

Luciana dos Santos Andrade

**DINÂMICA POPULACIONAL DO BICHO-MINEIRO  
*LEUCOPTERA COFFEELLA* (GUÉRIN-MÈNEVILLE E  
PERROTET, 1842) (*LEPIDOPTERA: LYONETIIDAE*) USANDO  
UM MODELO DE AUTÔMATOS CELULARES**

JEQUIÉ-BA  
2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E EXATAS

Luciana dos Santos Andrade

DINÂMICA POPULACIONAL DO BICHO-MINEIRO  
*LEUCOPTERA COFFEELLA* (GUÉRIN-MÈNEVILLE E  
PERROTET, 1842) (*LEPIDOPTERA: LYONETIIDAE*) USANDO  
UM MODELO DE AUTÔMATOS CELULARES

Monografia apresentada ao Departamento de  
Química e Exatas da Universidade Estadual do  
Sudoeste da Bahia como requisito parcial para  
obtenção do título de Licenciada em  
Matemática com Enfoque em Informática.

Orientador: Prof. Dr. Nemesio Matos de Oliveira Neto

JEQUIÉ-BA  
2011

Monografia apresentada ao Departamento de Química e Exatas da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia como requisito parcial para obtenção do título de Licenciada em Matemática com Enfoque em Informática.

Aprovada por:



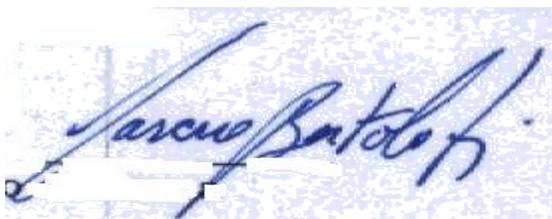
---

Prof. Dr. Nemésio Matos de Oliveira Neto, UESB  
Orientador



---

Profª. Dra. Ana Lúcia Biggi de Souza, UESB



---

Prof. Dr. Márcio Antônio de Andrade Bortoloti, UESB

JEQUIÉ-BA  
2011

*Porque dele, e por ele, e para ele são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente. Amém! (ROMANOS 11:36, Bíblia Sagrada.)*

# Agradecimentos

Sou grata...

A Deus por TUDO.

À minha família pelo apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida.

Ao meu orientador Némesio, por tudo o que me ensinou e pelo incansável bordão: "Cadê os resultados?".

Aos colegas da minha turma pela união e companheirismo.

A todos os meus professores da graduação pela minha formação acadêmica e profissional.

Aos membros da banca examinadora que se dispuseram a avaliar este trabalho.

# Resumo

O bicho-mineiro *Leucoptera coffeella* (Guérin Mèneville e Perrotet, 1842) é uma das mais importantes pragas do café, devido aos danos econômicos causados por esse inseto na cafeicultura, diminuindo a produção e qualidade do café. Em virtude disso, o trabalho proposto teve como objetivo estudar a dinâmica populacional do bicho-mineiro, via simulações computacionais. Propôs-se um modelo matemático, discreto no espaço e no tempo, comumente chamado de Autômatos Celulares (ACs). As simulações computacionais do ACs mostram a dinâmica populacional do bicho-mineiro em cada uma de suas fases biológicas e a influência da temperatura no desenvolvimento desse inseto, uma vez que os resultados mostram um aumento nas populações quando foi incluída a dependência temporal no modelo. Observa-se também a correlação da probabilidade de morte na fase lagarta com a dinâmica populacional do inseto, sugerindo uma possível técnica de controle da praga em um cafezal por meio do controle biológico.

**Palavras-chave:** Bicho-Mineiro, Café, Simulações Computacionais, Autômatos Celulares.

# Abstract

The leaf miner *Leucoptera coffeella* (Guérin Mèneville and Perrotet, 1842) is one of the most important coffee pests, due to the economic damages caused by this insect in coffee production, decreasing production and coffee quality. As a result the proposed work aims at studying the population dynamics of leaf miner via computer simulations. To this end we propose a mathematical model, computing, discrete in space and time, commonly called Cellular Automata (CA). Computer simulations of CA show the population dynamics of leaf miner in each of its phases and biological influence of temperature on the development of this insect, since the results show an increase in populations where the time dependence was included in the model. It was also noted the correlation of probability of death in the caterpillar stage of the insect population dynamics, suggesting a possible technique of controlling the pest in an coffee plantation through biological control.

**Keywords:** Leaf Miner, Coffee, Computer Simulations, Cellular Automata.

# Lista de Figuras

Figura 1: Representação AC unidimensional (1D).....	13
Figura 2: Representação de quatro possíveis vizinhanças.....	14
Figura 3: Evolução da regra 90 após 4 passos de tempo.....	16
Figura 4: Padrão espaço-temporal gerado pelo AC 1D de Wolfram, para uma configuração inicial no meio da rede.....	17
Figura 5: Padrão espaço-temporal gerado por um AC 1D de Wolfram, para uma configuração inicial aleatória.....	18
Figura 6: Fração de pessoas infectadas em função do tempo.....	20
Figura 7: Números de insetos em cada uma das fases (média sobre 4 amostras) em 720 passos de tempo sem efeito sazonal.....	27
Figura 8: Números de insetos em cada uma das fases (media sobre 4 amostras) em 720 passos de tempo com efeito sazonal.....	29
Figura 9: Evolução temporal de todas as fases do bicho-mineiro em diferentes probabilidades de morte para cada fase do inseto.....	30

# Lista de Quadros

Quadro 1: Regras locais do AC unidimensional de Wolfram (regra 90) .....15

Quadro 2: Evolução da regra 90 após 4 passos de tempo.....16

# Sumário

1. Introdução.....	11
2. Referencial Teórico.....	13
2.1 Autômatos Celulares.....	13
2.1.1 Um modelo de AC unidimensional de Wolfram.....	15
2.1.2 Um modelo de ACs bidimensional (Processo de Contato).....	18
2.2 Cafeicultura Baiana e Aspectos Biológicos do Bicho-Mineiro.....	21
2.2.1 A importância da Cafeicultura na Bahia e a Presença do Bicho-Mineiro.....	21
2.2.2 Aspectos Biológicos do Bicho-Mineiro.....	22
3. Material e Métodos.....	24
3.1 Um Modelo de Autômatos Celulares para a Dinâmica Populacional do Bicho-Mineiro.....	24
4. Resultados e Discussão.....	27
5. Conclusões.....	31
6. Considerações Finais e Perspectivas.....	32
7. Referências.....	33

# 1. Introdução

Atualmente as simulações computacionais têm sido de suma importância para reproduzir ações e fenômenos biológicos (FERREIRA JR; MARTINS; VILELA, 2002), complementando a abordagem experimental, amplamente utilizadas também na Física (OLIVEIRA-NETO, 2006), Química (SILVA *et al.*, 2000), Ciências Sociais (ALVES; MARTINS; OLIVEIRA-NETO, 2002) dentre outras áreas.

Uma maneira para simular fenômenos nestas áreas é através de modelos matemático-computacionais, comumente chamados de Autômatos Celulares (ACs), que são sistemas dinâmicos<sup>1</sup> totalmente discretos, isto é, não são contínuos no espaço, no tempo e nas variáveis de estados, que evoluem seguindo regras simples, processadas, em geral, em paralelo, e idêntica para todos as células (sítios). Eles são, por sua simplicidade e capacidade de exibir dinâmicas com padrões espaço-temporais intrincados, um instrumento importante para modelar e descrever fenômenos complexos.

Os fenômenos complexos não podem ser entendidos pela análise do comportamento de cada parte individualizada, mas pela análise do comportamento por inteiro, gerado pelas interações de cada parte. A utilização dos ACs para descrever tais sistemas, como por exemplo, os sistemas biológicos, podem fornecer muitas informações sobre a dinâmica temporal e espacial, dentre elas, estratégias de como controlar populações e combater pragas (BAPTESTINI, 2006).

Assim, com uma abordagem computacional, modelou-se a dinâmica populacional do bicho-mineiro (BM) *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville e Perrotet, 1842)<sup>2</sup>, ordem *Lepidoptera*, família *Lyonetiidae*, a fim de analisar a dinâmica populacional dessa praga em todas as suas fases biológicas, para entender melhor quais os mecanismos-chave que facilitam o desenvolvimento do BM no cafeeiro. O modelo proposto de Autômatos Celulares foi construído com bases nos aspectos bióticos e abióticos que influenciam

---

<sup>1</sup>Sistemas que mudam (evoluem) com o passar do tempo.

<sup>2</sup>Nomenclatura zoológica. Guérin-Mèneville e Perrotet: autores que descreveram a espécie *Leucoptera coffeella*.

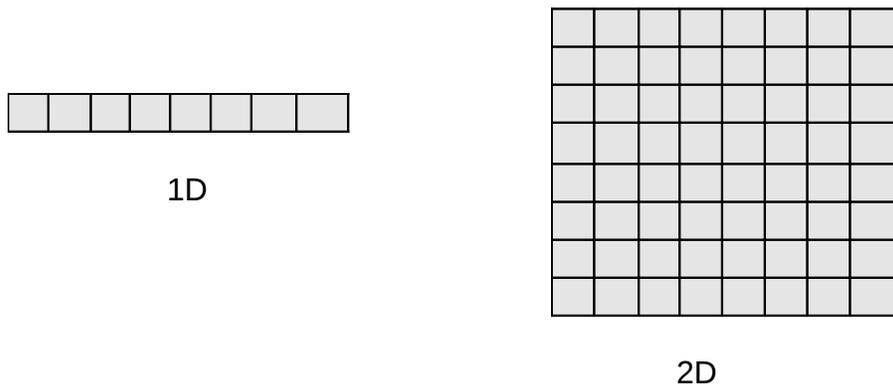
diretamente no desenvolvimento do BM. Este trabalho gerará informações que poderão ser utilizadas para a proposta de uma possível técnica de controle desta praga que afeta a produção e qualidade do café.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1 Autômatos Celulares

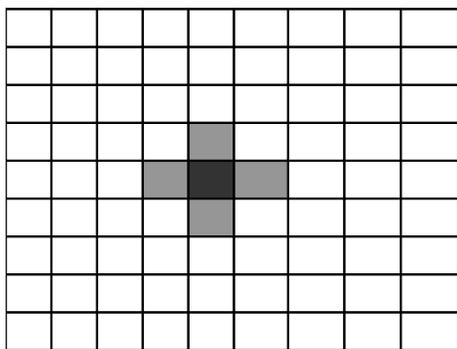
A idéia de Autômatos Celulares (ACs), de acordo com Pascoal (2005), foi introduzida no final dos anos 40 pelo matemático e cientista John Von Neumann, e pelo matemático Stanislaw Ulam, de maneira teórica. No final dos anos 60, em uma perspectiva prática, os ACs conseguiram maior divulgação através do matemático Conway, criador do Jogo da Vida.

Para Baptestini (2006), os autômatos celulares são modelos matemáticos usados para estudar sistemas complexos. De acordo com Alves, (2002, p.1), um sistema complexo é “[...] constituído de muitos graus de liberdade interagindo entre si, localmente, e que são capazes de gerar complicados padrões espaço-temporais.” A estrutura dos ACs, segundo Schatten (2008), é um conjunto de células (sítios) dispostas em uma malha (rede), em geral unidimensional ou bidimensional (Figura 1), que será dinamizado a cada passo de tempo através de regras que definirão o estado de cada célula (sítio).

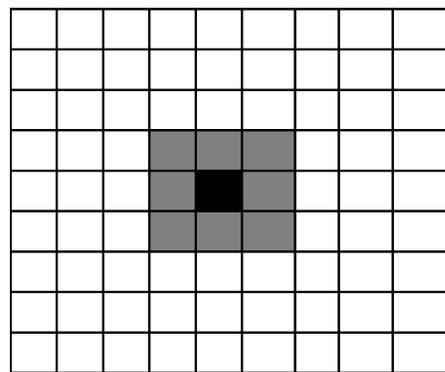


**Figura 1:** Representação unidimensional (1D) e bidimensional (2D) de redes comumente utilizadas nos ACs. Cada célula, ou sítio, é representado através de cada quadrado nestas figuras.

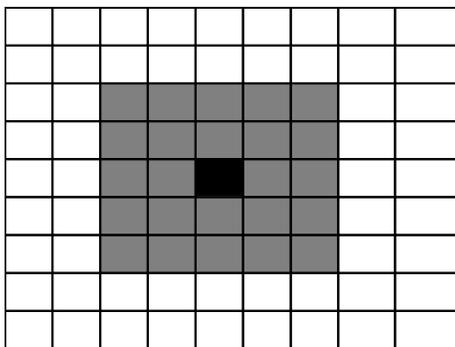
Por sua vez, cada sítio terá os seus respectivos vizinhos. Segundo Pascoal (2005), os vizinhos podem ser considerados como: vizinhança de Neumann, sendo os vizinhos, as célula abaixo, acima, à esquerda e à direita de uma dada célula (Figura 2 (a) ); vizinhança de Moore, onde os vizinhos são os mesmos da vizinhança de Neumann mais as células das diagonais da célula escolhida (Figura 2 (b) ); vizinhança de Moore Estendida, os vizinhos são equivalentes à vizinhança de Moore mais as células abaixo, acima, à esquerda, à direita e das diagonais da vizinhança de Moore (Figura 2 (c) ) e vizinhança Aleatória, onde os vizinhos ficam espalhados na rede de forma não ordenada (Figura 2 (d) ).



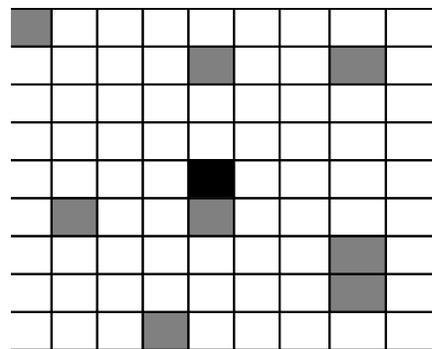
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 2:** Representação de quatro possíveis vizinhanças (célula preenchidas em cinza escuro) de uma dada célula escolhida na rede (célula preenchida em preto): (a) vizinhança de Neumann (4 vizinhos); (b) vizinhança de Moore (8 vizinhos); (c) vizinhança de Moore Estendida (24 vizinhos); (d) vizinhança Aleatória (8 vizinhos).

Uma vez definida o tipo de vizinhança e o tipo de rede a ser utilizada, pode-se definir um modelo de Autômato Celular. Nas subseções à seguir, são descritos dois modelos de ACs: Modelo de Wolfram (1983) e um modelo, hipotético, proposto, de processo de contato.

### 2.1.1 Um modelo de AC unidimensional de Wolfram

Seja um autômato celular (AC) unidimensional descrito por Wolfram (1983). Esse AC unidimensional é formado por uma cadeia linear de sítios aos quais estão associadas variáveis dinâmicas,  $\sigma_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , que podem assumir dois valores possíveis, ou seja,  $K = 2$ , logo  $\sigma_i = 0$  ou  $1$ . A vizinhança de um sítio  $i$ , é o próprio sítio  $i$  e aqueles imediatamente adjacentes a ele, à esquerda (sítio  $i - 1$ ) e à direita (sítio  $i + 1$ ). Condições de contorno periódicas são impostas à cadeia; portanto,  $\sigma_0 = \sigma_N$  e  $\sigma_{N+1} = \sigma_1$  sempre. Considere esse AC unidimensional na regra 90, cuja evolução temporal é determinada mediante o número 90 na base binária. O quadro 1 mostra as regras locais desse AC unidimensional; na primeira linha são exibidas todas as  $2^3 = 8$  ( $k^p$ ,  $k = 2$  (valores possíveis de cada sítio);  $p = 3$  (o número de sítios que compõem a vizinhança)) configurações possíveis para uma vizinhança e na segunda, é dado o valor obtido pelo sítio central sobre o passo de tempo seguinte de acordo com uma regra específica local.

**Quadro 1:** Regras locais do AC unidimensional de Wolfram (regra 90).

Vizinhança	111	110	101	100	011	010	001	000
$\sigma_i(t+1)$	0	1	0	1	1	0	1	0

Desse modo o valor assumido pelo sítio  $i$  no tempo posterior pela regra 90 será dado por  $\sigma_i(t+1) = 1$ , se  $\sigma_{i-1}(t) \neq \sigma_{i+1}(t)$  ou  $\sigma_i(t+1) = 0$ , se  $\sigma_{i-1}(t)$  e  $\sigma_{i+1}(t)$  forem iguais. A evolução temporal do autômato celular é obtida pela aplicação simultânea destas regras em cada sítio para cada passo de tempo. Um exemplo de evolução de um AC unidimensional com esta regra 90 é exibido no quadro 2, onde inicia-se a rede ( $t=0$ ) com 1 sítio com  $\sigma_i = 1$  (sítio central) e todos os outros com  $\sigma_i = 0$ . Cada passo de tempo forma um eixo imaginário (vertical) apontado de cima para baixo.

**Quadro 2:** Evolução da regra 90 após 4 passos de tempo. Tempo evolui de cima para baixo, formando um eixo imaginário (vertical) como indicado na primeira coluna, e em cada linha têm-se as configurações da rede unidimensional para cada tempo.

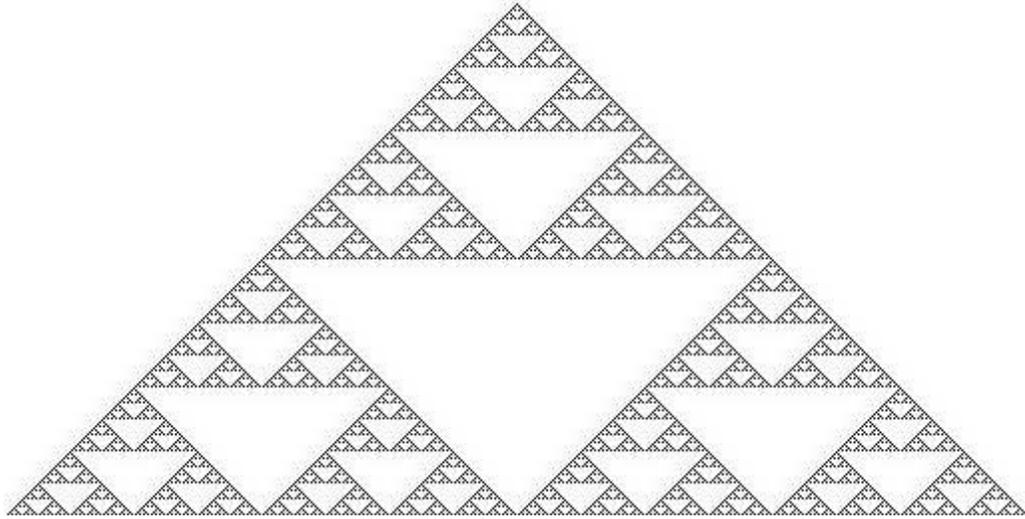
Tempo	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$	$\sigma_6$	$\sigma_7$
t=0	0	0	0	1	0	0	0
t=1	0	0	1	0	1	0	0
t=2	0	1	0	0	0	1	0
t=3	1	0	1	0	1	0	1
t=4	1	0	0	0	0	0	1

A partir desta evolução, atribui-se a cor branca para o sítio com  $\sigma_i = 0$  e a cor preta ao sítio com  $\sigma_i = 1$ , ou seja, a configuração da rede com valores 0 e 1 apresentados na tabela 2 será a figura 3.



**Figura 3:** Evolução da regra 90 após 4 passos de tempo. Sítio com a cor preta ( $\sigma_i = 1$ ) e sítio com a cor branca ( $\sigma_i = 0$ ).

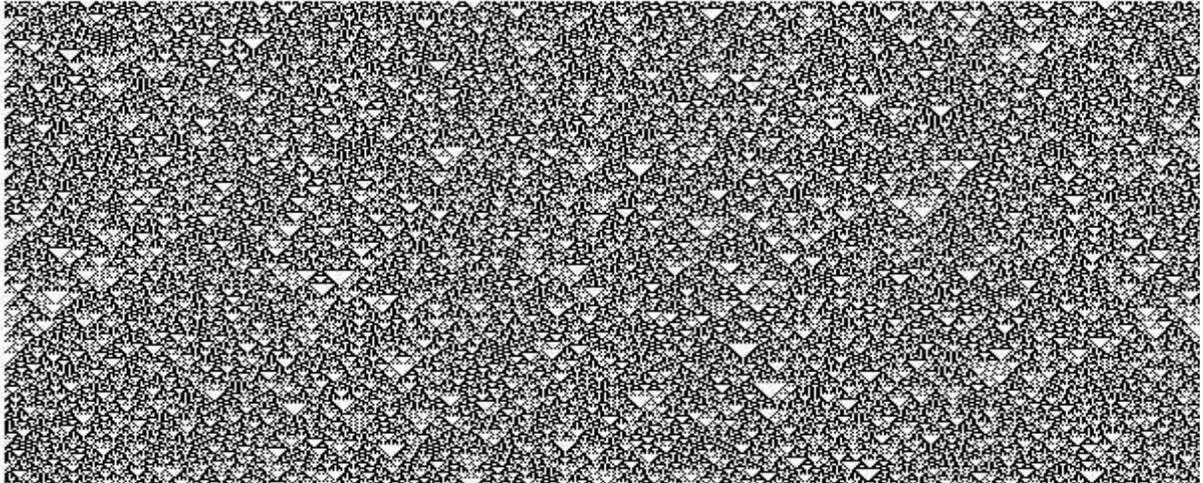
A figura 4 mostra o padrão espaço-temporal gerado a partir de uma configuração inicial contendo um único sítio, o central, com valor 1 e os demais com valor 0, ou seja,  $\sigma_i(0) = 1$ , se  $i = N/2$  ou  $\sigma_i(0) = 0$ , se  $i \neq N/2$ .



**Figura 4:** Padrão espaço-temporal gerado a partir de uma configuração inicial com um único sítio com valor  $\sigma_i = 1$  no meio da rede e os demais sítios com valor  $\sigma_i = 0$ , pelo AC 1D de Wolfram, cuja dinâmica é definida pela regra 90. Cada pixel em preto corresponde a um sítio com valor  $\sigma_i = 1$ , enquanto que os brancos correspondem a sítios com  $\sigma_i = 0$ . A rede 1D está na mesma direção (horizontal) que a apresentada na figura 1. O tempo evolui de maneira similar ao apresentado na tabela 2. Assim, o instante inicial ( $t=0$ ) corresponde ao topo da figura gerada, enquanto na base da figura tem-se o instante final. Fonte: (ALVES, 2002).

As configurações espaciais do AC unidimensional num determinado instante de tempo são representadas em cada linha horizontal, sendo que a primeira linha representa a configuração inicial, na qual é representada na figura 4 com a cor preta, quando  $\sigma_i(0) = 1$  e branco, caso contrário. Esse padrão gerado pela regra 90 forma um objeto fractal matemático, o triângulo de Sierpinski, que é construído a partir de cópias aproximadas de si mesmo em seu interior, ou seja, triângulos em qualquer escala de comprimento que é característica da auto-similaridade.

Já a figura 5 mostra o padrão espaço-temporal para uma configuração inicial aleatória, na qual cada sítio assume 0 ou 1 com igual probabilidade, formando uma estrutura desordenada com triângulos de tamanhos limitados.



**Figura 5:** Padrão espaço-temporal gerado por um AC de Wolfram com a regra 90, para uma configuração inicial aleatória. Os pixel pretos correspondem a sítios com valor  $\sigma_i = 1$ , enquanto pixel brancos com  $\sigma_i = 0$ . O eixo temporal é o mesmo daquele descrito na tabela 2. Fonte: (ALVES, 2002).

## 2.1.2 Um modelo de ACs bidimensional (Processo de Contato)

O Processo de Contato refere-se a um modelo de ACs bidimensional proposto para avaliar o contágio de uma pessoa infectada com os demais indivíduos que fazem parte de uma área, onde esta pessoa infectada mantém contato.

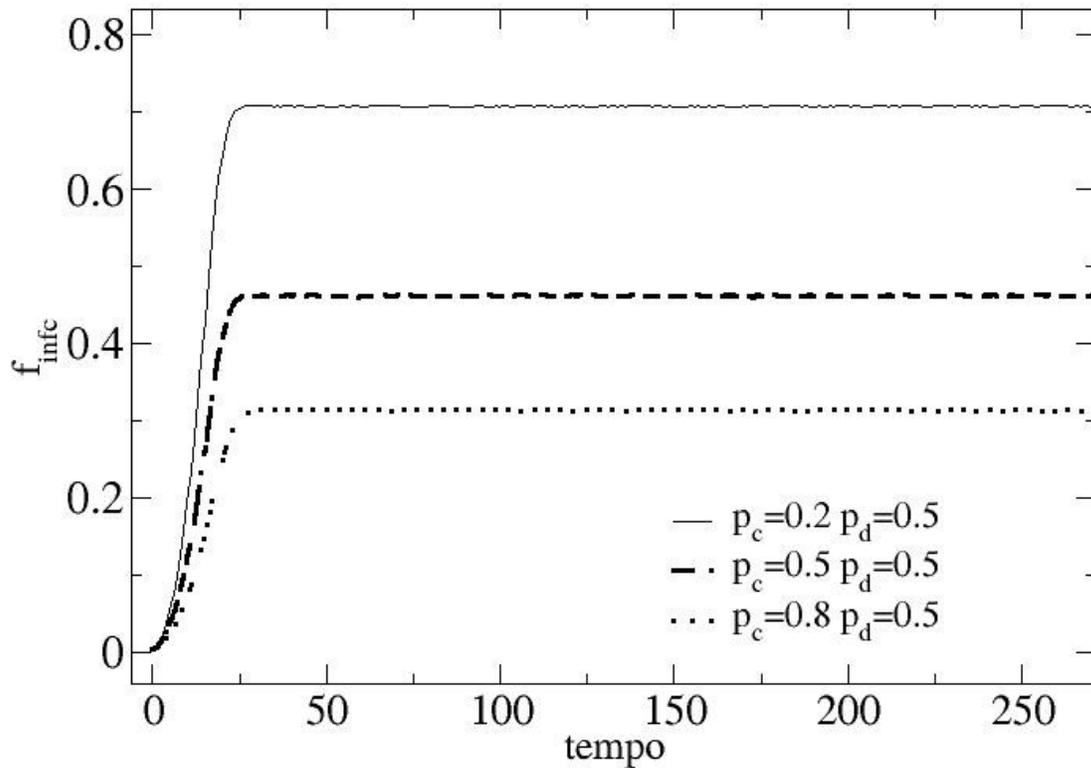
Considerando-se o modelo de autômato celular bidimensional em uma rede quadrada de comprimento linear  $L$ , sendo  $L$  um número natural, onde cada sítio localizado pela sua coordenada (horizontal)  $i$  e pela sua coordenada (vertical)  $j$ , representa uma pessoa que é associada à variáveis (estados) dinâmicas,  $\sigma_{i,j}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, L$ ,  $L \in \mathbb{N}$ , que podem assumir dois valores possíveis ( $K=2$ ), ou seja,  $\sigma_{i,j} = 0$  ou

1, na qual a pessoa estará doente se  $\sigma_{i,j} = 1$  e sadia se  $\sigma_{i,j} = 0$ . É considerada condições de contorno periódicas (fechadas), onde as células da extremidade são vizinhas das células da extremidade oposta. A vizinhança de um sítio é a vizinhança de Neumann, em que os vizinhos são os sítios imediatamente adjacentes a ele, à esquerda, à direita, abaixo e acima. Os estados  $\sigma_{i,j} = 0$  ou  $1$  dos sítios na rede são escolhidos aleatoriamente no início das simulações (condição inicial).

Todos os sítios são atualizados simultaneamente a cada passo de tempo de acordo com as seguintes regras locais:

- (i) pessoa sã ( $\sigma_{i,j} = 0$ ): se a pessoa, localizada com abscissa  $i$  e ordenada  $j$  possui algum vizinho doente no instante de tempo ( $t$ ), ou seja,  $\sigma_{i-1,j} = 1$  ou  $\sigma_{i+1,j} = 1$  ou  $\sigma_{i,j-1} = 1$  ou  $\sigma_{i,j+1} = 1$ , esta fica doente, no próximo passo de tempo, isto é,  $\sigma_{i,j}(t+1) = 1$ , com probabilidade  $P_d$ .
- (ii) pessoa doente ( $\sigma_{i,j} = 1$ ): se a pessoa, localizada com abscissa  $i$  e ordenada  $j$  está doente no tempo ( $t$ ), esta se torna sã (curada) no próximo instante de tempo, isto é,  $\sigma_{i,j}(t+1) = 0$ , com uma probabilidade  $P_c$ .

A Figura 6 refere-se o número de pessoas infectadas em função do tempo para o modelo descrito acima. Este resultado que foi obtido utilizando  $L = 20$ , isto é,  $L^2 = 20^2$  pessoas (sítios). Nas simulações foram realizadas uma média sobre 100 diferentes amostras. Uma pessoa infectada, isto é,  $\sigma_{i,j} = 1$  foi distribuída aleatoriamente na rede (condição inicial). A probabilidade de uma pessoa sadia ficar doente ( $P_d$ ) e a probabilidade de cura ( $P_c$ ) foram fixadas durante toda a simulação e iguais para todas.  $P_d$  foi fixado em 0.5 para todas as simulações e  $P_c$  igual a 0.2, 0.5 e 0.8 para os resultados representados pela curva contínua, tracejada e pontilhada respectivamente.



**Figura 6:** Fração de pessoas infectadas em função do tempo. Para  $P_d = 0.5$  e três valores distintos de  $P_c = 0.2$  (curva contínua);  $P_c = 0.5$  (curva tracejada);  $P_c = 0.8$  (curva pontilhada). A condição inicial foi 1 pessoa infectada na rede quadrada de tamanho linear  $L=20$ . Os resultados obtidos foram colocados com uma média sobre 100 diferentes amostras.

O número de pessoas infectadas cresce à medida que o tempo passa até aproximadamente 25 passos de tempo e após esse período, o número de pessoas infectadas atinge o equilíbrio. À medida em que aumenta a probabilidade de uma pessoa doente ficar curada ( $P_c$ ), a fração de pessoas infectadas diminui, mantendo a probabilidade de uma pessoa sadia ficar doente ( $P_d$ ) fixa para cada simulação (Figura 6).

## 2.2 Cafeicultura Baiana e Aspectos Biológicos do Bicho-Mineiro

### 2.2.1 A Importância da Cafeicultura na Bahia e a Presença do Bicho-Mineiro

O estado da Bahia ocupa o quinto lugar na produção de café nacional, sendo que o Brasil destaca-se como o maior produtor de café *Coffea arabica* L. no mundo. A cafeicultura constitui um dos pilares da economia brasileira e desempenha importante papel na economia baiana, gerando milhões de dólares em receitas cambiais (CONAB, 2010). Para Matiello (2000 *apud* MELO, 2005), a cafeicultura na Bahia é responsável pela participação significativa na geração de empregos e na renda das propriedades das regiões produtoras do Estado, que compreende as regiões do Planalto, Atlântico e Oeste. Dados da Secretaria da Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária (2010) mostram que a cafeicultura baiana vem crescendo nos últimos anos e destaca-se também como atividade de grande empregabilidade dentre os principais setores do agronegócio, sendo que a sua capacidade de geração de empregos registra que em média para cada 1 milhão de reais em faturamento o seguimento gera 404 vagas, o que demonstra sua importância para a economia baiana, tanto no mercado interno, quanto no externo.

De acordo com Reis (1990), Matiello (1991), Reis e Souza (1996) *apud* Melo (2005), o cafeeiro hospeda diversas espécies de artrópodes<sup>3</sup>, dentre elas o bicho-mineiro, *L. coffeella*, o qual destaca-se como uma das principais pragas do café em todo Brasil devido aos danos econômicos causados por esse inseto na produção de café, afetando o rendimento e a longevidade das plantas, pois o ataque do bicho-mineiro causa redução na área foliar e queda de folhas, diminuindo assim a

---

<sup>3</sup>Filo (*Arthropoda*) que compreende animais invertebrados, com membros articulados, corpo dividido em segmentos metaméricos e geralmente coberto de um tegumento quitinoso que é mudado a intervalos. Inclui os crustáceos, insetos, aranhas e animais relacionados. Disponível em: <http://michaelis.uol.com.br/moderno/portugues/index.php?lingua=portuguesportugues&palavra=Artr%F3podes&CP=18861&typeToSearchRadio=exactly&pagRadio=50>>. Acesso em: 12 out. 2010.

fotossíntese.

O inseto “deve seu nome às galerias que constrói entre as epidermes da folha, em consequência à destruição do tecido paliçádico, utilizado pelas lagartas para sua alimentação” (SOUZA *et al.*, 1998 *apud* CONCEIÇÃO, 2005, p.6). De acordo com Reis e Souza (2002), é uma praga exótica originária da África e foi encontrada no Brasil em 1851, provavelmente por mudas vindas das Antilhas e Ilha de Bourbon.

## 2.2.2 Aspectos Biológicos do Bicho-Mineiro

*Leucoptera coffeella* é um inseto monófago, pois ataca apenas o cafeeiro. De acordo com Souza (1998, *apud* CONCEIÇÃO, 2005) o inseto possui metamorfose completa, passando pela fase de ovo, lagarta, crisálida (pupa) e adulto (mariposa).

A fase ovo dura em média 5 a 21 dias, sendo que os ovos dificilmente podem ser vistos a olho nu, sendo achatados, brancos brilhantes, e de aspecto gelatinoso com dimensões de 0,30 mm de comprimento e 0,25 mm de largura, colocados pela mariposa fêmea na parte superior da folha. Depois dessa fase, o inseto passa para a fase lagarta, que dura em média de 9 a 40 dias. Nesta fase, que é a fase prejudicial para o cafeeiro, a lagarta penetra diretamente na folha e começa a se alimentar do tecido paliçádico (parênquima foliar); essas áreas atacadas vão secando e aumentando de tamanho à medida que as lagartas vão se desenvolvendo. Depois da fase lagarta, quando estão completamente desenvolvidas, com cerca de 6,0 mm de comprimento, deixam de se alimentar, e descem para parte inferior da planta, passando para a fase de crisálida, permanecendo durante 4 a 26 dias, em média, quando finalmente alcançam a fase adulto na proporção de 1 macho:1 fêmea. Nesta última fase, o inseto possui uma vida média de 15 dias. Como um todo, o ciclo biológico do bicho-mineiro (BM) pode durar de 19 a 87 dias de acordo com as condições climáticas, principalmente temperatura, umidade relativa do ar e precipitação (AVELAR, 2008; CONCEIÇÃO, 2005; MELO, 2005).

Na fase lagarta, o bicho-mineiro é predado por algumas espécies de insetos. Dentre

eles, as vespas assumem maior importância. Também nesta fase é parasitado por himenópteros (MELO, 2005).

As fêmeas do bicho-mineiro preferem ovipositar em folhas isentas de ovos para minimizar a competição intra-específica, a fim de garantir uma maior proliferação de sua prole (MICHEREFF, 2000). O período de acasalamento varia em torno de 1 a 5 dias (MICHEREFF; MICHEREFF FILHO; VILELA, 2007), ou seja, esse período de acasalamento correlaciona-se com tempo de maturidade do inseto na fase adulta. Depois deste período, as fêmeas iniciam a oviposição e são capazes de colocar mais de 50 ovos durante sua vida. (AVELAR, 2008).

Estudos realizados por Parra (1981 *apud* CONCEIÇÃO, 2005) mostram que em temperaturas mais elevadas o tempo para eclodir a lagarta é menor, logo a viabilidade que corresponde à porcentagem de lagartas que emergem, pode variar em função da temperatura. Também, a viabilidade da fase ovo pode variar, especialmente em função da temperatura. Em condições de laboratório, Parra (1985 *apud* OLIVEIRA; MARTINS; ZACARIAS, 2008) constatou que a duração da fase ovo foi igual a 10 dias a 20 °C, 5 dias a 27 °C e 4 dias a 30 °C. A duração fase lagarta também varia em função da temperatura, ou seja, a duração da fase diminui com o aumento da temperatura, sendo a duração média das lagartas igual a 20,5 dias a 20 °C, 9,5 dias a 27 °C e 9,5 dias a 30 °C. E também a viabilidade da fase lagarta que representa a porcentagem de lagartas que passam à fase crisálida, sendo 49,9 % a 20 °C, 72,4% a 27 °C e 80,7% a 30 °C. O mesmo acontece na duração da fase crisálida, aumentando a temperatura o tempo de vida do inseto nessa fase diminui. Sendo a duração média da fase crisálida de 14 dias a 20 °C, 5,5 dias a 27 °C e 4,4 dias a 30 °C e a viabilidade, ou seja, a porcentagem de adultos que emergem é de 78,7% a 20°C, 94,7% a 27 °C e 93,3% a 30 °C. E para os adultos, temperaturas de 20 °C e 27 °C, o tempo de vida é 12 dias e reduzido cerca de 4 dias em temperaturas de 30 °C (PARRA, 1981 *apud* CONCEIÇÃO, 2005).

Estudos realizados por Lima e outros (1977 *apud* MELO, 2005) sobre a flutuação populacional do bicho-mineiro, apontam que em certas regiões da Bahia o inseto está presente durante todo ano apresentando um aumento em sua população em épocas de seca e um decréscimo em períodos chuvosos.

## 3. Material e Métodos

### 3.1 Um Modelo de Autômatos Celulares para a Dinâmica Populacional do Bicho-Mineiro

No nosso modelo, consideramos uma rede quadrada de tamanho linear  $L$  para representar uma plantação de café em que cada ponto da rede (sítio) representa um cafeeiro. Em cada sítio  $(i,j)$  da rede, as populações de insetos foram designadas por  $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$ , para as fases ovo, lagarta, pupa e adulto, respectivamente. Analogamente, cada fase do ciclo biológico do inseto será representada por uma variável  $\sigma$ , que assume os seguintes valores:

$$\sigma = \begin{cases} 0, & \text{inseto na fase ovo} \\ 1, & \text{inseto na fase larva (lagarta)} \\ 2, & \text{inseto na fase crisálida (pupa)} \\ 3, & \text{inseto na fase adulto (mariposa)} \end{cases}$$

Inicialmente foram distribuídas aleatoriamente na rede quantidade iniciais do bicho-mineiro na fase ovo, lagarta, crisálida e adulto. A probabilidade de morte de cada fase é fixada durante toda a simulação, como também, comprimento linear da rede, tempo de maturidade (quando a mariposa começa a ovipositar), distância máxima do voo da mariposa para ovipositar, quantidade de ovos colocados em cada passo de tempo.

Para cada instante (passo) de tempo será atualizado o estado de cada um dos insetos na rede, de acordo com a seguinte regra:

$\sigma = 0$  ( fase ovo)

- O inseto permanece neste estado durante um tempo  $T_0$ . Depois deste período, o estado é atualizado para  $\sigma = 1$  (fase lagarta) na proporção 1 para 1 (fêmea e macho).

- Em cada tempo  $t$  o inseto pode morrer naturalmente com probabilidade  $P_0$ ;
- $\sigma = 1$  (lagarta)
- O inseto permanece neste estado durante um tempo  $\mathcal{T}_1$ . Depois deste período, o estado é atualizado para  $\sigma = 2$  (fase pupa).
  - Em cada tempo  $t$  o inseto pode morrer naturalmente com probabilidade  $P_1$ ;
- $\sigma = 2$  (crisálida)
- Depois de um período  $\mathcal{T}_2$  o estado é atualizado para  $\sigma = 3$ ;
  - O inseto pode morrer naturalmente, em um dado instante, com probabilidade  $P_2$ ;
- $\sigma = 3$  (adulto)
- Decorrido um tempo  $\mathcal{T}_3$  neste estado, o inseto morre naturalmente;
  - Depois de um período para alcançar a maturidade  $t_{\text{mat}}$ , o inseto (fêmea) começa a ovipositar (na proporção 1 macho:1 fêmea) e, portanto, com estado inicial  $\sigma_0$ ;
  - Depois de ovipositar 1 ovo, o inseto voa e escolhe, aleatoriamente, um outro sítio na rede para ovipositar, repetindo isto  $N_{\text{ovo}}$  vezes.

Em todas as simulações foram fixados alguns parâmetros, a fim de observar como estes parâmetros interfere na dinâmica populacional do BM, tais como: probabilidade de morte para a fase ovo, lagarta e pupa, igual a 0.16, 0.1 e 0.05, respectivamente; número inicial de ovos, lagarta, pupa e adulto, igual a 20, 10, 60 e 20, respectivamente; o tempo de vida do inseto na fase ovo, lagarta, pupa e adulto, igual a 13, 24, 15 e 12 passos de tempo, respectivamente; tempo de maturidade da mariposa igual a 3 passos de tempo; número de ovos colocados pela mariposa em cada passo de tempo igual a 5. As quantidades iniciais de inseto foram distribuídas aleatoriamente na rede contendo 400 sítios ( $L = 20$ ).

Para simular efeitos sazonais, foi incluída uma dependência temporal nos tempos de vida de cada fase,  $\tau$ 's. O motivo deste tipo de dependência se dá pelo fato de que  $\tau$

depende da temperatura e esta por sua vez, assume ser uma função senoidal, típica daquelas observadas no campo (MELO, 2005).

Assim sendo, assume-se que cada  $\tau$  dependa do tempo da seguinte maneira:

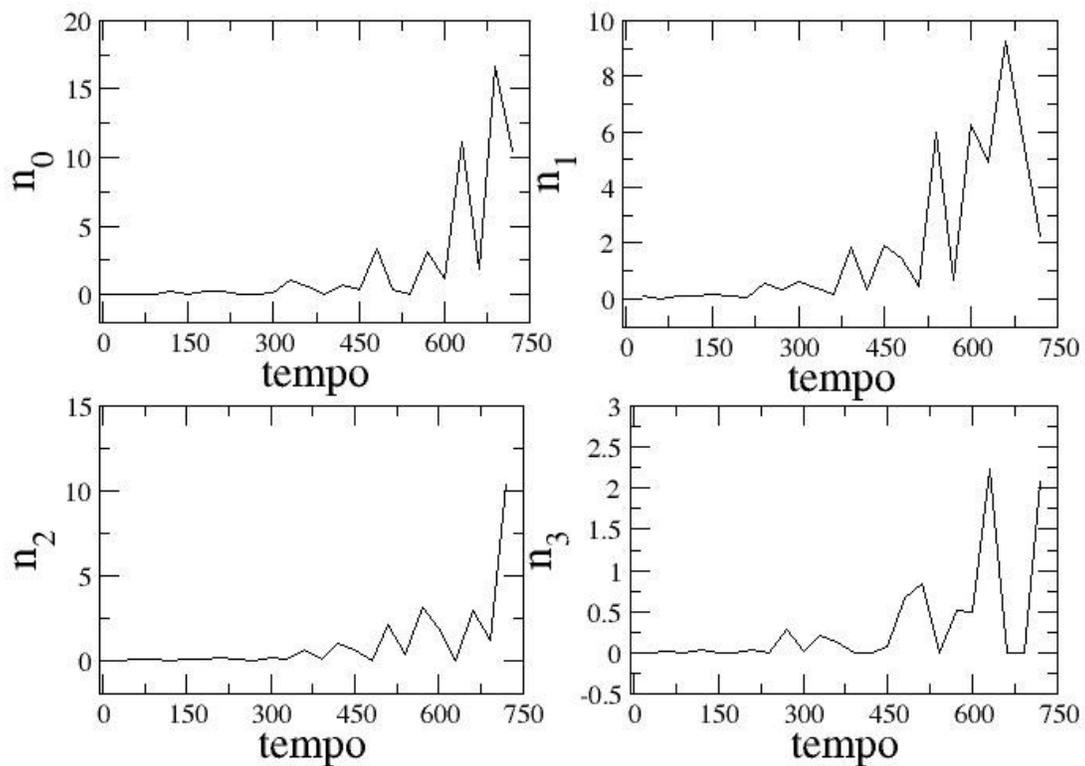
$$\tau(t) = \tau^* + \frac{\tau^*}{2} \sin\left(\frac{2t\pi}{T} + \varphi\right)$$
 onde  $T$  é o período e  $\varphi$  é um ângulo de fase para ajustar aos dados de campo.

Considerando os mesmos parâmetros já apresentados e incluindo os efeitos sazonais descritos anteriormente, realizou-se novas simulações, utilizou-se um período  $T = 360$  e  $\varphi = \pi$ .

Para avaliar a influência das probabilidades de morte em cada fase do inseto na dinâmica populacional, utilizou os mesmos parâmetros das simulações com o efeito sazonal com as probabilidades de morte na fase ovo ( $r_0$ ) e na fase crisálida ( $r_2$ ) fixas e iguais a 0.2 ( $r_0 = r_2 = 0.2$ ). E variando a probabilidade de morte da fase lagarta ( $r_1$ ) assumindo valores iguais a 0.16, 0.25 e 0.2 para cada simulação.

## 4. Resultados e Discussão

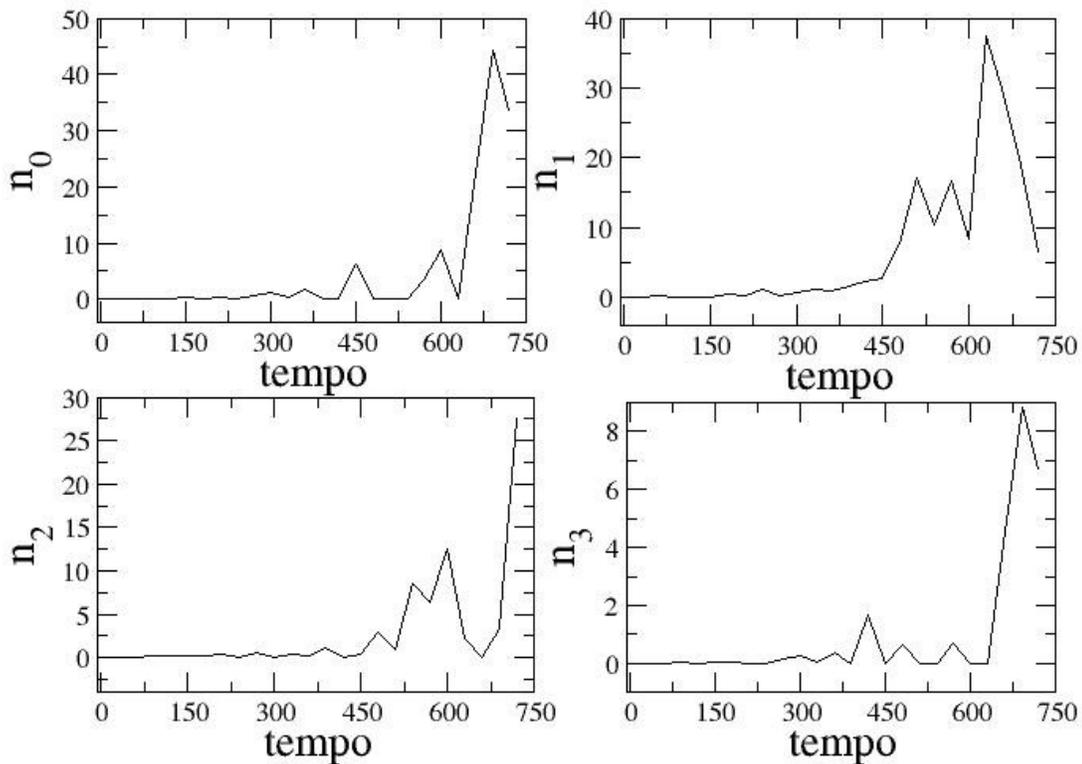
O resultado da dinâmica populacional do bicho-mineiro da configuração apresentada inicialmente pode ser visto na Figura 7. Esse resultado não levou em consideração o efeito sazonal.



**Figura 7:** Números de insetos em cada uma das fases (média sobre 4 amostras) em 720 passos de tempo sem efeito sazonal. Sendo  $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$  iguais à densidade (média sobre  $L^2$ ) de inseto na fase ovo, lagarta, crisálida e mariposa, respectivamente.

Observa-se que os níveis populacionais em cada fase possuem, inicialmente, um leve crescimento e flutuação típicos da passagem do inseto de uma dada fase para a seguinte. Um aumento pronunciado nos níveis populacionais é observado quando  $n_3$  (número de inseto na fase adulta) aumenta significativamente ( $t = 450$ ). Isto se deve ao fato de que o inseto na fase adulta inicia a oviposição, aumentando assim, as populações das outras fases do inseto.

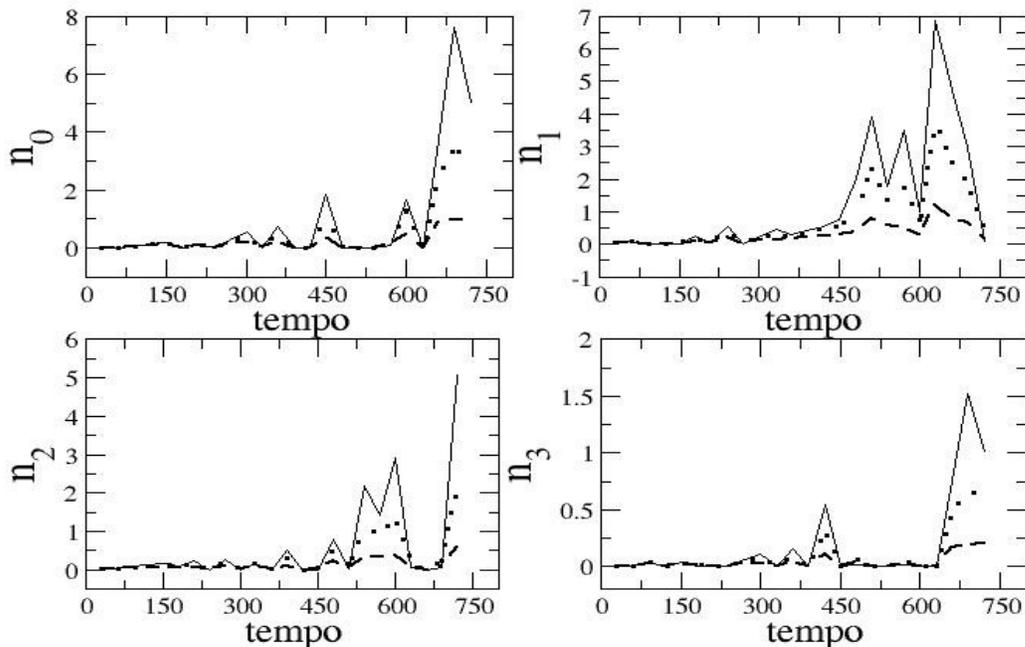
Para obter o resultado (Figura 8) utilizou-se a função senoidal descrita anteriormente, a fim de incluir uma dependência temporal nos  $\tau$ 's (efeito sazonal) onde  $T = 360$  e  $\phi = \pi$ , além de todos os outros valores dos parâmetros utilizados para gerar a figura 7.



**Figura 8:** Números de insetos em cada uma das fases (média sobre 4 amostras) em 720 passos de tempo com efeito sazonal. Sendo  $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$  iguais à densidade (média sobre  $L^2$ ) de inseto na fase ovo, lagarta, crisálida e mariposa, respectivamente.

Em comparação com os resultados obtidos sem efeito sazonal (Figura 7), observou-se que os níveis populacionais (Figura 8) assumem valores acima daqueles exibidos na figura 7 indicando que os efeitos térmicos influenciam diretamente na dinâmica populacional do BM. Apesar do aumento nas populações do inseto em cada fase, ao incluir-se os efeitos sazonais, observou-se, como visto na figura 7, que o crescimento mais pronunciado ocorre, também, em torno de 450 passos de tempo, isto é  $t \sim T$ .

A Figura 9 mostra a influência das probabilidades de morte em cada fase nos níveis populacionais do BM. Para isso, utilizou os mesmos parâmetros das simulações com o efeito sazonal com as probabilidades de morte na fase ovo ( $r_0$ ) e na fase crisálida ( $r_2$ ) fixas e iguais a 0.2 ( $r_0 = r_2 = 0.2$ ). E a fase lagarta a probabilidade de morte ( $r_1$ ) assumiu valores de 0.16, 0.25 e 0.2 representados pela curva contínua, tracejada e pontilhada.



**Figura 9:** Evolução temporal de todas as fases do bicho-mineiro em diferentes probabilidades de morte para cada fase do inseto, fixando a probabilidade de morte da fase ovo e crisálida iguais a 0.2 e variando a probabilidade de morte da fase lagarta igual a 0.16 (curva contínua); 0.2 (curva pontilhada); 0.25 (curva tracejada).

As simulações realizadas com diferentes probabilidades de morte de cada fase do BM apresentam comportamento similar (Figura 9).

Analisando a figura 9 observa-se que é possível controlar o nível populacional na fase lagarta, pois é nessa fase que o inseto sofre a ação da predação e parasitismo, para manter os níveis populacionais de todas as fases em nível aceitável. Isto sugere que o controle biológico pode ser útil para controlar o desenvolvimento da praga nos cafezais, uma vez que o controle biológico é feito utilizando predadores, parasitóides e entomopatógenos do BM para auxiliar na sua redução (REIS; SOUZA, 2002).

## 5. Conclusões

Este presente trabalho apresenta um modelo de ACs para a dinâmica populacional do BM. Em termos qualitativos, o modelo recupera uma grande característica da dinâmica populacional observada no campo (MELO, 2005): oscilações sazonais em cada fase.

Neste modelo de ACs foi observado a influência da temperatura nos níveis populacional do BM e a dependência da dinâmica populacional com a probabilidade de morte na fase lagarta, isto é,  $r_1$ , que indica uma possível maneira de controlar a evolução da praga em campo.

## 6. Considerações Finais e Perspectivas

Sabe-se que o bicho-mineiro na fase lagarta é predado por vespas (MELO, 2005) sendo assim, pretende-se acrescentar ao modelo utilizando a predação, incluindo na regra da fase lagarta uma probabilidade de ser predada por uma vespa ( $P_v$ ); tornando o modelo mais realístico. Também pretende-se estudar os padrões espaço-temporais de cada fase gerada pelos ACs.

## 7. Referências

ALVES, Sidiney Geraldo. **Simulações de eleições e dos efeitos de pesquisa de opinião usando um modelo de autômatos celulares**. 2002. 67p. Tese (Mestrado em Física) – Departamento de Física, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002. Disponível em: < <http://www.ufv.br/dpf/mestrado/teses/sidiney.pdf> >. Acesso em: 6 nov. 2010.

ALVES, Sidiney Geraldo; MARTINS, Marcelo Lobato; OLIVEIRA NETO, Nemésio Matos. Electoral surveys influence on the voting processes: A cellular automata model. **Physica. A**, Holanda, v. 316, p.601-614, 2002.

AVELAR, Maria Betânia Lopes. **Análise de Agregação Espacial do Bicho-Mineiro do Cafeeiro (*Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville e Perrotet, 1842) (*Lepidoptera:Lyonetiidae*)) em Lavoura Cafeeira (*Coffea arabica* L.) Orgânica em Formação**. 2008. 81p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

BAPTESTINI, Elizabeth Machado. **Um sistema presa-predador com evasão mediada por feromônio de alarme**. 2006. 81p. Tese (*Magister Scientiae*) – Departamento de Física, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006. Disponível em: <<http://www.ufv.br/dpf/mestrado/teses/baptestini.pdf>>. Acesso em: 6 nov. 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB/ MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Acompanhamento da Safra Brasileira Café Safra 2010 terceira estimativa**, Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/90a470414b206e2314513e20522278aa.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2010.

CONCEIÇÃO, Celso Henrique Costa. **Biologia, dano e controle do bicho-mineiro em cultivares de café arábica**. 2005. 86p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo, Campinas, 2005.

FERREIRA JR., Silvio da Costa; MARTINS, Marcelo Lobato; VILELA, Marcelo José. A Reaction-Diffusion Model for the Growth of Avascular Tumor. **Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids and Related Interdisciplinary Topics**, USA, v. 65, n. 021907, 2002.

MELO, Thiago Lima. **Flutuação Populacional, Predação e Parasitismo do Bicho-Mineiro *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville e Perrotet, 1842) (Lepidoptera: Lyonetiidae) em Duas Regiões Cafeeiras do Estado da Bahia.** 2005. 135p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2005.

MICHEREFF, Mirian Fernandes Furtado. **Comportamento reprodutivo do bicho-mineiro-do-cafeeiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville,1842) (Lepidoptera: Lyonetiidae).** 2000. 46p. Tese (mestrado em Entomologia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

MICHEREFF, Mirian Fernandes Furtado; MICHEREFF FILHO, Miguel; VILELA, Evaldo Ferreira. Comportamento de Acasalamento do Bicho-Mineiro-do-Cafeeiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Meneville) (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Neotropical Entomology**, v. 36, p. 376-382, 2007.

OLIVEIRA, Anderson Castro Soares de; MARTINS, Solange Gomes Faria; ZACARIAS, Mauricio Sergio. Computer simulation of the coffee leaf miner using sexual Penna aging model. **Physica. A**, v. 387, p. 476-484, 2008.

OLIVEIRA NETO, Nemésio Matos. **Álgebra de Heisenberg Generalizada, Partículas Compostas e Estados de Quase-Equilíbrio.** 2006. 167p. Tese (Doutorado em Física) – Centro Brasileiro em Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2006.

PASCOAL, Fabio Sant’Ana. **Sociedade artificial fight4life: autômato celular modelando vida artificial.** 2005. 64p. (Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

REIS, Paulo Rebelles; SOUZA, Júlio César. Insetos na folha. **Revista Cultivar Grandes Culturas**, Pelotas, n. 39, p. 30-33, maio 2002. Disponível em: <[http://www.grupocultivar.com.br/arquivos/gc39\\_insetos.pdf](http://www.grupocultivar.com.br/arquivos/gc39_insetos.pdf)>. Acesso em: 5 out. 2010.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, IRRIGAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA – SEAGRI. **Especial: O Café na Bahia**, Salvador, 2010. Disponível em: <[http://www.seagri.ba.gov.br/especial\\_ocafenabahia.pdf](http://www.seagri.ba.gov.br/especial_ocafenabahia.pdf)>. Acesso em: 19 nov. 2010.

SCHATTEN, Alexander. **Cellular Automata Tutorial.** 2008. Disponível em: <<http://www.schatten.info/info/ca/ca.html>>. Acesso em: 2 nov. 2010.

SILVA, Alessandro Costa da; et at. A natureza fractal de ácidos húmicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Brasil, v. 24, n. 4, p.759-766, 2000.

WOLFRAM, Stephen. **Statistical Mechanics of Cellular Automata (1983)**

Disponível em: < <http://www.stephenwolfram.com/publications/articles/ca/83-statistical/3/text.html>>. Acesso em: 27 nov. 2010.