



ÉRICA FERNANDA DA CRUZ

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE DISPERSÃO NA DINÂMICA
ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *APHIS GOSSYPHII*
GLOVER, 1877 (HEMIPTERA: APHIDIDAE) EM
ALGODOEIRO**

LAVRAS – MG

2018

ÉRICA FERNANDA DA CRUZ

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE DISPERSÃO NA DINÂMICA
ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *APHIS GOSSYPHII* GLOVER, 1877
(HEMIPTERA: APHIDIDAE) EM ALGODOEIRO**

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.

Dra. Solange Gomes Faria Martins
Orientadora

LAVRAS – MG

2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Cruz, Érica Fernanda da.

Efeito dos parâmetros de dispersão na dinâmica espaço-temporal do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) em algodoeiro / Érica Fernanda da Cruz. - 2018.
87 p. : il.

Orientador(a): Solange Gomes Faria Martins.

.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.
Bibliografia.

1. Pulgão. 2. Modelo Penna. 3. Dinâmica Populacional. I.
Martins, Solange Gomes Faria. . II. Título.

ÉRICA FERNANDA DA CRUZ

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE DISPERSÃO NA DINÂMICA
ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *APHIS GOSSYPHII* GLOVER, 1877
(HEMIPTERA: APHIDIDAE) EM ALGODOEIRO**

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 22 de Março de 2018.

Dra. Solange Gomes Faria Martins	UFLA
Dra. Thelma Safadi	UFLA
Dr. Augusto Ramalho de Moraes	UFLA
Dra. Angélica Souza da Mata	UFLA
Dr. Maurício Sérgio Zacarias	EPAMIG

Dra. Solange Gomes Faria Martins
Orientadora

**LAVRAS – MG
2018**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e por tornar possível a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, irmãos, namorado e familiares pelo apoio, amor e força para seguir em frente e realizar meus objetivos.

Agradeço à minha orientadora, professora Dra. Solange Gomes Faria Martins, pela paciência, pelos ensinamentos transmitidos com muita competência e ética nesses 10 anos de orientação (iniciação científica, mestrado e doutorado).

Aos membros da banca examinadora, Dr. Maurício Sérgio Zacarias, Dr. Augusto Moraes de Carvalho, Dra. Thelma Sáfy e Dra. Angélica Sousa da Mata pela disponibilidade e pelas críticas e sugestões que contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos amigos da pós-graduação, pelo apoio e amizade. Em especial à Tamara, Ricardo, Cristian, Carolina, Rafael, Henrique, Kelly, Peter, Laís, Elayne e Allan por todos os momentos de convivência. Foi extremamente enriquecedor conhecer e conviver com cada um de vocês.

Aos meus amigos em geral, sempre presentes, me apoiando, incentivando e sendo meu refúgio.

À minha melhor amiga Jeanny, pelo companheirismo, por dividir momentos bons e de dificuldade com descontração e alegria.

Aos professores e funcionários dos Departamento de Estatística (DES), Departamento de Ciências Exatas (DEX) e Departamento de Física (DFI).

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para execução desta tese, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O uso de ferramentas computacionais e modelos com estrutura etária e espacial se faz cada vez mais presente no estudo teórico da dinâmica de populações. Entender a distribuição espacial de uma espécie é um fator importante, que permite estabelecer o número de amostras para avaliar a densidade populacional e definir estratégias de controle da praga. O pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) é considerado praga-chave de grande importância pelos prejuízos que pode causar a diversas espécies de plantas. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento da dinâmica espaço-temporal do pulgão *A. gossypii* em algodoeiro, considerando-se o ciclo de folhagem da planta, sob alterações nos parâmetros de migração de formas ápteras e aladas. Com este estudo avaliou-se os efeitos destes parâmetros sobre as variáveis dependentes do tempo, a distribuição espacial, e a dinâmica temporal de formação de cluster. As simulações da dinâmica espaço-temporal foram realizadas por meio de programas desenvolvidos em linguagem C, os quais levam em consideração adaptações do Modelo Penna com base em características biológicas do pulgão *A. gossypii*. Com este estudo observou-se transições de fase do sistema, as quais, em alguns casos, seguem leis de potência.

Palavras-chave: Pulgão. Modelo Penna. Dinâmica Populacional. Distribuição Espacial.

ABSTRACT

The use of computational tools and models with age and spatial structure becomes increasingly present in the theoretical study of population dynamics. Understanding the spatial distribution of a species is an important factor, which allows to establish the number of samples to evaluate the population density and determine strategies for pest control. The aphid *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) is considered an important key pest due to the damage it can cause to several plants species. In this way, the objective of this work was to study the behavior of the space-time dynamics of the aphid *A. gossypii* in cotton, considering the foliage cycle of the plant, under changes in the migration parameters of winged and winged forms. Thus, it was evaluated the effects of these parameters on the time-dependent variables, the spatial distribution, and the temporal dynamics of cluster formation. The simulations of space-time dynamics were carried out through programs developed in C language, which take into account adaptations of the Penna Model based on biological characteristics of the aphid it *A. gossypii*. With this study, we observed phase transitions, which, in some cases, follow power laws.

Keywords: Aphid. Penna model. Population dynamics. Spatial distribution

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Produção brasileira de algodão em caroço no período de 1977/78 até 2015/16. Fonte:(CONAB, 2018)	19
Figura 3.2 – População de pulgões ápteros e alados em algodoeiro.Fonte:(ENTOMOLOG, 2017)	20
Figura 3.3 – Ciclo de vida holocíclico (completo) e anolocíclico (incompleto) de pul- gões. Fonte:(MENDES, 2017)	21
Figura 3.4 – Exemplos das regras de vizinhança de Von Neumann (esquerda) e de Moore (direita).	24
Figura 3.5 – Exemplo de formação de clusters e percolação para diversos valores de p . Para $p \geq 0,6$ tem-se a ocorrência do cluster percolante. Fonte: (NETO, 2010)	25
Figura 3.6 – Uma representação esquemática da transição de percolação. Fonte:(BEN- AVRAHAM; HAVLIN, 2000)	26
Figura 4.1 – Gráfico da capacidade de carga da planta em função da idade (dias) nas 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem	34
Figura 4.2 – Exemplo das opções de migração do pulgão na rede de acordo com as regras de vizinhança de Von Neumann	35
Figura 5.1 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos da dinâmica sem ciclo fenológico e sem a produção de formas aladas para diferentes tamanhos de rede ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$). Gráfico correspondente a uma simulação por rede.	39
Figura 5.2 – Variância populacional da dinâmica sem ciclo fenológico e sem a produção de formas aladas ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$). Gráfico correspondente a uma simulação por rede.	39
Figura 5.3 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a), dos tempos mé- dios para ocorrência da máxima variância (b) e densidades médias de sí- tios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (b) em função de diferentes dimensões de rede (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Dinâmica sem ciclo fenológico e sem a presença de indivíduos alados.	41

Figura 5.4 – Evolução temporal da média populacional de pulgões em função do tempo na rede 30×30 , para diferentes probabilidades de migração do áptero (α_1). Gráficos correspondentes a uma única simulação por rede ($\chi = 0,9$).	42
Figura 5.5 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos na rede 30×30 , para diferentes probabilidades de migração do áptero. ($\chi = 0,1$). Gráficos correspondentes a uma única simulação por rede.	43
Figura 5.6 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a), dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) e densidades médias de sítios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (b) em função da probabilidade de dispersão do áptero (curva simulada e ajuste), com $\chi = 0,9$ (rede 30×30). Dinâmica sem ciclo fenológico e sem a presença de indivíduos alados.	44
Figura 5.7 – Densidade do cluster percolante na rede 30×30 em função da densidade de sítios ativos para diferentes valores de χ e $\alpha_1 = 0,1$. Imagens correspondentes a uma única simulação por rede.	45
Figura 5.8 – Evolução temporal da densidade de sítios ativos na rede 30×30 para diferentes valores de χ e $\alpha_1 = 0,1$. Curvas correspondentes a uma única simulação por rede	45
Figura 5.9 – Tempo médio para ocorrência de percolação em função de χ na rede 30×30 com $\alpha_1 = 0,1$ (curva simulada e ajuste). Dinâmica sem ciclo e sem a presença de alados.	46
Figura 5.10 – Distribuição espacial de sítios ativos na rede 30×30 em momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do áptero $\alpha_1 = 0,1$ e $\chi = 0,1$. Imagens correspondentes a uma única simulação por rede.	47
Figura 5.11 – Distribuição espacial dos sítios ativos na rede 30×30 em momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do áptero $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$. Imagens correspondentes a uma única simulação por rede.	48
Figura 5.12 – Distribuição espacial dos sítios ativos na 30×30 em momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do áptero $\alpha_1 = 0,9$ e $\chi = 0,1$. Imagens correspondentes a uma única simulação por rede.	48

Figura 5.13 – Evolução temporal da distribuição espacial do pulgão com população inicial localizada na linha 24 e coluna 22 da rede 30×30 ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$).	51
Figura 5.14 – Evolução temporal da distribuição espacial do pulgão com população inicial localizada na linha 5 e coluna 11 da rede 30×30 ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$).	52
Figura 5.15 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos da dinâmica sem ciclo fenológico e com produção de formas aladas ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$) em diferentes tamanhos de rede. Curvas correspondentes a uma única simulação por rede.	53
Figura 5.16 – Variância em função do tempo sem ciclo fenológico e com produção de formas aladas ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$) em diferentes tamanhos de rede. Curvas correspondentes a uma única simulação por rede.	54
Figura 5.17 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a) e dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) em função das diferentes dimensões de rede (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$ (rede 30×30). Dinâmica sem ciclo fenológico e com a presença de indivíduos alados.	55
Figura 5.18 – Densidade média de sítios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (círculo) com respectivo intervalo a 95% de confiança (barras) para diferentes dimensões de rede ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$). Dinâmica sem ciclo e com alados.	55
Figura 5.19 – Evolução temporal da média populacional de pulgões em função do tempo na rede 30×30 , para diferentes probabilidades de migração do alado ($\alpha_1 = 0,1$ e $\chi = 0,9$). Gráficos correspondentes a uma única simulação por rede.	56
Figura 5.20 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos variando a probabilidade de migração do alado (α_2) ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).	57
Figura 5.21 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a), dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) e densidades médias de sítios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (c) em função da probabilidade de migrar do alado (α_2) (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Dinâmica sem ciclo fenológico e com a presença de indivíduos alados.	58

Figura 5.22 – Número de sítios ativos em função do tempo variando a probabilidade de migração do alado (α_2) ($\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$).	59
Figura 5.23 – Tamanho do maior cluster em função do tempo variando a probabilidade de migração do alado (Rede 30×30 , α_2) ($\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$). Curvas correspondentes a uma única simulação para a rede.	59
Figura 5.24 – Número de clusters em função do tempo variando a probabilidade de migração do alado (α_2) ($\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$).	60
Figura 5.25 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0.1$ e $\chi = 0,9$	62
Figura 5.26 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0.5$ e $\chi = 0,9$	62
Figura 5.27 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0.9$ e $\chi = 0,9$	63
Figura 5.28 – Evolução temporal da distribuição espacial do pulgão com população inicial localizada na linha 24 e coluna 22 da rede. ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$).	65
Figura 5.29 – Evolução temporal da distribuição espacial do pulgão com população inicial localizada na linha 5 e coluna 11 da rede. ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$).	66
Figura 5.30 – Média populacional de pulgões durante o ciclo fenológico do algodoeiro na rede 30×30 sem a presença de alados, para diferentes valores de α_1 e $\chi = 0,9$. Curvas referente a uma única simulação.	67
Figura 5.31 – Variância populacional no ciclo fenológico do algodoeiro na rede 30×30 sem a presença de alados, para diferentes valores de α_1 e $\chi = 0,9$ Curvas referentes a uma única simulação.	68
Figura 5.32 – Distribuição espacial do pulgão, na rede 30×30 , em diferentes idades do algodoeiro, na dinâmica com ciclo fenológico e sem alados ($\alpha_1 = 1,0$ e $\chi = 0,9$).	68
Figura 5.33 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a) e dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) em função das diferentes dimensões de rede (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$ (rede 30×30). Dinâmica com ciclo fenológico e com a presença de indivíduos alados.	69

Figura 5.34 – Densidade média de sítios ativos nas idades correspondentes à ocorrência de percolação (círculo) com respectivo intervalo a 95% de confiança (barras) para diferentes tamanhos de rede. Dinâmica com ciclo e com a presença de alados ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$	70
Figura 5.35 – Média populacional correspondentes às idades do algodoeiro no ciclo fenológico na rede 30×30 com a presença de alados ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).	70
Figura 5.36 – Variância populacional correspondente às idades do algodoeiro no ciclo fenológico na rede 30×30 com a presença de alados ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).	71
Figura 5.37 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a), dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) e densidades médias de sítios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (c) em função da probabilidade de migrar do alado (α_2) (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Dinâmica sem ciclo fenológico e com a presença de indivíduos alados.	72
Figura 5.38 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos variando a probabilidade de migração do alado na dinâmica com ciclo fenológico do algodoeiro ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).	73
Figura 5.39 – Número de sítios ativos em função da idade do algodoeiro variando a probabilidade de migração do alado para a dinâmica com ciclo fenológico, rede 30×30 ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).	74
Figura 5.40 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0,2$	74
Figura 5.41 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0,5$	75
Figura 5.42 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0,9$	75
Figura 5.43 – Distribuição espacial do pulgão na rede 30×30 em diferentes idades do algodoeiro com população inicial localizada na linha 24 e coluna 22 da rede. Dinâmica com ciclo fenológico e com alados. ($\alpha_1 = 0,1$), $\alpha_2 = 0,5$	77
Figura 5.44 – Distribuição espacial do pulgão na rede 30×30 em diferentes idades do algodoeiro com população inicial localizada na linha 5 e coluna 11 da rede. Dinâmica com ciclo fenológico e com alados. ($\alpha_1 = 0,1$), $\alpha_2 = 0,5$	77

Figura 5.45 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos na rede 80×80 , com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,4$ e $\chi = 0,9$ (curva simulada e ajuste). Dinâmica sem ciclo fenológico e formação de alados. Curva correspondente a uma única simulação.	79
Figura 5.46 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos na rede 90×90 , com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,4$ e $\chi = 0,9$ (curva simulada e ajuste). Dinâmica com ciclo fenológico e formação de alados. Curva correspondente a uma única simulação.	80
Figura 5.47 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos na rede 100×100 , com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,4$ e $\chi = 0,9$ (curva simulada e ajuste). Dinâmica sem ciclo fenológico e formação de alados. Curva correspondente a uma única simulação.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Duração do estágio ninfal (α), período pré-reprodutivo (β), longevidade (L), em dias, fecundidade total por fêmea (B) e fecundidade diária por fêmea (b) do <i>A. gossypii</i> , no algodoeiro em diferentes temperaturas (médias \pm d-semi-amplitude do intervalo de confiança 95 %). Fonte:(XIA; WERF; RABBINGE, 1999)	22
Tabela 3.2 – Taxa intrínseca de crescimento (r_m) e duração em dias de uma geração (τ) de <i>A. gossypii</i> , no algodoeiro em diferentes temperaturas. Fonte:(XIA; WERF; RABBINGE, 1999)	22
Tabela 3.3 – Expoentes críticos de percolação para malhas de dimensão $d = 2, 3$	26
Tabela 5.1 – Intervalo a 95% de confiança dos tempos médios para ocorrência da máxima variância e da percolação e valores médios das densidades no momento da percolação para diferentes dimensões de rede ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$). Dinâmica sem ciclo fenológico e sem a presença de indivíduos alados.	40
Tabela 5.2 – Etapas temporais em que ocorreram a máxima variância e a percolação, e os respectivos valores das densidades de sítios ativos no momento da percolação na rede 30×30 , para diferentes probabilidades de migração do áptero ($\chi = 0,1$).	43
Tabela 5.3 – Etapas temporais em que ocorreram a percolação e os respectivos valores das densidades de sítios ativos para diferentes valores de χ , com $\alpha_1 = 0,1$ na rede 30×30 (Máxima variância ocorreu em 113).	46
Tabela 5.4 – Análise de variância contendo as fontes de variação (FV), números de graus de liberdade (GL), valores de quadrados médios e respectivas significâncias do teste F (rede 30×30 , $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$).	49
Tabela 5.5 – Estimativas e respectivos valor-p dos teste de normalidade (Shapiro -Wilk), homogeneidade de variância (Bartlett) e independência (Durbin-Watson) para Percolação, Tempo que ocorreu a variância máxima, e Densidade de sítios ativos no momento da percolação (rede 30×30 , $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$).	49
Tabela 5.6 – Valores médios do tempo de percolação, do tempo em que ocorreu a máxima variância e da densidade de sítios ativos no momento da percolação nas diferentes localizações da população inicial de pulgões, para rede 30×30 , $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$	50

Tabela 5.7 – Etapas temporais que ocorreram a máxima variância, percolação e valores das densidades no momento da percolação para diferentes probabilidades de migração do alado ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).	57
Tabela 5.8 – Número médio de sítios ativos, tamanho médio do maior cluster e número máximo de clusters para diferentes probabilidades de migração do alado nas últimas 125 etapas temporais (Rede 30×30 , $\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$).	61
Tabela 5.9 – Análise de variância contendo as fontes de variação (FV), números de graus de liberdade (GL), valores de quadrados médios e respectivas significâncias do teste F.	63
Tabela 5.10 – Estimativas e respectivos valor-p dos teste de normalidade (Shapiro -Wilk), homogeneidade de variância (Bartlett) e independência (Durbin-Watson) para Percolação, Tempo que ocorreu a variância máxima, e Densidade que ocorreu a percolação.	64
Tabela 5.11 – Idades do algodoeiro correspondentes aos momentos de ocorrência da máxima variância e da percolação, e valores das densidades no momento da percolação para diferentes probabilidades de migração do alado considerando o ciclo de folhagem do algodoeiro ($\alpha_1 = 0,1$ e $\chi = 0,9$).	71
Tabela 5.12 – Análise de variância contendo as fontes de variação (FV), números de graus de liberdade (GL), valores de quadrados médios e respectivas significâncias do teste F.	76
Tabela 5.13 – Estimativas e respectivos valor-p dos teste de normalidade (Shapiro -Wilk), homogeneidade de variância (Bartlett) e independência (Durbin-Watson) para Percolação, Máxima variância, e Densidade.	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Importância Econômica do Algodão	18
3.2	Pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover	19
3.2.1	Considerações gerais e importância econômica	19
3.2.2	Aspectos biológicos e comportamentais	20
3.3	Modelo penna	22
3.4	Autômatos celulares	23
3.5	Teoria da Percolação	24
3.5.1	Transição de fase e a percolação	25
3.6	Análise de Variância	27
3.7	O teste F	27
3.8	Teste de Tukey	28
3.9	Teste de Shapiro Wilk	28
3.10	Teste de Bartlett	29
3.11	Teste de Durbin-Watson	29
4	METODOLOGIA	31
4.1	Modelo Penna adaptado à biologia do pulgão <i>A. gossypii</i> e do algodoeiro <i>Gossypium hirsutum</i>.	32
4.1.1	Relativas à reprodução:	32
4.1.2	Relativas à competição entre indivíduos:	32
4.1.3	Relativas à biologia do pulgão e do algodoeiro	33
4.1.4	Relativas à migração de formas áptera e alada:	35
4.2	Análise da Dinâmica Espacial	35
4.2.1	Variância Espacial	35
4.2.2	Formação de cluster	36
4.3	Localização espacial inicial dos pulgões.	36
4.4	Cenários considerados	36

5	RESULTADOS	38
5.1	Dinâmica sem ciclo fenológico do algodoeiro	38
5.1.1	Sem formação de alados	38
5.1.1.1	População inicial localizada num sítio central da rede:	38
5.1.1.2	Influência da localização espacial inicial dos pulgões nas variáveis: densidade de sítios ativos no momento da percolação, momentos de ocorrência da percolação e da máxima variância	49
5.1.2	Com formação de alados	53
5.1.2.1	População inicial localizada num sítio central da rede:	53
5.1.2.2	Influência da localização espacial inicial dos pulgões nas variáveis: tempo de percolação, máxima variância e Densidade de percolação	63
5.2	Dinâmica com ciclo fenológico do algodoeiro	66
5.2.1	Sem formação de alados	67
5.2.1.1	População localizada num sítio central da rede	67
5.2.2	Com formação de alados	69
5.2.2.1	População localizada num sítio central da rede	69
5.2.2.2	Influência da localização espacial inicial dos pulgões nas variáveis: Percolação, máxima variância e densidade crítica de percolação	76
5.3	Transições de fase e leis de potência	78
6	CONCLUSÕES	82
	REFERÊNCIAS	84

INTRODUÇÃO

O pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) é uma praga cosmopolita, considerada de grande importância pelos prejuízos que pode ocasionar em diversas culturas, em especial o algodoeiro, podendo ser presenciada logo após a germinação das plantas. É considerada praga-chave por ser responsável por severos danos diretos e indiretos causados às plantas hospedeiras. Esses insetos-pragas são responsáveis pela transmissão de um grande número de viroses às plantas, além de atraírem formigas e favorecerem, também, a formação de fumagina, que reduz a capacidade fotossintética da planta, contribuindo para seu enfraquecimento (GALLO et al., 2002; SANTOS, 2007).

O interesse comercial em desenvolver um controle satisfatório para o pulgão, mantendo-os sob níveis populacionais aceitáveis, em que não causem danos econômicos, impulsiona os estudos sobre o comportamento de sua dinâmica populacional. O uso de ferramentas computacionais e modelos com estrutura etária e espacial se faz cada vez mais presente no estudo teórico da dinâmica de populações. Em particular, o Modelo Penna (PENNA, 1995) é extremamente apropriado para este intuito, um modelo ideal para estudar populações com estrutura etária e de fácil implementação em computadores. Cada indivíduo é representado por uma tira de bits, em que são realizadas operações lógicas, permitindo simular grandes populações com rapidez.

No estudo de dinâmica de populações, modelagens no âmbito espacial podem trazer muitas informações importantes sobre o sistema, permitindo verificar processos de dispersão, bem como fatores que podem contribuir para a formação de padrões espaciais (LIEBHOLD; KOENIG; BJØRNSTAD, 2004). Em particular, o estudo da dispersão de insetos ajuda a desenvolver sistemas de previsão para alertar agricultores e silvicultores para invasões de pragas que podem causar problemas econômicos consideráveis na produção de culturas (BULLOCK; KENWARD; HAILS, 2002). Na modelagem espacial, destaca-se o uso de autômatos celulares, que permitem reproduzir vários tipos de fenômenos espaciais com base em regras de transição simples e são flexíveis na incorporação de diferenças individuais e interações locais (PAUWELS et al., 2013).

Utilizando o Modelo Penna com as adaptações propostas por Amaral (2014), objetivou-se nesse trabalho estudar o comportamento da dinâmica espaço-temporal do pulgão *A. gossypii*, em algodoeiro *Gossypium hirsutum* L., representada em um autômato celular, sob diferentes probabilidades de dispersão de suas formas ápteras e aladas. Para melhor compreender a relação entre aspectos temporais e espaciais, avaliou-se os efeitos dos parâmetros relativos à capacidade

de dispersão de *A. gossypii* sobre as variáveis dependentes do tempo, a distribuição espacial do pulgão e a dinâmica temporal de formação de cluster (aglomerado). Utilizou-se para tal, o conceito de percolação de sítios, buscando identificar, caso ocorra, o momento da transição de fase do sistema e suas características.

OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Pretende-se neste trabalho analisar os efeitos de parâmetros relativos à capacidade de migração de formas ápteras e aladas do pulgão *A. gossypii* sobre a dinâmica espaço-temporal desta espécie em algodoeiro, assim como verificar a existência e as características de transições de fase do sistema, levando em consideração o ciclo fenológico da planta e as adaptações do modelo Penna propostas por Amaral (2014) .

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a evolução temporal da média e da variância populacional mediante mudanças nos valores de parâmetros relativos à migração de pulgões (ápteros e alados) na dinâmica com ciclo de folhagem.
- Identificar semelhanças e diferenças entre as dinâmicas sem e com ciclo de folhagem do algodoeiro.
- Identificar, caso ocorra, o momento da transição de fase do sistema e suas características.
- Identificar, caso existam, relações entre os momentos de ocorrência da percolação, da máxima variância e do limiar crítico de transição de fase do sistema nas dinâmicas com e sem ciclo de folhagem do algodoeiro.

REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Importância Econômica do Algodão

O algodão é a fibra natural mais produzida no mundo e desempenha um papel importante em nossas vidas, pois oferece utilidade em diversos produtos. É produzido atualmente em mais de 60 países, nos cinco continentes, em uma média anual de 35 milhões de hectares, movimentando anualmente cerca de 12 bilhões de dólares no comércio mundial (ABRAPA, 2017).

Na agricultura brasileira é um dos mais antigos produtos em exploração com extrema importância socioeconômica, pois garante um lugar privilegiado no cenário internacional. Nos últimos anos o Brasil tem se mantido entre os cinco maiores produtores mundiais, ao lado de China, Índia, EUA e Paquistão. Estando também entre os maiores exportadores e consumidores mundiais (ABRAPA, 2017).

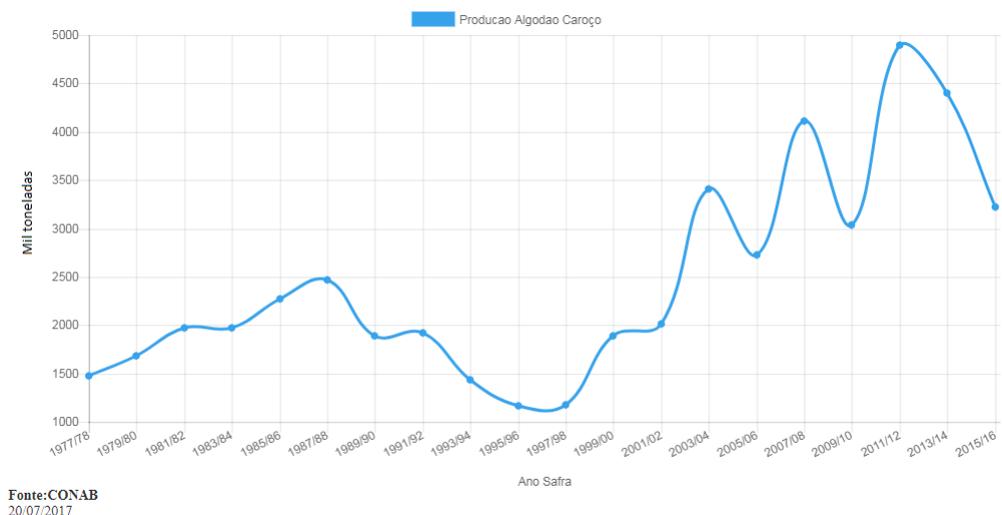
O sexto levantamento da safra 2017/18 brasileira de algodão aponta para uma área plantada de 1.143,4 mil hectares. A região Centro-Oeste é a maior produtora nacional, sendo o estado do Mato Grosso o maior produtor responsável por 746,5 mil hectares cultivados no atual ciclo (CONAB, 2018).

O volume total da produção de algodão tem apresentado flutuações históricas, com um declínio acentuado no fim da década de 1980 (Figura 3.1). De acordo com NEVES e PINTO (2012), neste período, as plantações do nordeste foram fortemente castigadas pela praga do bicudo, além de outros fatores econômicos que contribuíram para que a cotonicultura no Brasil entrasse em uma forte crise. No fim da década de 1990, com a estabilização da economia nacional, apoio governamental e o desenvolvimento de cultivares adaptadas ao cerrado, o setor retomou o caminho do crescimento (NEVES; PINTO, 2012).

Diversos fatores tem influência direta no crescimento e desenvolvimento do algodoeiro, tais como, temperatura, precipitação, fertilidade do solo, incidência de pragas e doenças. Os lucros e prejuízos na produção dependem da luta dos cotonicultores contra as pragas que constituem um dos fatores limitantes para exploração e produção do algodão (ALMEIDA; SILVA; RAMALHO, 2008).

Dentre as primeiras pragas que ocorrem no algodoeiro está o pulgão *Aphis gossypii* Glover 1977 (Hemiptera: Aphididae), que segundo Gallo et al. (2002) pode ocorrer logo após a germinação das plantas e quando não controlados reduzem a produção em até 44%.

Figura 3.1 – Produção brasileira de algodão em caroço no período de 1977/78 até 2015/16. Fonte:(CONAB, 2018)



3.2 Pulgão *Aphis gossypii* Glover

3.2.1 Considerações gerais e importância econômica

Dentre as diversas pragas que atacam o algodoeiro destaca-se o pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae), que pode ocorrer logo após a germinação das plantas. Quando não controlados chegam a reduzir a produção em até 44%, sendo considerados de grande importância pelos prejuízos que podem ocasionar (GALLO et al., 2002). É uma espécie cosmopolita que além do algodoeiro, hospedam-se em outras diversas espécies, tais como, cucurbitáceas, café, cacau, berinjela, citros, pimentão, batata, cebola, soja, alface e muitas espécies de plantas ornamentais (BLACKMAN; EASTOP et al., 2000).

Os pulgões são insetos sugadores, que possuem aparelho bucal formado por dois pares de estiletos, que são adaptados para perfurar os tecidos e sugar a seiva do floema de suas plantas hospedeiras, extraindo os nutrientes necessários (PONSEN, 1977; COSTA; LUZ, 1998). Neste processo de sucção da seiva, os pulgões ocasionam um retorcimento das folhas e deformação dos brotos, prejudicando o desenvolvimento da planta. Além disso, a excreção do excedente da seiva que se deposita sobre as folhas em forma de solução açucarada, permite o desenvolvimento de fumagina, que reduz a capacidade de fotossíntese da planta (SANTOS, 2007), essa excreção atrai também muitas formigas, que em troca do alimento protegem os pulgões de seus inimigos naturais (GALLO et al., 2002). No entanto, as maiores perdas ocasionadas por esses insetos, está relacionada com a transmissão de doenças virais, No Brasil, os vírus mais comuns causadores de consideráveis perdas econômicas na cultura do algodoeiro são: Mosaico Comum,

Mosaico Tardio, Vermelhão ou Antocianose e o Mosaico-das-nervuras ou “azulão”(BARBOSA; FRANÇA, 1982; DEGRANDE, 1998; ARAÚJO; CIA, 1999; GALLO et al., 2002).

3.2.2 Aspectos biológicos e comportamentais

O pulgão, *A. gossypii* pertence à Ordem Hemiptera e família Aphididae. São insetos de tamanho pequeno, coloração variável do amarelo-claro ao verde-escuro. Medem aproximadamente 1,3 mm de comprimento com sífúnculos escuros na extremidade do abdômen (figura 3.2). Podem ocorrer nas formas ápteras (sem asas) e aladas (com asas) (GALLO et al., 2002; SARAN; SANTOS, 2007). No início da formação das colônias, todos os indivíduos são ápteros, mas, à medida que a população aumenta, havendo excesso de competição intraespecífica e a diminuição da qualidade do alimento, os pulgões liberam um feromônio que induz a formação de indivíduos alados que ajudam na dispersão da espécie, facilitando a colonização de outras plantas. Indivíduos ápteros também estão envolvidos em dispersão em pequena escala, pois podem caminhar de uma folha para outra ou de uma planta para uma planta vizinha (HODGSON, 1991).

Os pulgões são capazes de voar por longos períodos, além disso, podem ser levados facilmente por correntes de ar, conseguindo assim, migrar a grandes distâncias (DIXON, 1977; GALLO et al., 2002; BUENO, 2005). No entanto, de acordo com Loxdale et al. (1993), o movimento local tem um impacto muito maior na distribuição populacional e genotípica do que os movimentos de longa distância, que podem não ser vantajosos para os pulgões. Assim, o movimento local pode ser mais significativo embora, em determinadas circunstâncias, os pulgões percorram longas distâncias. Mas tanto para movimentos de curta ou longa distância, o sucesso de colonização, dependerá em grande parte da abundância da planta hospedeira.

Figura 3.2 – População de pulgões ápteros e alados em algodoeiro.Fonte:(ENTOMOLOG, 2017)



A. gossypii possui uma enorme capacidade de reprodução, uma fêmea pode dar origem a cerca de 100 ninfas em 10 dias (SARAN; SANTOS, 2007). Em lugares que possuem clima tropical, como no Brasil, a reprodução ocorre de forma assexuada, e se processa exclusivamente por partenogênese telítoca, ou seja, as fêmeas procriam sem terem sido fecundadas, tanto as formas aladas quanto as ápteras são constituídas apenas de fêmeas que dão origem às ninfas (DIXON, 1977; BLACKMAN, 1987; GALLO et al., 2002). As descendentes são geneticamente iguais às mães, conhecidas como clones, com ciclo de vida anolocíclico (incompleto). Em ambientes de clima temperado a reprodução pode também ser sexuada, em que os indivíduos possuem ciclo de vida holocíclico (completo)(figura 3.3)(ILHARCO, 2002).

A temperatura é um fator que afeta diretamente o desenvolvimento da espécie, bem como a qualidade do alimento. De acordo com Xia, Werf e Rabbinge (1999) cada inseto possui uma demanda térmica diferente, sendo incapazes de manter a temperatura corporal constante. Em geral, mudanças na temperatura resultam em alterações no tempo médio da geração e na longevidade dos afídeos, que decrescem em condições térmicas mais baixas. A taxa intrínseca de crescimento e a fecundidade média das fêmeas são mais elevadas a 25°C (tabelas 3.1 e 3.2) (DIXON, 1977; XIA; WERF; RABBINGE, 1999).

Figura 3.3 – Ciclo de vida holocíclico (completo) e anolocíclico (incompleto) de pulgões.
Fonte:(MENDES, 2017)

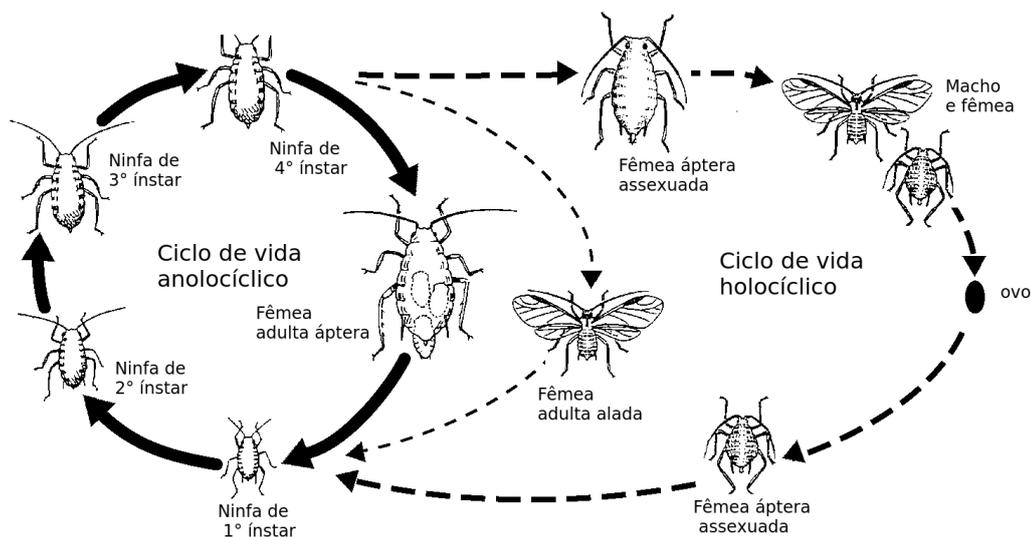


Tabela 3.1 – Duração do estágio ninfal (α), período pré-reprodutivo (β), longevidade (L), em dias, fecundidade total por fêmea (B) e fecundidade diária por fêmea (b) do *A. gossypii*, no algodoeiro em diferentes temperaturas (médias \pm d-semi-amplitude do intervalo de confiança 95 %). Fonte:(XIA; WERF; RABBINGE, 1999)

$\theta(^{\circ}\text{C})$	α	β	L	B	b
10	23.0 ± 1.76	3.2 ± 0.55	53.4 ± 7.06	6.1 ± 1.69	0.4 ± 0.27
15	13.0 ± 1.0	2.4 ± 0.47	38.4 ± 4.9	21.4 ± 2.5	1.2 ± 0.2
20	8.5 ± 0.39	1.0 ± 0.2	24.2 ± 2.94	24.6 ± 2.0	2.2 ± 0.24
25	5.0 ± 0.2	0.6 ± 0.08	15.8 ± 1.96	28.3 ± 2.5	3.1 ± 0.25
30	4.6 ± 0.18	0.6 ± 0.12	12.0 ± 1.37	14.6 ± 1.4	2.7 ± 0.39
35	5.4 ± 0.39	0.9 ± 0.2	10.2 ± 0.78	4.0 ± 0.35	1.7 ± 0.41

Tabela 3.2 – Taxa intrínseca de crescimento (r_m) e duração em dias de uma geração (τ) de *A. gossypii*, no algodoeiro em diferentes temperaturas. Fonte:(XIA; WERF; RABBINGE, 1999)

$\theta(^{\circ}\text{C})$	r_m	τ
10	0.03	28.9
15	0.14	18.5
20	0.25	11.4
25	0.39	8.3
30	0.36	6.4
35	0.09	7.6

3.3 Modelo penna

O Modelo Penna (PENNA, 1995), conhecido também por modelo "Bit-String" foi proposto em 1995 por T.J.P. Penna, consiste em um modelo para o estudo da evolução de populações com estrutura etária que reproduz fenômenos observados em populações reais. Baseia-se na teoria da seleção natural de Darwin para a evolução das espécies e na teoria do acúmulo de mutações deletérias para explicar o envelhecimento biológico através de variáveis booleanas e técnicas de manipulação de bits.

Na versão assexuada, o "genoma" de cada indivíduo de uma população é representado por uma palavra computacional, isto é, uma tira de bits. Cada bit valendo zero ou um, corresponde a uma idade do indivíduo (hora, dia, mês, ano, etc). Bit setado em 1 representa uma mutação deletéria naquela idade, assim o indivíduo sofrerá o efeito da mutação deletéria naquela e nas demais idades de sua vida, visto que o efeito de uma mutação deletéria é cumulativo. Já bit setado em zero indica que não há presença de mutação deletéria. O indivíduo permanece vivo enquanto o número de mutações deletérias na sua idade atual for menor que um limiar T .

A reprodução é representada da seguinte forma: Quando o indivíduo (todos considerados fêmeas) atinge a idade de maturidade sexual R , ele poderá gerar b descendentes em cada instante t . Cada descendente terá inicialmente a mesma tira de bits da mãe, e então, são escolhidos M bits, que representarão novas mutações deletérias, ou seja, se o bit sorteado para receber mutações deletérias for zero, passa a ser um; se o bit já estava setado em um, permanece setado em um.

A competição por alimento e espaço entre os indivíduos está inserida no modelo através do fator de mortalidade chamado fator de Verhulst, que evita a explosão populacional. A cada etapa temporal cada indivíduo pode morrer com probabilidade $N_{k,l}(t)/N_{max,k,l}$, em que $N_{max,k,l}$ representa a capacidade de carga máxima do ambiente (sítio) e $N_{k,l}(t)$ representa a população num dado instante t , sendo k a linha e l a coluna da rede em que o sítio se encontra.

Caso o indivíduo sobreviva aos testes de morte por fatores genéticos e competição, sua idade é incrementada de uma unidade. Depois de todos os indivíduos serem testados para todas etapas descritas no modelo, conclui-se uma etapa temporal.

3.4 Autômatos celulares

No fim da década de 40, o matemático Von Neumann propôs pela primeira vez a modelagem da auto-reprodução por meio do uso de Autômatos celulares. Desde então, modelos com estrutura espacial baseados em autômatos celulares vem sendo utilizados em diversas áreas, devido à facilidade de implementação, habilidade em mimetizar formas e capacidade de serem readaptados para reproduzir vários tipos de fenômenos espaciais (FILHO et al., 2007).

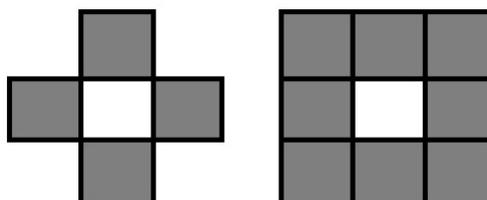
Autômatos celulares permitem a modelagem transparente de sistemas complexos com base em regras de transição simples e são flexíveis na incorporação de diferenças individuais e interações locais (PAUWELS et al., 2013).

De acordo com Melotti (2009) o Automato Celular (AC) é composto por um grupo de células (vetores ou matrizes) em que cada célula é caracterizada por um certo estado. Os estados (valores) das células são alterados conforme um conjunto de regras de transição, que depende da vizinhança (às vezes da própria célula também), ou seja, das células em torno da célula que será atualizada. Assim, o AC é composto de três partes: uma estrutura ("lattice"(tipo da rede de contato), ou seja, a geometria (formato) da célula), uma vizinhança (conjunto de sítios que são consideradas vizinhas e que podem afetar o estado atual da sítio) e uma regra de transição

local (podem ser determinísticas ou probabilísticas, regras lógicas ou de soma) (PEIXOTO; BARROS, 2004; MELOTTI, 2009).

Na Figura 3.4 temos como exemplo os dois critérios de vizinhança mais usados para uma rede bidimensional que são o de Von Neumann, em que são consideradas como vizinhas as células que compartilham as arestas; e a de Moore, em que são acrescentados os vizinhos que têm vértices em comum com a célula que está sendo considerada.

Figura 3.4 – Exemplos das regras de vizinhança de Von Neumann (esquerda) e de Moore (direita).



3.5 Teoria da Percolação

Broadbent e Hammersley (1957) perguntando-se: Ao jogar uma pedra porosa a um balde de água, qual a probabilidade do centro dessa pedra estar molhado? Formularam um modelo estocástico simples que deu origem a *Teoria da percolação*, um ramo da teoria das probabilidades dos meios aleatórios unida a conceitos geométricos e probabilísticos.

A teoria da percolação pode ser entendida como as condições em que os clusters estão totalmente conectados em uma rede aleatória, ou seja, lugares em que o sorteio da ocupação de um sítio é feita de forma aleatória e independente da ocupação dos demais sítios vizinhos (STAUFFER; AHARONY, 2014).

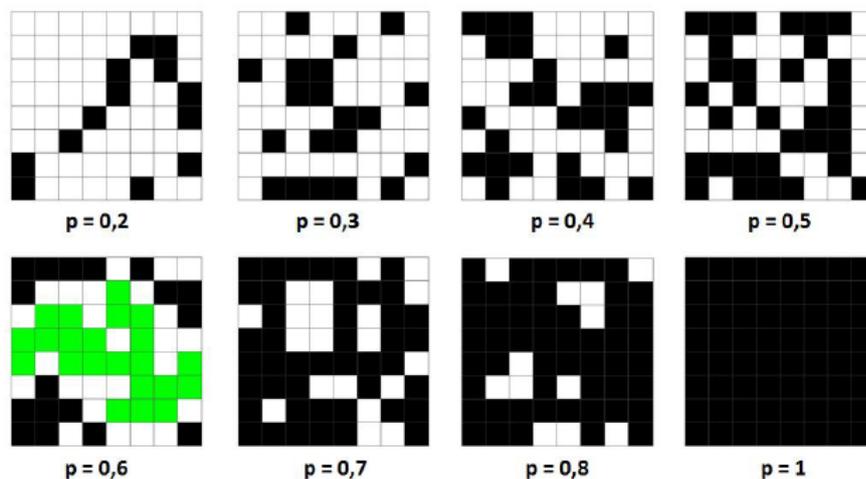
Essa teoria vem sendo usada em diversos estudos, sua aplicação é um campo de rápido crescimento em áreas de ciência e tecnologia muito diferentes, por exemplo propagação de epidemias (ALLARD et al., 2009), tecnologia farmacêutica (LEUENBERGER, 1999), imagens de microtomografias (LIU JIE E REGENAUER-LIEB, 2011), dentre outras.

Identificar as relações entre os momentos em que ocorre a percolação pode ser muito importante, pois segundo With (2002) a modelagem de dispersão de organismos (modelos neutros e dicotômicos) tem como base a teoria da percolação. Estes modelos têm como finalidade quantificar o limiar crítico a partir do qual o habitat transita, sob a perspectiva de determinada espécie, de um estado conexo para um estado desconexo.

As ideias básicas da teoria da percolação podem ser vistas da seguinte maneira: Considere Z^2 o conjunto de coordenadas inteiras no plano, formando uma grade quadrada de tamanho finito, em que cada quadrado dessa grade chamado de sítio e simbolizado por x , pode assumir dois estados: vazio ou ocupado. Cada sítio pode estar ocupado aleatoriamente com probabilidade p , ou vazia com uma probabilidade $(1 - p)$. Dois sítios são vizinhos se possuem um lado em comum na estrutura e o conjunto de sítios vizinhos ocupados é chamado de aglomerado (LEUENBERGER et al., 1989; STAUFFER; AHARONY, 2014).

Quando a probabilidade de ocupação é baixa, os sítios ficam distribuídos isoladamente ou formam apenas pequenos aglomerados e para um determinado valor da probabilidade de ocupação p , surge um aglomerado dominante sobre os outros conectando os dois lados opostos da grade, quando isso ocorre dá-se o nome de *percolação* e ao valor de p para qual a ocorrência desse aglomerado percolante se dá pela primeira vez, chama-se de p_c de probabilidade crítica ou *limiar de percolação* (Figura 3.5) (STAUFFER; AHARONY, 2014).

Figura 3.5 – Exemplo de formação de clusters e percolação para diversos valores de p . Para $p \geq 0,6$ tem-se a ocorrência do cluster percolante. Fonte: (NETO, 2010)



3.5.1 Transição de fase e a percolação

Segundo Ben-Avraham e Havlin (2000), define-se como *Probabilidade de percolação* a probabilidade de um dado sítio da rede pertencer a um aglomerado de tamanho infinito. Quando p é pequeno predominam-se clusters pequenos com poucas conexões, à medida que p aumenta, o tamanho dos clusters também aumenta, até que para um certo valor de p , surge um cluster que abrange a rede de borda a borda. Se a rede é infinita, define-se como

$$\theta(p) \equiv P_p(|C| = \infty), \quad (3.1)$$

como a probabilidade, em função dos valores de p , de que o tamanho do aglomerado C seja $n = \infty$. Essa probabilidade sofre uma transição de fase: é zero para $p < p_c$, e aumenta continuamente quando p é maior do que o limite crítico p_c e segue uma lei de potência do tipo:

$$\theta(p) \approx (p - p_c)^\beta, \quad (3.2)$$

em que β é o expoente crítico associado ao parâmetro de ordem $\theta(p)$, seu comportamento pode ser observado na Figura 3.6.

À medida que o valor do parâmetro p se aproxima do ponto crítico, outras relações podem ser encontradas na forma de lei de potência, tais como comprimento de correlação (ξ), tamanho médio de clusters finitos ($\chi(p)$), entre outros, cujos expoentes são chamados expoentes críticos de percolação. Seus valores são independentes da estrutura da malha, mas apresenta valores distintos para diferentes dimensões (d) (Tabela 3.3)(STAUFFER; AHARONY, 2014; SAHINI; SAHIMI, 2014).

Figura 3.6 – Uma representação esquemática da transição de percolação. Fonte:(BEN-AVRAHAM; HAVLIN, 2000)

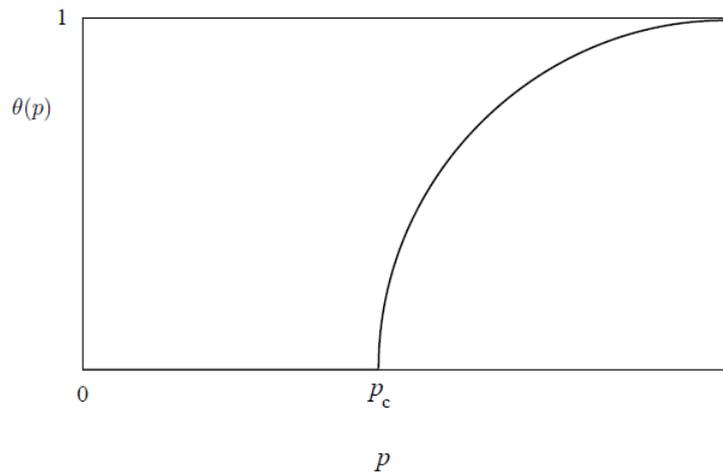


Tabela 3.3 – Expoentes críticos de percolação para malhas de dimensão $d = 2, 3$.

Quantidade	Expoente	d=2	d=3
Parâmetro de ordem	β	5/36	0,41
Número total de cluster	α	-2/3	-0,62
Tamanho médio de clusters finitos	γ	43/18	1,80
Condutividade	μ	1,30	2,0

3.6 Análise de Variância

A Análise de Variância (ANAVA), segundo Banzatto e Kronka (2006), é uma técnica que consiste na decomposição da variância total (e dos números de graus de liberdade) em partes atribuídas a causas conhecidas e independentes (fatores controlados) e de porção residual de origem desconhecida e de natureza aleatória (fatores não controlados).

Toda análise de variância de um experimento pressupõe um modelo matemático e a aceitação de algumas hipóteses básicas (PIMENTEL-GOMES, 1990). Como exemplo, tomemos um experimento inteiramente casualizado, teremos como modelo matemático:

$$y_{ij} = m + t_i + e_{ij}$$

onde y_{ij} é o valor observado relativo à parcela que recebeu o tratamento i na repetição j ; m é a média geral; t_i mede o efeito do tratamento i ; e e_{ij} é a contribuição do acaso, isto é, a parte da variação devida a fatores não controlados. Na análise admitimos as seguintes hipóteses:

- Os diversos efeitos são aditivos, como no modelo matemático acima.
- Os erros ou desvios e_{ij} são independentes, do que resulta que não são correlacionados.
- Os erros e_{ij} possuem todos a mesma variância σ^2 .
- Os erros e_{ij} tem distribuição normal.

A seguir são apresentados o teste F, bem como os testes usados para a verificação dos pressupostos para a análise de variância.

3.7 O teste F

O teste F, de Snedecor, tem por finalidade comparar estimativas de variâncias. De acordo com Banzatto e Kronka (2006), na análise de variância, os quadrados médios (Q.M.) são estimativas de variâncias, obtendo-se um Q.M. para cada causa de variação. Assim, num experimento inteiramente casualizado, temos a estimativa da variância devido aos efeitos dos tratamentos (Q.M. Tratamentos) e outra devido aos efeitos dos fatores não controlados (Q.M. Resíduos).

Para aplicarmos o teste F na análise de variância, comparamos sempre uma variância devido aos efeitos do fator controlado com a variância causada pelos efeitos dos fatores não controlados (BANZATTO; KRONKA, 2006). Então:

$$F = \frac{Q.M.Tratamentos}{Q.M.Resduos}$$

Admitindo a hipótese de nulidade, ou seja, supondo que os tratamentos sejam todos equivalentes, teríamos duas estimativas de variância que não deveriam diferir, a não ser por acaso.

O valor crítico de F obtido nas tabelas de distribuição de F , nos indica o valor máximo que a razão de variâncias (F calculado) poderá assumir devido apenas a flutuações amostrais (BANZATTO; KRONKA, 2006). Temos as seguintes situações:

- Se o valor de F calculado for maior que o valor F tabelado o teste é significativo ao nível testado (α), então rejeitamos a hipótese de nulidade, portanto as diferenças nos efeitos dos tratamentos não devem ser atribuídas ao acaso e sim aos efeitos maiores de alguns dos tratamentos.

3.8 Teste de Tukey

O teste de Tukey, proposto em 1949 por John Wilder Tukey (1949), é usado para comparar todos os possíveis pares de médias, baseia-se na amplitude total estudentizada (PIMENTEL-GOMES, 1990). Define-se a diferença mínima significativa (DMS) como:

$$DMS = \frac{qs}{\sqrt{r}}, \quad (3.3)$$

em que q é o valor da amplitude total estudentizada ao nível de 5% ou 1% de probabilidade; s é a estimativa do desvio padrão residual; e r é o número de repetições, suposto o mesmo para todos os tratamentos. Portanto, o teste de Tukey declara duas médias significativamente diferentes se o valor absoluto de suas diferenças amostrais ultrapassar o valor de DMS .

3.9 Teste de Shapiro Wilk

O teste proposto por Shapiro e Wilk (1965) é usado para avaliar se a distribuição de probabilidade associada a uma amostra pode ser aproximada pela distribuição Normal. Portanto, é usado para a verificação do pressuposto de normalidade dos resíduos para a análise de variância.

De acordo com Royston (1995) a estatística W é a razão entre duas estimativas da variância de uma distribuição normal baseada numa amostra aleatória de n observações. O numerador

da estatística W do teste de Shapiro-Wilk é proporcional ao quadrado do melhor estimador linear do desvio padrão (variância mínima, não viesado) e o denominador é a soma dos quadrados das observações ao redor da média amostral. A estatística do teste de Shapiro-Wilk é dada por:

$$W = \frac{b^2}{s^2} = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (3.4)$$

em que y_i são os valores da amostra ordenados, a_i são os coeficientes tabelados gerados pelas médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra de tamanho n de uma distribuição Normal. No caso de um valor significativo para a estatística do teste, isso indica falta de normalidade para a variável aleatória analisada.

3.10 Teste de Bartlett

O teste de Bartlett (BARTLETT, 1937) é utilizado para testar se k amostras são de populações com variâncias iguais (homocedasticidade), que é uma pressuposição para a análise de variância. As hipóteses para este teste são dadas por:

$$\begin{aligned} H_0 & : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2 \\ H_1 & : \text{pelo menos um } \sigma_i^2 \text{ é diferente, } i = 1, \dots, k. \end{aligned}$$

A estatística do teste de Bartlett para K amostras de tamanhos n_i e variâncias S_i^2 é dada por:

$$B_0 = \frac{(N - k) \ln(S_p^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(S_i^2)}{1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{n_i - 1} \right) - \frac{1}{N - k} \right)}. \quad (3.5)$$

Onde $N = \sum_{i=1}^k n_i$ e $S_p^2 = \frac{1}{N - k} \sum_{i=1}^k (n_i - 1) S_i^2$. Sob H_0 a estatística acima tem distribuição assintótica qui-quadrado com $k - 1$ graus de liberdade. Assim, rejeita-se H_0 se $B_0 > Q_{[1 - \alpha; k - 1]}$ (quantil $1 - \alpha * 100\%$ da distribuição qui-quadrado com $k - 1$ graus de liberdade).

3.11 Teste de Durbin-Watson

O teste de Durbin-Watson é o mais utilizado teste para detectar autocorrelação. Baseia-se no pressuposto que os resíduos seguem um processo autorregressivo de primeira ordem. Na situação em que não existe autocorrelação, os erros são variáveis aleatórias gaussianas indepen-

dentem e idênticamente distribuídas (CHATTERJEE; SIMONOFF, 2013). Temos portanto, as seguintes hipóteses para o teste:

H_0 : Os erros são independentes

H_1 : Os erros são autocorrelacionados.

Sendo e_i o erro associado à i -ésima observação, temos que a estatística do teste de Durbin-Watson é dada por:

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2}. \quad (3.6)$$

Para a tomada de decisão, ao nível de significância α comparamos a estatística DW com os valores críticos d_L e d_U da tabela de Durbin-Watson.

- Se $DW < d_L$, rejeitamos H_0 , há evidências estatísticas que os erros são positivamente correlacionados.
- Se $DW > d_U$, não rejeitamos H_0 , há evidências estatísticas de que não existe dependência residual.
- Se $d_L < DW < d_U$ o teste é inconclusivo.

De acordo com Chatterjee e Simonoff (2013) os testes de autocorrelação negativa são realizados mais raramente e, neste caso, a estatística de teste apropriada é $4 - DW$, e seguido o mesmo procedimento descrito acima.

METODOLOGIA

Amaral (2014) desenvolveu a partir de adaptações do Modelo Penna (PENNA, 1995), um modelo computacional implementado em linguagem C, para o estudo da dinâmica populacional do pulgão *A. gossypii* em diferentes faixas de temperaturas, no qual foi considerado a estrutura espaço-temporal em plantação de algodão *Gossypium hirsutum* L. (representado por sua área foliar). Este modelo foi aplicado ao estudo de diferentes cenários, inclusive aquele que trata da interação desse afídeo com o parasitóide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) (Hymenoptera: Aphididae). Amaral (2014) obteve uma boa representação de parâmetros biológicos, tais como taxa intrínseca de crescimento, duração de uma geração e as curvas de sobrevivência.

Com a finalidade de avaliar a dinâmica espaço-temporal da população de *A. gossypii*, Mendes (2017) utilizou o Modelo Penna com as adaptações propostas por Amaral (2014), sem considerar o ciclo fenológico do algodoeiro, na temperatura fixa de 25°C, sob diferentes probabilidades de migração de formas ápteras e aladas. Com este trabalho, para os diferentes cenários caracterizados pelos parâmetros relativos à capacidade de migração do pulgão, Mendes (2017) observou que os instantes de ocorrência do ponto de inflexão da média populacional ($\mu(t)$), de máxima variância e de cluster percolante, foram muito próximos, na maioria dos cenários, indicando a existência de uma relação entre variáveis dependentes do tempo e o padrão de distribuição espacial do pulgão.

O trabalho desenvolvido por Mendes (2017) foi um ponto de partida para diversas questões. A natureza da distribuição espacial agregada dos pulgões, em termos biológicos, é um fato conhecido. No entanto, o mecanismo que governa a formação de aglomerados (clusters) ao longo do tempo, não é completamente conhecido. A dinâmica de formação de cluster, ou seja, a análise de sua formação ao longo do período transiente, é um assunto bastante complexo e instigante. Certamente, a possibilidade de identificar a essência do processo poderá fornecer importantes informações sobre o sistema, o qual poderá contribuir, neste caso, para o manejo da praga em sistemas agrícolas.

No presente trabalho, com o objetivo de dar continuidade e melhor compreender a relação entre aspectos temporais e espaciais observada por Mendes (2017), além da descrição da evolução temporal e espacial, os efeitos de parâmetros relativos à capacidade de migração de formas ápteras e aladas do pulgão *A. gossypii* sobre sua dinâmica em algodoeiro serão avaliados, buscando identificar, caso ocorra, o momento da transição de fase do sistema e suas caracterís-

ticas. Utilizou-se para tal, o conceito de percolação de sítios, levando em consideração também o ciclo fenológico da planta e as adaptações do modelo Penna propostas por Amaral (2014).

A seguir é descrito o modelo desenvolvido a partir de dados da biologia do pulgão *A. gossypii* e da fenologia do algodoeiro.

4.1 Modelo Penna adaptado à biologia do pulgão *A. gossypii* e do algodoeiro *Gossypium hirsutum*.

A população inicial de cada sítio (que representa uma planta) de uma rede quadrada $L \times L$ é constituída somente de fêmeas ápteras (sem asas) oriundas de uma população com estrutura etária estável. A população inicial, constituída de N_0 pulgões, está localizada em um único sítio da rede. A capacidade de carga de cada sítio pode ser fixa (*dinâmica sem ciclo fenológico*) ou variar com o tempo (*dinâmica com ciclo fenológico*).

Cada fêmea é caracterizada por um "genoma" representado por duas palavras computacionais de 64 bits. Ambas dinâmicas seguem as regras do modelo Penna apresentadas na seção 3.3, com as seguintes alterações:

4.1.1 Relativas à reprodução:

Além da idade mínima de reprodução RM , o pulgão possui uma idade máxima de reprodução indicada por RX . Desta forma, estando em idade reprodutiva, a fêmea dará origem a b descendentes que serão posicionados no mesmo sítio da mãe. A densidade populacional no sítio em que se localiza a mãe áptera irá definir se o descendente será áptero ou alado. Em altas densidades populacionais as fêmeas ápteras darão origem à fêmeas aladas, com probabilidade dada por $\frac{N_j(t-1)}{N_{max,j}(t)}$, sendo $N_j(t-1)$ o tamanho da população no sítio j na etapa temporal $t-1$ e $N_{max,j}(t)$ a capacidade de carga do sítio j . As fêmeas na forma alada geram somente indivíduos na forma áptera.

4.1.2 Relativas à competição entre indivíduos:

Para incluir a competição entre os indivíduos localizados numa estrutura espacial, a cada etapa temporal cada indivíduo poderá morrer com probabilidade $N_j(t)/N_{max,j}(t)$, em que N_j é o número de pulgões situados no sítio j e $N_{max,j}(t)$ a capacidade de carga do sítio. Neste trabalho considera-se o meio homogêneo no que se refere à capacidade de carga, ou seja, em cada etapa temporal todos os sítios possuem o mesmo valor de $N_{max,j}(t)$. Na dinâmica sem ciclo

fenológico, $N_{max,j}(t)$ é uma constante, ou seja, $N_{max,j}(t) = N_{max}$ para todo j . Já na dinâmica com ciclo fenológico, $N_{max,j}(t)$ varia com o tempo de acordo com a idade da planta.

4.1.3 Relativas à biologia do pulgão e do algodoeiro

Na seção 3.2 observa-se que os parâmetros biológicos do pulgão (período reprodutivo, fertilidade, entre outros) são dependentes da temperatura. Desta forma, considerando que a temperatura de $25^{\circ}C$ é a mais favorável ao desenvolvimento do pulgão, as simulações foram realizadas considerando-se os valores de parâmetros obtidos empiricamente por Xia, Werf e Rabbinge (1999) nesta temperatura.

Na dinâmica com ciclo fenológico, a capacidade de carga dos sítios em cada etapa temporal foi definida como

$$N_{max,j}(t) = y_j(x,t) \times z_j(x,t), \quad (4.1)$$

sendo $y_j(x,t)$ e $z_j(x,t)$ a área foliar e o número de folhas do algodoeiro localizado no sítio j , cuja idade é x na etapa temporal t , respectivamente. Os valores de $y_j(x,t)$ e $z_j(x,t)$ foram obtidos a partir do experimento conduzido por BRITO (2005) em algodoeiro *Gossypium hirsutum* no período de julho a novembro de 2012 (temperatura média $26,9^{\circ}C$) em Barabalha, Ceará. De acordo com esse trabalho, as variáveis $y_j(x,t)$ e $z_j(x,t)$ são dadas pelas seguintes equações:

$$y_j(x,t) = 11,23 + 1,2649x - 0,0087x^2, \quad (4.2)$$

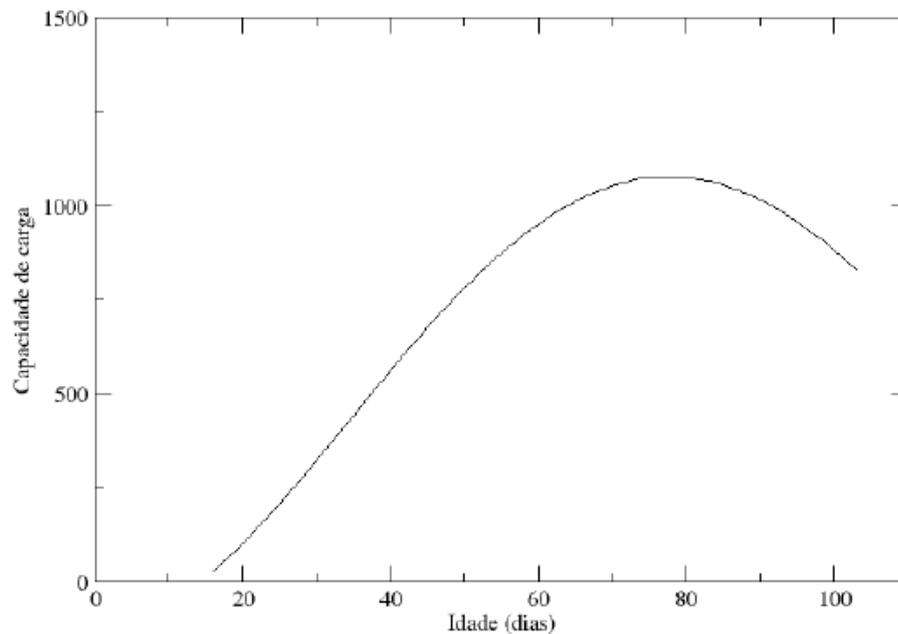
$$z_j(x,t) = -8,2483 + 0,6833x - 0,0043x^2, \quad (4.3)$$

em que x é a idade do algodoeiro em idas após emergência das plantas.

A Figura 4.1 mostra como se comporta a capacidade de carga em função da idade do algodoeiro, de acordo com a equação 4.1. Observa-se que o ciclo finaliza em 102 dias e que a capacidade de carga é diferente de zero a partir da idade 17 dias. Desta forma, em todas as simulações com ciclo fenológico, todas as plantas possuem idade de 17 dias em $t=1$. Por esta razão, a dinâmica com ciclo fenológico compreendeu apenas 86 dias.

Ambas dinâmicas partiram de uma população inicial com estrutura etária estável. Para isto, procedeu-se da seguinte forma:

Figura 4.1 – Gráfico da capacidade de carga da planta em função da idade (dias) nas 86 etapas temporais em que o algodão possui folhagem



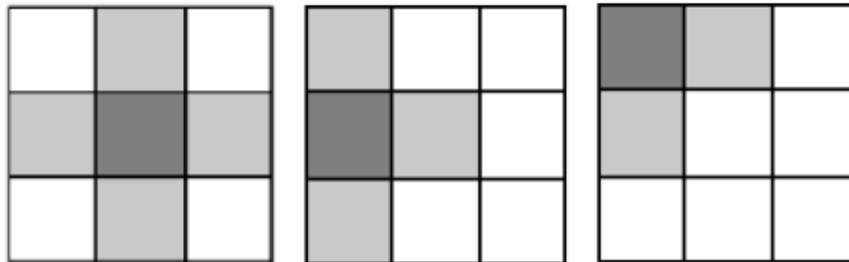
- *Dinâmica sem migração para obtenção da população com estrutura etária estável* - foi realizada uma simulação com 19800 e 19915 etapas temporais, para as dinâmicas sem e com ciclo fenológico, respectivamente, partindo de uma população constituída de 20 pulgões, todos localizados num único sítio. Durante estas etapas temporais a capacidade de carga dos sítios foi mantida constante e igual a 1500 (sem ciclo fenológico/com ciclo fenológico) e 83 (maioria das simulações com ciclo fenológico). Os parâmetros do modelo RM , RX e b assumiram os valores correspondentes à temperatura de $25^{\circ}C$. A população foi considerada fechada, ou seja, não existe processo de migração entre sítios. A população gerada após este processo constituiu a população inicial da dinâmica sem ciclo fenológico.

Na *dinâmica sem ciclo fenológico* a capacidade de carga de cada sítio se manteve constante e igual a 1500. Na *dinâmica com ciclo fenológico* a capacidade de carga em $t=1$ correspondeu a do algodoeiro aos 17 dias de idade, ou seja, 83. Além disto, na dinâmica com ciclo fenológico, no final de cada etapa temporal são atualizadas não somente a idade de cada pulgão, mas também a idade do algodoeiro. Todas as duas dinâmicas seguem todos passos definidos no modelo Penna, com a inclusão do passo relativo à migração de pulgões entre sítios.

4.1.4 Relativas à migração de formas áptera e alada:

- *Migração de ápteros* - A probabilidade de migração dos pulgões ápteros de um sítio para o outro é dada por α_1 . Dado que ele migrou, sorteia-se a posição para onde o pulgão irá se mover de acordo com as regras de vizinhança de Neumann e Burks (1966). Se o pulgão encontra-se em um sítio central da rede ele possui quatro opções de migração. Se ele está em um sítio da borda, então ele tem três opções para ocupar. Por fim, caso o pulgão se encontre em um dos quatro extremos da rede, possui somente duas opções para migrar (Figura 4.2). A probabilidade de ocupação de qualquer um dos sítios vizinhos é a mesma.

Figura 4.2 – Exemplo das opções de migração do pulgão na rede de acordo com as regras de vizinhança de Von Neumann



- *Migração de alados* - O pulgão alado poderá migrar com probabilidade α_2 para qualquer sítio da rede, escolhido aleatoriamente.

4.2 Análise da Dinâmica Espacial

4.2.1 Variância Espacial

A variância espacial, medida em cada etapa temporal, foi obtida considerando-se todos os sítios da rede, definida como:

$$\sigma^2(t) = \frac{\sum_{j=1}^{L^2} (N_j(t) - \mu(t))^2}{L^2}, \quad (4.4)$$

$$\text{com } \mu(t) = \frac{\sum_{j=1}^{L^2} N_j(t)}{L^2}.$$

4.2.2 Formação de cluster

Para analisar a formação de cluster na rede, primeiramente é necessário definir quais são os sítios ativos. Tendo definido o valor de χ , um parâmetro pertencente ao intervalo $[0,1]$, considerou-se como sítios ativos aqueles que satisfazem à seguinte condição:

$$\chi_j(t) \geq \chi \quad (4.5)$$

sendo $\chi_j(t) = \frac{N_j(t)}{\mu(t)}$. Além disto, é necessário definir:

$$\text{densidade de sítios ativos} = \frac{\varepsilon}{L^2} \quad (4.6)$$

sendo ε o número de sítios da rede que satisfazem à condição 4.5 para um dado valor de χ , e

$$\text{densidade do cluster percolante} = \frac{\varepsilon_P}{L^2} \quad (4.7)$$

sendo ε_P o número de sítios ativos da rede que pertencem ao cluster percolante.

4.3 Localização espacial inicial dos pulgões.

Em ambas dinâmicas foram considerados cenários em que a população inicial estava localizada num sítio da região central da rede, com coordenadas (14,14). Para verificar a influência da localização inicial dos pulgões nas variáveis: Tempo para percolar, Máxima variância e Densidade de sítios ativos no momento da percolação, foram considerados também cenários em que os pulgões se encontravam distribuídos em cinco sítios escolhidos aleatoriamente. As coordenadas dos sítios foram: (7,26), (24,22), (5,11), (27,1) e (14,24). Para cada par foram feitas cinco repetições com cinco diferentes sementes, obtendo assim os dados para cada variável.

Foram realizados os testes de homogeneidade da variância, normalidade e independência dos erros. Não havendo restrições às pressuposições da análise de variância, os dados foram submetidos à esta. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises foram realizadas utilizando-se o software R (R Core Team, 2013).

4.4 Cenários considerados

Nas duas dinâmicas foram considerados cenários com e sem a formação de alados. Os diferentes cenários foram caracterizados pelos valores dos parâmetros α_1 , α_2 e χ . Foram rea-

lizadas simulações com redes 30×30 , 40×40 , 50×50 , 60×60 , 80×80 , 90×90 e 100×100 . A maior parte dos resultados apresentados foram obtidos com a rede 30×30 . Para obtenção de valores médios foram realizadas 15 simulações para cada rede com um dado conjunto de parâmetros. Em cada uma das simulações considerou-se diferentes sementes geradoras de números aleatórios.

RESULTADOS

A seguir apresentam-se os resultados obtidos em todas as simulações bem como as discussões desses resultados.

5.1 Dinâmica sem ciclo fenológico do algodoeiro

Nesta seção serão apresentados os resultados da dinâmica sem considerar o ciclo de folhagem da planta, ou seja, a capacidade de carga do algodoeiro em cada sítio não varia com o tempo. Nesta dinâmica foram considerados cenários com e sem a formação de alados. Nestes cenários estudou-se a influência da localização espacial da população inicial de pulgões sobre as variáveis de interesse. Foram realizadas simulações considerando-se diferentes tamanhos de rede: 30×30 , 40×40 , 50×50 e 60×60 . Porém, a maior parte dos resultados apresentados foram gerados a partir da rede 30×30 .

5.1.1 Sem formação de alados

5.1.1.1 População inicial localizada num sítio central da rede:

Na Figura 5.1 tem-se a densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos para diferentes dimensões da rede, fixando-se a probabilidade de dispersão do áptero em $\alpha_1 = 0,5$ e adotando-se $\chi = 0,9$ (considera-se como sítios ativos em cada instante t aqueles cujo tamanho populacional ($N_j(t)$) é maior ou igual a 90% da média populacional da rede $\mu(t)$). Verificou-se o mesmo comportamento para as diferentes dimensões da rede, ou seja, existe uma densidade crítica acima da qual todos os sítios ativos pertencem ao cluster percolante. As densidades de sítios ativos no momento em que ocorreu a percolação foram 0,7744 (30×30), 0,7825 (40×40), 0,7864 (50×50) e 0,8008 (60×60).

Em todas as dimensões de rede simuladas foi observado o mesmo comportamento para a variância (Figura 5.2), ou seja, cresce até um valor máximo e volta a decair, mantendo-se constante em um valor bem baixo a partir de uma certa etapa temporal. Observa-se também uma defasagem entre as curvas nas diferentes redes. Quanto maior a dimensão da rede, maior a amplitude de tempo e maior a variância.

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores dos intervalos de confiança dos tempos médios necessários para ocorrência da máxima variância e da percolação, assim como os valores médios das densidades no momento da percolação em diferentes dimensões de rede e parâme-

Figura 5.1 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos da dinâmica sem ciclo fenológico e sem a produção de formas aladas para diferentes tamanhos de rede ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$). Gráfico correspondente a uma simulação por rede.

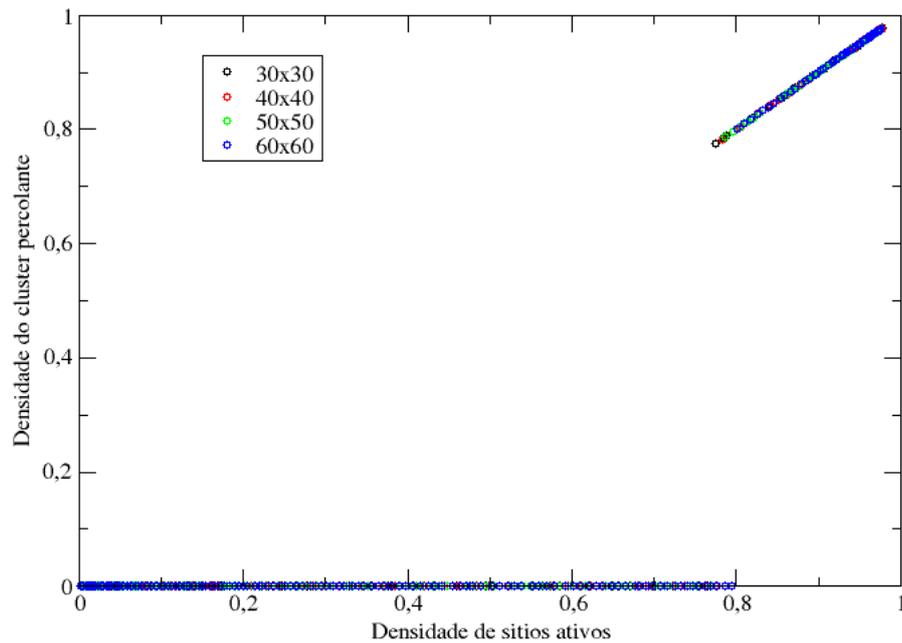
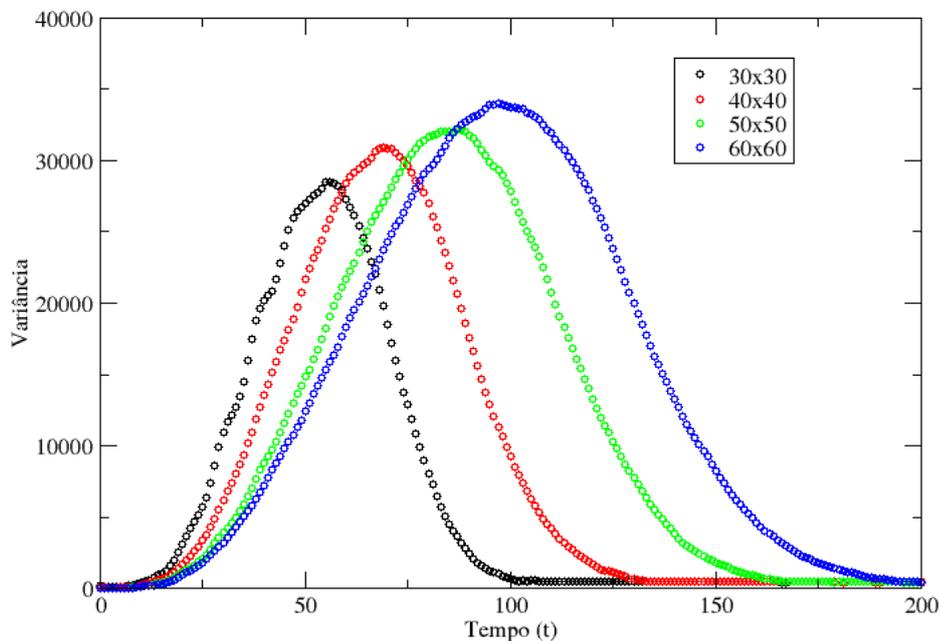


Figura 5.2 – Variância populacional da dinâmica sem ciclo fenológico e sem a produção de formas aladas ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$). Gráfico correspondente a uma simulação por rede.



tos $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Os valores médios foram calculados sobre 15 simulações para cada dimensão de rede. Cada simulação difere uma da outra pelos valores das sementes iniciais, geradoras dos números aleatórios. Na Figura 5.3 são apresentados os valores médios do momento de ocorrência da percolação, da máxima variância e densidade crítica, respectivamente, em fun-

ção da dimensão da rede com seus respectivos ajustes. Observa-se que o tempo para ocorrência de percolação e de máxima variância aumentam linearmente com a dimensão da rede, sendo o tempo médio em que ocorre o valor máximo para variância menor que o tempo médio que ocorreu a percolação para todas dimensões de rede analisadas. Em relação à densidade de sítios ativos observa-se também um aumento linear, porém não observa-se diferenças significativas entre as redes 30×30 , 40×40 e 50×50 . Por outro lado, observamos diferenças significativas entre a rede 60×60 e as redes 30×30 e 40×40 (Tabela 5.1).

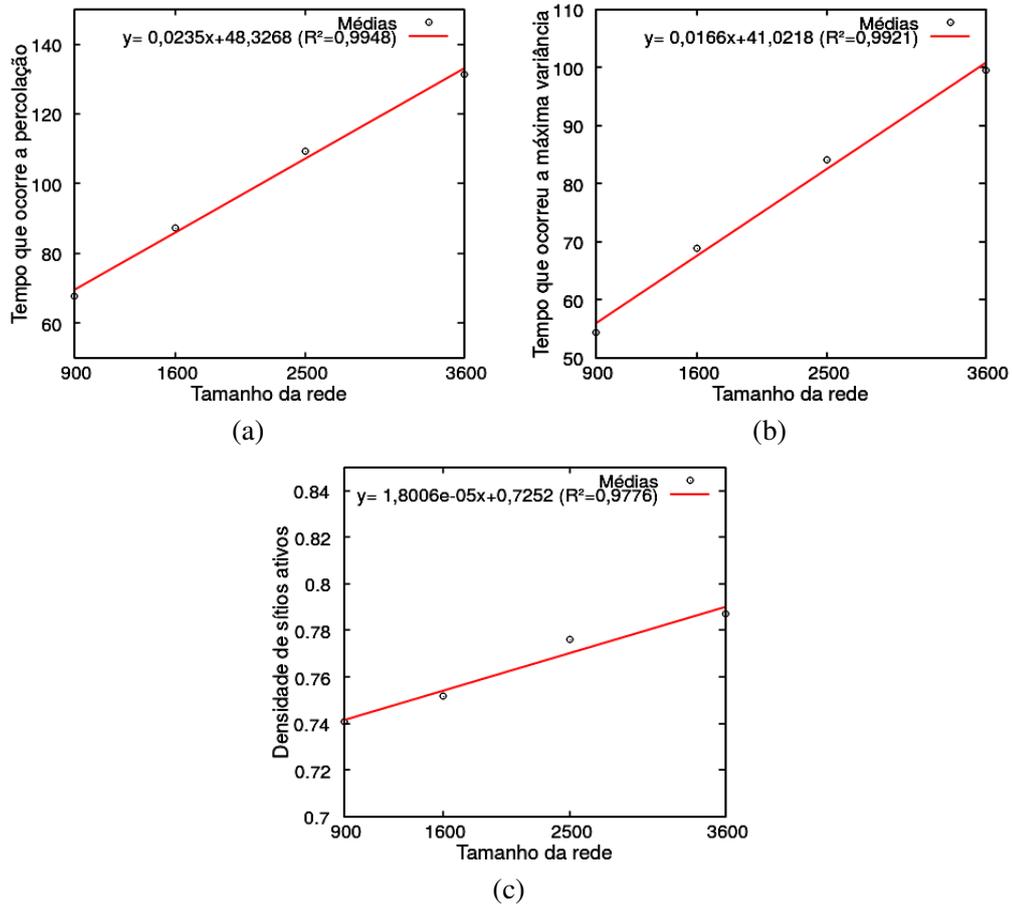
Tabela 5.1 – Intervalo a 95% de confiança dos tempos médios para ocorrência da máxima variância e da percolação e valores médios das densidades no momento da percolação para diferentes dimensões de rede ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$). Dinâmica sem ciclo fenológico e sem a presença de indivíduos alados.

Rede	Máxima variância	Momento da percolação	Densidade
30×30	[53,2127; 55,4540]	[66,1853; 69,2781]	[0,7277; 0,7538]
40×40	[67,9819; 69,7514]	[84,6757; 89,5910]	[0,7302; 0,7731]
50×50	[83,1286; 85,2714]	[106,6474; 112,0192]	[0,7562; 0,7964]
60×60	[97,9886; 100,9447]	[128,4439; 133,4439]	[0,7730; 0,8012]

Na figura 5.4 apresenta-se a evolução temporal da média do número de pulgões variando-se o parâmetro de dispersão do áptero α_1 , na rede de dimensão 30×30 , com $\chi = 0,9$ (considera-se como sítios ativos em cada instante t aqueles cujo tamanho populacional $N_j(t)$ é maior ou igual a 10% da média populacional $\mu(t)$). Para os diferentes valores do parâmetro de dispersão do áptero (α_1), observa-se em todos os casos que a população total de pragas cresce até atingir um limiar e se mantém constante a partir de então, isto ocorre devido a competição intraespecífica inserida no modelo por meio do fator de Verhulst. De acordo com o aumento na probabilidade de dispersão do áptero o tempo necessário para atingir o limiar diminui. Portanto, a variação na capacidade de dispersão de indivíduos ápteros com movimentos de curta distância, tem influência no tamanho populacional durante o período transiente, com efeito mais intenso para baixas probabilidades de dispersão onde o crescimento é bem mais lento. Infere-se que à medida que se aumenta a probabilidade de dispersão do áptero atinge-se uma população máxima em menor tempo, logo, neste caso, maior prejuízo pode ocorrer com a cultura.

Na figura 5.5 tem-se a densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos, variando-se o parâmetro de dispersão do áptero α_1 , na rede 30×30 com diferentes valores de α_1 e $\chi = 0,1$. Para todos os valores de α_1 , observa-se uma transição do sistema de uma fase em que não existe cluster percolante na rede para uma fase em que existe um único

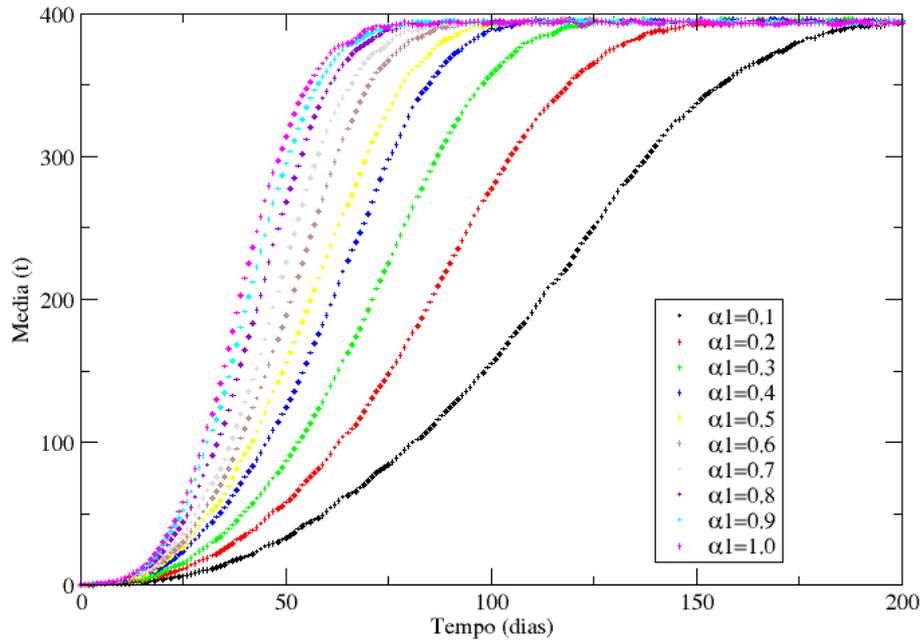
Figura 5.3 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a), dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) e densidades médias de sítios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (b) em função de diferentes dimensões de rede (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Dinâmica sem ciclo fenológico e sem a presença de indivíduos alados.



cluster percolante. Essa transição ocorre para valores de densidade de sítios ativos na rede, aproximadamente entre 0,6 e 0,8 (tabela 5.2). A partir desses limiares, o gráfico apresenta um comportamento linear para todos os valores de α_1 . A partir do momento em que ocorre a percolação, a densidade do cluster percolante se mantém igual à densidade de sítios ativos, com a presença de um único cluster até o fim da dinâmica.

Na Figura 5.6 são apresentados os valores médios dos tempos necessários para ocorrência de percolação e de máxima variância, assim como os valores médios da densidade de sítios ativos no momento da percolação na rede 30×30 com diferentes valores de α_1 e $\chi = 0,9$. Observa-se que os tempos médios para percolação e máxima variância diminuem com a probabilidade de dispersão do alado, obtendo-se bons ajustes para leis de potência. Com uma probabilidade de dispersão de 70% a população consegue atingir as extremidades da rede em menos que a metade do tempo levado em uma probabilidade de 10%. De um modo geral, os

Figura 5.4 – Evolução temporal da média populacional de pulgões em função do tempo na rede 30×30 , para diferentes probabilidades de migração do áptero (α_1). Gráficos correspondentes a uma única simulação por rede ($\chi = 0,9$).



tempos necessários para ocorrência da máxima variância populacional foram menores que os tempos necessários para ocorrência da percolação. De acordo com Carpenter e Brock (2006), o aumento na variância pode ser um indicador importante de mudanças de regime no sistema. O mecanismo que está subjacente à variabilidade crescente próxima do limiar de transição ocorre em diversos sistemas físicos, ecológicos e sociais (BROCK; CARPENTER; SCHEFFER, 2008). Com relação à densidade crítica de sítios ativos, verifica-se um aumento da média com o aumento de α_1 até o valor de probabilidade de 60% de dispersão do áptero, a partir daí observa-se um declínio das densidades críticas no momento da percolação.

Na Figura 5.7 encontra-se o gráfico da densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos, variando os valores de χ para rede de tamanho 30×30 e $\alpha_1 = 0,1$. Considerando como sítios ativos aqueles em que $\chi_j(t) \geq \chi$ com χ no intervalo $[0,1;0,9]$, observa-se a mesma transição de fase descrita anteriormente. Entretanto, considerando-se $\chi = 1,0$, o comportamento da curva nas últimas etapas temporais muda bastante em relação aos cenários anteriores: (i) a densidade de sítios ativos é reduzida (a partir de $t = 158$, o que pode ser observado na figura 5.8) e (ii) o tamanho do cluster percolante é menor que o número de sítios ativos, podendo ser inclusive igual a zero, ou seja, em algumas etapas temporais finais da dinâmica não acontece mais a percolação. Com $\chi = 1,0$ não observou-se, portanto, uma transição de fase. Na Tabela 5.3 verifica-se que a densidade de sítios ativos em que ocorreu

Figura 5.5 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos na rede 30×30 , para diferentes probabilidades de migração do áptero. ($\chi = 0, 1$). Gráficos correspondentes a uma única simulação por rede.

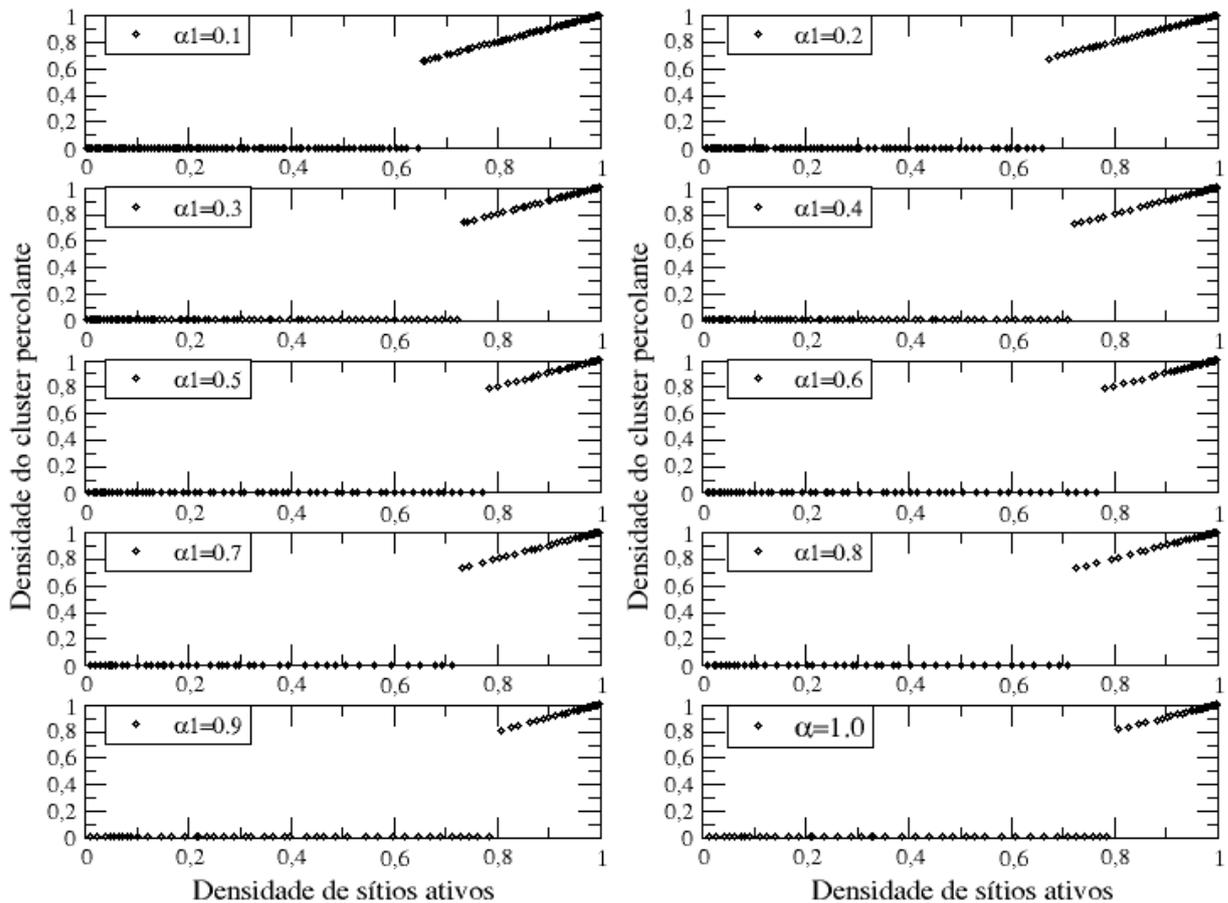
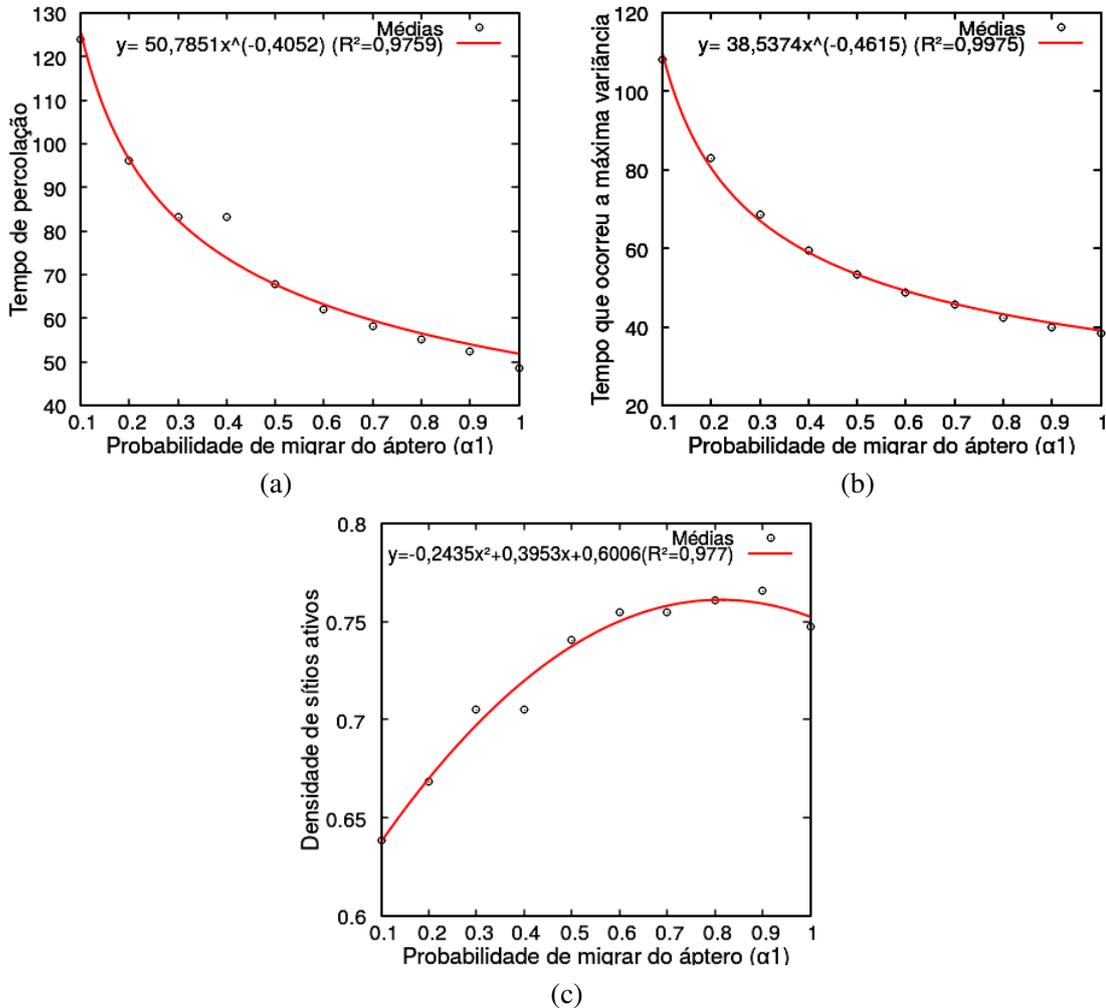


Tabela 5.2 – Etapas temporais em que ocorreram a máxima variância e a percolação, e os respectivos valores das densidades de sítios ativos no momento da percolação na rede 30×30 , para diferentes probabilidades de migração do áptero ($\chi = 0, 1$).

α_1	Máxima variância	Momento da percolação	Densidade de sítios ativos
0,1	113	117	0.656
0,2	83	89	0.673
0,3	66	76	0.736
0,4	59	64	0.724
0,5	56	62	0.787
0,6	49	54	0.781
0,7	47	46	0.734
0,8	40	42	0.728
0,9	39	43	0.808
1.0	39	41	0.809

a percolação ficou entre 0,62 e 0,67 para todos valores de χ , pelos intervalos de confiança, observa-se que não há diferença significativa nos valores da densidade. Portanto, a densidade

Figura 5.6 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a), dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) e densidades médias de sítios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (b) em função da probabilidade de dispersão do áptero (curva simulada e ajuste), com $\chi = 0,9$ (rede 30×30). Dinâmica sem ciclo fenológico e sem a presença de indivíduos alados.



crítica a partir da qual ocorre a percolação é a mesma para todas as categorias que definem os sítios ativos. Na mesma tabela apresenta-se os valores médios dos momentos em que ocorreram a percolação. Já os valores correspondentes ao momento de ocorrência da máxima variância são exatamente os mesmos, para todos os valores de χ (113 dias para $\alpha_1 = 0,1$ e rede 30×30). Isto ocorre pelo fato da variância ter sido calculada sobre todos os sítios da rede, o que a torna dependente apenas da dinâmica, e independente da categoria escolhida para definir os sítios ativos.

Figura 5.7 – Densidade do cluster percolante na rede 30×30 em função da densidade de sítios ativos para diferentes valores de χ e $\alpha_1 = 0, 1$. Imagens correspondentes a uma única simulação por rede.

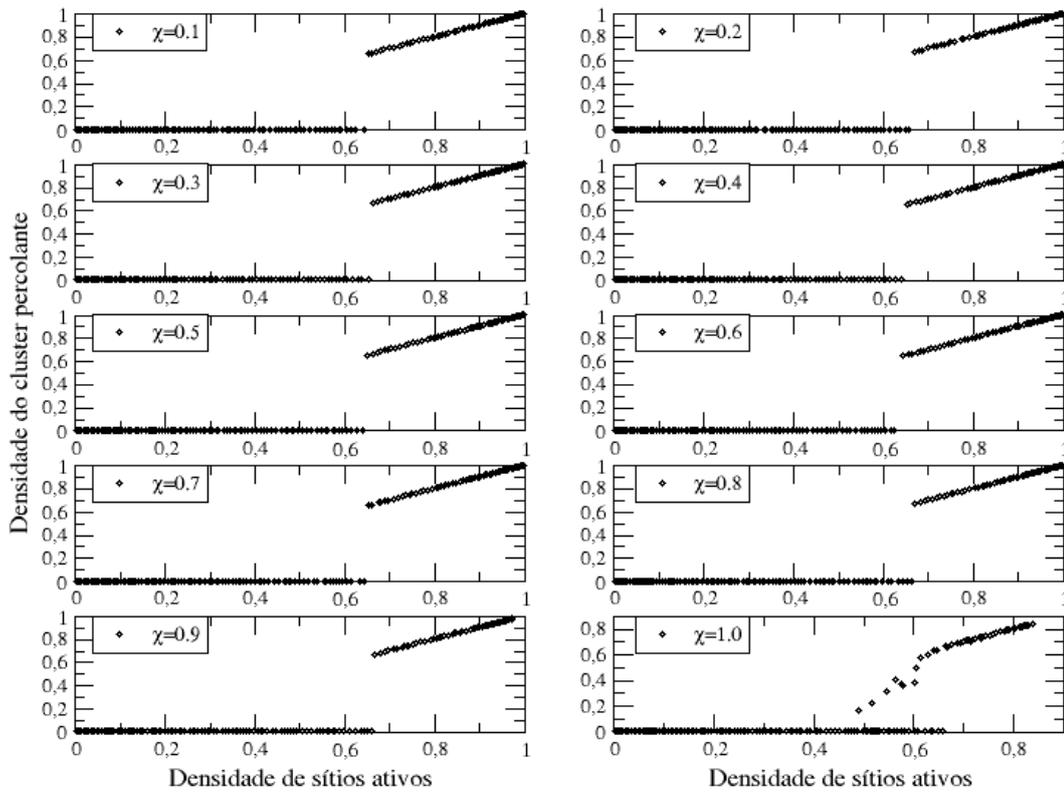


Figura 5.8 – Evolução temporal da densidade de sítios ativos na rede 30×30 para diferentes valores de χ e $\alpha_1 = 0, 1$. Curvas correspondentes a uma única simulação por rede

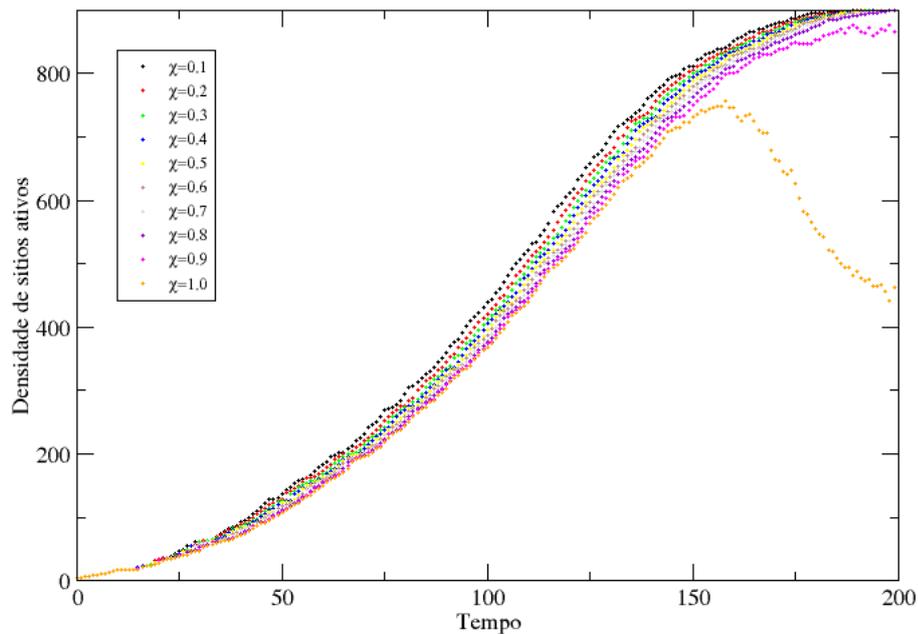
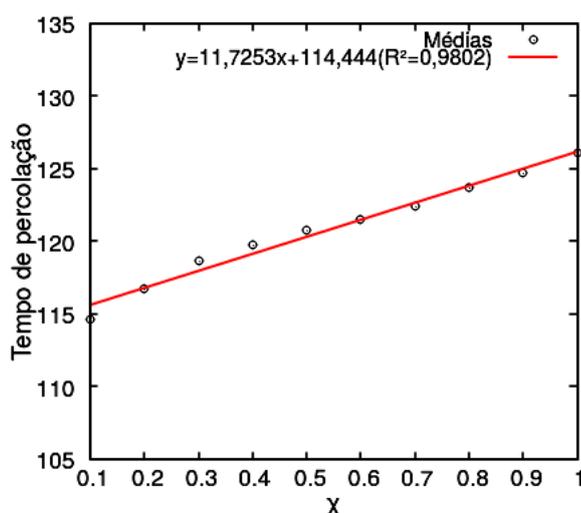


Tabela 5.3 – Etapas temporais em que ocorreram a percolação e os respectivos valores das densidades de sítios ativos para diferentes valores de χ , com $\alpha_1 = 0,1$ na rede 30×30 (Máxima variância ocorreu em 113).

χ	Momento da percolação	Densidade
0,1	[111,4478; 111,7502]	[0,6182; 0,6640]
0,2	[113,6896; 119,7771]	[0,6210; 0,6676]
0,2	[115,6504; 121,6830]	[0,6246; 0,6678]
0,3	[116,7477; 122,7190]	[0,6213; 0,6657]
0,4	[116,7477; 122,7190]	[0,6213; 0,6657]
0,5	[117,8237; 123,7763]	[0,6236; 0,6653]
0,6	[118,5598; 124,3735]	[0,6217; 0,6639]
0,7	[119,3973; 125,4027]	[0,6214; 0,3639]
0,8	[120,5645; 126,7689]	[0,6246; 0,6679]
0,9	[121,5558; 127,9109]	[0,6253; 0,6671]
1,0	[122,8447; 129,4220]	[0,6267; 0,6690]

Os valores médios do tempo necessário para ocorrência de percolação na rede 30×30 com diferentes valores χ e $\alpha_1 = 0,1$ apresentam-se na Figura 5.9. Observa-se que os tempos médios para percolação aumentam linearmente em função dos valores de χ . Cabe ressaltar que o valor médio para ocorrência da percolação é inferior a 113 dias para todos os valores de χ . Portanto, o momento de ocorrência da máxima variância é um marco para a ocorrência da mudança de fase (para $\chi < 1,0$), independente da categoria escolhida para os sítios ativos.

Figura 5.9 – Tempo médio para ocorrência de percolação em função de χ na rede 30×30 com $\alpha_1 = 0,1$ (curva simulada e ajuste). Dinâmica sem ciclo e sem a presença de alados.



Nas Figuras 5.10 a 5.12 observa-se a distribuição espacial de sítios ativos em diferentes etapas temporais (antes, durante e após a percolação) para as probabilidades de migração do áptero $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_1 = 0,5$ e $\alpha_1 = 0,9$, respectivamente, com $\chi = 0,1$. Verifica-se a formação

de um único cluster como já observado anteriormente. Na etapa temporal 150, para $\alpha_1 = 0,1$, a população ainda não atingiu a rede por completo, ao contrário das probabilidades de migração mais altas (0,5 e 0,9), cujas densidades populacionais de sítios ativos são diferentes de zero para todos os sítios da rede.

Figura 5.10 – Distribuição espacial de sítios ativos na rede 30×30 em momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do áptero $\alpha_1 = 0,1$ e $\chi = 0,1$. Imagens correspondentes a uma única simulação por rede.

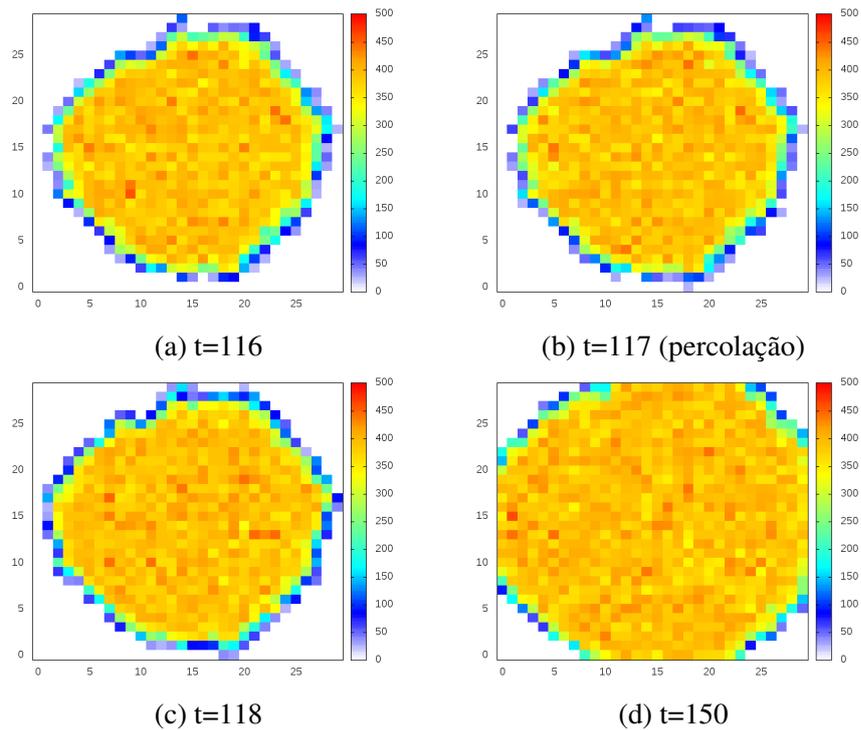


Figura 5.11 – Distribuição espacial dos sítios ativos na rede 30×30 em momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do áptero $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$. Imagens correspondentes a uma única simulação por rede.

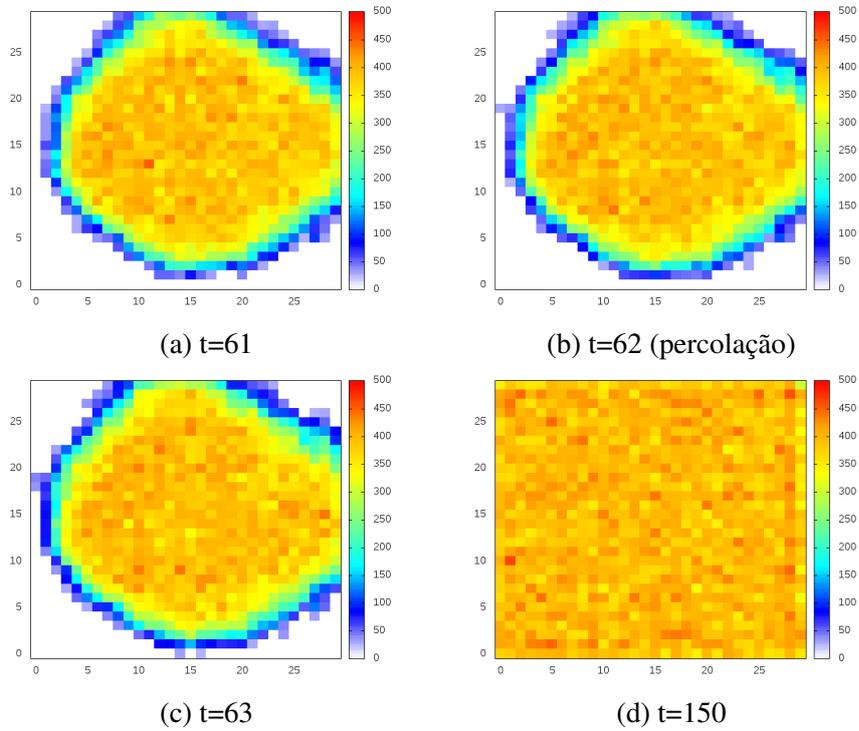
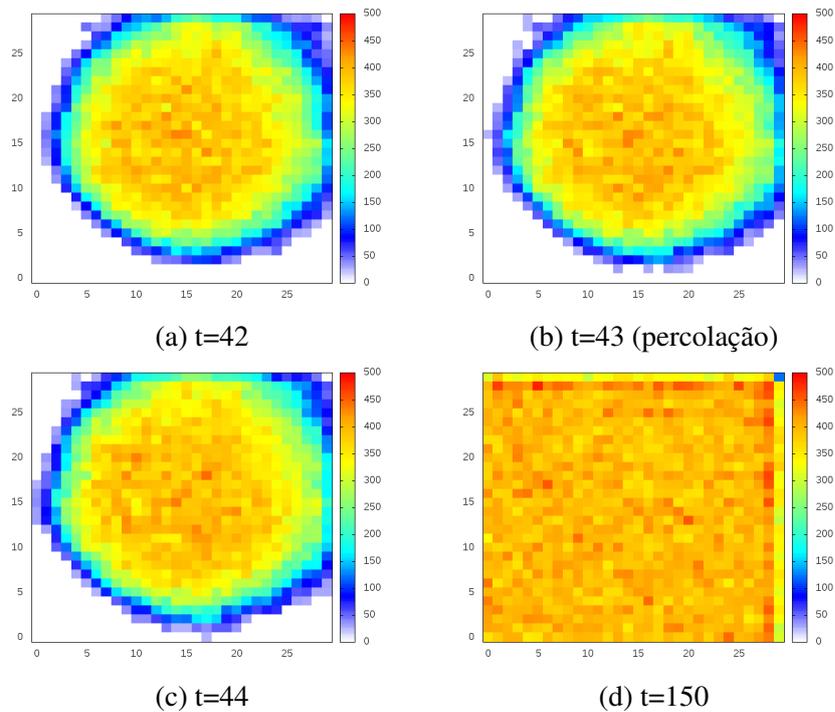


Figura 5.12 – Distribuição espacial dos sítios ativos na 30×30 em momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do áptero $\alpha_1 = 0,9$ e $\chi = 0,1$. Imagens correspondentes a uma única simulação por rede.



5.1.1.2 Influência da localização espacial inicial dos pulgões nas variáveis: densidade de sítios ativos no momento da percolação, momentos de ocorrência da percolação e da máxima variância

Na rede 30×30 com $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$, foram consideradas cinco diferentes localizações iniciais para a população de pulgões. Na tabela 5.4 tem-se um resumo da análise de variância para o tempo de percolação, tempo em que ocorreu a máxima variância e a densidade de sítios ativos no momento da percolação. Verifica-se que houve efeito significativo da localização inicial dos pulgões em todas as variáveis analisadas.

Tabela 5.4 – Análise de variância contendo as fontes de variação (FV), números de graus de liberdade (GL), valores de quadrados médios e respectivas significâncias do teste F (rede 30×30 , $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$).

Fonte de Variação	GL	Variáveis		
		Percolação	Máx. Variância	Densidade
Localização inicial	4	1032,4***	498,9***	0,0383***
Erro	20	8,3	7,1	0,00103
CV%		17,04	12,85	14,52

***Significativo pelo teste F.

Os pressupostos da análise de variância foram atendidos para todas as variáveis analisadas, como pode-se observar pelas estatísticas e valor-p dos testes de normalidade, homogeneidade da variância e independência dos erros, apresentados na Tabela 5.5. Portanto, como ao nível de 5% de significância as amostras provêm de uma população normal, as variâncias são iguais e os resíduos são independentes, segundo Banzatto e Kronka (2006), a análise de variância e as conclusões dela tiradas são válidas.

Tabela 5.5 – Estimativas e respectivos valor-p dos teste de normalidade (Shapiro -Wilk), homogeneidade de variância (Bartlett) e independência (Durbin-Watson) para Percolação, Tempo que ocorreu a variância máxima, e Densidade de sítios ativos no momento da percolação (rede 30×30 , $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$).

Variáveis	Shapiro-Wilk		Barlet		Durbin-Watson	
	W	valor-p	B	valor-p	DW	valor-p
Percolação	0,973	0,733	1,559	0,816	2,715	0,248
Max. Variância	0,935	0,111	4,973	0,290	2,077	0,560
Densidade	0,981	0,899	6,665	0,155	2,688	0,282

As médias das variáveis avaliadas para cada localização inicial estão apresentadas na Tabela 5.6.

No tempo médio de percolação, três pares ordenados não apresentaram diferença significativa entre as médias pelo teste Tukey, levando a um tempo maior para ocorrer a percolação. Nos pares (7,26) e (5,11) o tempo de percolação foi significativamente menor. Portanto, as distribuições iniciais afetam o processo de percolação. Para o tempo em que ocorreu a máxima variância, não houve diferença significativa somente entre os pares (7,26) e (24,22). Portanto, a distribuição inicial dos pulgões da rede afeta também essa variável. Observa-se ainda, que a densidade de sítios ativos no momento em que ocorre a percolação é mais baixa nos pares ordenados (7,26) e (14,24) em que iniciou-se a dinâmica, sendo estatisticamente diferente dos demais pares de localização inicial dos pulgões na rede (Tabela 5.6).

Em todas as variáveis houve diferença significativa entre alguns pares de localização inicial da população de pulgões, confirmando assim, que a distribuição inicial dos pulgões na rede pode causar um impacto sobre o processo de infestação da praga, quando não há a presença do pulgão alado.

Tabela 5.6 – Valores médios do tempo de percolação, do tempo em que ocorreu a máxima variância e da densidade de sítios ativos no momento da percolação nas diferentes localizações da população inicial de pulgões, para rede 30×30 , $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$.

Localização inicial	Variáveis		
	Tempo de percolação	Tempo da máxima variância	Densidade crítica
(7,26)	68,4 b	75,8 b	0,5282 c
(24,22)	87,6 a	75,6 b	0,6902 a
(5,11)	58,2 c	59,4 d	0,6329 ab
(27,1)	89,2 a	86,8 a	0,6116 b
(14,24)	89,2 a	69,8 c	0,4696 d

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (rede 30×30 , $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$).

Nas Figuras 5.13 e 5.14, encontra-se a evolução temporal da distribuição espacial com população inicial localizada em diferentes pontos da rede ((5,11) e (24,22)). Verifica-se diferentes momentos de ocorrência da percolação e da máxima variância quando comparadas as duas localizações iniciais. Observa-se que com a localização inicial (5,11) todos os sítios da rede apresentam tamanho populacional maior ou igual a 10% da média populacional, a partir de $t = 100$. O mesmo não é observado para a dinâmica com localização inicial (24,22).

Figura 5.13 – Evolução temporal da distribuição espacial do pulgão com população inicial localizada na linha 24 e coluna 22 da rede 30×30 ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$).

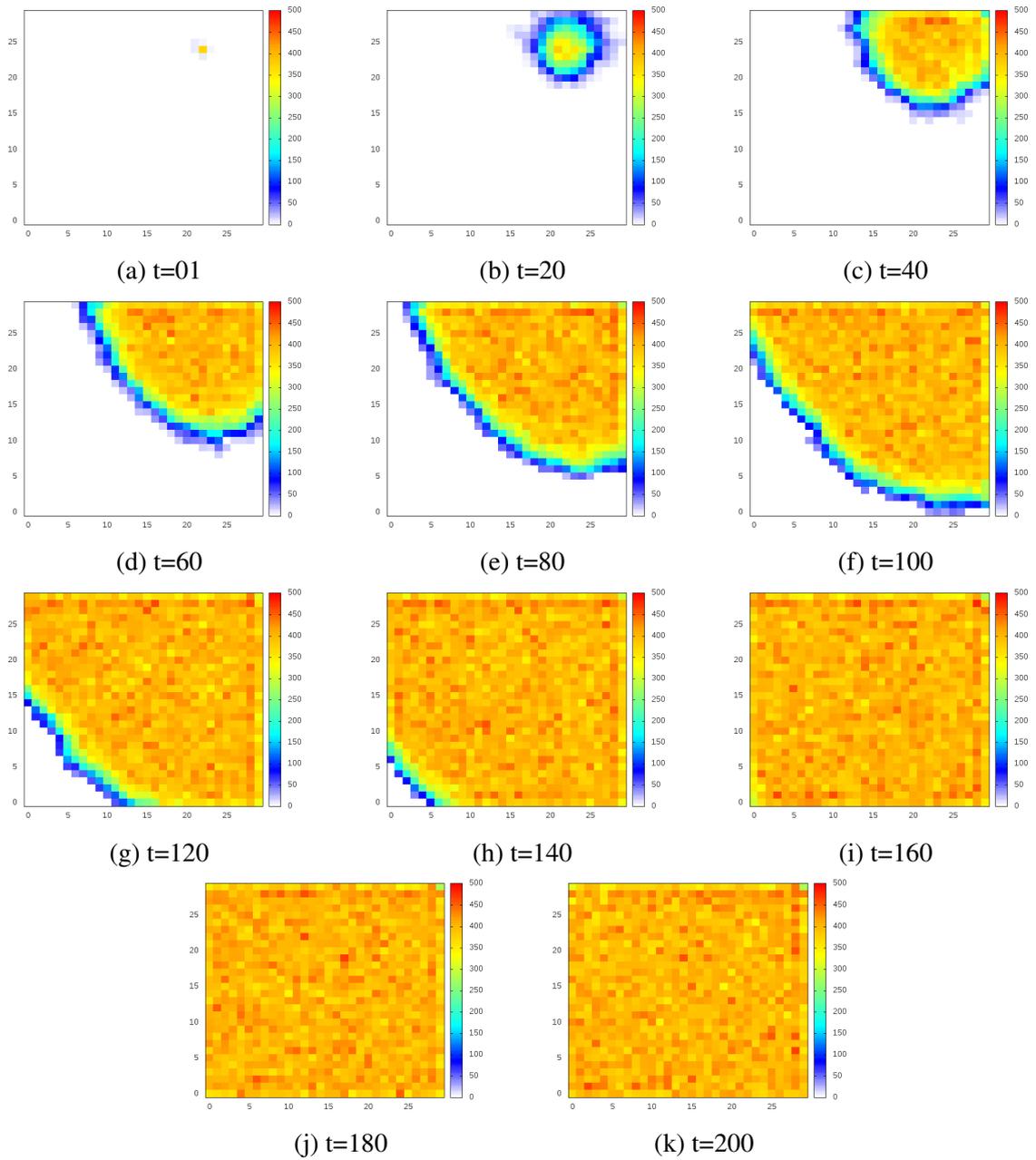
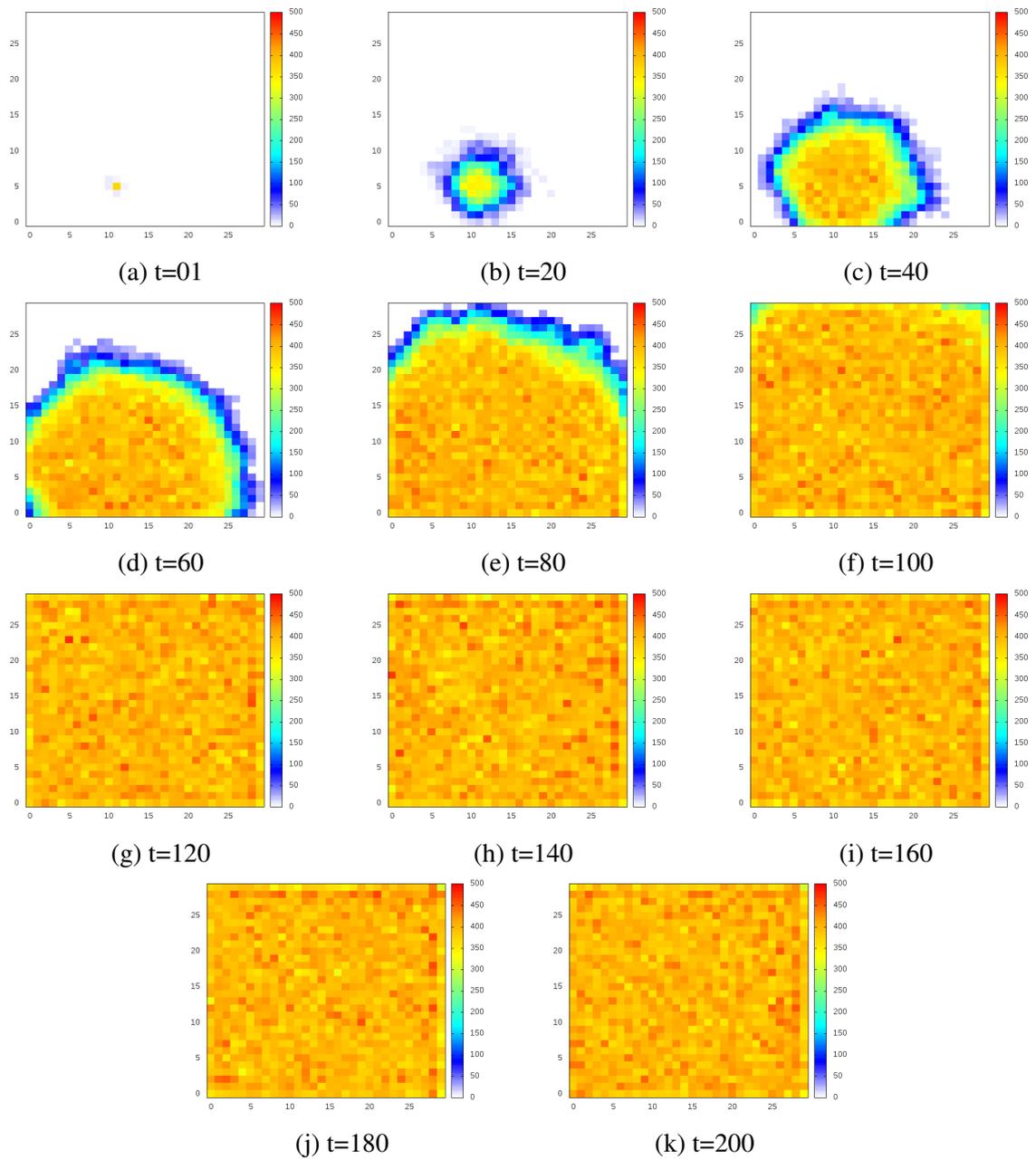


Figura 5.14 – Evolução temporal da distribuição espacial do pulgão com população inicial localizada na linha 5 e coluna 11 da rede 30×30 ($\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,1$).

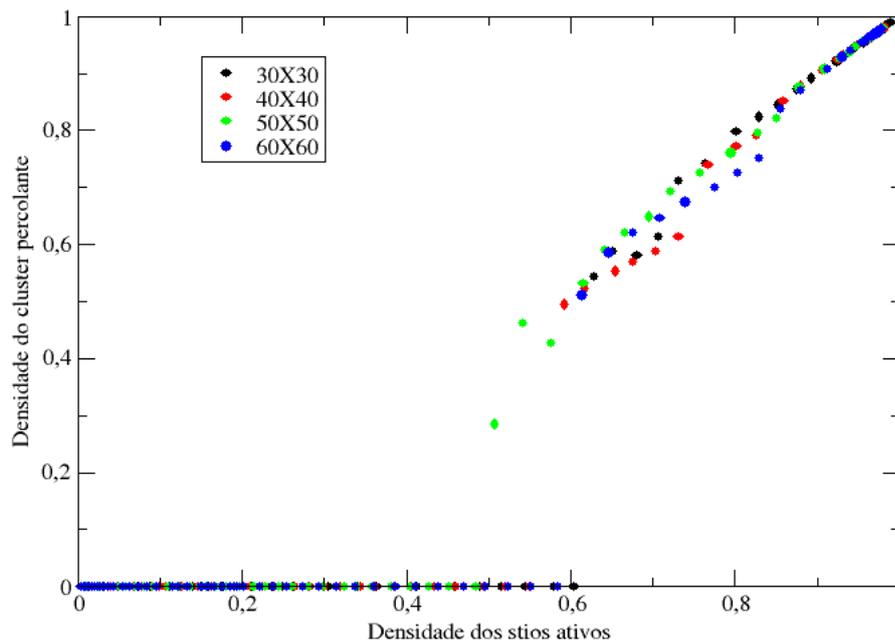


5.1.2 Com formação de alados

5.1.2.1 População inicial localizada num sítio central da rede:

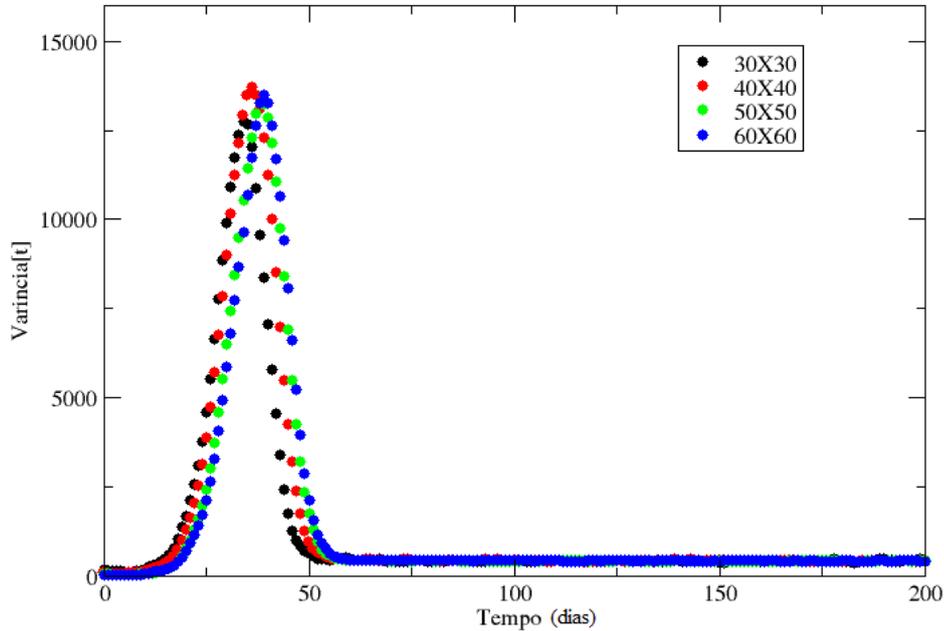
Na Figura 5.15 tem-se a densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos para diferentes dimensões de redes, fixando-se a probabilidade de dispersão do áptero em $\alpha_1 = 0,1$ e do alado em $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Nota-se que a curva após o limiar de percolação não tem mais o comportamento linear observado na dinâmica sem alados (reta com coeficiente angular igual a um). As densidades de sítios ativos no momento em que houve percolação estão em torno de 0,6 e 0,5, valores um pouco menores comparados aos da dinâmica sem alados. As densidades foram 0,6289 (30×30), 0,5925 (40×40), 0,5076 (50×50) e 0,6133 (60×60).

Figura 5.15 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos da dinâmica sem ciclo fenológico e com produção de formas aladas ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$) em diferentes tamanhos de rede. Curvas correspondentes a uma única simulação por rede.



A variância populacional em função do tempo possui o mesmo comportamento da variância na dinâmica sem alado no que se refere à monotonicidade. No entanto, os valores máximos em que ela ocorre estão bem próximos para os diferentes tamanhos de rede (Figura 5.16), ao contrário do observado na dinâmica sem alado. Os tempos para ocorrência da percolação também são muito próximos: 38 (30×30), 40 (40×40), 40 (50×50) e 44 (60×60), diferente do observado na dinâmica sem alado.

Figura 5.16 – Variância em função do tempo sem ciclo fenológico e com produção de formas aladas ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$) em diferentes tamanhos de rede. Curvas correspondentes a uma única simulação por rede.



Na Figura 5.17 são apresentados os valores médios dos tempos necessários para ocorrência da máxima variância e da percolação, assim como os valores médios das densidades no momento da percolação com seus respectivos ajustes, para diferentes dimensões de rede e parâmetros $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Os valores médios foram calculados sobre 15 simulações para cada dimensão de rede. Observa-se que os tempos médios necessários para ocorrência de percolação e máxima variância aumentam linearmente com a dimensão da rede. No entanto, as densidades de sítios ativos no momento da percolação não apresentaram diferenças significativas quando considerou-se diferentes dimensões da rede (Figura 5.18). O mesmo comportamento para as variáveis de interesse foi verificado na dinâmica sem alado.

Figura 5.17 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a) e dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) em função das diferentes dimensões de rede (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$ (rede 30×30). Dinâmica sem ciclo fenológico e com a presença de indivíduos alados.

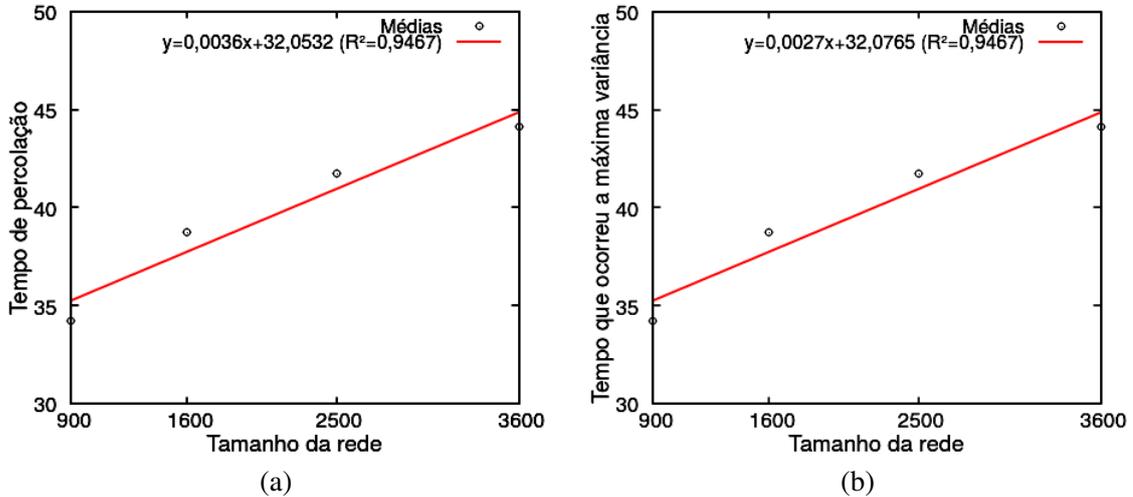
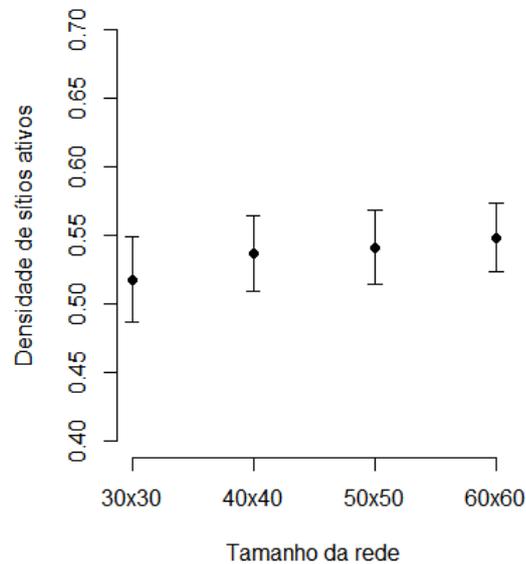


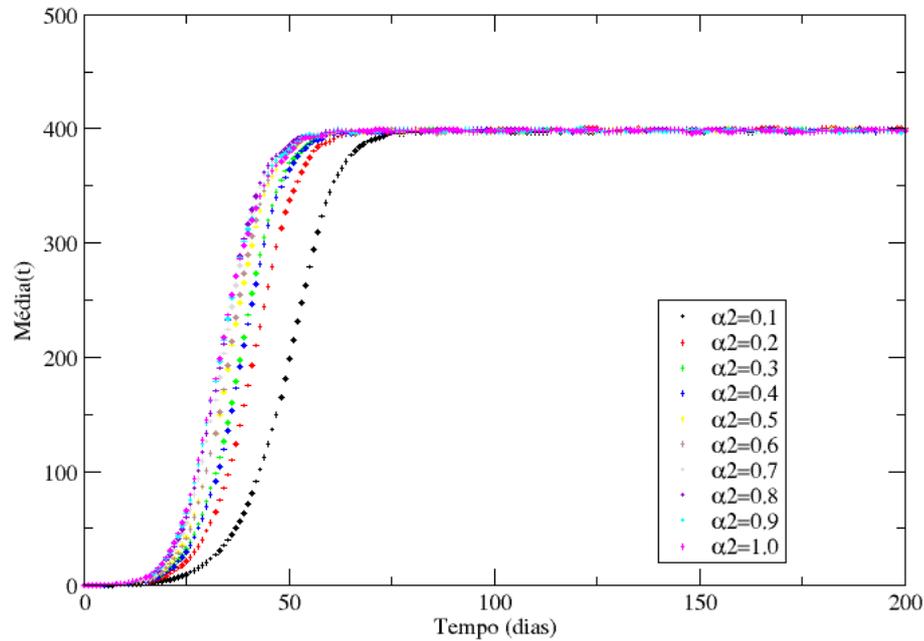
Figura 5.18 – Densidade média de sítios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (círculo) com respectivo intervalo a 95% de confiança (barras) para diferentes dimensões de rede ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$). Dinâmica sem ciclo e com alados.



A evolução da média populacional em função do tempo variando-se α_2 na rede de dimensão 30×30 , com $\alpha_1 = 0,1$ e $\chi = 0,1$ apresenta-se na Figura 5.19. De acordo com o aumento na probabilidade de dispersão do alado o tempo necessário para que a média populacional se estabilize é bem menor se comparado à dinâmica sem produção de formas aladas.

Na Figura 5.20 são apresentadas as curvas de densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos na rede 30×30 para diferentes valores de α_2 , com $\alpha_1 = 0,1$ e

Figura 5.19 – Evolução temporal da média populacional de pulgões em função do tempo na rede 30×30 , para diferentes probabilidades de migração do alado ($\alpha_1 = 0.1$ e $\chi = 0,9$). Gráficos correspondentes a uma única simulação por rede.



$\chi = 0,9$. Em todos os casos, observa-se que a densidade de sítios ativos no momento em que a percolação tem início está em torno de 0,5 e 0,6. Os valores de densidade crítica encontrados nas simulações apresentaram valor máximo em $\alpha_2 = 0,1$ (0,639) e mínimo em $\alpha_2 = 1,0$ (0,482) (Tabela 5.7).

Na Tabela 5.7 são apresentados também os tempos necessários para que a percolação tenha início para diferentes valores de α_2 . Para a probabilidade mais baixa de dispersão do alado ($\alpha_2 = 0,1$), o tempo que leva para percolar é de 54 dias, o qual corresponde ao tempo para percolação quando $\alpha_1 = 0,6$ na dinâmica sem formação de alados (Tabela 5.2). A presença de alados proporciona a colonização de sítios vazios distantes do ponto inicial, contribuindo para a formação de novos clusters, o que contribui para que a percolação aconteça mais rapidamente.

Ainda na Tabela 5.7 são apresentados os tempos necessários para ocorrência de máxima variância para diferentes valores de α_2 , dados referentes a uma única simulação. Os tempos de percolação decaem com o aumento de α_2 e a partir de $\alpha_2 = 0,5$ os valores do tempo parecem se estabilizar. Já na Figura 5.21b, observa-se também a influência da probabilidade de migração do alado nos valores médios dos tempos de ocorrência da máxima variância sobre 15 simulações, que decaem em função de α_2 , no entanto, observa-se um aumento no tempo médio à partir de $\alpha_2 = 0,8$. Além disto, verifica-se que para valores de α_2 superiores a 0,7, o tempo necessário para percolação (Figura 5.21a) é inferior ao tempo necessário para ocorrência de má-

xima variância. Este comportamento é diferente do observado para a dinâmica sem formação de alado.

Figura 5.20 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos variando a probabilidade de migração do alado (α_2) ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).

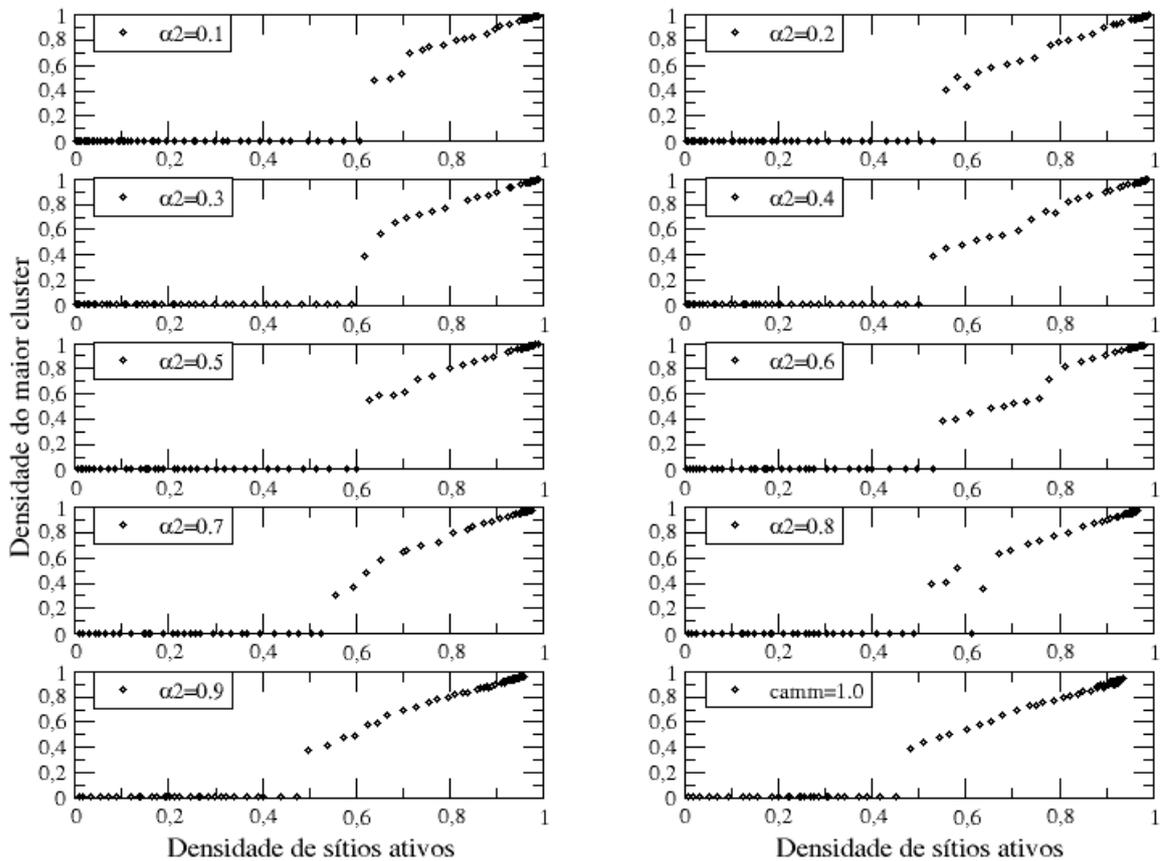
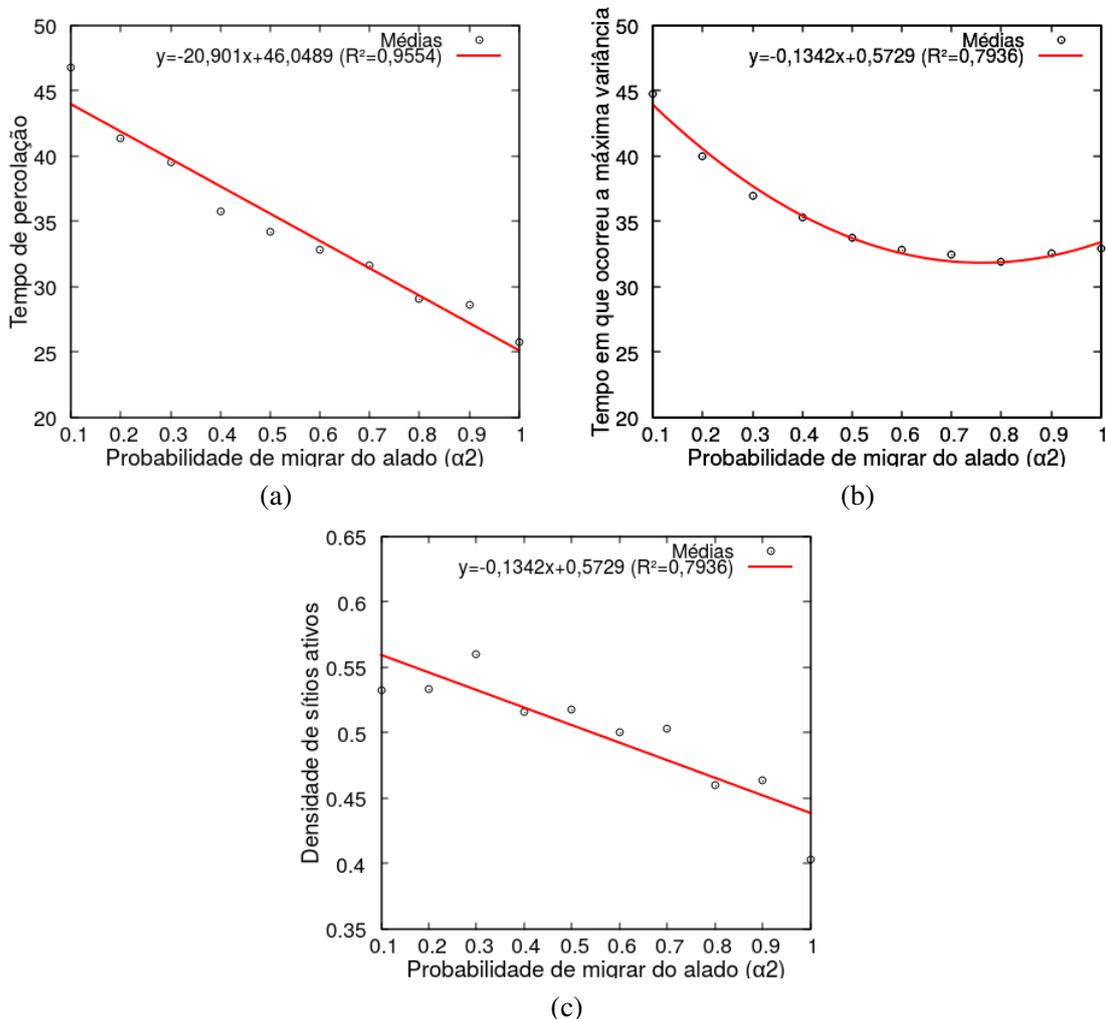


Tabela 5.7 – Etapas temporais que ocorreram a máxima variância, percolação e valores das densidades no momento da percolação para diferentes probabilidades de migração do alado ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).

α_2	Máxima variância	Momento da percolação	Densidade
0,1	48	54	0,639
0,2	40	42	0,560
0,3	37	41	0,618
0,4	37	38	0,530
0,5	34	38	0,629
0,6	34	35	0,551
0,7	32	34	0,559
0,8	32	32	0,529
0,9	33	30	0,498
1,0	34	29	0,482

Na Figura 5.21a são apresentados os valores médios do tempo necessário para ocorrência da percolação na rede 30×30 para diferentes valores de α_2 com $\alpha_1 = 0,1$ e $\chi = 0,9$. Verifica-se que os valores médios para o tempo de percolação diminuem linearmente em função de α_2 , bem como os valores médios das densidades críticas de sítios ativos no momento da percolação (Figura 5.21c).

Figura 5.21 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a), dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) e densidades médias de sítios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (c) em função da probabilidade de migrar do alado (α_2) (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Dinâmica sem ciclo fenológico e com a presença de indivíduos alados.



O número de sítios ativos tende a aumentar em relação ao tempo, e então estabiliza-se ao redor de um valor constante alguns dias após o início da percolação, para todas as probabilidades de migração do alado (α_2) (Figura 5.22). O mesmo ocorre com o tamanho do maior cluster em relação ao tempo (Figura 5.23), que se estabiliza bem próximo do número de sítios

ativos. Isto indica que o maior cluster chega a abranger uma grande parte dos sítios ativos, mas não todos, como ocorre na dinâmica sem alados.

Figura 5.22 – Número de sítios ativos em função do tempo variando a probabilidade de migração do alado (α_2) ($\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$).

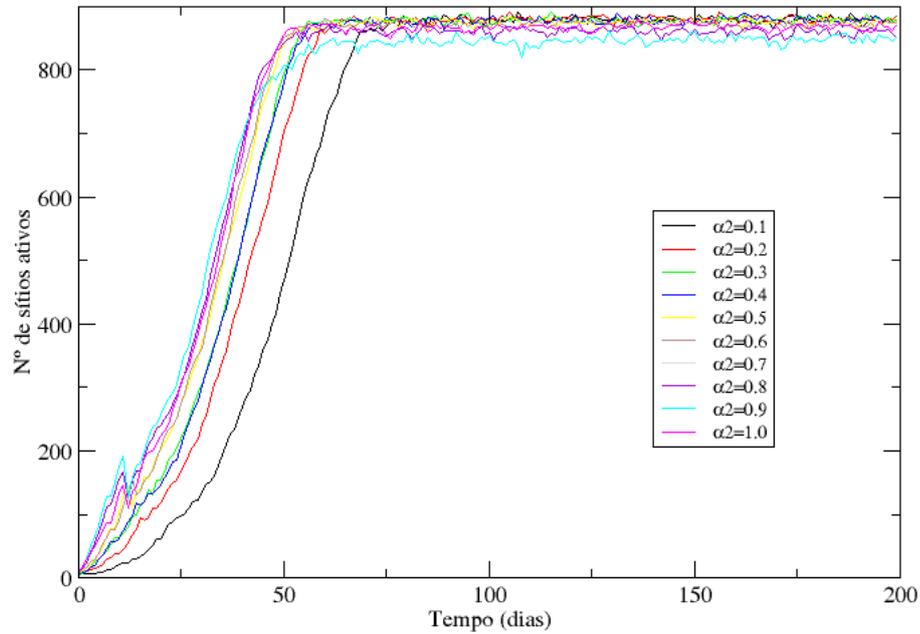
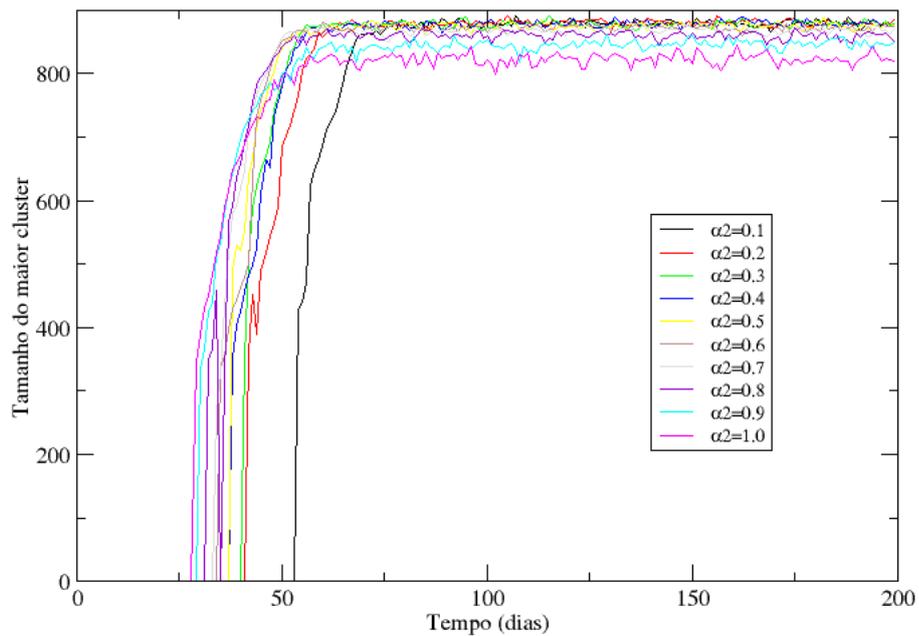


Figura 5.23 – Tamanho do maior cluster em função do tempo variando a probabilidade de migração do alado (Rede 30×30 , α_2) ($\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$). Curvas correspondentes a uma única simulação para a rede.



Observa-se na Figura 5.24 que o número de clusters tem um aumento inicial em função do tempo, que se dá pelo crescimento da população. À medida que o tempo passa, os sítios vão

se conectando e os clusters começam a aumentar de tamanho, então ocorre a percolação e esse número tem uma queda, estabilizando-se em um valor baixo.

Os valores médios obtidos nas últimas 125 etapas temporais, do tempo de percolação e da máxima variância, assim como da densidade de sítios ativos no momento da percolação, podem ser vistos na tabela 5.8. Observa-se que o número médio de sítios ativos e o tamanho médio do maior cluster decaem com o aumento da probabilidade de dispersão do alado a partir de $\alpha_2 = 0,5$. Com o aumento da probabilidade de dispersão do alado (α_2) o número médio de clusters cresce.

Figura 5.24 – Número de clusters em função do tempo variando a probabilidade de migração do alado (α_2) ($\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$).

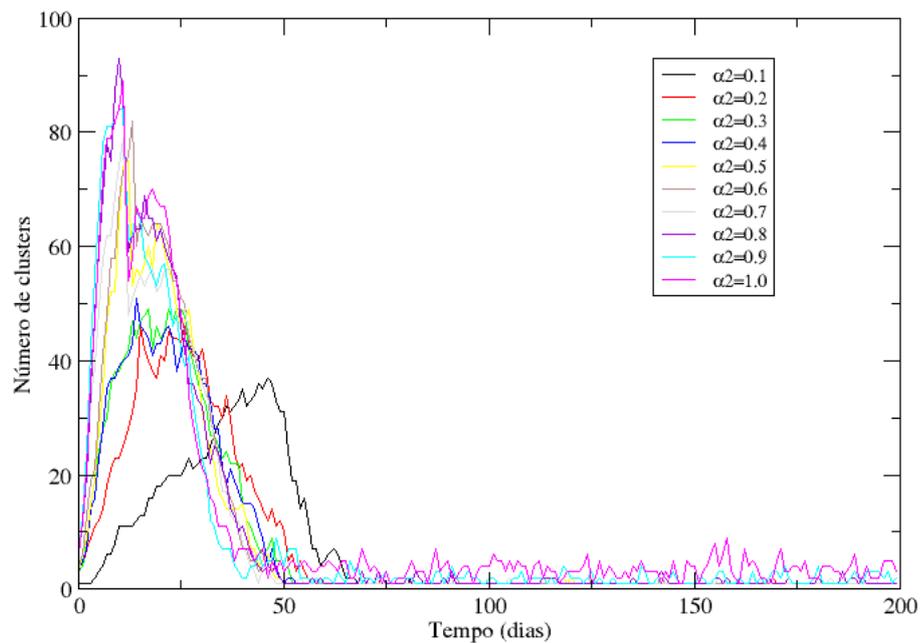


Tabela 5.8 – Número médio de sítios ativos, tamanho médio do maior cluster e número máximo de clusters para diferentes probabilidades de migração do alado nas últimas 125 etapas temporais (Rede 30×30 , $\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$).

α_2	Número de sítios ativos	Tamanho do maior cluster	Nº máximo de clusters
0,1	$879,04 \pm 0,8312$	$879,41 \pm 0,7556$	37
0,2	$879,77 \pm 0,7666$	$879,77 \pm 0,7686$	46
0,3	$878,78 \pm 0,7356$	$878,77 \pm 0,7355$	49
0,4	$878,95 \pm 0,7751$	$878,94 \pm 0,7726$	51
0,5	$877,08 \pm 0,8455$	$877,08 \pm 0,8455$	75
0,6	$875,22 \pm 0,9617$	$875,21 \pm 0,9605$	82
0,7	$872,80 \pm 1,2423$	$872,71 \pm 1,2630$	79
0,8	$867,46 \pm 1,8905$	$867,33 \pm 1,9182$	93
0,9	$860,59 \pm 2,7993$	$859,97 \pm 2,8967$	84
1,0	$848,36 \pm 4,4863$	$845,59 \pm 4,9333$	89

Nas Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam-se a distribuição espacial em diferentes etapas temporais (antes, durante e após a percolação) para as probabilidades de migração do alado $\alpha_2 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.5$ e $\alpha_2 = 0.9$, respectivamente, com $\alpha_1 = 0.1$ e $\chi = 0.9$. Observa-se a formação de clusters isolados em diferentes pontos da rede, devido a possibilidade de colonização de qualquer sítio pelo pulgão alado. Comparando-se as distribuições espaciais em $t=150$ para os três valores de α_2 , verifica-se que à medida que α_2 aumenta, surgem mais sítios não ativos. Portanto, o aumento de α_2 favorece a mudança de “status” dos sítios, passando de ativo para não ativo, e vice-versa.

Figura 5.25 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0.1$ e $\chi = 0,9$

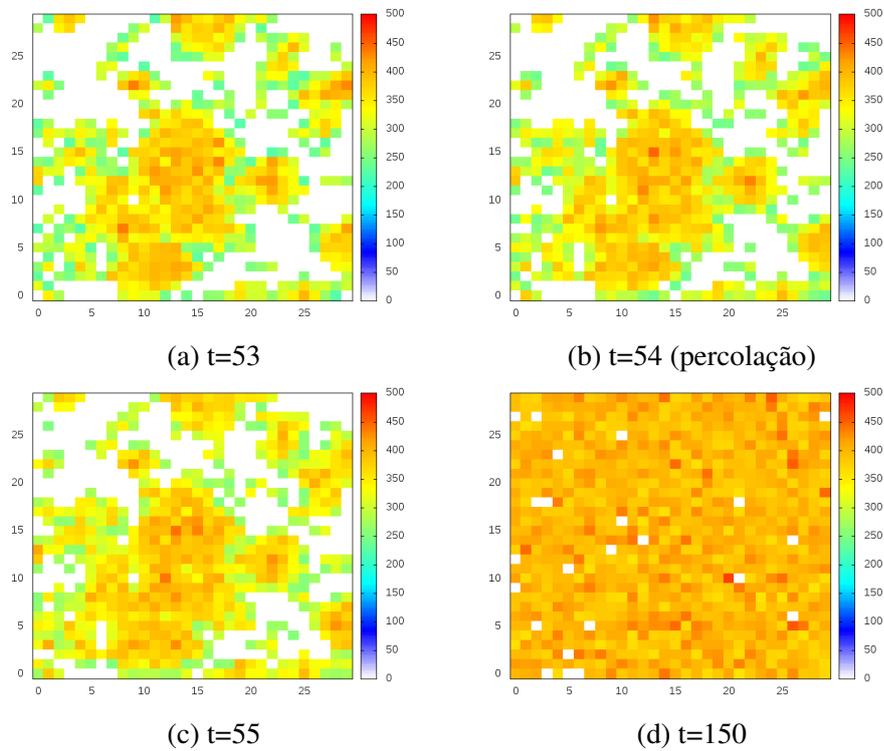


Figura 5.26 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0.5$ e $\chi = 0,9$

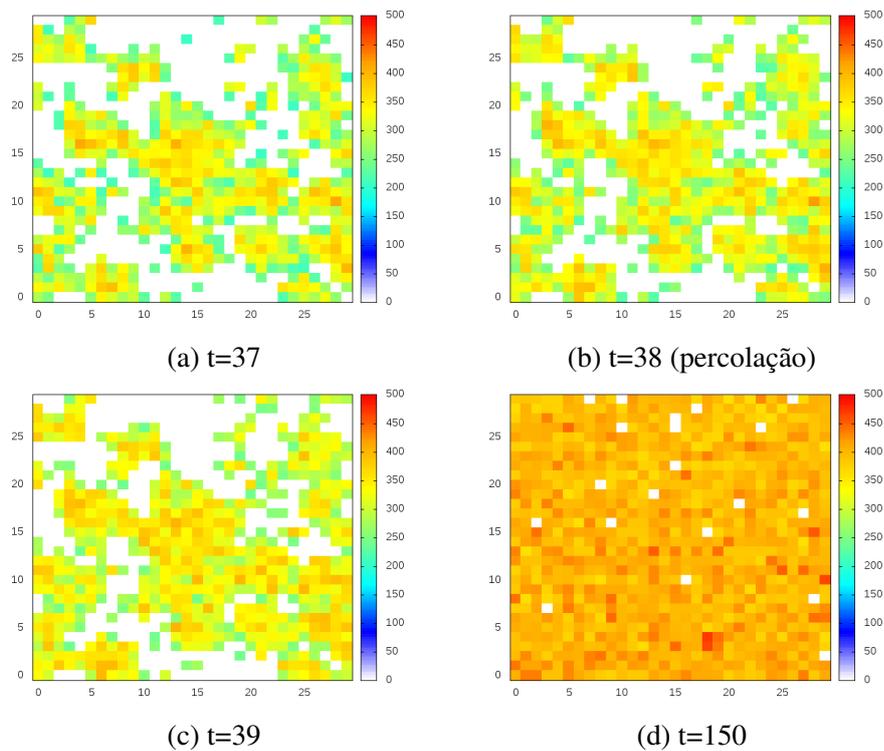
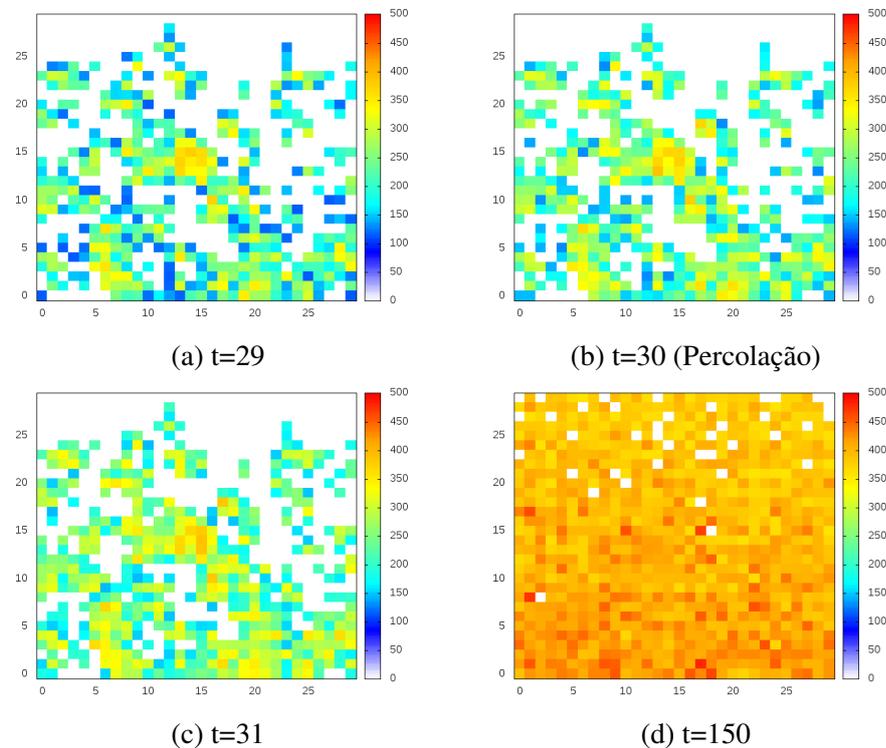


Figura 5.27 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0,9$ e $\chi = 0,9$



5.1.2.2 Influência da localização espacial inicial dos pulgões nas variáveis: tempo de percolação, máxima variância e Densidade de percolação

Na rede 30×30 com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$ foram consideradas cinco diferentes localizações iniciais para a população de pulgões. Na tabela 5.9 tem-se um resumo da análise de variância para o tempo de percolação, tempo em que ocorreu a máxima variância e a densidade de sítios ativos no momento da percolação. Verifica-se que não houve efeito significativo da localização inicial dos pulgões em todas as variáveis analisadas.

Tabela 5.9 – Análise de variância contendo as fontes de variação (FV), números de graus de liberdade (GL), valores de quadrados médios e respectivas significâncias do teste F.

Fonte de Variação	GL	Variáveis		
		Percolação	Máx. Variância	Densidade
Localização inicial	4	7.3600 ^{NS}	0,5400 ^{NS}	0,0068 ^{NS}
Erro	20	4,86	1,10	0,0042
CV%		0,54	2,91	14,5

NS - Não significativo pelo teste F.

Os pressupostos da análise de variância foram atendidos para todas as variáveis analisadas, como pode-se observar pelas estatísticas e valor-p dos testes de normalidade, homogeneidade da variância e independência dos erros apresentados na Tabela 5.10. Ao nível de 5% de significância as amostras provêm de uma população normal, as variâncias são iguais e os resíduos são independentes. Segundo Banzatto e Kronka (2006), a análise de variância e as conclusões dela tiradas são válidas.

Tabela 5.10 – Estimativas e respectivos valor-p dos teste de normalidade (Shapiro -Wilk), homogeneidade de variância (Bartlett) e independência (Durbin-Watson) para Percolação, Tempo que ocorreu a variância máxima, e Densidade que ocorreu a percolação.

Variáveis	Shapiro-Wilk		Barlet		Durbin-Watson	
	W	valor-p	B	valor-p	DW	valor-p
Percolação	0,9834	0,9425	6,4971	0,1650	2,9160	0,098
Max. Variância	0,9677	0,5875	3,5868	0,4648	2,8164	0,166
Densidade	0,9473	0,2172	8,4569	0,0762	2,8294	0,126

Portanto, quando há a presença do pulgão alado na dinâmica, a localização inicial da população na rede não possui influência significativa nas variáveis analisadas, ou seja, a localização inicial da população não causa nenhum impacto significativo no processo de infestação da praga na plantação.

Nas Figuras 5.28 e 5.29, encontra-se a evolução temporal da distribuição espacial com a presença de alados na dinâmica, com população inicial nas coordenadas (24,22) e (5,11), respectivamente. Nota-se que existe diferença apenas nas primeiras etapas temporais referentes somente às diferentes localizações iniciais em que a dinâmica se inicia, mas o padrão de distribuição é semelhante, em que nas etapas temporais iniciais apresenta aglomerados maiores próximo ao local onde se iniciou a dinâmica, mas a medida que o tempo passa eles se distribuem para toda a rede.

Figura 5.28 – Evolução temporal da distribuição espacial do pulgão com população inicial localizada na linha 24 e coluna 22 da rede. ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$).

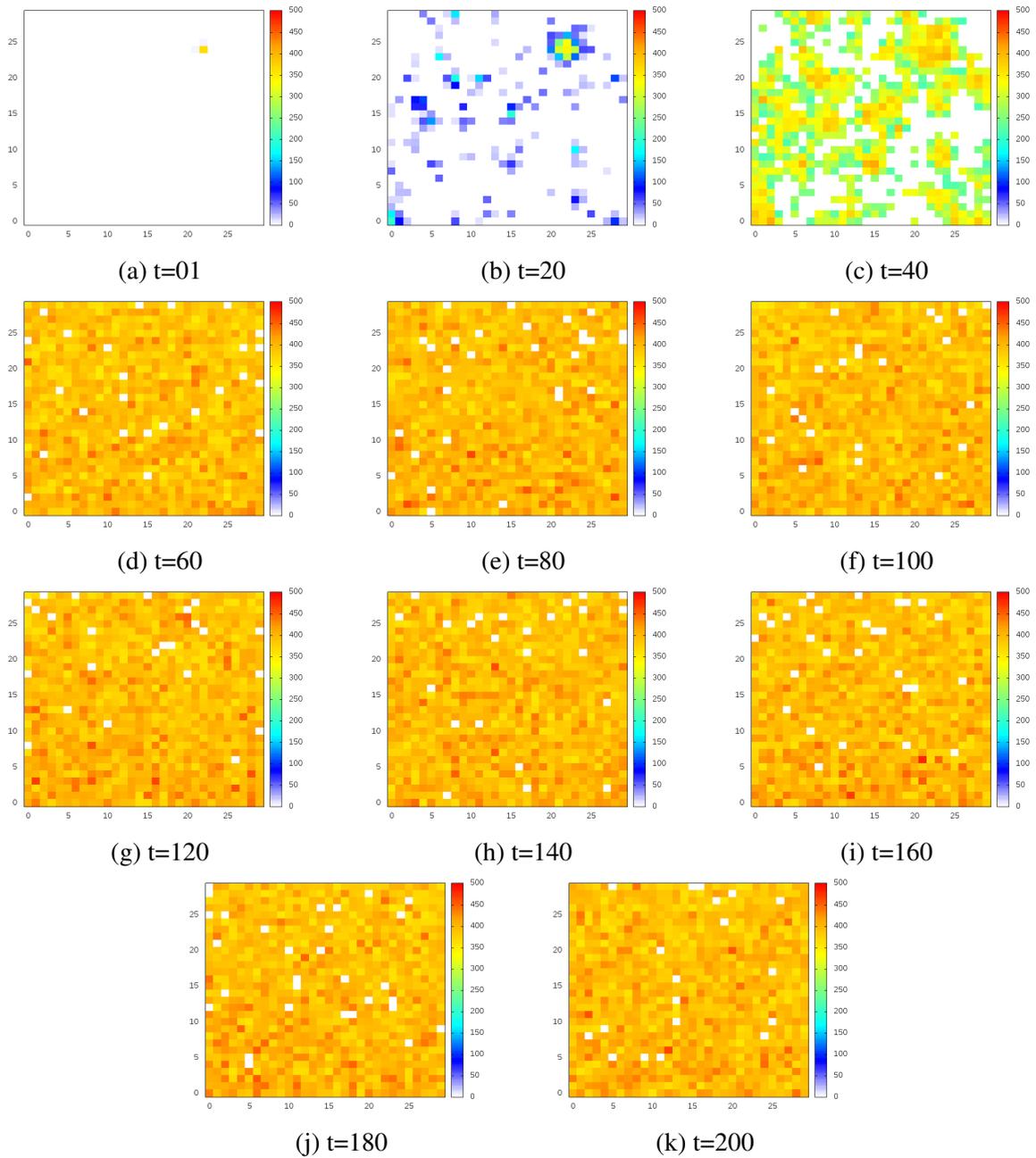
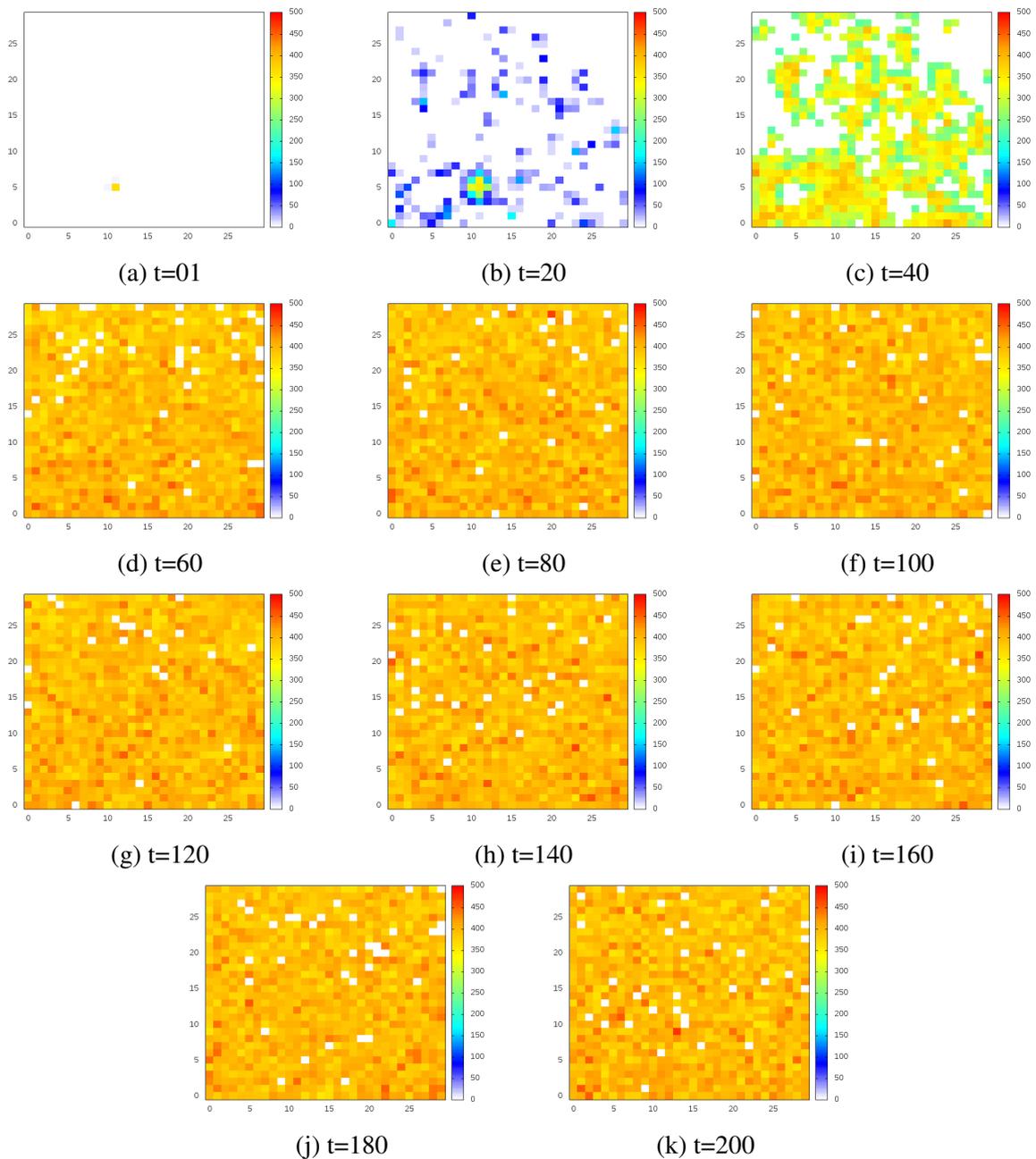


Figura 5.29 – Evolução temporal da distribuição espacial do pulgão com população inicial localizada na linha 5 e coluna 11 da rede. ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$).



5.2 Dinâmica com ciclo fenológico do algodoeiro

A seguir apresentam-se os resultados referentes à dinâmica em que a capacidade de suporte do algodoeiro muda com o tempo de acordo com o seu ciclo fenológico. Nesta dinâmica foram considerados cenários com e sem a formação de alados. Nestes cenários estudou-se a influência da localização espacial da população inicial de pulgões sobre as variáveis de interesse. Foram realizadas simulações considerando-se diferentes tamanhos de rede: 30×30 , 40×40 ,

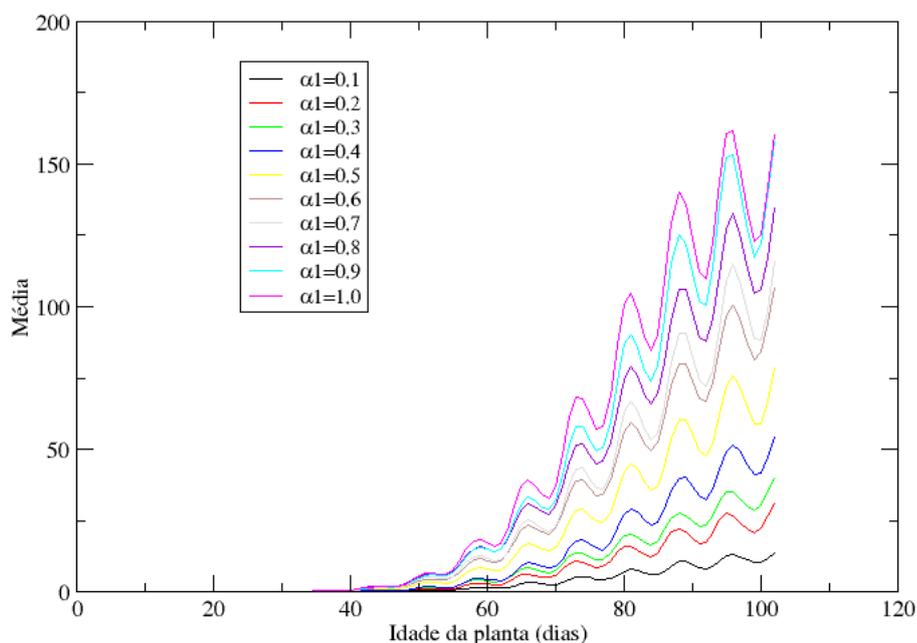
50×50 e 60×60. Porém, a maior parte dos resultados apresentados foram gerados a partir da rede 30×30.

5.2.1 Sem formação de alados

5.2.1.1 População localizada num sítio central da rede

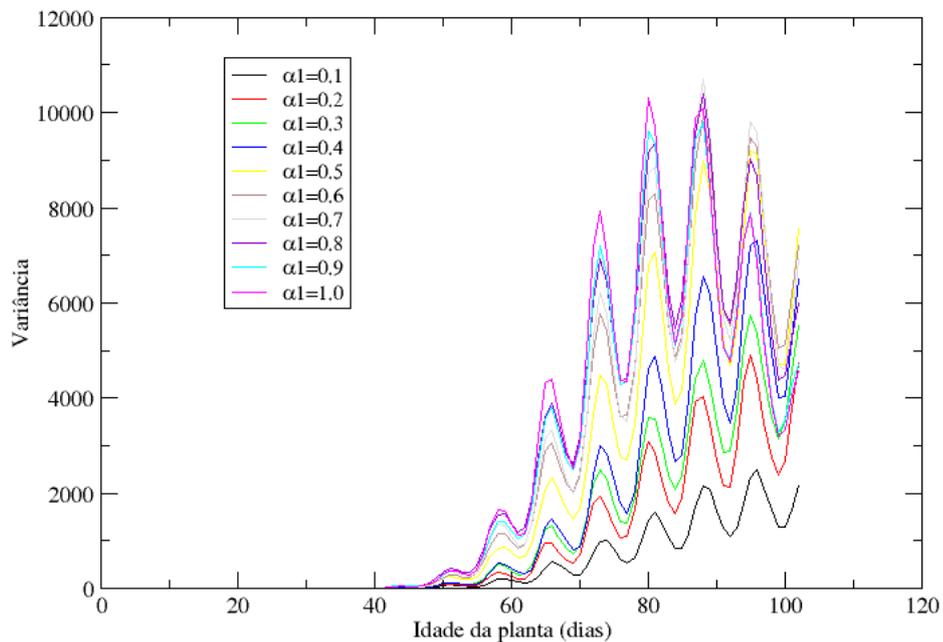
Na Figura 5.30 encontra-se a média populacional durante o ciclo de folhagem do algodoeiro na rede 30×30 para diferentes valores de α_1 e $\chi = 0,9$. Nota-se um aumento da média populacional do pulgão com o aumento da probabilidade de dispersão do áptero, devido a maior possibilidade de colonização de novas plantas. A média populacional apresenta uma sazonalidade não observada na dinâmica sem ciclo fenológico do algodoeiro. O comportamento sazonal também é observado na variância (Fig. 5.31), cujos valores em cada etapa temporal também aumentam com α_1 . Esse comportamento é efeito de populações pequenas, uma vez que a capacidade de carga do ambiente no período anterior à migração correspondeu ao da planta aos 17 dias de idade.

Figura 5.30 – Média populacional de pulgões durante o ciclo fenológico do algodoeiro na rede 30×30 sem a presença de alados, para diferentes valores de α_1 e $\chi = 0,9$. Curvas referente a uma única simulação.



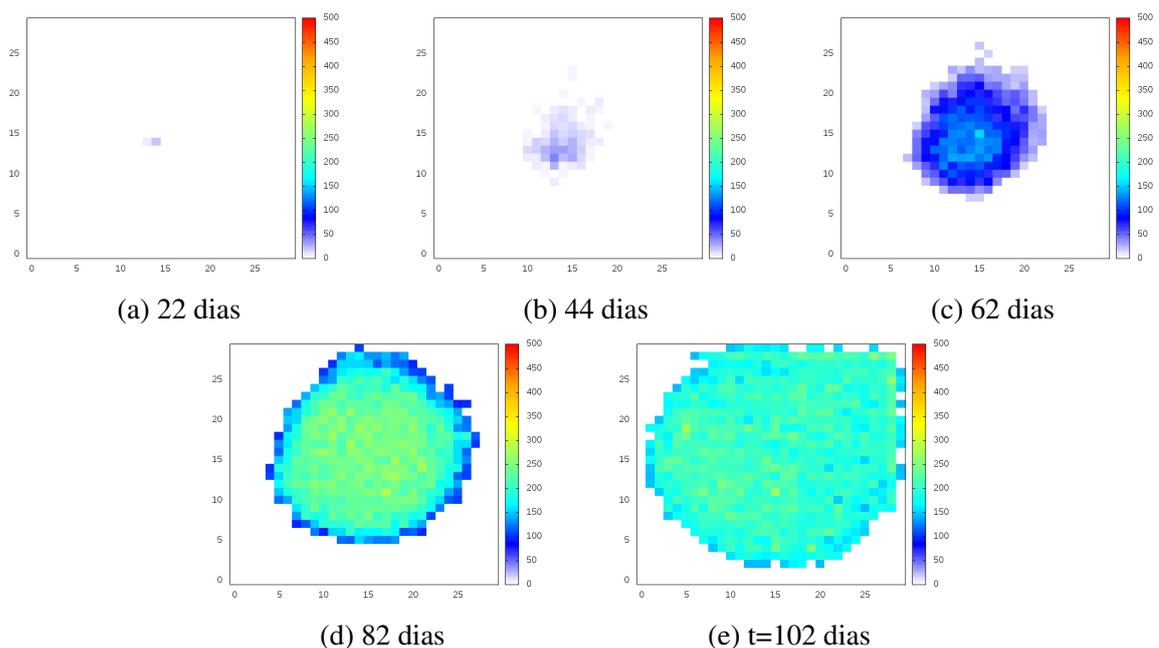
Na figura 5.32 tem-se a distribuição espacial do pulgão na rede 30×30 em diferentes idades da planta para 100% de probabilidade de dispersão do áptero. Mesmo para o mais alto valor de α_1 a população não atingiu os extremos da rede até a última etapa temporal do

Figura 5.31 – Variância populacional no ciclo fenológico do algodoeiro na rede 30×30 sem a presença de alados, para diferentes valores de α_1 e $\chi = 0,9$. Curvas referentes a uma única simulação.



ciclo ($t = 86$ dias), correspondente à idade de 102 dias do algodoeiro (Figura 5.32e), embora a densidade de sítios ativos tenha atingido o valor 0,713. Para todas as dimensões de redes utilizadas os pulgões não atingiram os extremos da rede nos 86 últimos dias referentes ao ciclo fenológico da planta, mesmo para altas probabilidades de dispersão dos pulgões ápteros.

Figura 5.32 – Distribuição espacial do pulgão, na rede 30×30 , em diferentes idades do algodoeiro, na dinâmica com ciclo fenológico e sem alados ($\alpha_1 = 1,0$ e $\chi = 0,9$).



5.2.2 Com formação de alados

5.2.2.1 População localizada num sítio central da rede

Com a formação de alados houve percolação já no final do ciclo fenológico do algodoeiro. Na rede 40×40 a percolação aconteceu na idade de 88 dias, em uma densidade populacional de 0,4731; na rede 50×50 percolou um pouco mais tarde, na idade de 100 dias e com uma densidade de 0,5932 e, por fim, para a rede 60×60 ocorreu na idade de 95 dias, com densidade 0,4928.

Na Figura 5.33 são apresentados valores médios das idades do algodoeiro em que ocorreram a máxima variância e a percolação, assim como os valores médios das densidades de sítios ativos na idade correspondente à ocorrência da percolação com seus respectivos intervalos de confiança, para diferentes dimensões de rede e parâmetros $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Os valores médios foram obtidos a partir de 15 simulações realizadas para cada rede. Observe-se que as idades médias de ocorrência da percolação e máxima variância estão bem próximos e ambas aumentam linearmente em função do tamanho da rede. Já a densidade crítica de sítios ativos no momento da percolação não apresentam diferenças significativas.

Figura 5.33 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a) e dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) em função das diferentes dimensões de rede (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$ (rede 30×30). Dinâmica com ciclo fenológico e com a presença de indivíduos alados.

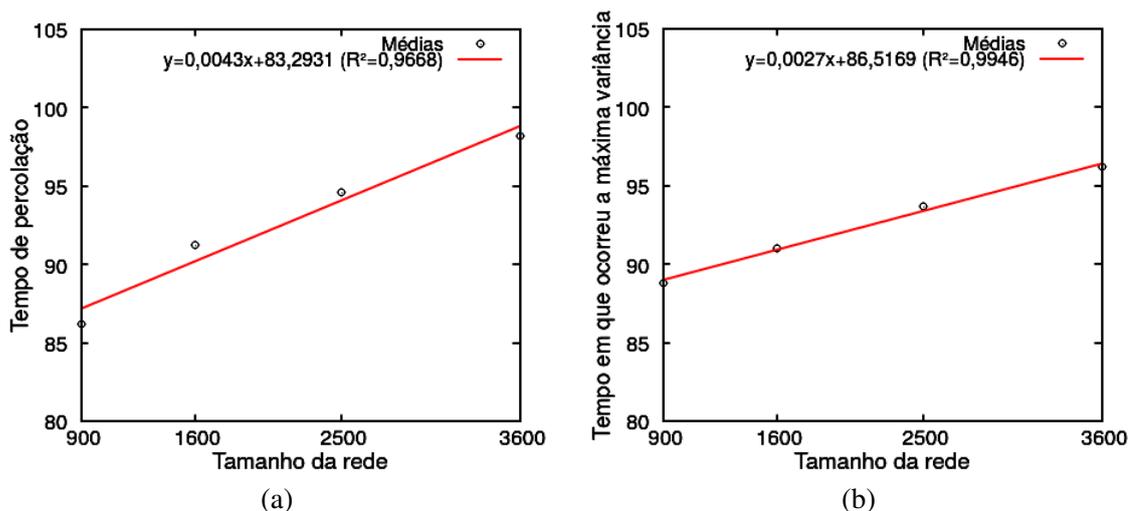


Figura 5.35 apresenta-se a média populacional na rede 30×30 com $\alpha_1 = 0,1$, $\chi = 0,9$ e diferentes valores de α_2 . A presença de pulgão alado na dinâmica influencia na média populacional que atinge valores mais altos comparados à dinâmica com ciclo e sem formação de alados. As oscilações observadas no cenário anterior permanecem.

Figura 5.34 – Densidade média de sítios ativos nas idades correspondentes à ocorrência de percolação (círculo) com respectivo intervalo a 95% de confiança (barras) para diferentes tamanhos de rede. Dinâmica com ciclo e com a presença de alados ($\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\chi = 0,9$).

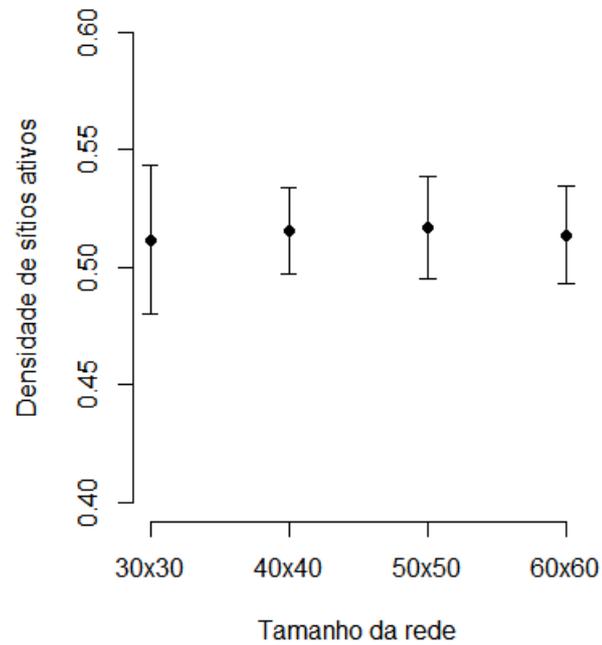
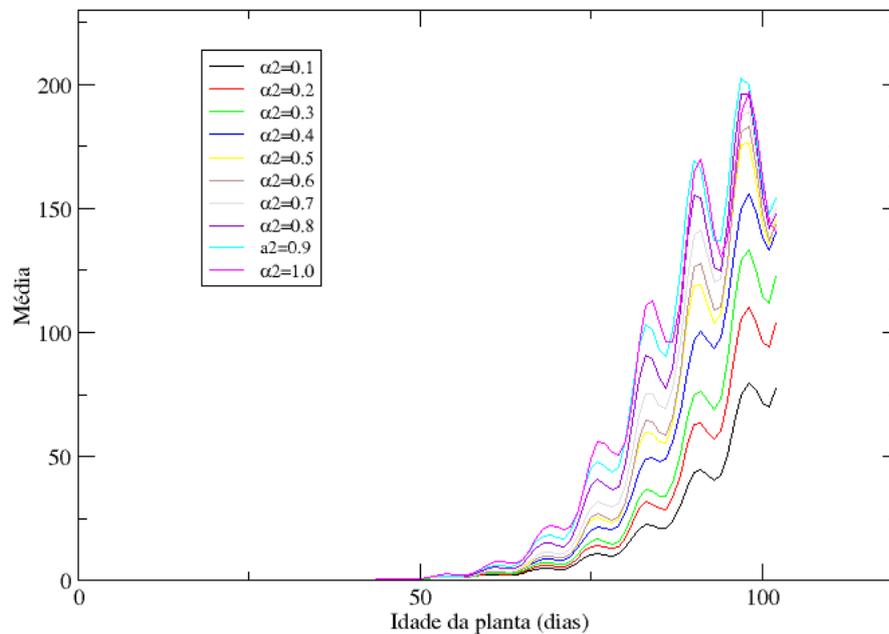
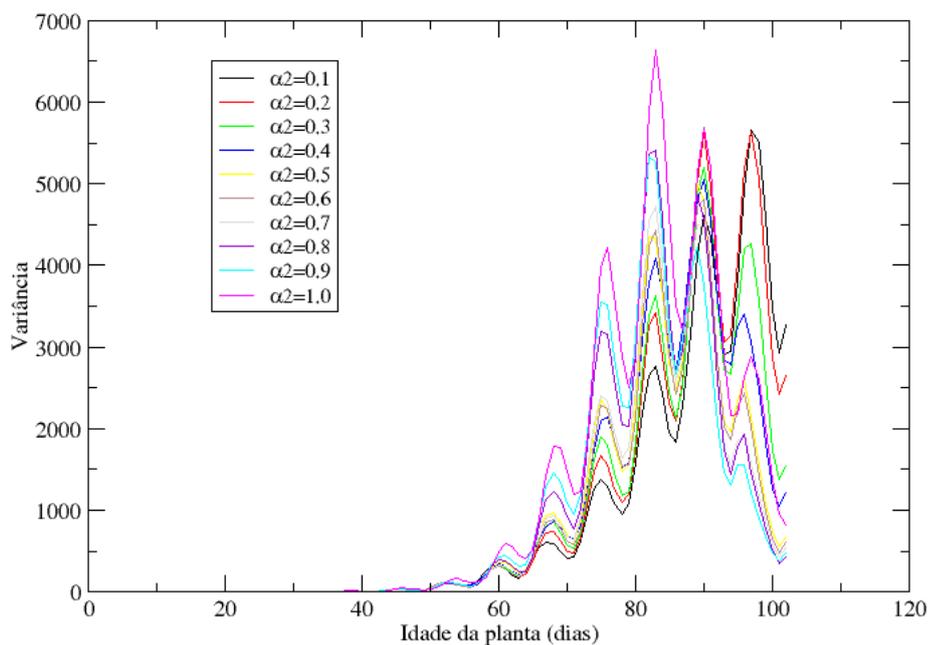


Figura 5.35 – Média populacional correspondentes às idades do algodoeiro no ciclo fenológico na rede 30×30 com a presença de alados ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).



A variância populacional atinge valores mais baixos, quando comparado à dinâmica com ciclo e sem formação de alados. O comportamento sazonal da variância continua sendo observado (Figura 5.36).

Figura 5.36 – Variância populacional correspondente às idades do algodoeiro no ciclo fenológico na rede 30×30 com a presença de alados ($\chi = 0,9$ e $\alpha_1 = 0,1$).



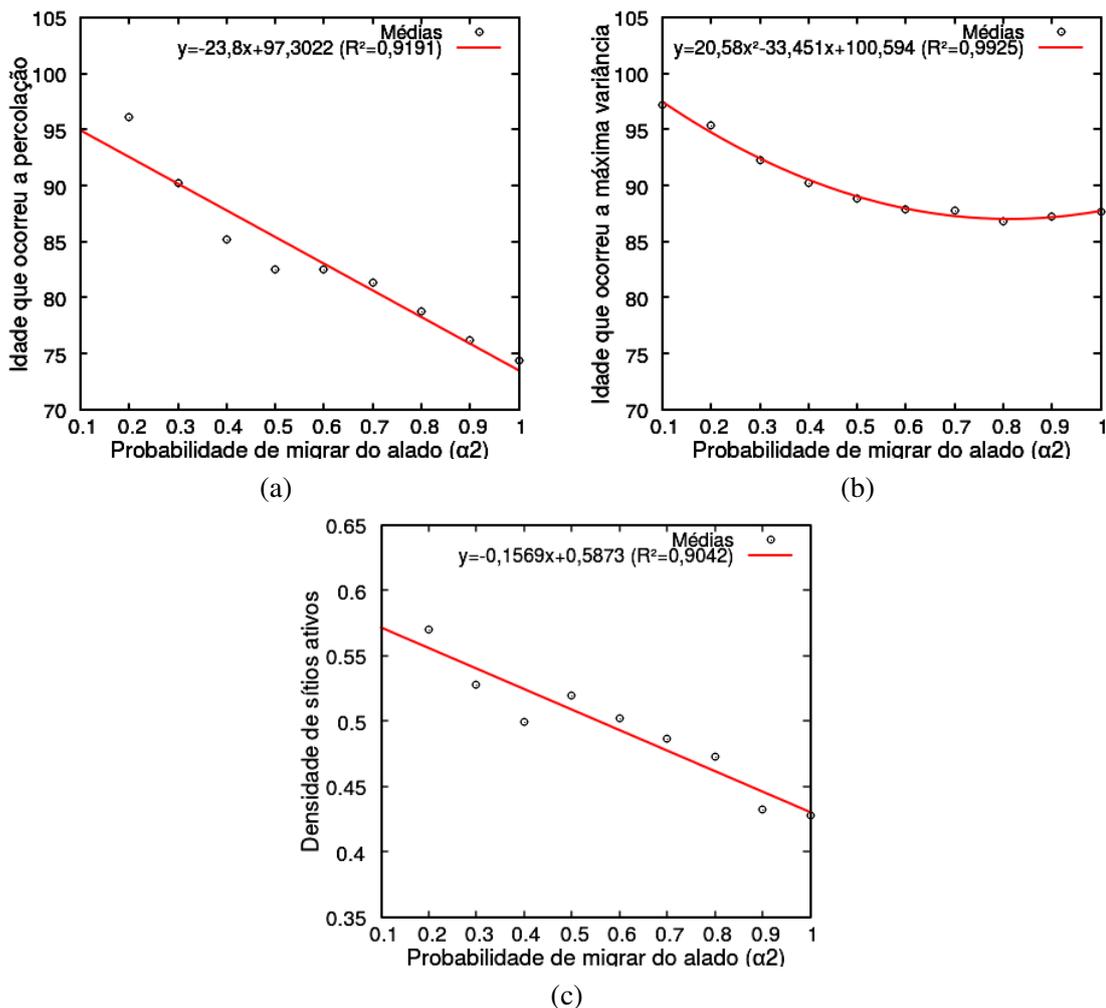
A percolação não ocorreu dentro do ciclo fenológico somente para $\alpha_2 = 0,1$. Para $\alpha_2 = 0,2$ e $\alpha_2 = 0,3$ a percolação ocorreu nas etapas temporais finais do ciclo fenológico, até 7 dias antes do seu término. Para valores de α_2 entre 0,4 e 0,7, os pulgões atingiram as extremidades da rede entre 10 e 15 dias antes do término do ciclo fenológico do algodoeiro. Por fim, para valores mais altos de α_2 (0,8; 0,9 e 1,0) a percolação aconteceu mais rapidamente, entre 17 e 25 dias antes do término do ciclo (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 – Idades do algodoeiro correspondentes aos momentos de ocorrência da máxima variância e da percolação, e valores das densidades no momento da percolação para diferentes probabilidades de migração do alado considerando o ciclo de folhagem do algodoeiro ($\alpha_1 = 0,1$ e $\chi = 0,9$).

α_2	Máxima variância	Percolação	Densidade
0.1	97	-	-
0.2	97	98	0.536
0.3	90	95	0.530
0.4	90	87	0.394
0.5	89	92	0.589
0.6	90	89	0.504
0.7	83	87	0.491
0.8	83	85	0.496
0.9	82	83	0.487
1.0	83	77	0.404

Na Figura 5.37a são apresentadas as idades médias do algodoeiro correspondentes à ocorrência de percolação na rede 30×30 para diferentes valores de α_2 , com $\alpha_1 = 0,1$ e $\chi = 0,9$. Verifica-se que os valores médios diminuem linearmente em função do aumento da probabilidade de dispersão do alado α_2 .

Figura 5.37 – Valores médios do tempo de ocorrência da percolação (a), dos tempos médios para ocorrência da máxima variância (b) e densidades médias de sítios ativos em que ocorreu a percolação pela primeira vez (c) em função da probabilidade de migrar do alado (α_2) (curva simulada e ajuste), com $\alpha_1 = 0,5$ e $\chi = 0,9$. Dinâmica sem ciclo fenológico e com a presença de indivíduos alados.



Os momentos de ocorrência da variância máxima estão bem próximos aos da ocorrência de percolação, entre 5 a 19 dias antes do final do ciclo fenológico, como pode-se observar na Tabela 5.11. Observa-se também um decaimento do momento em que acontece a variância máxima com o aumento de α_2 , no entanto, à partir de $\alpha_2 = 0,8$ volta a aumentar novamente. Este comportamento é observado para os valores médios do tempo sobre 15 simulações (Figura

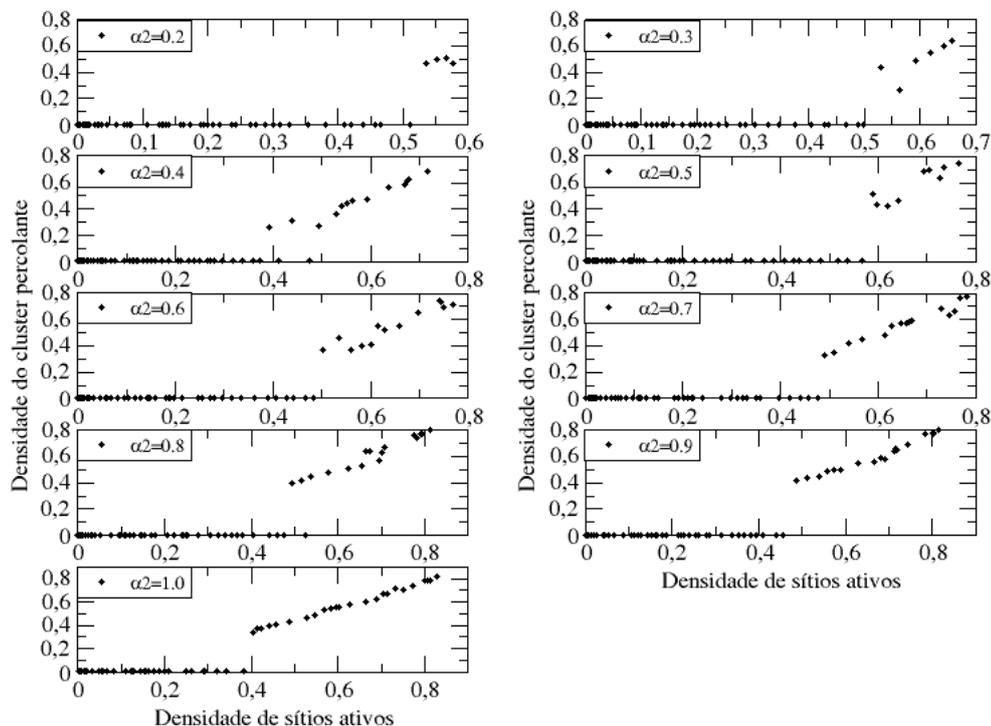
5.37b). Além disto, verifica-se que o tempo necessário para percolação é inferior ao tempo necessário para ocorrência de máxima variância.

A densidade crítica em que inicia a percolação, variou entre 0,394 e 0,589. Em relação aos valores médios obtidos das 15 simulações a densidade crítica apresentou uma queda linear em função do aumento de α_2 (Figura 5.37c).

Observa-se no gráfico da densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos (Figura 5.38) um comportamento similar ao da dinâmica sem ciclo fenológico do algodoeiro e com formação de alados. Ocorre uma mudança de fase para uma configuração em que coexistem clusters não percolantes com o cluster percolante.

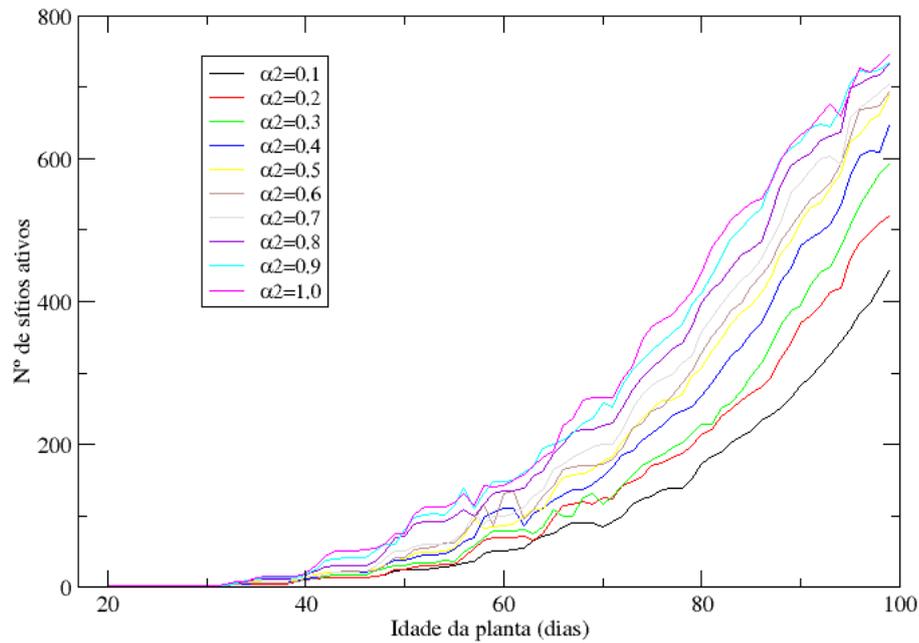
Na Figura 5.39 observa-se que o número de sítios ativos em cada idade do algodoeiro aumenta com α_2 . Este comportamento é também observado no período transiente da dinâmica sem ciclo fenológico.

Figura 5.38 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos variando a probabilidade de migração do alado na dinâmica com ciclo fenológico do algodoeiro ($\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$).



Nas Figuras 5.40 a 5.42 observa-se a distribuição espacial em diferentes idades do algodoeiro (antes, durante e após a percolação) para as probabilidades de migração do alado $\alpha_2 = 0,2$, $\alpha_2 = 0,5$ e $\alpha_2 = 0,9$, respectivamente, com a população inicial partindo do centro da

Figura 5.39 – Número de sítios ativos em função da idade do algodoeiro variando a probabilidade de migração do alado para a dinâmica com ciclo fenológico, rede 30×30 ($\chi = 0.9$ e $\alpha_1 = 0.1$).



rede. Comparando-se as distribuições espaciais em $t = 102$ verifica-se o aumento na densidade de sítios ativos com o aumento de α_2 , como já observado na figura 5.39.

Figura 5.40 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0.2$

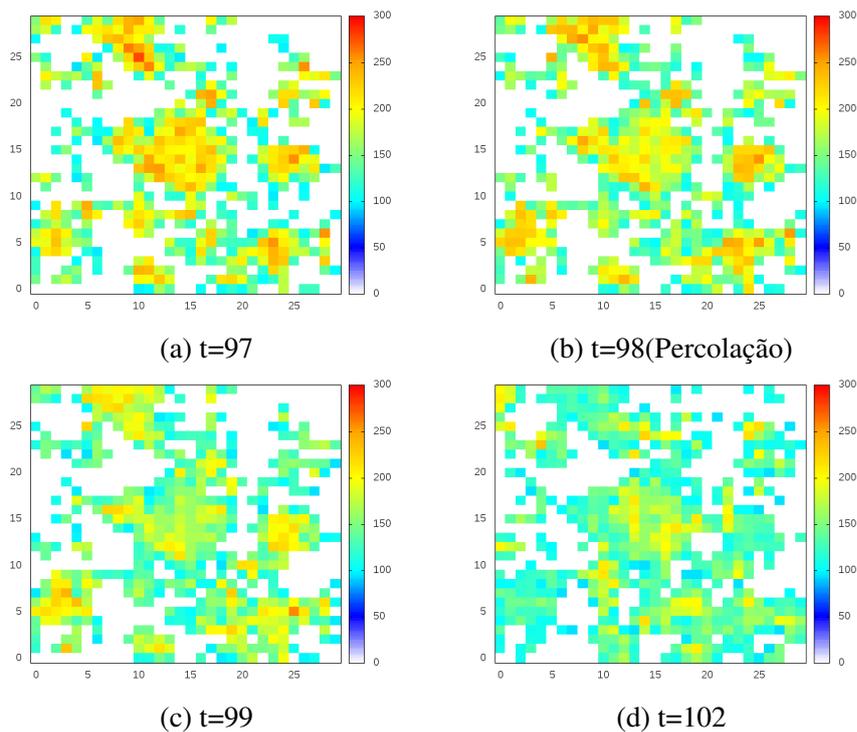


Figura 5.41 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0.5$

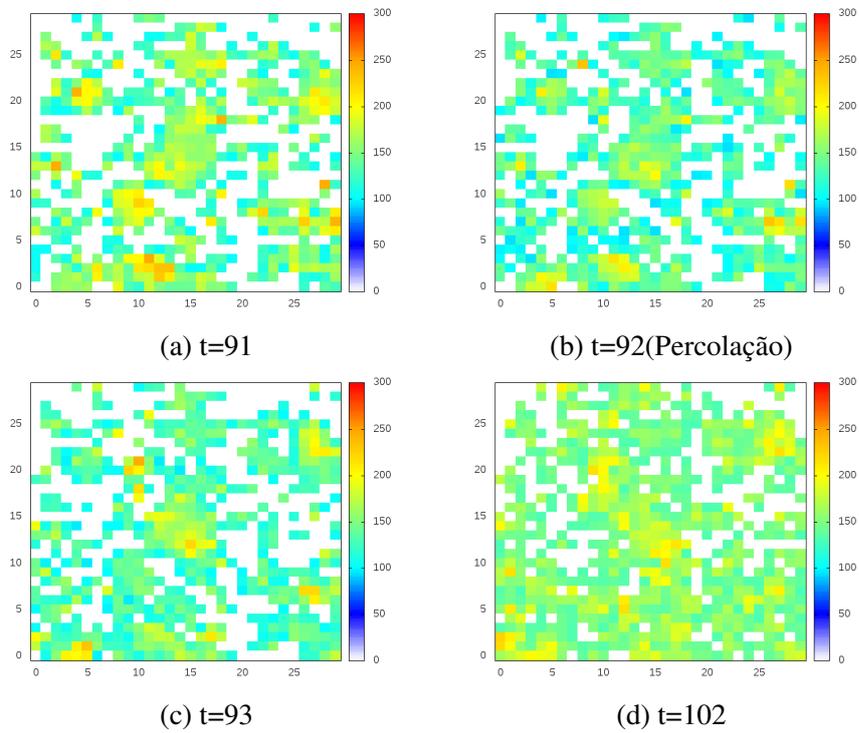
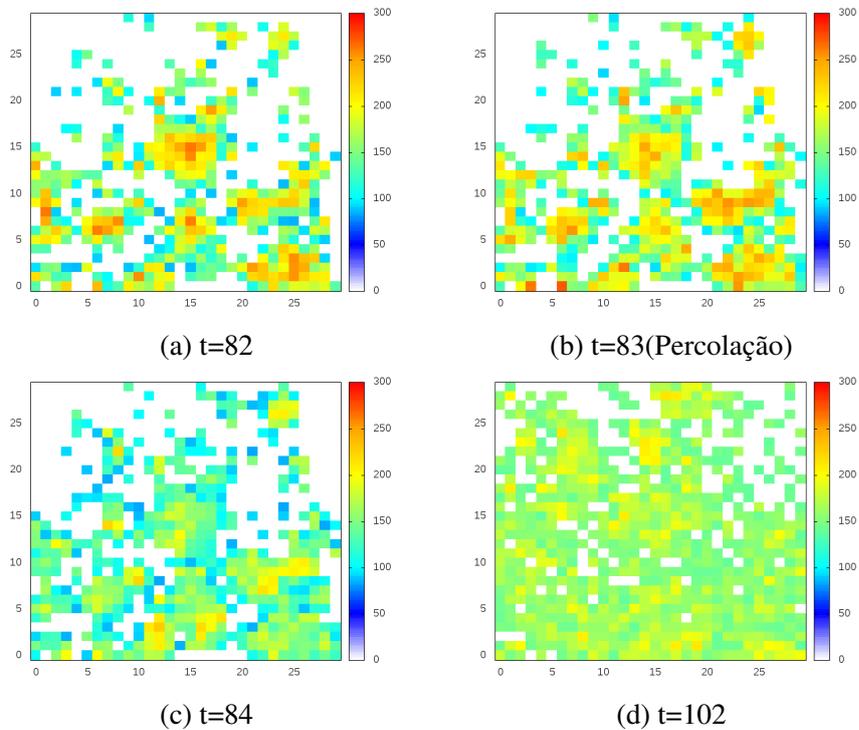


Figura 5.42 – Distribuição espacial nos momentos antes, durante e após a percolação para a probabilidade de migração do alado $\alpha_2 = 0.9$



5.2.2.2 Influência da localização espacial inicial dos pulgões nas variáveis: Percolação, máxima variância e densidade crítica de percolação

Na tabela 5.12 tem-se um resumo da análise de variância para as variáveis: Idade da planta que ocorreu percolação, Idade da planta que ocorreu a máxima variância e a densidade de sítios ativos em que ocorreu a percolação, para as cinco diferentes localizações espaciais da população inicial. Verifica-se que não houve efeito significativo da localização inicial dos pulgões em todas as variáveis analisadas.

Tabela 5.12 – Análise de variância contendo as fontes de variação (FV), números de graus de liberdade (GL), valores de quadrados médios e respectivas significâncias do teste F.

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios		
		Percolação	Máx. Variância	Densidade
Localização inicial	4	2.44 ^{NS}	0.64 ^{NS}	0.0008 ^{NS}
Erro	20	11.72	4.3	0.0022
CV%		3.87	2.4	8.67

NS - Não significativo pelo teste F.

Os pressupostos da análise de variância foram atendidos para todas as variáveis analisadas, como pode-se observar pelas estatísticas e valor-p dos testes de normalidade, homogeneidade da variância e independência dos erros apresentados na Tabela 5.13. Ao nível de 5% de significância as amostras provêm de uma população normal, as variâncias são iguais e os resíduos são independentes. Segundo Banzatto e Kronka (2006), a análise de variância e as conclusões dela tiradas são válidas.

Tabela 5.13 – Estimativas e respectivos valor-p dos teste de normalidade (Shapiro -Wilk), homogeneidade de variância (Bartlett) e independência (Durbin-Watson) para Percolação, Máxima variância, e Densidade.

Variáveis	Shapiro-Wilk		Bartlett		Durbin-Watson	
	W	valor-p	B	valor-p	DW	valor-p
Percolação	0.9503	0.2551	1.1389	0.8880	2.3542	0.9180
Max. Variância	0.9251	0.6670	0.1431	0.9976	2.7549	0.2160
Densidade	0.9437	0.1801	2.4154	0.6593	2.2862	0.888

Portanto, quando há a presença do pulgão alado na dinâmica, a localização inicial da população na rede não possui influência significativa nas variáveis analisadas, ou seja, não causa nenhum impacto no processo de infestação da praga na plantação.

Nas Figuras 5.43 e 5.44, encontra-se distribuição espacial do pulgão em diferentes idades do algodoeiro com a presença de alados na dinâmica, com população inicial nas coordenadas (24,22) e (5,11), respectivamente.

Figura 5.43 – Distribuição espacial do pulgão na rede 30×30 em diferentes idades do algodoeiro com população inicial localizada na linha 24 e coluna 22 da rede. Dinâmica com ciclo fenológico e com alados. ($\alpha_1 = 0.1$), $\alpha_2 = 0.5$.

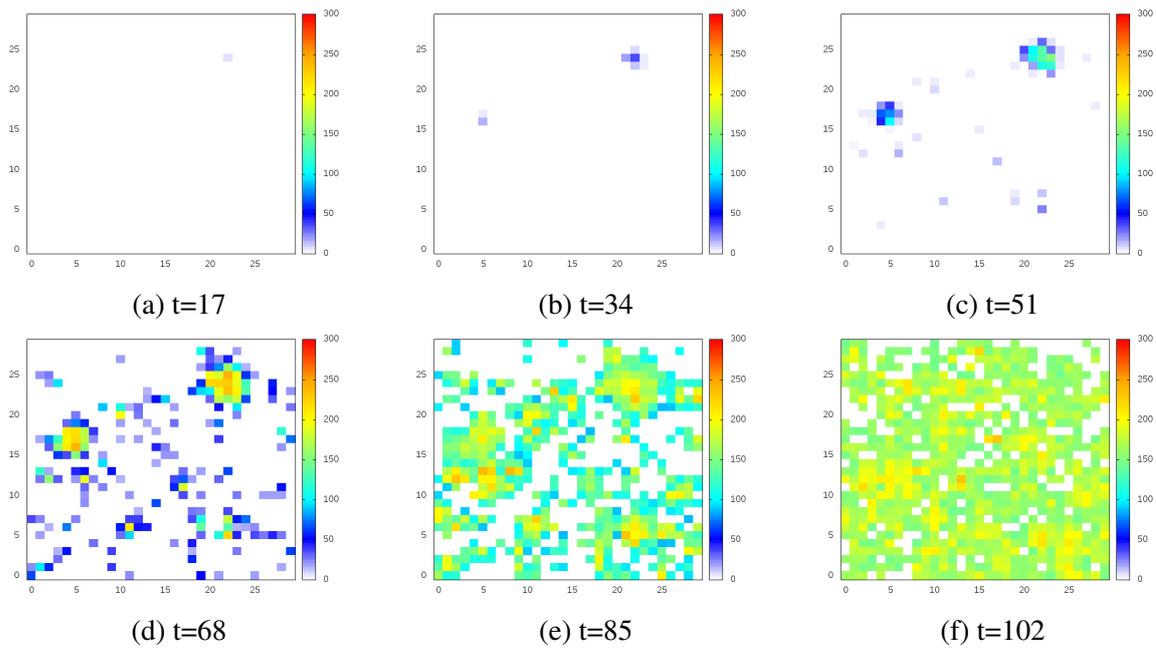
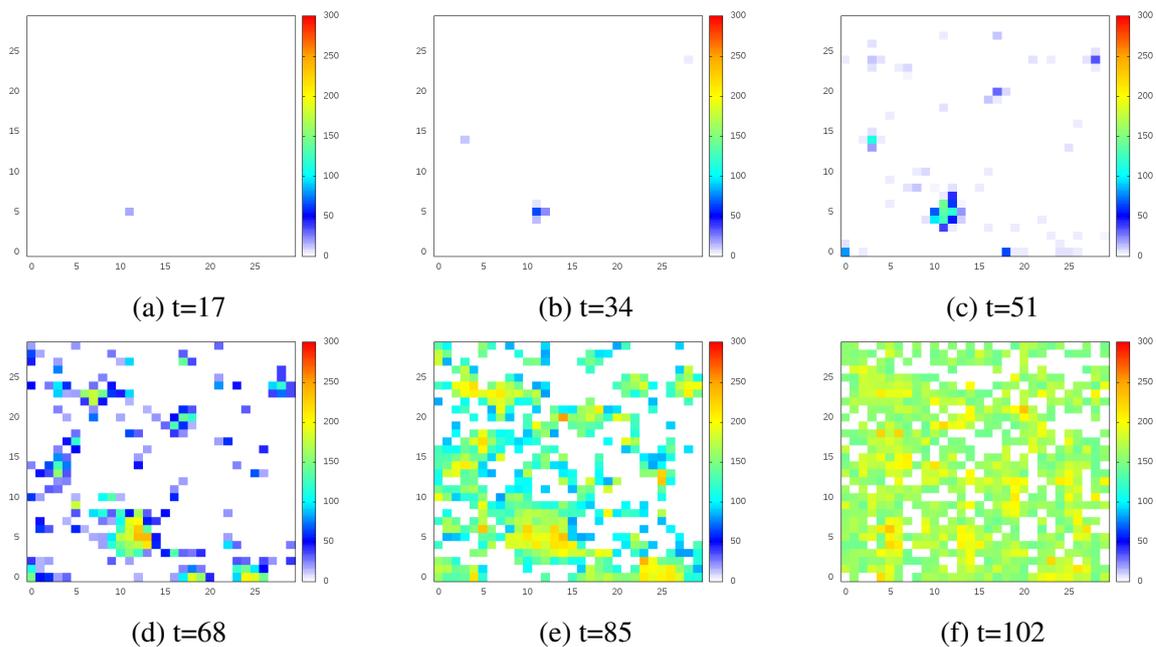


Figura 5.44 – Distribuição espacial do pulgão na rede 30×30 em diferentes idades do algodoeiro com população inicial localizada na linha 5 e coluna 11 da rede. Dinâmica com ciclo fenológico e com alados. ($\alpha_1 = 0.1$), $\alpha_2 = 0.5$.



5.3 Transições de fase e leis de potência

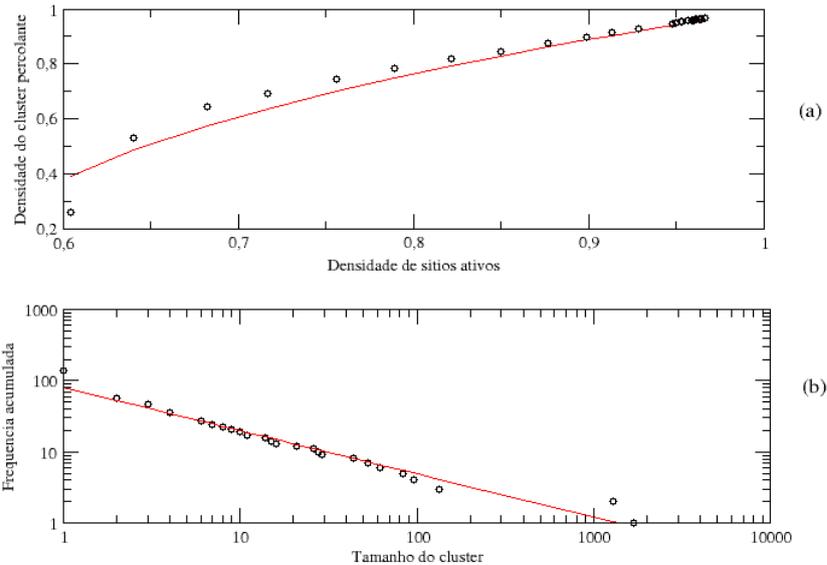
Em diferentes sistemas é possível observar uma transição geométrica caracterizada pela emergência de um cluster percolante conectando as bordas do sistema. De acordo com Grimmett (1999) acredita-se que a probabilidade de percolação comporta-se semelhantemente a uma lei de potência para valores maiores que uma probabilidade crítica (p_c) e é nula para valores menores que p_c . Essa probabilidade crítica caracteriza o ponto no qual as transformações das propriedades de um sistema acontecem de uma fase para outra (NETO, 2010). Segundo Ziff e Sapoval (1986), o limiar de percolação para estruturas de dimensão 2 está bem definido para redes suficientemente grandes, com um valor de aproximadamente 0,593 para percolação estática (comportamento crítico no estado estacionário).

Nas seções anteriores verificou-se a ocorrência de transições de fase no sistema. As transições de fase observadas apresentam percolação dinâmica, ou seja, observa-se o fenômeno num regime não estacionário. Tais transições foram definidas como a passagem do sistema de uma fase em que não existe cluster percolante para outra em que este tipo de cluster está presente (*fase percolante*). Tais transições foram caracterizadas por densidades críticas abaixo das quais não existe cluster percolante. Na dinâmica sem ciclo fenológico e sem a formação de alados observou-se uma transição para uma fase percolante caracterizada por um único cluster, sendo este o percolante ($\chi_1 < 1,0$). Em tal dinâmica não foi observada uma lei de potência que relaciona a densidade de sítios ativos com a densidade de sítios ativos no momento da percolação (densidade crítica). Entre estas densidades a relação é linear com coeficiente angular igual a um. Com a inclusão de formas aladas em ambas dinâmicas (sem e com ciclo fenológico), verificou-se a ocorrência de transição para uma fase percolante caracterizada pela coexistência de um cluster percolante (*cluster infinito*) e demais clusters não percolantes (*clusters finitos*). A relação entre as densidades nestas dinâmicas não foi linear como observado na dinâmica sem formação de alados.

Nas figuras 5.45, 5.46 e 5.47 são apresentados os gráficos da densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos, assim como da distribuição de frequência acumulada dos tamanhos dos clusters no momento da percolação, nas redes 80×80 , 90×90 e 100×100 , respectivamente. Para ambas as redes considerou-se a dinâmica com ciclo fenológico e com formação de alados para os parâmetros $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,4$ e $\chi = 0,9$. No período que antecede as migrações, a capacidade de carga do ambiente foi 1500. A população inicial

foi localizada nos sítios de coordenadas (39,39), (44,44) e (49,49), nas redes 80×80 , 90×90 e 100×100 , respectivamente.

Figura 5.45 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos na rede 80×80 , com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,4$ e $\chi = 0,9$ (curva simulada e ajuste). Dinâmica sem ciclo fenológico e formação de alados. Curva correspondente a uma única simulação.



Os ajustes referentes à rede 80×80 (Figura 5.45) foram:

- (a) $y = 1,42(x - 0,54)^{0,45} R^2 = 0,98$
- (v) $y = 80,29x^{-0,61} R^2 = 0,96$

Os ajustes referentes à rede 90×90 (Figura 5.46) foram:

- (a) $y = 1,40(x - 0,54)^{0,43} R^2 = 0,99$
- (v) $y = 140,51x^{-0,67} R^2 = 0,98$

Os ajustes referentes à rede 100×100 (Figura 5.47) foram:

- (a) $y = 1,34(x - 0,51)^{0,42} R^2 = 0,99$
- (v) $y = 196,11x^{-0,71} R^2 = 0,98$

Figura 5.46 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos na rede 90×90 , com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,4$ e $\chi = 0,9$ (curva simulada e ajuste). Dinâmica com ciclo fenológico e formação de alados. Curva correspondente a uma única simulação.

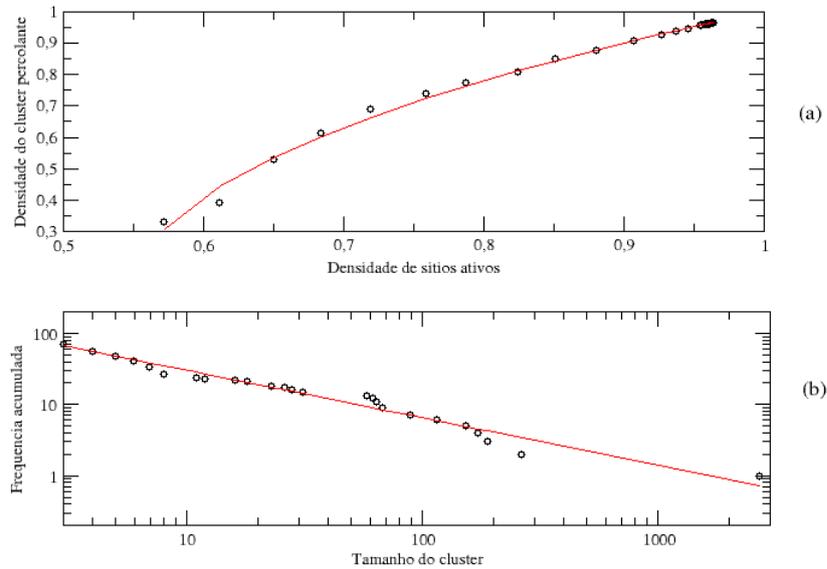
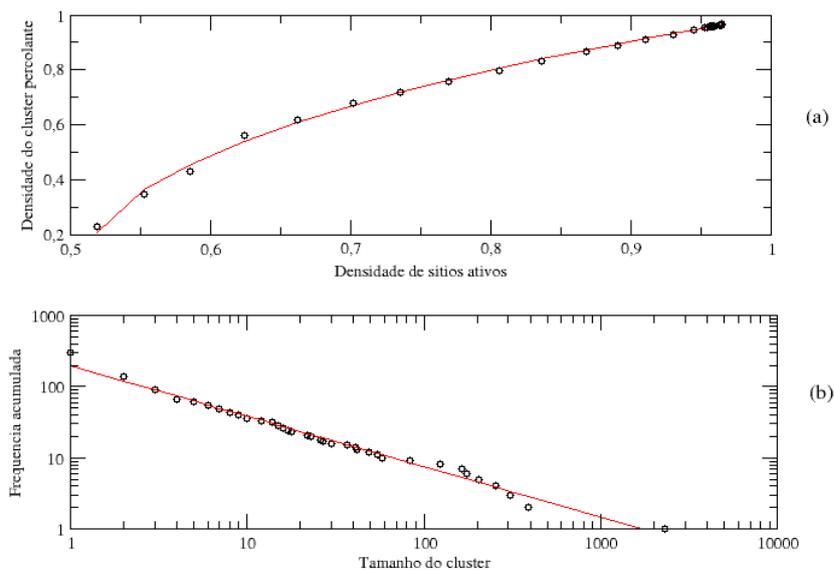


Figura 5.47 – Densidade do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos na rede 100×100 , com $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,4$ e $\chi = 0,9$ (curva simulada e ajuste). Dinâmica sem ciclo fenológico e formação de alados. Curva correspondente a uma única simulação.



Em todos os casos foram obtidos bons ajustes para a lei de potência. As densidade críticas ficaram em torno de 0,5, estando ambos abaixo do valor encontrado na literatura para a percolação estática. Os expoentes ficaram em torno de 0,4, superiores ao valor $\frac{5}{36}$, também encontrado na literatura para a percolação estática. Os valores muito próximos destes expoentes nos remete à independência de escala, classe de universalidade, conceito que teve origem na física dos fenômenos críticos (STAUFFER; AHARONY, 2014).

O comportamento do sistema descrito por uma lei de potência não foi observado para alguns cenários (variando dimensão da rede, parâmetros do modelo, condições iniciais, entre outros). Portanto, não se pôde neste trabalho definir as condições para que as transições de fase seguindo leis de potência ocorram neste modelo de dinâmica populacional.

CONCLUSÕES

- Os resultados para redes de dimensões maiores não apresentaram diferença para as simulações realizadas sem ciclo fenológico em relação a densidade crítica de percolação para a dinâmica somente com ápteros, mas o tempo levado para haver percolação aumenta com o aumento do tamanho da rede, assim como a etapa temporal que ocorre a variância máxima.
- Para o cenário sem ciclo fenológico e sem alados, observou-se a transição de fase em que o cluster percolante coincide com sítios ativos e possui comportamento linear para todos os valores de α_1 . Além disso, a probabilidade de migração do áptero (α_1) interfere no momento em que ocorre percolação e que ocorre o valor máximo para a variância, que diminuem com o aumento de α_1 , sendo que a máxima variância ocorre em etapas temporais anteriores ao momento de percolação. A densidade crítica é mais alta com o aumento de α_1 .
- Na dinâmica sem ciclo e sem alado observou-se que os tempos médios para percolação com valores de χ superiores a 0,7 são significativamente maiores do que para $\chi = 0,2$. Para $\chi = 1.0$ não observou-se mudança de fase. A densidade de sítios ativos no momento em que ocorre a percolação e o momento em que ocorre a máxima variância independem de χ .
- A distribuição inicial dos pulgões na rede teve influência significativa no tempo de percolação, densidade crítica e momento em que ocorre a máxima variância para a dinâmica sem ciclo e sem a presença de alados.
- Na dinâmica sem ciclo e com a produção de formas aladas a curva do cluster percolante em função da densidade de sítios ativos não possui comportamento linear, tanto para redes maiores quanto para diferentes valores de α_2 .
- Para as simulações sem ciclo e com a produção de formas aladas observou-se que as médias do tempo para acontecer a percolação diminuí com o aumento de α_2 , o tempo médio em que ocorre a máxima variância diminuí até $\alpha_2 = 0,5$, estabilizando-se em seguida. A partir de $\alpha_2 = 0,7$ o tempo para ocorrer a percolação é menor que o tempo para ocorrência da máxima variância, diferente do observado para a dinâmica sem alados.

- Na presença de alados na dinâmica sem ciclo, a localização inicial da população na rede não possui influência significativa no tempo de percolação, máxima variância e densidade crítica.
- Para dinâmica com ciclo, não houve percolação para o cenário caracterizado pela ausência de alados, em nenhum tamanho de rede simulado, embora tenha atingido altas densidades. Neste mesmo cenário, a média e a variância populacional aumentam com o aumento da probabilidade de dispersão do áptero.
- Não observou-se diferença significativa para a idade correspondente à máxima variância e densidade crítica na dinâmica com ciclo e com alados em relação ao aumento do tamanho das redes. A idade correspondente à ocorrência de percolação para as redes 40×40 e 50×50 não apresentaram diferenças significativas. Na rede 30×30 observa-se a ocorrência da percolação em uma idade menor, comparada às demais redes.
- A presença de alados na dinâmica com ciclo fenológico influencia na média populacional que atinge valores mais altos comparados à dinâmica com ciclo e sem alados. A variância atinge valores mais baixos.
- A percolação não ocorreu somente para $\alpha_1 = 0, 1$ na dinâmica com ciclo e com alado, o tempo para a formação do cluster percolante diminui com o aumento da probabilidade de dispersão do alado (α_2), assim como os momentos que ocorre a máxima variância e as densidades críticas.
- Nas simulações para dinâmica com ciclo e com alados observou-se que ocorre uma mudança de fase para uma configuração em que coexistem clusters não percolantes com o cluster percolante. A localização inicial da população na rede não possui influência significativa no tempo de percolação, máxima variância e densidade crítica. a.
- Para redes ainda maiores, dimensões 80×80 a 100×100 , com ciclo fenológico e com alados. Observou-se em todas os casos foram obtidos bons ajustes para a lei de potência. As densidade críticas ficaram em torno de 0,5, estando ambos abaixo do valor encontrado na literatura para a percolação estática. Os expoentes ficaram em torno de 0,4, superiores ao valor $\frac{5}{36}$ também encontrado na literatura para a percolação estática. O comportamento do sistema descrito por uma lei de potência não foi observado para alguns cenários (variando dimensão da rede, parâmetros do modelo, condições iniciais, entre outros).

REFERÊNCIAS

- ABRAPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE ALGODÃO. **Algodão no mundo**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.abrapa.com.br/Paginas/dados/algodao-no-mundo.aspx>>.
- ALLARD, A. et al. Heterogeneous bond percolation on multitype networks with an application to epidemic dynamics. **Physical Review E**, APS, v. 79, n. 3, p. 036113, 2009.
- ALMEIDA, R. d.; SILVA, C. d.; RAMALHO, F. D. S. Manejo integrado de pragas do algodoeiro no Brasil. **O agronegócio do algodão no Brasil**, Embrapa Informação Tecnológica Brasília, v. 2, p. 1035–1098, 2008.
- AMARAL, M. L. d. **Dinâmica espaço-temporal do pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 e sua interação com o parasitoide *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson, 1880) em algodão (*Gossypium hirsutum* L.)**. 86 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- ARAÚJO, A. E.; CIA, E. Doenças do algodoeiro. **EMBRAPA-CNPA, Fundação MT: Mato Grosso: liderança e competitividade.**, Rondonópolis: Fundação MT, p. 100–112, 1999.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. d. N. **Experimentação agrícola**. Jaboticabal: Funep, 2006. 246 p.
- BARBOSA, S.; FRANÇA, F. Pragas das cucurbitáceas e seu controle. **Informe Agropecuário, Belo Horizonte**, v. 8, n. 85, p. 54–56, 1982.
- BARTLETT, M. S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, JSTOR, p. 268–282, 1937.
- BEN-AVRAHAM, D.; HAVLIN, S. **Diffusion and reactions in fractals and disordered systems**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000.
- BLACKMAN, R. L. Reproduction, cytogenetics and development. **Aphids: their biology, natural enemies and control**, Elsevier Amsterdam, v. 2, p. 163–195, 1987.
- BLACKMAN, R. L.; EASTOP, V. F. et al. **Aphids on the world's crops: an identification and information guide**. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2000. 466 p.
- BRITO, D. **Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 201, em função de nitrogênio, densidade de plantas e cloreto de mepiquat. 2005. 116 p.** Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado)-Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, 2005.
- BROADBENT, S. R.; HAMMERSLEY, J. M. Percolation processes: I. crystals and mazes. In: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**. [S.l.], 1957. v. 53, n. 3, p. 629–641.
- BROCK, W. A.; CARPENTER, S. R.; SCHEFFER, M. Regime shifts, environmental signals, uncertainty, and policy choice. **Complexity theory for a sustainable future**, Columbia University Press, p. 180–206, 2008.

- BUENO, V. Controle biológico de pulgões ou afídeos-praga em cultivos protegidos. **Informe Agropecuário**, v. 28, p. 9–17, 2005.
- BULLOCK, J. M.; KENWARD, R. E.; HAILS, R. S. **Dispersal ecology: 42nd symposium of the British ecological society**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2002. v. 42. 459 p.
- CARPENTER, S.; BROCK, W. Rising variance: a leading indicator of ecological transition. **Ecology letters**, Wiley Online Library, v. 9, n. 3, p. 311–318, 2006.
- CHATTERJEE, S.; SIMONOFF, J. S. **Handbook of regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 2013. v. 5. 252 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/18_03_09_14_46_58_grao_marco_2018.pdf>.
- COSTA, C. L.; LUZ, Q. C. Vetores de vírus de plantas–1. insetos. **Revisão anual de patologia de plantas. Passo Fundo**, v. 6, p. 103–171, 1998.
- DEGRANDE, P. E. **Guia prático de controle das pragas do algodoeiro**. Dourados: UFMS, 1998. 60 p.
- DIXON, A. Aphid ecology: life cycles, polymorphism, and population regulation. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 8, n. 1, p. 329–353, 1977.
- ENTOMOLOG. **Pulgão: Aphis gossypii**. 2017. Disponível em: <<http://entomolog-reuni.blogspot.com.br/2011/09/pulgao.html>>.
- FILHO, B. S. S. et al. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. **Megadiversidade**, p. 74, 2007.
- GALLO, D. et al. **Entomologia agrícola**. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 2002. 920 p.
- GRIMMETT, G. What is percolation? In: **Percolation**. Berlin: Springer, 1999. p. 1–31.
- HODGSON, C. Dispersal of apterous aphids (homoptera: Aphididae) from their host plant and its significance. **Bulletin of Entomological Research**, Cambridge University Press, v. 81, n. 4, p. 417–427, 1991.
- ILHARCO, F. A. **Equilíbrio biológico de afídeos**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 303 p.
- LEUENBERGER, H. The application of percolation theory in powder technology. **Advanced Powder Technology**, Brill, v. 10, n. 4, p. 323–352, 1999.
- LEUENBERGER, H. et al. Percolation theory, fractal geometry, and dosage form design. **Pharmaceutica Acta Helvetiae**, SCHWEIZ APOTHEKERZEITUNG STATIONSTRASSE 12 POSTFACH 226, 3097 BERN-LIEBEFELD, SWITZERLAND, v. 64, n. 2, p. 34–39, 1989.
- LIEBHOLD, A.; KOENIG, W. D.; BJØRNSTAD, O. N. Spatial synchrony in population dynamics. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Annual Reviews, v. 35, p. 467–490, 2004.

- LIU JIE E REGENAUER-LIEB, K. Aplicação da teoria da percolação à microtomografia de meios estruturados: limiar de percolação, expoentes críticos e upscaling. **Physical Review E**, v. 83, p. 016106, 2011.
- LOXDALE, H. D. et al. The relative importance of short-and long-range movement of flying aphids. **Biological Reviews**, Wiley Online Library, v. 68, n. 2, p. 291–311, 1993.
- MELOTTI, G. **Aplicação de Autômatos Celulares em Sistemas Complexos: Um estudo de caso em espalhamento de epidemias**. Dissertação (Mestrado) — MACSIN-UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- MENDES, C. E. T. **Efeito dos parâmetros de dispersão sobre a dinâmica espaço-temporal do pulgão *Aphis gossypii* Glover: Uma abordagem computacional**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, Lavras, 2017.
- NETO, S. G. d. A. **Estimativa de expoentes críticos em Percolação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- NEUMANN, J. V.; BURKS, A. W. **Theory of self-reproducing automata**. Urbana: University of Illinois Press, 1966. 388 p.
- NEVES, M. F.; PINTO, M. J. A. **A cadeia do algodão brasileiro: desafios e estratégias**. Brasília-DF: Markestrat, 2012.
- PAUWELS, I. S. et al. Modelling a pike (*esox lucius*) population in a lowland river using a cellular automaton. **Ecological informatics**, Elsevier, v. 17, p. 46–57, 2013.
- PEIXOTO, M.; BARROS, L. Um estudo de autômatos celulares para o espalhamento geográfico de epidemias com parâmetro fuzzy. **Trends in Applied and Computational Mathematics**, v. 5, n. 1, p. 125–133, 2004.
- PENNA, T. J. A bit-string model for biological aging. **Journal of Statistical Physics**, Springer, v. 78, n. 5, p. 1629–1633, 1995.
- PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 1990. 451 p.
- PONSEN, M. Anatomy of an aphid vector: *Myzus persicae*. In: **Aphids as Virus Vectors**. New York: Academic Press, 1977. p. 63–82.
- R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>.
- ROYSTON, P. Remark as r94: A remark on algorithm as 181: The w-test for normality. **Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)**, v. 44, n. 4, p. 547–551, 1995.
- SAHINI, M.; SAHIMI, M. **Applications of percolation theory**. [S.l.]: CRC Press, 2014.
- SANTOS, W. d. Manejo das pragas do algodão com destaque para o cerrado brasileiro. **Algodão no cerrado do Brasil. Brasília: Associação Brasileira dos Produtores de Algodão**, p. 403–478, 2007.
- SARAN, P. E.; SANTOS, W. J. **Manual de pragas do algodoeiro**. [S.l.]: FMC, 2007. 280 p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

STAUFFER, D.; AHARONY, A. **Introduction to percolation theory: revised second edition**. 2. ed. [S.l.]: CRC press, 2014. 192 p.

TUKEY, J. W. Comparing individual means in the analysis of variance. **Biometrics**, p. 99–114, 1949.

WITH, K. A. Using percolation theory to assess landscape connectivity and effects of habitat fragmentation. **Applying landscape ecology in biological conservation**, Springer, p. 105–130, 2002.

XIA, J.; WERF, W. v. d.; RABBINGE, R. Influence of temperature on bionomics of cotton aphid, *aphis gossypii*, on cotton. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, Wiley Online Library, v. 90, n. 1, p. 25–35, 1999.

ZIFF, R. M.; SAPOVAL, B. The efficient determination of the percolation threshold by a frontier-generating walk in a gradient. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, v. 19, n. 18, p. L1169, 1986.