indicando ser esta uma configuração significativa para a proliferação de pulgões.



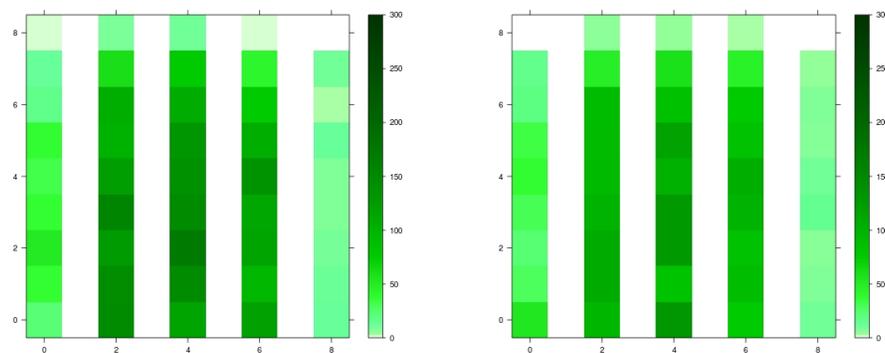
(a) Lâmina de 411,6mm

(b) Lâmina de 515,5mm



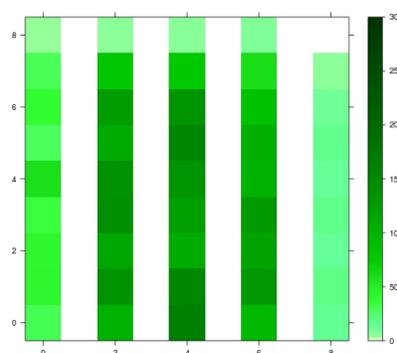
(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 45 Distribuição espacial da população de pulgões *A. gossypii* alados na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 108$



(a) Lâmina de 411,6mm

(b) Lâmina de 515,5mm



(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 46 Distribuição espacial da população de pulgões *A. gossypii* ápteros na rede, obtida por simulação espaço-temporal em função da lâmina de irrigação, mensurada em $t = 108$

5.2.2 Expoente k da distribuição binomial negativa

A Tabela 7 apresenta os valores da média e da variância da população de pulgões na rede, além do índice k da distribuição binomial negativa, em função do tempo e da lâmina de irrigação considerados.

Tabela 7 Estatísticas (média amostral, variância amostral e expoente k da distribuição binomial negativa) da população de pulgões *A. gossypii* em algodoeiro (*G. hirsutum*) submetidos a diferentes lâminas de irrigação

Lâminas		tempo		
		$t = 30$	$t = 78$	$t = 108$
411,6mm	\bar{x}	2,00	35,00	43,12
	s^2	6,80	2478,72	3455,13
	k	0,83	0,50	0,54
515,5mm	\bar{x}	6,28	45,72	36,90
	s^2	1,93	4400,37	2359,44
	k	0,86	0,48	0,58
617,4mm	\bar{x}	2,54	56,59	53,34
	s^2	11,32	6218,14	4625,72
	k	0,73	0,51	0,62

Pode ser observada, em todos os casos, uma disposição altamente agregada ($k < 2$) da população de pulgões. Esses resultados estão de acordo com aqueles encontrados, experimentalmente, por Rodrigues, Fernandes e Santos (2010) que estudaram a distribuição espacial de *A. gossypii* em duas cultivares de algodoeiro.

5.2.3 Correlograma direcional de Moran

A análise de autocorrelação espacial foi utilizada, para investigar a estrutura espacial das populações de *A. gossypii*, utilizando as três configurações da rede propostas na subseção anterior. Para determinação do número k de classes, a serem avaliadas na construção do correlograma de Moran foi utilizada a fórmula de Sturges, conforme proposto por Legendre e Legendre (1998), de forma que, para uma rede de tamanho 9×9 , temos 81 sítios, totalizando

$$C_2^{81} = \frac{81 \times (81 - 1)}{2} = 3240$$

distâncias na área amostral estudada, produzindo um valor de k igual a

$$k = 1 + \log_2(3240) \approx 13 \quad (21)$$

classes.

A direcionalidade é um fator considerável em elementos da natureza, uma vez que a variabilidade ou distribuição espacial de tais elementos ocorre mais intensamente numa direção e menos intensamente em outra direção. Dessa forma, optou-se por analisar a estrutura espacial das populações de *A. gossypii* considerando as direções 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° e 180° com o intuito de verificar tal comportamento.

Utilizando os correlogramas direcionais de Moran, mostrados pela Figura 47, obteve-se o comportamento espacial dos pulgões *A. gossypii*, em plantas de algodão, tomados no tempos $t = 30$ e submetidas à lâmina de irrigação de $411,66mm$, (Figura 47(a)), $515,5mm$ (Figura 47(b)) e $617,4mm$ (Figura 47(c)). Verifica-se, em todas as situações, que a significância estatística do índice de Moran, considerando a mesma classe de distância, depende da direção em que foi mensurada, indicando um comportamento anisotrópico das população de pulgões, isto é, a correlação espacial dos pulgões não é a mesma se medida em diferentes direções. Este fato atesta que o fator lâmina de irrigação não influencia o comportamento anisotrópico da população de pulgões.

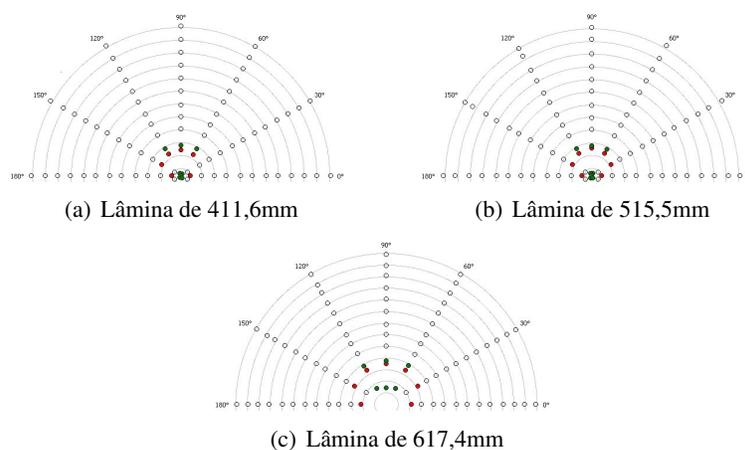


Figura 47 Correlograma direcional de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 30$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. Círculos vermelhos indicam autocorrelação positiva significativa, círculos verdes indicam autocorrelação negativa significativa e círculos brancos indicam autocorrelação não-significativa

Situações análogas são apresentadas nas Figuras 48 e 49, indicando que o tempo de permanência dos pulgões na rede igualmente não influencia o comportamento anisotrópico da população de pulgões.

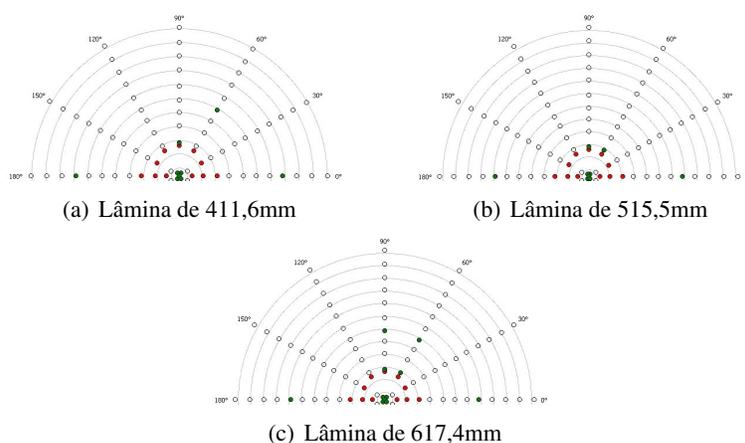


Figura 48 Correlograma direcional de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 78$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. Círculos vermelhos indicam autocorrelação positiva significativa, círculos verdes indicam autocorrelação negativa significativa e círculos brancos indicam autocorrelação não-significativa

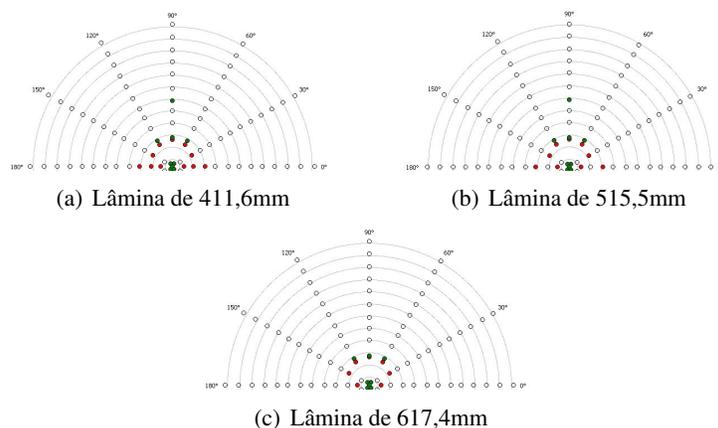


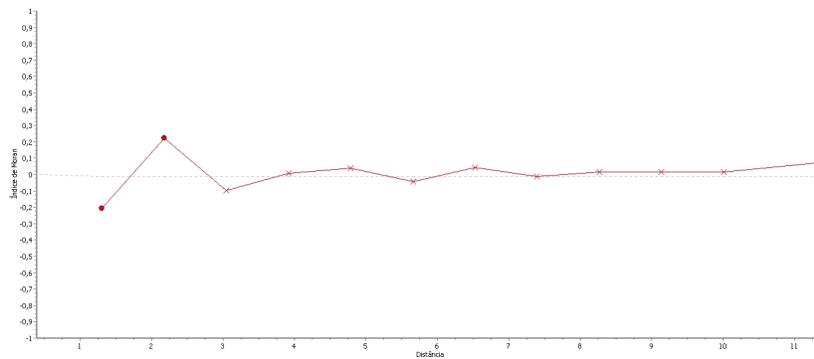
Figura 49 Correlograma direcional de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 108$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. Círculos vermelhos indicam autocorrelação positiva significativa, círculos verdes indicam autocorrelação negativa significativa e círculos brancos indicam autocorrelação não-significativa

Em uma análise geral, os resultados encontrados pela simulação da dinâmica espaço-temporal do pulgão *A. gossypii* estão condizentes com os resultados encontrados por Oliveira (2010), ao simular a dinâmica espaço-temporal do bicho-mineiro do cafeeiro, em condições de campo e temperaturas constantes. Segundo este autor, as lagartas do bicho-mineiro do cafeeiro apresentam um comportamento espacial agregado, com variabilidade espacial, na maioria dos casos, anisotrópica, ou seja, dependente da direção.

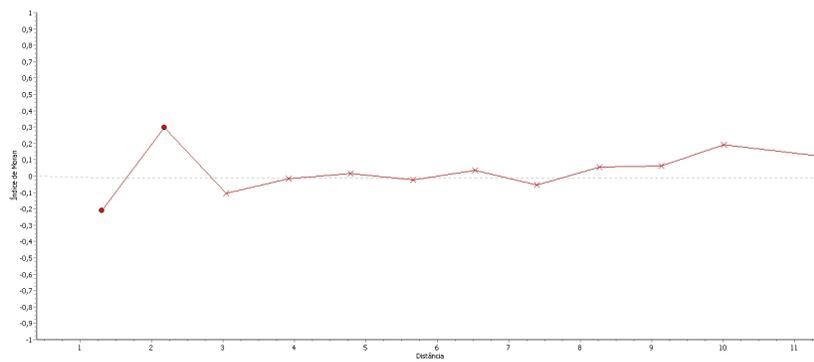
5.2.4 Correlogramas de Moran

Ao analisarmos os correlogramas direcionais de Moran, percebemos um comportamento anisotrópico basicamente apenas nas primeiras classes de distâncias, indicando uma anisotropia leve na população dos afídeos. Diante desse fato, foi assumida isotropia nos modelos de autocorrelação espacial, isto é, admitiu-se que a interação é igualmente possível e previsível em todas as direções, sem evidência de viés direcional.

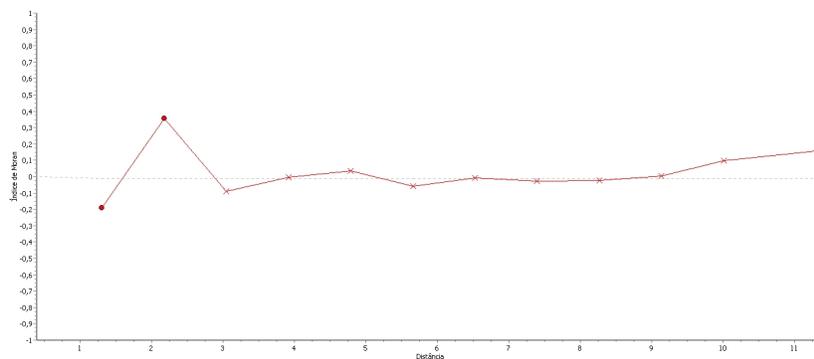
A Figura 50 apresenta os correlogramas de Moran da população de afídeos alimentados por plantas de algodão mensurados no tempo $t = 30$, submetidas às lâminas de irrigação de $411,6mm$ (Figura 50(a)), $515,5mm$ (Figura 50(b)) e $617,4mm$ (Figura 50(c)).



(a) Lâmina de 411,6mm



(b) Lâmina de 515,5mm



(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 50 Correlograma de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 30$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. A linha tracejada indica o valor esperado do índice I_d de Moran sob hipótese nula de ausência de autocorrelação

Podemos notar, nas três situações, que os correlogramas indicam existência de correlação, estatisticamente significativa ($p\text{-valor} < 0,05$), apenas nas duas primeiras classes de distância dentre as 13 classes analisadas. Os sítios (ou plantas), separados por estes intervalos de distâncias, portanto, tendem a ser semelhantes quanto ao nível de infestação, considerando a população total da rede. Para as demais classes de distância, os índices deixam de ser significativos e se estabilizam próximo ao valor esperado sob hipótese nula de ausência de autocorrelação, de forma que os sítios distanciados por essas classes tendem a ter níveis de infestação não correlacionados. A alternância entre valores positivos e negativos do índice, em todos os casos analisados na Figura 50, indicando autocorrelação positiva e negativa, pode ser explicada pela presença de colunas sem plantas (em branco) na rede, simulando o sistema de plantio do algodoeiro em fileiras simples. As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam os limites das classes de distâncias considerados, os respectivos valores, esperados e estimados, dos índices de Moran e suas respectivas significâncias, mensurados no tempo $t = 30$, para as lâminas de irrigação de $411,6mm$, $515,5mm$ e $617,4mm$, respectivamente.

Tabela 8 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 411,6mm, mensurados em $t = 30$

Nº	Classes de distâncias				Índice de Moran				p-valor
	Limite Inferior	Limite superior	Nº pares	E(I)	I	SD(I)	z		
1	0,00000	0,87029	0	-	-	-	-	-	-
2	0,87029	1,74057	272	-0,0125	-0,2066	0,0599	3,2373	0,0012	
3	1,74057	2,61086	350	-0,0125	0,2239	0,0515	4,5858	0,0000	
4	2,61086	3,48114	398	-0,0125	-0,0960	0,0479	1,7413	0,0816	
5	3,48114	4,35143	490	-0,0125	0,0097	0,0428	0,5192	0,6036	
6	4,35143	5,22171	460	-0,0125	0,0399	0,0448	1,1678	0,2428	
7	5,22171	6,09200	408	-0,0125	-0,0422	0,0478	0,6207	0,5347	
8	6,09200	6,96228	236	-0,0125	0,0446	0,0636	0,8981	0,3691	
9	6,96228	7,83257	344	-0,0125	-0,0136	0,0508	0,0228	0,9817	
10	7,83257	8,70285	192	-0,0125	0,0149	0,0675	0,4062	0,6845	
11	8,70285	9,57314	60	-0,0125	0,0142	0,1253	0,2136	0,8307	
12	9,57314	10,44342	20	-0,0125	0,0149	0,2190	0,1254	0,9001	
13	10,44342	12,31371	10	-0,0125	0,0753	0,3084	0,2848	0,7757	

Tabela 9 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 515,5mm, mensurados em $t = 30$

Nº	Classes de distâncias				Índice de Moran				p-valor
	Limite Inferior	Limite superior	Nº pares	E(I)	I	SD(I)	z		
1	0,00000	0,87029	0	-	-	-	-	-	-
2	0,87029	1,74057	272	-0,0125	-0,2112	0,0599	3,3138	0,0009	
3	1,74057	2,61086	350	-0,0125	0,2974	0,0515	6,0120	0,0000	
4	2,61086	3,48114	398	-0,0125	-0,1046	0,0479	1,9198	0,0548	
5	3,48114	4,35143	490	-0,0125	-0,0150	0,0428	0,0590	0,9529	
6	4,35143	5,22171	460	-0,0125	0,0168	0,0448	0,6536	0,5133	
7	5,22171	6,09200	408	-0,0125	-0,0235	0,0478	0,2303	0,8178	
8	6,09200	6,96228	236	-0,0125	0,0351	0,0636	0,7496	0,4534	
9	6,96228	7,83257	344	-0,0125	-0,0553	0,0508	0,8431	0,3991	
10	7,83257	8,70285	192	-0,0125	0,0551	0,0675	1,0015	0,3165	
11	8,70285	9,57314	60	-0,0125	0,0606	0,1253	0,5838	0,5593	
12	9,57314	10,44342	20	-0,0125	0,1899	0,2190	0,9241	0,3554	
13	10,44342	12,31371	10	-0,0125	0,1214	0,3084	0,4345	0,6639	

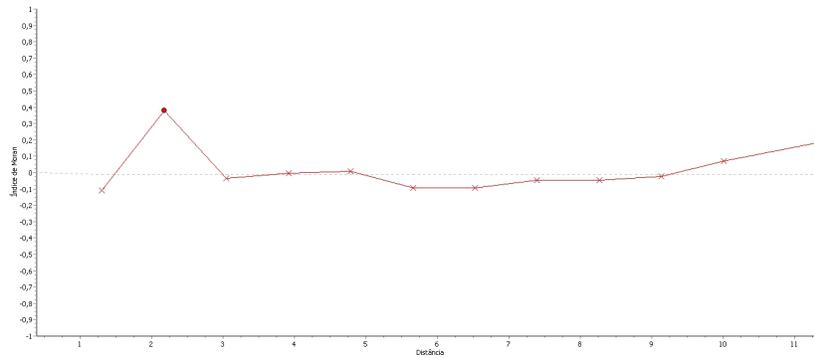
Tabela 10 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 617,4mm, mensurados em $t = 30$

Nº	Classes de distâncias				Índice de Moran				
	Limite Inferior	Limite superior	Nº pares	E(I)	I	SD(I)	z	p-valor	
1	0,00000	0,87029	0	-	-	-	-	-	
2	0,87029	1,74057	272	-0,0125	-0,1901	0,0599	2,9609	0,0030	
3	1,74057	2,61086	350	-0,0125	0,3560	0,0515	7,1482	0,0000	
4	2,61086	3,48114	398	-0,0125	-0,0894	0,0479	1,6038	0,1087	
5	3,48114	4,35143	490	-0,0125	-0,0041	0,0428	0,1958	0,8446	
6	4,35143	5,22171	460	-0,0125	0,0346	0,0448	1,0504	0,2935	
7	5,22171	6,09200	408	-0,0125	-0,0595	0,0478	0,9821	0,3260	
8	6,09200	6,96228	236	-0,0125	-0,0084	0,0636	0,0640	0,9489	
9	6,96228	7,83257	344	-0,0125	-0,0286	0,0508	0,3172	0,7510	
10	7,83257	8,70285	192	-0,0125	-0,0229	0,0675	0,1545	0,8771	
11	8,70285	9,57314	60	-0,0125	0,0029	0,1253	0,1235	0,9016	
12	9,57314	10,44342	20	-0,0125	0,0984	0,2190	0,5065	0,6124	
13	10,44342	12,31371	10	-0,0125	0,1617	0,3084	0,5644	0,5721	

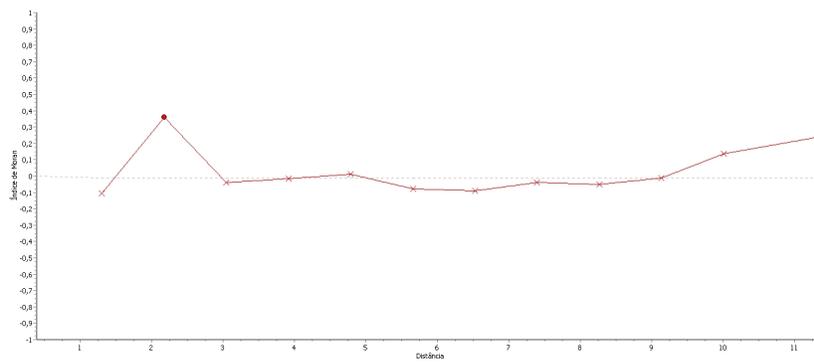
A Figura 51 apresenta os correlogramas de Moran da população de afídeos alimentados por plantas de algodão mensurados no tempo $t = 78$, submetidas às lâminas de irrigação de $411,6mm$ (Figura 51(a)), $515,5mm$ (Figura 51(b)) e $617,4mm$ (Figura 51(c)). Observa-se, em todas situações de irrigação, correlação estatisticamente significativa (p-valor $< 0,05$) apenas na segunda classe de distância, indicando que apenas os pares de plantas cuja distância pertence a este intervalo possuem níveis de infestação similares. Para os demais pares de plantas, cuja distância pertence às outras classes de distância, foram encontrados indicadores de autocorrelação não significativos, apontando que não houve diferenças significativas nos valores dos índices de Moran, quanto ao método de irrigação utilizado, ou seja, independente da lâmina de irrigação proposta, a estrutura espacial dos pulgões na rede permanece inalterada. As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam os limites das classes de distâncias considerados, os respectivos valores, esperados e estimados, dos índices de Moran e suas respectivas significâncias, mensurados no tempo $t = 78$, para as lâminas de irrigação de $411,6mm$, $515,5mm$ e $617,4mm$, respectivamente.

A Figura 52 apresenta os correlogramas de Moran da população de afídeos, alimentados por plantas de algodão ao final da simulação, ou seja, mensurados no tempo $t = 108$, submetidas às lâminas de irrigação de $411,6mm$ (Figura 52(a)), $515,5mm$ (Figura 52(b)) e $617,4mm$ (Figura 52(c)).

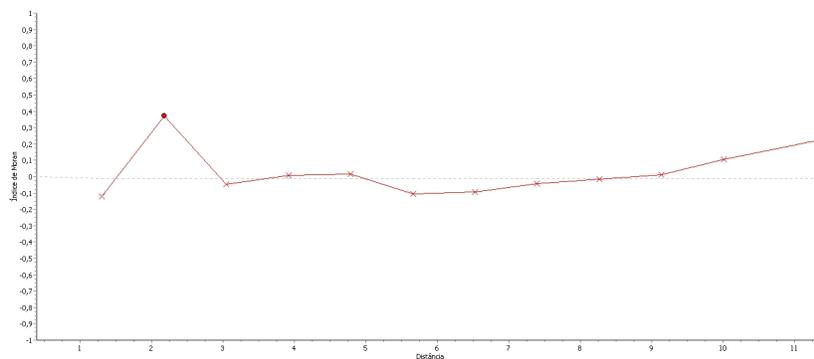
Podemos observar uma situação análoga à configuração da rede, quando considerado $t = 30$, ao analisarmos a Figura 52, que apresenta a configuração espacial da rede ao final da simulação, ou seja, em $t = 108$. Apenas os pares de plantas cuja distância pertence às duas primeiras classes de distância apresentaram autocorrelação estatisticamente significativa (p-valor $< 0,05$), indicando uma relação entre níveis de infestação. As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam os limites das classes de distâncias considerados, os respectivos valores, esperados e estimados, dos índices de Moran e suas respectivas significâncias, mensurados no tempo $t = 78$, para as lâminas de irrigação de $411,6mm$, $515,5mm$ e $617,4mm$, respectivamente. Nota-se que o fator lâmina de irrigação não influencia a configuração espacial da rede, porém, esta é alterada ao considerar o tempo de permanência dos pulgões na rede.



(a) Lâmina de 411,6mm



(b) Lâmina de 515,5mm



(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 51 Correlograma de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 78$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. A linha tracejada indica o valor esperado do índice I_d de Moran sob hipótese nula de ausência de autocorrelação

Tabela 11 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 411,6mm, mensurados em $t = 78$

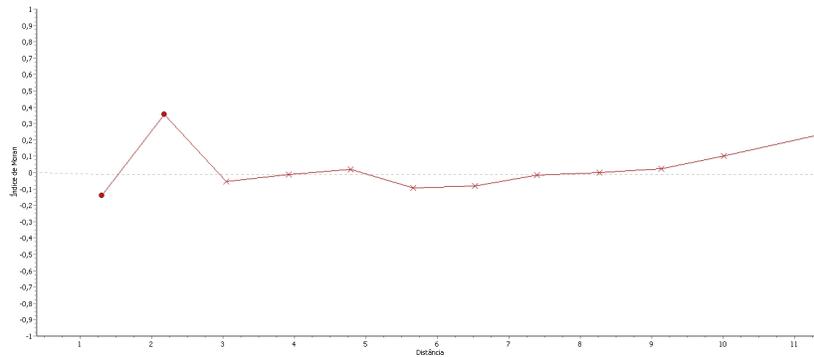
Nº	Classes de distâncias				Índice de Moran				p-valor
	Limite Inferior	Limite superior	Nº pares	E(I)	I	SD(I)	z		
1	0,00000	0,87029	0	-	-	-	-	-	-
2	0,87029	1,74057	272	-0,0125	-0,1094	0,0599	1,6160	0,1060	
3	1,74057	2,61086	350	-0,0125	0,3776	0,0515	7,5660	0,0000	
4	2,61086	3,48114	398	-0,0125	-0,0335	0,0479	0,4397	0,6601	
5	3,48114	4,35143	490	-0,0125	-0,0027	0,0428	0,2283	0,8194	
6	4,35143	5,22171	460	-0,0125	0,0096	0,0448	0,4946	0,6208	
7	5,22171	6,09200	408	-0,0125	-0,0955	0,0478	1,7356	0,0826	
8	6,09200	6,96228	236	-0,0125	-0,0956	0,0636	1,3073	0,1910	
9	6,96228	7,83257	344	-0,0125	-0,0451	0,0508	0,6418	0,5209	
10	7,83257	8,70285	192	-0,0125	-0,0458	0,0675	0,4932	0,6218	
11	8,70285	9,57314	60	-0,0125	-0,0250	0,1253	0,0998	0,9204	
12	9,57314	10,44342	20	-0,0125	0,0720	0,2190	0,3859	0,6995	
13	10,44342	12,31371	10	-0,0125	0,1859	0,3086	0,6435	0,5199	

Tabela 12 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 515,5mm, mensurados em $t = 78$

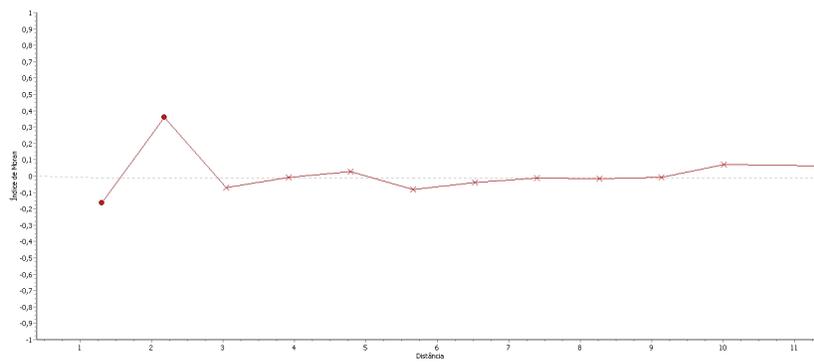
Nº	Classes de distâncias				Índice de Moran					p-valor
	Limite Inferior	Limite superior	Nº pares	E(I)	I	SD(I)	z			
1	0,00000	0,87029	0	-	-	-	-	-	-	-
2	0,87029	1,74057	272	-0,0125	-0,1072	0,0599	1,5800	0,1141		
3	1,74057	2,61086	350	-0,0125	0,3610	0,0515	7,2449	0,0000		
4	2,61086	3,48114	398	-0,0125	-0,0398	0,0479	0,5701	0,5685		
5	3,48114	4,35143	490	-0,0125	-0,0152	0,0428	0,0645	0,9485		
6	4,35143	5,22171	460	-0,0125	0,0109	0,0448	0,5216	0,6019		
7	5,22171	6,09200	408	-0,0125	-0,0799	0,0478	1,4103	0,1584		
8	6,09200	6,96228	236	-0,0125	-0,0881	0,0636	1,1891	0,2343		
9	6,96228	7,83257	344	-0,0125	-0,0404	0,0508	0,5505	0,5819		
10	7,83257	8,70285	192	-0,0125	-0,0500	0,0675	0,5566	0,5777		
11	8,70285	9,57314	60	-0,0125	-0,0110	0,1253	0,0119	0,9904		
12	9,57314	10,44342	20	-0,0125	0,1376	0,2190	0,6855	0,4930		
13	10,44342	12,31371	10	-0,0125	0,2440	0,3084	0,8317	0,4055		

Tabela 13 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 617,4mm, mensurados em $t = 78$

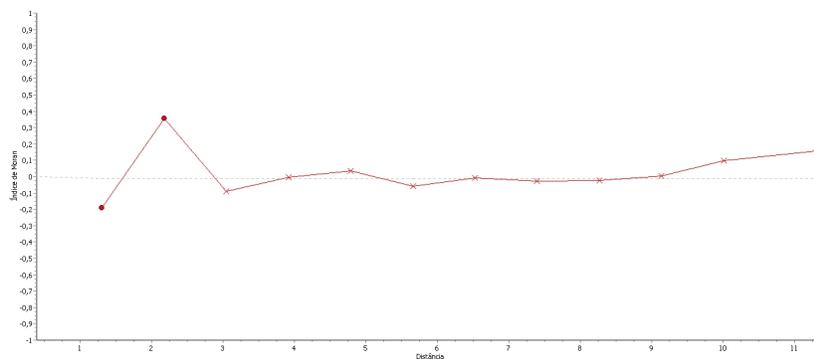
Nº	Classes de distâncias			Índice de Moran					p-valor
	Limite Inferior	Limite superior	Nº pares	E(I)	I	SD(I)	z		
1	0,00000	0,87029	0	-	-	-	-	-	-
2	0,87029	1,74057	272	-0,0125	-0,1218	0,0599	1,8234	0,0682	
3	1,74057	2,61086	350	-0,0125	0,3706	0,0515	7,4307	0,0000	
4	2,61086	3,48114	398	-0,0125	-0,0457	0,0479	0,6921	0,4888	
5	3,48114	4,35143	490	-0,0125	0,0060	0,0428	0,4319	0,6657	
6	4,35143	5,22171	460	-0,0125	0,0139	0,0448	0,5898	0,5553	
7	5,22171	6,09200	408	-0,0125	-0,1050	0,0478	1,9346	0,0530	
8	6,09200	6,96228	236	-0,0125	-0,0949	0,0636	1,2959	0,1949	
9	6,96228	7,83257	344	-0,0125	-0,0424	0,0508	0,5899	0,5552	
10	7,83257	8,70285	192	-0,0125	-0,0172	0,0675	0,0710	0,9433	
11	8,70285	9,57314	60	-0,0125	0,0108	0,1253	0,1860	0,8524	
12	9,57314	10,44342	20	-0,0125	0,1037	0,2190	0,5304	0,5958	
13	10,44342	12,31371	10	-0,0125	0,2279	0,3084	0,7794	0,4357	



(a) Lâmina de 411,6mm



(b) Lâmina de 515,5mm



(c) Lâmina de 617,4mm

Figura 52 Correlograma de Moran para a população de pulgões em plantas de algodão mensurados no tempo $t = 108$, submetidas à lâmina de irrigação de (a) 411,6mm, (b) 515,5mm e (c) 617,4mm. A linha tracejada indica o valor esperado do índice I_d de Moran sob hipótese nula de ausência de autocorrelação

Tabela 14 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 411,6mm, mensurados em $t = 108$

Nº	Classes de distâncias				Índice de Moran					p-valor
	Limite Inferior	Limite superior	Nº pares	E(I)	I	SD(I)	z			
1	0,00000	0,87029	0	-	-	-	-	-	-	-
2	0,87029	1,74057	272	-0,0125	-0,1410	0,0599	2,1425	0,0321	0,0321	
3	1,74057	2,61086	350	-0,0125	0,3571	0,0515	7,1687	0,0000	0,0000	
4	2,61086	3,48114	398	-0,0125	-0,0537	0,0479	0,8592	0,3901	0,3901	
5	3,48114	4,35143	490	-0,0125	-0,0099	0,0428	0,0607	0,9515	0,9515	
6	4,35143	5,22171	460	-0,0125	0,0180	0,0448	0,6807	0,4960	0,4960	
7	5,22171	6,09200	408	-0,0125	-0,0930	0,0478	1,6840	0,0921	0,0921	
8	6,09200	6,96228	236	-0,0125	-0,0820	0,0636	1,0930	0,2743	0,2743	
9	6,96228	7,83257	344	-0,0125	-0,0170	0,0508	0,0902	0,9281	0,9281	
10	7,83257	8,70285	192	-0,0125	-0,0002	0,0675	0,1848	0,8533	0,8533	
11	8,70285	9,57314	60	-0,0125	0,0234	0,1253	0,2868	0,7742	0,7742	
12	9,57314	10,44342	20	-0,0125	0,1008	0,2190	0,5175	0,6047	0,6047	
13	10,44342	12,31371	10	-0,0125	0,2351	0,3084	0,8029	0,4220	0,4220	

Tabela 15 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 515,5mm, mensurados em $t = 108$

Nº	Classes de distâncias				Índice de Moran					p-valor
	Limite Inferior	Limite superior	Nº pares	E(I)	I	SD(I)	z			
1	0,00000	0,87029	0	-	-	-	-	-	-	-
2	0,87029	1,74057	272	-0,0125	-0,1657	0,0599	2,5544	0,0106		
3	1,74057	2,61086	350	-0,0125	0,3599	0,0515	7,2231	0,0000		
4	2,61086	3,48114	398	-0,0125	-0,0696	0,0479	1,1902	0,2339		
5	3,48114	4,35143	490	-0,0125	-0,0095	0,0428	0,0690	0,9449		
6	4,35143	5,22171	460	-0,0125	0,0255	0,0448	0,8477	0,3966		
7	5,22171	6,09200	408	-0,0125	-0,0806	0,0478	1,4233	0,1546		
8	6,09200	6,96228	236	-0,0125	-0,0395	0,0636	0,4244	0,6712		
9	6,96228	7,83257	344	-0,0125	-0,0114	0,0508	0,0211	0,9831		
10	7,83257	8,70285	192	-0,0125	-0,0155	0,0675	0,0457	0,9635		
11	8,70285	9,57314	60	-0,0125	-0,0080	0,1253	0,0355	0,9716		
12	9,57314	10,44342	20	-0,0125	0,0694	0,2190	0,3741	0,7082		
13	10,44342	12,31371	10	-0,0125	0,0610	0,3084	0,2382	0,8116		

Tabela 16 Limites das classes de distância, número de pares, valor esperado e estimado, desvio padrão, e significância do índice de Moran calculados em uma população de pulgões *A. gossypii* alimentados por plantas de algodão submetidas à lâmina de irrigação de 617,4mm, mensurados em $t = 108$

Nº	Classes de distâncias				Índice de Moran					p-valor
	Limite Inferior	Limite superior	Nº pares	E(I)	I	SD(I)	z			
1	0,00000	0,87029	0	-	-	-	-	-	-	-
2	0,87029	1,74057	272	-0,0125	-0,1901	0,0599	2,9609	0,0030	0,0030	
3	1,74057	2,61086	350	-0,0125	0,3560	0,0515	7,1482	0,0000	0,0000	
4	2,61086	3,48114	398	-0,0125	-0,0894	0,0479	1,6038	0,1087	0,1087	
5	3,48114	4,35143	490	-0,0125	-0,0041	0,0428	0,1958	0,8446	0,8446	
6	4,35143	5,22171	460	-0,0125	0,0346	0,0448	1,0504	0,2935	0,2935	
7	5,22171	6,09200	408	-0,0125	-0,0595	0,0478	0,9821	0,3260	0,3260	
8	6,09200	6,96228	236	-0,0125	-0,0084	0,0636	0,0640	0,9489	0,9489	
9	6,96228	7,83257	344	-0,0125	-0,0286	0,0508	0,3172	0,7510	0,7510	
10	7,83257	8,70285	192	-0,0125	-0,0229	0,0675	0,1545	0,8771	0,8771	
11	8,70285	9,57314	60	-0,0125	0,0029	0,1253	0,1235	0,9016	0,9016	
12	9,57314	10,44342	20	-0,0125	0,0984	0,2190	0,5065	0,6124	0,6124	
13	10,44342	12,31371	10	-0,0125	0,1617	0,3084	0,5649	0,5721	0,5721	

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Acredita-se que o uso de ferramentas computacionais como suporte ao conhecimento dos aspectos biológicos e comportamentais e da estrutura espacial da população de pulgões em cultivares de algodoeiro sustentam a aplicação das técnicas de manejo integrado de pragas. Com isso, a implementação de programas mais complexos, que simulam com veracidade, aspectos da natureza, tornam-se cada vez mais necessários. Dentro deste cenário, recomenda-se como trabalhos futuros, a implementação de programas computacionais capazes de:

- a) considerar a forma de plantio do algodoeiro em fileiras duplas;
- b) considerar o efeito dos fenômenos naturais, como chuva e vento, no desenvolvimento das plantas e no desenvolvimento das colônias de pulgões;
- c) considerar a presença dos inimigos naturais do pulgão *A. gossypii* na dinâmica espaço-temporal.

7 CONCLUSÃO

O programa computacional, baseado na metodologia proposta neste trabalho, produziu de forma satisfatória resultados condizentes com os encontrados na literatura especializada.

O Modelo Penna, adaptado à biologia do pulgão *A. gossypii* e ao ciclo fenológico do algodão, foi capaz de reproduzir as características da população do afídeo, mesmo com a inserção da estrutura espacial.

O fator lâmina de irrigação produziu efeitos significativos nas características populacionais avaliadas na população, uma vez que a maior lâmina de irrigação produziu uma área foliar maior, quando considerado o ciclo fenológico do algodoeiro e a interação dos pulgões com o ambiente externo (sistema aberto).

O fator tempo de permanência dos pulgões na rede, de forma análoga, produziu efeitos significativos apenas na autocorrelação espacial dos sítios, quando avaliados em classes de distâncias, considerando a situação proposta.

Quanto à distribuição espacial dos pulgões, verificou-se que eles apresentaram comportamento agregado, com variabilidade espacial anisotrópica, isto é, dependente da direção.

De modo geral, os resultados encontrados com as simulações foram concordantes com aqueles obtidos experimentalmente.

REFERÊNCIAS

ALEXOPOULOS, C. Statistical estimation in computer simulation. In: HENDERSON, S. G.; NELSON, B. L. (Ed.). **Simulation**. New York: Elsevier, 2006. p. 193-223. (Handbooks in Operations Research and Management Science, 13).

ARAÚJO, A. E. de et al. **Cultivo de algodão irrigado**. Brasília: EMBRAPA, 2006. (Sistemas de Produção, 3). Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/#algodao>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, F. D. S. Risco climático para o cultivo de algodoeiro na região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 22, n. 3, p. 408-416, 2007.

BAILEY, T.; GATRELL, A. **Interactive spatial data analysis**. New York: Wiley, 1995. 732 p.

BARRETO, A. **Configuração de plantio na cultura do algodoeiro herbáceo irrigado por sulcos**. Brasília: EMBRAPA-CNPA, 1994. 7 p. (EMBRAPA-CNPA. Pesquisa em Andamento).

BERNARDES, A. T. Strategies for reproduction and ageing. **Annalen der Physik**, Leipzig, v. 5, n. 6, p. 539-550, 1996.

BEZERRA, J. R. C. **Crescimento, desenvolvimento e rentabilidade do algodoeiro BRS 200 - Marrom, irrigado**. 2007. 102 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

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

CALBO, A. G.; SILVA, W. L. C.; TORRES, A. C. Comparação de modelos e estratégias para análise de crescimento. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 1, n. 1, p. 1-7, 1989.

CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. **Introduction to plant disease epidemiology**. New York: Wiley, 1990. 560 p.

CLIFF, A.; ORD, K. **Spatial processes: models and applications**. London: Pion, 1981. 266 p.

COSTA, A. S.; SAUER, H. F. G. Vermelhão do algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 13, n. 20, p. 237-247, set. 1954.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p. (Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics: Applied Probability and Statistics).

DRUCK, S. et al. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004. 190 p.

EFRON, B. Bootstrap methods: another look at the Jackknife. **Annals of Statistics**, Hayward, v. 1, n. 1, p. 1-26, Jan. 1979.

ELLIOTT, J. **Some methods for the statistical analysis of samples of benthic invertebrates**. Davis: Freshwater Biological Association, 1977. 160 p. (Scientific Publication).

ERMENTROUT, G. B.; EDELSTEIN-KESHET, L. Cellular automata approaches to biological modeling. **Journal of Theoretical Biology**, London, v. 160, n. 1, p. 97-133, Feb. 1993.

FABRICIO, T. M. **Diversidade, variação sazonal e importância econômica dos afídeos (Homoptera: Aphidoidea) na estação ecológica de Jataí (Luiz Antônio-SP) e nas áreas agrícolas e de silvicultura do entorno**. 2003. 122 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

FERNANDES, A. M. V. et al. Desenvolvimento do pulgão *aphis gossypii* glover (hemiptera: Aphididae) em três cultivares do algodão herbáceo *Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* hutch. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 3, n. 30, p. 467-470, set. 2001.

FERNANDES, F. S. et al. Within-plant distribution of cotton aphid (hemiptera: Aphididae) in cotton cultivars with colored fibers. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 84, p. 707-719, 2012.

FORTIN, M. J.; DALE, M. **Spatial analysis**. Cambridge: Cambridge University, 2005. 365 p.

GIAROLA, L. T. P.; MARTINS, S. G. F.; COSTA, M. C. P. T. Computer simulation of aphid *gossypii* insects using penna ageing model. **Physica A - Statistical Mechanics and its Applications**, London, v. 368, n. 1, p. 147-154, Jan. 2006.

HE, M. F.; PAN, Q. H.; WANG, Z. R. 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, Apr. 2007.

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

JINGYUAN, X. **Biological control of cotton aphid (*Aphis gossypii* Glover) in cotton (inter) cropping systems in China: a simulation study**. 1997. 183 p. Thesis (Ph.D. in Entomology) - Landbouwniversiteit Wageningen, Wageningen, 1997.

KUNO, E. Sampling and analysis of insect populations. **Annual Review of Entomology**, Palo Alto, v. 36, n. 1, p. 285-304, 1991.

LAW, A.; KELTON, W. **Simulation modeling and analysis**. 3rd ed. Ann Arbor: McGraw-Hill, 2000. 760 p.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical ecology**. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 1998. 853 p.

LIMA, R. R. **Modelagem espaço-temporal para dados de incidência de dados de doenças em plantas**. 2005. 167 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2005.

MARUR, C. J.; RUANO, O. Escala do algodão. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 154, p. 3-4, mar. 2004.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. São Paulo: UNESP, 2010. 568 p.

MENEZES, J. P. **Controle biológico**. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/artigos/artigo.php?id=42>>. Acesso em: 10 dez. 2001.

MONDOR, E. B.; ROSENHEIM, J. A.; ADDICOTT, J. F. Predator-induced transgenerational phenotypic plasticity in the cotton aphid. **Oecologia**, Berlin, v. 142, n. 1, p. 104-108, Jan. 2005.

MONTEIRO, J. E. B. A. et al. Estimação da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 1, p. 15-24, 2005.

MORISITA, M. Measuring of the dispersion of individuals and analysis of the distributional patterns. **Memoirs of the Faculty of Science**, Kyushi, v. 2, p. 215-235, 1959.

NECHET, K. L. **Manejo integrado de doenças de plantas**. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/artigos/artigo.php?id=338>>. Acesso em: 12 dez. 2006.

NEVES, M. F. et al. **A cadeia do algodão brasileiro: safra 2012-2013: desafios e estratégias**. Brasília: Associação Brasileira dos Produtores de Algodão, 2013. 196 p.

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

OLIVEIRA, A.; MARTINS, S.; ZACARIAS, M. Computer simulation of the coffee leaf miner using sexual penna aging model. **Physica A - Statistical Mechanics and its Applications**, London, v. 387, n. 2/3, p. 476-484, Jan. 2008.

OLIVEIRA, A. C. S. de. **Simulação computacional e análise estatística aplicadas ao estudo de diferentes aspectos da dinâmica populacional de pragas de importância econômica: o bicho-mineiro do cafeeiro e o ácaro rajado**. 2010. 138 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PAN, Q.; LI, M.; HE, M. F. The effect of "closed fishing" in china. **International Journal of Modern Physics C**, Singapore, v. 18, n. 3, p. 391-398, Mar. 2007.

PECK, J. R. A ruby in the rubbish: beneficial mutations, deleterious mutations and the evolution of sex. **Genetics Society of America**, Bethesda, n. 137, p. 597-606, 1994.

PEGDEN, C.; SHANNON, R.; SADOWSKI, R. **Introduction to simulation using SIMAN**. New York: McGraw-Hill, 1990. 615 p.

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.

PENNA, T. J. P.; DEOLIVEIRA, S. M.; STAUFFER, D. Mutation accumulation and the catastrophic senescence of the pacific salmon. **Physical Review E**, New York, v. 52, n. 4, p. R3309-R3312, Oct. 1995.

PEREIRA, C. D.; LOMONACO, C. Produção de formas aladas em colônias de *brevicoryne brassicae* (l.) (hemiptera: Aphididae) por indução do parasitóide *diaeretiella rapae* (mcintosh) (hymenoptera: Aphidiidae) e alguns aspectos comportamentais da interação destas espécies. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 1, n. 32, p. 97-102, jan./mar. 2003.

PORTO, S. I.; OLIVEIRA NETO, A. A. de; SOUSA, F. O. B. de. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, sexto levantamento**. Brasília: CONAB, 2013. 66 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna, 2010. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

RATKOWSKI, D. A. **Nonlinear regression modeling: a unified practical approach**. New York: M. Dekker, 1983. 288 p.

REETZ, E. R. **Anuário brasileiro do algodão**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2013. 144 p.

RENSHAW, E. **Modelling biological populations in space and time**. Cambridge: Cambridge University, 1991. 403 p.

RODRIGUES, T. R.; FERNANDES, M. G.; SANTOS, H. R. dos. Distribuição espacial de *aphis gossypii* (glover) (hemiptera, aphididae) e *bemisia tabaci* (gennadius) biótipo b (hemiptera, aleyrodidae) em algodoeiro bt e não-bt. **Revista Brasileira de Entomologia**, São Paulo, v. 1, n. 54, p. 136-143, mar. 2010.

ROSENBERG, M. S. The bearing correlogram: a new method of analyzing directional spatial autocorrelation. **Geographical Analysis**, Columbus, v. 32, n. 3, p. 267-278, July 2000.

SANTOS, R. V. R. dos. **Simulação dos efeitos da pesca seletiva sobre as características de crescimento do surubim *Pseudoplatystoma corruscans* (Spix & Agassiz, 1829) (Pisces: Pimelodidae)**. 2008. 58 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

SCALON, J. D. et al. Spatial and temporal dynamics of coffee-leaf-miner and predatory wasps in organic coffee field in formation. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 4, p. 646-652, abr. 2011.

SCHMEISER, B. Batch size effects in the analysis of simulation output. **Operations Research**, Baltimore, v. 30, n. 3, p. 556-568, May/June 1982.

SEIBEL, F. O novo salto do agronegócio. **Anuário Exame - Agronegócio 2007/2008**, São Paulo, p. 14-21, jun. 2007.

SILVA, A. M. et al. Distribuição espacial de pulgões *aphis gossypii* (Glover, 1877) em plantas de algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 6., 2007, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2007. p. 1-6.

SMIDERLE, O. J. **Manejo integrado de pragas de grãos armazenados: identificação e controle**. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/artigos/artigo.php?id=371>>. Acesso em: 16 jun. 2007.

SOGLIA, M. C. de M.; BUENO, V. H. P.; SAMPAIO, M. V. Desenvolvimento e sobrevivência de *aphis gossypii* glover (hemiptera: Aphididae) em diferentes temperaturas e cultivares comerciais de crisântemo. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, p. 211-216, jun. 2002.

SOGLIA, M. C. de M. et al. Fecundidade e longevidade de *aphis gossypii* Glover, 1877 (hemiptera, aphididae) em diferentes temperaturas e cultivares comerciais de crisântemo (*dendranthema grandiflora* tzvelev). **Revista Brasileira de Entomologia**, São Paulo, v. 1, n. 47, p. 49-54, mar. 2003.

SOKAL, R.; THOMPSON, B. Spatial genetic structure of human populations in japan. **Human Biology**, Detroit, v. 70, n. 1, p. 1-22, Feb. 1998.

SOKAL, R. R.; ODEN, N. L. Spatial autocorrelation in biology. **Biological Journal of the Linnean Society**, London, v. 10, p. 199-228, June 1978.

SOUTHWOOD, R.; HENDERSON, P. **Ecological methods**. New York: Wiley, 2000. 575 p.

SOUZA, A. A. **Estudo dos efeitos de diferentes estratégias de pesca seletiva e da influência dos níveis hidrológicos sobre a população e pesca do surubim via simulação computacional**. 2010. 149 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SOUZA, A. A. **Simulação da dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 e sua interação com o parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880)**. 2007. 93 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

SOUZA, A. de; MARTINS, S.; ZACARIAS, M. Computer simulation applied to the biological control of the insect *Aphis gossypii* for the parasitoid *Lysiphlebus testaceipes*. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 220, n. 6, p. 756-763, Mar. 2009.

TAYLOR, L. R. Assessing and interpreting the spatial distributions of insect populations. **Annual Review of Entomology**, Palo Alto, v. 29, n. 1, p. 321-357, 1984.

UPTON, G.; FINGLETON, B. **Spatial data analysis by example: point pattern and quantitative data**. New York: J. Wiley, 1985. 410 p.

VAINSENER, S. **Algodão**. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 2009. Disponível em: <<http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

VENDRAMIM, J. D.; NAKANO, O. Avaliação de danos de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (homoptera: Aphididae) no algodoeiro cultivar iac-17. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, Jaboticabal, v. 10, n. 1, p. 89-96, 1981.

WATERS, W. E. A quantitative measure of aggregation in insects. **Journal of Economic Entomology**, College Park, v. 52, n. 6, p. 1180-1184, 1959.

WOLFRAM, S. **A new kind of science**. Champaign: Wolfram Media, 2002. 876 p.

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. 90, p. 25-35, 1999.

YOUNG, L.; YOUNG, J. **Ecological Statistics**. New York: Springer, 1998. 565 p.