

# USO DE MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NA AVALIAÇÃO DO CONTROLE BIOLÓGICO DA MINADORA DO CITROS

Sônia Ternes<sup>1</sup>  
Jurandir Fernando Ribeiro Fernandes<sup>2</sup>  
Hyun Mo Yang<sup>3</sup>

**RESUMO** – O uso de simuladores aplicados ao controle biológico permite avaliar a dinâmica do sistema praga-parasitas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do controle biológico do inseto-praga *Phyllocnistis citrella* (larva-minadora-da-folha-dos-citros) e a interação com seus inimigos naturais *Galeopsomyia fausta* e *Ageniaspis citricola*. Para tanto, foi desenvolvido o simulador SIMCOBIM, sob o ambiente de programação do Matlab<sup>®</sup>, apoiado em modelos matemáticos compartimentais e determinísticos. Os parâmetros dos modelos foram calibrados a partir de dados encontrados na literatura. Na análise dos cenários, observou-se a dinâmica das populações a partir do nível de limiar econômico. Observou-se que a praga atinge o nível de dano econômico (ND) no prazo máximo de 60 dias, quando da ausência de parasitos no mesmo ambiente e com condições favoráveis de temperatura e umidade. Em outro cenário, com as três espécies em interação, verificou-se que o inseto-praga não atingiu o ND. Além disso, a população do parasito exótico tendeu a deslocar a do nativo, quando a disponibilidade de hospedeiros alternativos para a *G. fausta* foi pequena.

**Palavras chaves:** larva-minadora-da-folha-dos-citros, inimigos naturais, modelos matemáticos, dinâmica populacional

## USING MATHEMATICAL MODELLING AND SIMULATION TO EVALUATE THE BIOLOGICAL CONTROL OF CITRUS LEAFMINER

**ABSTRACT** – The use of simulators in the biological control of insect pests allows evaluating the pest-parasite system. Our goal was to evaluate the efficiency of the biological control of the pest *Phyllocnistis citrella* (citrus leafminer) and to study the interaction with its natural

---

<sup>1</sup> Doutora em Engenharia Elétrica; Embrapa Informática Agropecuária. [sonia@cnptia.embrapa.br](mailto:sonia@cnptia.embrapa.br)

<sup>2</sup> Eng. Mecânico, Mestre e Doutor, Professor Titular da Faculdade de Elétrica e de Computação, UNICAMP.

<sup>3</sup> Físico, Mestre, Doutor e Livre Docente, Professor Titular do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, UNICAMP.

enemies *Galeopsomyia fausta* and *Ageniaspis citricola*. The simulator SIMCOBIM was developed using the Matlab<sup>®</sup> programming language, which is based on compartmental and deterministic mathematical models. The parameters of the models were calibrated based on data found in the literature. To analyse the scenarios, the population dynamics was observed from the economic threshold viewpoint. It was observed that the pest reached the economic injury level (EIL) in 60 days. It was possible because the absence of parasites in the same habitat, not to mention the favourable scenario conditions such as temperature and humidity. In another scenario, where the three species interacted among themselves, it was verified that the pest does not reach the EIL. Furthermore, the exotic parasite population tends to displace the native one when the number of available alternative hosts for the *G. fausta* was small.

**Keywords:** citrus leafminer, natural enemies, mathematical models, population dynamics

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura do citros apresenta grande importância econômica para o Brasil. Em 1996 o Brasil exportou cerca de 1,2 milhão de toneladas de suco concentrado de laranja, gerando uma receita de 1,2 bilhão de dólares (GRAZIANO, 1997). Na mesma época o Estado de São Paulo foi responsável por 80% da produção nacional, tendo alcançado em 1997 a produção de 383 milhões de caixas (de 40,8 kg). Estatísticas atuais mostram que esses números têm se mantido relativamente constantes (ABECITRUS, 2007; São Paulo, 2007).

Na década de 90 surgiram novas pragas e doenças na citricultura brasileira, como a larva-minadora-da-folha-dos-citros, *Phyllocnistis citrella* (Lepidoptera: Gracillariidae), a qual foi encontrada pela primeira vez no Brasil em março de 1996 em Itacemópolis, SP, e rapidamente se disseminou para outros Estados (CHAGAS, 1999).

A *P. citrella* ataca preferencialmente folhas novas em brotações de citros. A fêmea da *P. citrella* ovipõe sob a superfície

ventral da folha. O ovo eclode dando origem à larva que fura a epiderme da folha e caminha formando minas. A pupação ocorre dentro da mina, em uma célula especial (câmara pupal) localizada na margem da folha. A formação das minas leva à atrofia do tecido foliar e favorecem a infecção da planta por agentes fitopatogênicos, como o cancro cítrico, causado pela bactéria *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*.

A região de Limeira, uma das cinco maiores regiões citrícolas do Estado de São Paulo, apresenta as condições básicas para o desenvolvimento da *P. citrella*, ou seja, umidade relativa do ar superior a 60% e temperaturas médias acima de 25°C, durante os meses de setembro a abril, período no qual se concentram os maiores fluxos de brotações novas (CHAGAS, 1999), demonstrando o potencial de danos desse inseto-praga.

A espécie *Galeopsomyia fausta* (Hymenoptera: Eulophidae) foi identificada como o principal parasito nativo da *P. citrella* no Estado de São Paulo, onde chegou a índices de 90% entre os parasitos nativos coletados em campo (COSTA *et al.*, 1999).

A *G. fausta* é um ectoparasito da fase de pupa, e sua reprodução é do tipo partenogênese telítoca (óvulo não fecundado produz apenas fêmeas), apresentando machos ocasionais. A fêmea da *G. fausta* ovipõe sobre a câmara pupal da *P. citrella*. O ovo eclode dando origem à larva que se alimenta da pupa do hospedeiro, ocasionando sua morte.

A espécie *Ageniaspis citricola* (Hymenoptera: Encyrtidae) foi introduzida no Brasil em 1998, para o controle biológico da *P. citrella* (CHAGAS, 1999), e é um endoparasito de ovos e larvas jovens. O parasitismo é gregário, podendo produzir até oito ovos por hospedeiro. Os ovos não fertilizados produzem machos (partenogênese arrenótoca) e ovos fertilizados produzem machos e fêmeas. A fêmea da *A. citricola* ovipõe preferencialmente dentro de ovos e larvas de 1º ínstar da *P. citrella*, matando o hospedeiro quando esse alcança o estágio de pré-pupa.

Para combater a *P. citrella* usam-se agrotóxicos, mas pode-se utilizar também o controle biológico, como preconizado pelo Manejo Integrado de Pragas (MIP). No MIP, o controle biológico é associado ao uso de técnicas culturais e inseticidas, a fim de obter um resultado eficiente, econômico e ecologicamente viável (BOSCH *et al.*, 1985). O monitoramento do nível populacional da praga é necessário, observando-se alguns índices importantes, tais como o nível de dano econômico (ND) — menor densidade populacional que causa prejuízo econômico, compensando, portanto, a aplicação de medidas de controle — e o nível de limiar econômico (NL) — nível populacional no qual medidas devem ser tomadas para se

evitar que a população do inseto-praga atinja o ND — (SILVEIRA NETO *et al.*, 1976).

O objetivo desse trabalho foi explorar cenários obtidos de modelos matemáticos, para analisar a dinâmica populacional do inseto-praga *Phyllocnistis citrella* (larva-minadora-da-folha-dos-citros) e seus inimigos naturais, as espécies *Galeopsomyia fausta* e *Ageniaspis citricola*. Como não existem dados biológicos relativos à interação praga-parasitos, avaliou-se por simulação a eficiência do controle biológico do inseto-praga, incluindo a interação entre as duas espécies de inimigos naturais.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O fenômeno biológico da interação praga-parasitos é descrito por um modelo matemático determinístico e compartimental, representado por um sistema de equações diferenciais ordinárias não-lineares. Na construção do modelo e definição dos compartimentos considerou-se que o modelo representa a população de fêmeas ao longo do tempo, sendo que a população total, que inclui os machos, pode ser estimada usando-se a razão sexual de cada espécie. Os compartimentos não interceptantes representam as fases do ciclo de vida de cada espécie envolvida diretamente no processo de parasitismo. Dessa forma, usam-se as notações O, L e P para representar, respectivamente, ovos, larvas e pupas, e as notações M, G e A para representar os adultos da praga, parasito nativo e exótico. Considera-se o fato de que o inimigo natural nativo é um parasito generalista, de tal modo que a população dessa espécie mantém um crescimento natural independente do nível da população da

praga, enquanto que para o inimigo natural exótico, um parasito específico, o crescimento da sua população só é possível na presença da praga, devido ao benefício decorrente do parasitismo. Uma vez que a competição se expressa indiretamente pela disponibilidade do alimento (praga), não se considera competição direta entre os dois parasitos.

Um modelo genérico incorporando a dinâmica vital das três populações em interação é descrito pelo sistema de equações (2.1). Nesse sistema, cada equação diferencial descreve a dinâmica de variação de um dado compartimento.

Os parâmetros relacionados ao inseto-praga são as taxas de larvas que originam pupas ( $\alpha_1$ ), pupas que dão origem a adultos ( $\alpha_2$ ), mortalidade das fases de larva ( $\mu_1$ ), pupa ( $\mu_2$ ) e fêmea adulta ( $\mu_3$ ). A função  $\Phi(M)$  corresponde à taxa *per capita* de crescimento da população do inseto-praga. As funções  $f_2(P,G)$ ,  $f_3(L_m, A_v)$  e  $f_4(L_m, A)$  correspondem ao parasitismo de fêmeas do inimigo natural nativo ( $G$ ) e de fêmeas virgens ( $A_v$ ) e acasaladas ( $A$ ) do inimigo natural exótico sobre o inseto-praga, respectivamente. A fase ovo foi incorporada em  $\Phi(M)$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dL_m}{dt} = \Phi(M)M - (\alpha_1 + \mu_1)L_m - f_3(L_m, A_v) - f_4(L_m, A) \\ \frac{dP}{dt} = \alpha_1 L_m - (\alpha_2 + \mu_2)P - f_2(P, G) \\ \frac{dM}{dt} = \alpha_2 P - \mu_3 M \\ \frac{dL_g}{dt} = \Phi'(G)G - (\alpha'_{12} + \mu'_{12})L_g + g'(P, G) \\ \frac{dG}{dt} = \alpha'_{12} L_g - \mu'_3 G \\ \frac{dL_a}{dt} = \Phi''(A)A - (\alpha''_{12} + \mu''_{12})L_g + g''(L_m, A) \\ \frac{dA_v}{dt} = \alpha''_{12} L_a - (\alpha''_3 + \mu''_3)A_v \\ \frac{dA}{dt} = \alpha''_3 A_v - \mu''_4 A \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Os parâmetros relacionados ao parasito nativo são as taxas de larvas do parasito nativo que, passando pela fase de pupa, vão originar indivíduos adultos ( $\alpha'_{12}$ ), mortalidade das fases de larva e pupa ( $\mu'_{12}$ ), e mor-

talidade do indivíduo adulto ( $\mu'_3$ ). As funções  $\Phi'(G)$  e  $g'(P,G)$  representam a taxa *per capita* de crescimento da população do parasito nativo e o crescimento da população do parasito nativo decorrente do parasitismo,

respectivamente. A fase de pupa está embutida nos parâmetros  $\alpha'_{12}$  e  $\mu'_{12}$ .

Os parâmetros relacionados ao parasito exótico são as taxas de larvas do parasito que, passando pela fase de pupa, vão originar fêmeas virgens ( $\alpha''_{12}$ ), fêmeas pós acasalamento ( $\alpha''_3$ ), mortalidade das fases de larva e pupa ( $\mu''_{12}$ ), mortalidade de fêmeas virgens ( $\mu''_3$ ) e mortalidade de fêmeas acasaladas ( $\mu''_4$ ). As funções  $\Phi''(A)$  e  $g''(L_m, A)$  representam, respectivamente, a taxa per capita de crescimento da população do parasito exótico e o crescimento da população do inimigo exótico decorrente do parasitismo. A fase de pupa está embutida nos parâmetros  $\alpha''_{12}$  e  $\mu''_{12}$ .

As funções  $f_2(\cdot)$ ,  $f_3(\cdot)$ ,  $f_4(\cdot)$ ,  $g'(\cdot)$  e  $g''(\cdot)$  descrevem a interação entre as espécies do inseto-praga e dos parasitos e são aproximadas pelas expressões (2.2). É assumido existir um encontro aleatório (Severo, 1969) entre a fêmea de *G. fausta* e a pupa do inseto-praga, e entre as fêmeas virgens e acasaladas de *A. citricola* e a larva do inseto-praga. Assim, devido a esses encontros, ocorre um decréscimo na população de pupas e larvas da *P. citrella*, proporcional às taxas  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ , respectivamente. Em contraposição, as populações de pupas do parasito nativo e de larvas do parasito exótico são beneficiadas por este encontro aleatório, de modo proporcional às taxas  $k'_1$  e  $k''_1$ , respectivamente. Essas aproximações são razoavelmente boas quando as populações são abundantes, o que pode não ocorrer na prática. Porém, a utilização de expressões simples para descrever tais funções facilita a obtenção de resultados analíticos.

$$\begin{cases} f_2(P, G) = k_2 PG \\ f_3(L_m, A_v) = k_3 L_m A_v \\ f_4(L_m, A) = k_4 L_m A \\ g'(P, G) = k'_1 PG \\ g''(L_m, A) = k''_1 L_m A, \end{cases} \quad (2.2)$$

Os parâmetros  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_3$ ,  $\alpha'_{12}$ ,  $\mu'_{12}$ ,  $\mu'_3$ ,  $\alpha''_{12}$ ,  $\alpha''_3$ ,  $\mu''_{12}$ ,  $\mu''_3$  e  $\mu''_4$  são os parâmetros biológicos que podem ser ajustados a partir de experimentos ou de dados encontrados na literatura. As taxas de crescimento natural  $\Phi(\cdot)$ ,  $\Phi'(\cdot)$  e  $\Phi''(\cdot)$  caracterizam as diferentes considerações sobre a dinâmica vital. Nas simulações realizadas considera-se que as três populações crescem da mesma forma e que são controladas pela capacidade de saturação do meio ambiente, ou seja, crescimento logístico de Verhulst (EDELSTEIN-KESHET, 1988; MURRAY, 1993). Tais funções são caracterizadas pelas expressões:

$$\begin{cases} \Phi(M) = \phi \left( 1 - \frac{M}{c} \right) \\ \Phi'(G) = \phi' \left( 1 - \frac{G}{c'} \right) \\ \Phi''(A) = \phi'' \left( 1 - \frac{A}{c''} \right) \end{cases} \quad (2.3)$$

A hipótese de que o crescimento da população do parasito exótico só é possível na presença do inseto-praga, por ser um parasito específico, corresponde a se ter  $\phi'' = 0$ , ou seja, o crescimento intrínseco da população é nulo. Isso é utilizado no processo de simulação, porém os estudos analíticos

consideram  $\phi'' \neq 0$ . Ternes (2001) apresentou um estudo do sistema de equações (2.1) em regime estacionário para as populações isoladas, considerando  $\phi'' \neq 0$ . Todas as análises matemáticas encontram-se no trabalho citado e neste artigo são mostrados alguns resultados aplicáveis em controle biológico de pragas.

A análise dos cenários é realizada pelo software SIMCOBIM (Simulador do Controle Biológico da Minadora do Citros), desenvolvido usando-se a linguagem de programação do Matlab® (MATHWORKS, 1999), em ambiente UNIX e plataforma SUN.

O SIMCOBIM é baseado em modelos matemáticos que descrevem a dinâmica populacional dos insetos no período de setembro a abril, no município de Limeira, SP. Assim, considera-se que as análises são realizadas no contexto de pior caso (maior dano econômico), ou seja, na época mais adequada para o desenvolvimento da *P. citrella*. A temperatura média mensal da região geográfica no período analisado é o fator abiótico responsável pela variação dos parâmetros biológicos dos modelos.

O usuário interage com o simulador apenas na primeira parte do processo de simulação, referente à interface. Nessa fase o usuário responde as perguntas sobre o modelo a ser simulado (uma espécie isolada, duas ou três espécies), formas de crescimento de cada uma das espécies (constante, via controle intra-específico ou crescimento logístico de Verhulst), condições iniciais (populações iniciais, fatores de acréscimo, de decréscimo e valor da capacidade de saturação do meio, se necessário), forma de a-

tualização da temperatura durante o período de simulação (constante, variável diariamente ou semanalmente) e define o período de simulação.

Na segunda parte do processo, o SIMCOBIM emite um relatório inicial com resultados analíticos sobre os pontos de equilíbrio estacionário para as populações isoladas. Se o usuário optou pela simulação com duas espécies, o simulador fornece também os níveis populacionais em equilíbrio para as populações em interação, calculados sob a hipótese de temperatura constante a 25°C (análise de pior caso), analisa a estabilidade de tais pontos e obtêm limites analíticos para a validade dos parâmetros relacionados ao benefício ( $k'_1$  e  $k''_1$ ) ou prejuízo ( $k_i$ ) decorrente do processo de parasitismo.

Após a apresentação desse relatório inicia-se a execução do processo dinâmico. A partir das equações diferenciais ordinárias (EDO) que representam o modelo escolhido pelo usuário, um processo de Runge-Kutta de quarta ordem (PRESS *et al.*, 1999) é chamado sucessivas vezes para a solução do sistema de EDO. A cada execução, de acordo com o período de simulação determinado pelo usuário, a temperatura média mensal é verificada, os parâmetros biológicos referentes a essa temperatura são escolhidos e uma nova execução da função de Runge-Kutta inicia-se para aquela unidade de tempo (dia ou mês). Ao final do tempo de execução, um novo relatório é emitido, com informação sobre os níveis populacionais finais resultantes do processo de Runge-Kutta, e são mostrados em tela os gráficos que representam a dinâmica das populações de imaturos e de fêmeas adultas.

Duas bases de dados foram construídas para utilização do simulador SIMCO-BIM: uma de temperaturas médias (diárias ou mensais) da região geográfica em estudo (Limeira) e, a outra, de parâmetros biológicos em função de seis diferentes temperaturas médias (18, 20, 22, 25, 28 e 30°C).

Os parâmetros biológicos do sistema de equações (2.1) (unidade em dias<sup>-1</sup>) foram estimados com base nos trabalhos de Chagas (1999), Edwards; Hoy (1998) e Llácer *et al.* (1998). A base de temperaturas médias mensais da região de Limeira foi construída a partir de dados cedidos pela Seção de Climatologia Agrícola do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), sobre a série histórica do período entre 1970 e 2000 (30 anos).

Não se conhecem os valores dos parâmetros referentes ao ciclo vital de *A. citricola* e como se tem por objetivo a análise da competição entre as duas espécies de inimigos naturais, foram considerados dois casos possíveis para a longevidade da fêmea adul-

ta desse parasito. Para isso, assumiu-se que a fêmea adulta desse parasito tende a viver menos do que a fêmea do parasito nativo (*G. fausta*), devido aos altos requisitos de temperatura média e umidade relativa (EDWARDS; HOY, 1998; SACARÍAS; CANALES, 1999). Assim, adotou-se, para análise de cenários, que a longevidade do parasito exótico corresponde a 50% e a 25%, da longevidade do parasito nativo.

As Tabelas 1, 2 e 3 mostram os valores dos parâmetros biológicos estimados para as populações do inseto-praga, parasito nativo e os dois casos considerados para o parasito exótico. Considerou-se  $\mu''_3 = \mu''_4$  e  $\alpha''_3 = 0,8 \text{ dias}^{-1}$  em ambos os casos.

Nas simulações, tomou-se por hipótese um talhão de 4,8 hectares composto por 2.000 plantas de laranja (monocultura) com idades entre seis e oito anos. Sob tais condições estima-se que cada planta possui cerca de 50.000 folhas distribuídas em 2.500 ramos verdes (20 folhas/ramo).

**Tabela 1** - Valores dos parâmetros biológicos (por dia) da população do inseto-praga, *Phyllocnistis citrella*, em função da temperatura (°C) <sup>(1)</sup>.

| Temperatura | $\alpha_1$ | $\mu_1$ | $\alpha_2$ | $\mu_2$ | $\mu_3$ | $\phi$ |
|-------------|------------|---------|------------|---------|---------|--------|
| 18          | 0,4430     | 0,0036  | 0,2765     | 0,0020  | 0,5354  | 0,4741 |
| 20          | 0,5662     | 0,0019  | 0,3520     | 0,0025  | 0,6135  | 0,8372 |
| 22          | 0,7110     | 0,0029  | 0,4745     | 0,0031  | 0,7182  | 1,2919 |
| 25          | 0,7895     | 0,0041  | 0,6185     | 0,0038  | 0,9654  | 2,3878 |
| 28          | 1,1905     | 0,0105  | 0,6465     | 0,0026  | 1,1569  | 2,1723 |
| 30          | 1,2405     | 0,0101  | 0,7425     | 0,0036  | 1,3333  | 1,9289 |

<sup>(1)</sup>  $\alpha_1$ : taxa de larvas que originam pupas;  $\mu_1$ : mortalidade da fase de larvas;  $\alpha_2$ : taxa de pupas que dão origem a adultos;  $\mu_2$ : mortalidade da fase de pupas;  $\mu_3$ : mortalidade de fêmeas adultas;  $\phi$ : taxa de ovos viáveis.

**Tabela 2** - Valores dos parâmetros biológicos (por dia) da população do parasito nativo, *Galeosomyia fausta*, em função da temperatura (°C) <sup>(2)</sup>.

| Temperatura | $\alpha'_{12}$ | $\mu'_{12}$ | $\mu'_3$ | $\phi'$ |
|-------------|----------------|-------------|----------|---------|
| 18          | 0,2010         | 0,0015      | 0,4058   | 3,1729  |
| 20          | 0,2280         | 0,0015      | 0,4854   | 5,0206  |
| 22          | 0,2650         | 0,0016      | 0,6038   | 6,7997  |
| 25          | 0,3480         | 0,0014      | 0,9523   | 9,5940  |
| 28          | 0,5070         | 0,0025      | 1,2135   | 7,1040  |
| 30          | 0,7290         | 0,0036      | 1,4492   | 5,1850  |

<sup>(2)</sup>  $\alpha'_{12}$ : taxa de larvas que originam adultos;  $\mu'_{12}$ : mortalidade das fases de larva e pupa;  $\mu'_3$ : mortalidade de fêmeas adultas;  $\phi'$ : taxa de ovos viáveis.

**Tabela 3** - Valores dos parâmetros biológicos (por dia) da população do parasito exótico, *Ageniaspis citricola*, com a longevidade correspondente a 50% e a 25% da longevidade de *G. fausta*, em função da temperatura (°C) <sup>(3)</sup>.

| Temperatura | $\alpha''_{12}$ | $\mu''_{12}$ | $\mu''_3$ (50%) | $\mu''_3$ (25%) |
|-------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
| 18          | 0,1202          | 0,0007       | 2,8985          | 5,7971          |
| 20          | 0,1760          | 0,0007       | 2,4271          | 4,8543          |
| 22          | 0,2320          | 0,0018       | 1,9047          | 3,8095          |
| 25          | 0,3170          | 0,0037       | 1,2077          | 2,4154          |
| 28          | 0,4025          | 0,0030       | 1,9708          | 1,9417          |
| 30          | 0,4590          | 0,0913       | 1,8116          | 1,6233          |

<sup>(3)</sup>  $\alpha''_{12}$ : taxa de larvas que originam adultos;  $\mu''_{12}$ : mortalidade das fases de larva e pupa;  $\mu''_3$ : mortalidade de fêmeas adultas.

Com relação ao ataque do inseto-praga sobre a planta e considerando-se a época mais favorável à emissão de brotos (setembro a abril), tomou-se por hipótese a preferência da *P. citrella* pelas cinco folhas novas localizadas na extremidade de cada ramo e a postura de um ovo por folha, originando cinco larvas por ramo, ou seja, 12.500 larvas por planta e 25 milhões de larvas no talhão. Tomando-se a oviposição máxima da fêmea do inseto-praga (62,47 ovos/fêmea) (CHAGAS, 1999), e supondo-se mortalidade nula para ovos, larvas e pupas, obtém-se uma população máxima de 400.000 fêmeas

do inseto-praga no talhão. Este resultado é utilizado como estimativa da capacidade de saturação do meio, parâmetro *c*, definido como a população máxima que o inseto atingiria na ausência de parasitos.

Segundo Fundecitrus (2001), é sugerido o valor de 30% de ramos infestados com larvas de 1° e 2° estádios como ND para talhões adultos. Sob as mesmas hipóteses consideradas anteriormente, chega-se à estimativa de 120.000 fêmeas por talhão como o ND correspondente. Propõe-se a relação  $NP = ND/c$  para avaliar a proporção entre o nível populacional alcançado pelo inseto-



praga e o valor numérico utilizado quanto ao parâmetro correspondente à capacidade de saturação (parâmetro  $c$ ). Razões próximas ou acima de NP podem indicar um estado de alerta, ou nível de perigo (NP), com provável prejuízo econômico, devido ao grande crescimento do inseto-praga. Para  $c = 400.000$  fêmeas e considerando-se 120.000 fêmeas como ND, tal relação é dada por  $NP = 0,3$ .

O limiar econômico (NL) é utilizado como estimativa da população inicial do inseto-praga no início do período de brotações. Tomando-se a média de cinco folhas infestadas com larvas por planta e sob as mesmas hipóteses de fecundidade máxima e mortalidade nula para os estágios intermediários do inseto-praga, obtém-se a estimativa de 10.000 larvas e 160 fêmeas como população inicial da *P. citrella*.

A população inicial de fêmeas do parasito nativo foi estimada a partir da população inicial de larvas da *P. citrella*. Supondo-se 10.000 larvas do inseto-praga e uma oviposição média de 100 ovos do parasito nativo, é estimada uma população inicial de 100 fêmeas e zero larvas de *G. fausta*. Como, por hipótese, a monocultura no talhão traz como consequência uma menor variedade de hospedeiros nativos em relação a este parasito, considerou-se inicialmente o valor de  $c' = 1.000$  fêmeas para a capacidade de saturação do meio. Nas simulações realizadas foi observada a variação da dinâmica das populações para diferentes populações iniciais e valores da capacidade do meio.

Na estimativa da população inicial de fêmeas do parasito exótico, supõe-se a

liberação de 18 fêmeas por hectare, num total de 86 fêmeas no talhão. Verificou-se por simulação a influência da liberação de diferentes quantidades de fêmeas deste parasito. Analisaram-se os resultados referentes à liberação de 10, 100, 1.000 e 10.000 fêmeas no talhão.

Além dos parâmetros referentes à capacidade de saturação do meio e populações iniciais, é necessário estimar os parâmetros referentes ao benefício ( $k_1'$  e  $k_1''$ ) e prejuízo ( $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ ) decorrentes do processo de parasitismo, para dar início às simulações. Dessa forma, foram realizadas várias simulações objetivando determinar intervalos de validade para tais parâmetros, baseados em resultados analíticos decorrentes do estudo do sistema de equações (2.1) e na observação dos níveis populacionais finais obtidos em cada simulação, quando se verificou a validade biológica dos resultados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

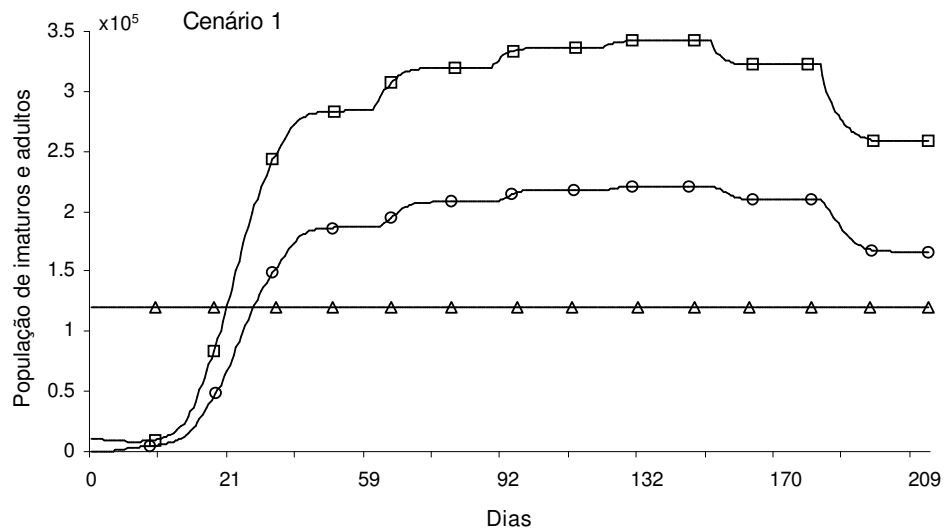
Tomou-se por hipótese que a população do inseto-praga atinge o NL no decorrer do mês de setembro. Assim, as simulações foram realizadas no período de 1º de outubro a 30 de abril (210 dias), compreendendo dois anos fictícios. Por comodidade, os valores dos parâmetros foram apresentados nos cenários sem a informação da respectiva unidade ( $\text{dias}^{-1}$  para os parâmetros biológicos e para  $k_1'$ ,  $k_1''$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ ; fêmeas por talhão para  $c$  e  $c'$ ).

#### **Cenário 1: presença da *P. citrella* e sem nenhum tipo de controle**

Esse cenário foi planejado visando quantificar e analisar as tendências do cres-

cimento da população do inseto-praga, sem interação com quaisquer inimigos naturais ou algum outro tipo de controle. Tal cenário pode ser considerado como um caso extremo, pois permite avaliar os danos máximos causados pelo inseto-praga e o grau de ne-

cessidade de medidas de controle. A Figura 1 descreve o crescimento populacional do estágio imaturo (pupas) e de fêmeas adultas para a simulação com a populacional inicial em NL e  $c = 400.000$ .



**Figura 1.** Dinâmica populacional de larvas ( $\square$ ) e fêmeas adultas ( $\circ$ ) de *Phyllocnistis citrella* (inseto-praga), no período de outubro a abril, no município de Limeira, SP, no cenário 1, com a capacidade de saturação do meio ( $c$ ) de 400.000 fêmeas adultas. O nível populacional ( $\Delta$ ) indica o patamar a partir do qual o nível de perigo ( $NP = ND/c$ ; ND: dano econômico estimado em 30% de ramos infestados) é alcançado.

Foram realizadas várias simulações para o parâmetro  $c$  variando-se os valores entre 50.000 e 400.000. A dinâmica das populações foi semelhante em todos os casos. O crescimento foi determinado pelo valor atribuído à capacidade do meio, ou seja, a praga cresceu o quanto lhe foi permitido pelas condições do meio. Na prática,

essa característica comprova o potencial de dano deste inseto-praga ao agroecossistema de citros, durante o período de emissão de brotos. Uma vez fornecida a condição básica para o crescimento da praga (folhas novas em brotações), a população aumentou e atingiu rapidamente o nível de dano econômico, pois as variações de temperatura no

período não se mostraram suficientes para causar grandes diminuições no nível populacional. De modo geral, em todas as simulações realizadas a população atingiu o valor de NP após os primeiros 30 dias e se manteve em nível de dano até o final do período de simulação.

Os valores para as populações iniciais foram variados da ordem de 10 a 100 vezes a partir dos valores correspondentes a NL, para um mesmo valor de  $c$ . A dinâmica das populações apresentou-se semelhante ao apresentado na Figura 1, com uma pequena diferença na forma de crescimento nos primeiros 60 dias de simulação.

### **Cenário 2: presença da *P. citrella* e dos parasitos nativo e exótico, com longevidade de *A. citricola* correspondendo a 50% da longevidade de *G. fausta***

Esse cenário visou avaliar a influência da presença conjunta dos inimigos naturais nativo e exótico na dinâmica da população da larva-minadora-da-folha-dos-citros.

A Figura 2 mostra a dinâmica das populações de fêmeas adultas das três espécies em interação. Representou-se a situação da população do inseto-praga em nível de controle (NL), a “chegada” de 100 fêmeas do parasito nativo e a liberação de uma quantidade semelhante de fêmeas do parasito exótico.

Devido à presença do parasito nativo, o crescimento do parasito exótico só se iniciou a partir do final do segundo mês (Figura 2). Nos dois primeiros meses, o crescimento da população do inseto-praga foi controlado exclusivamente pelo parasito nativo. A partir do terceiro mês, a população

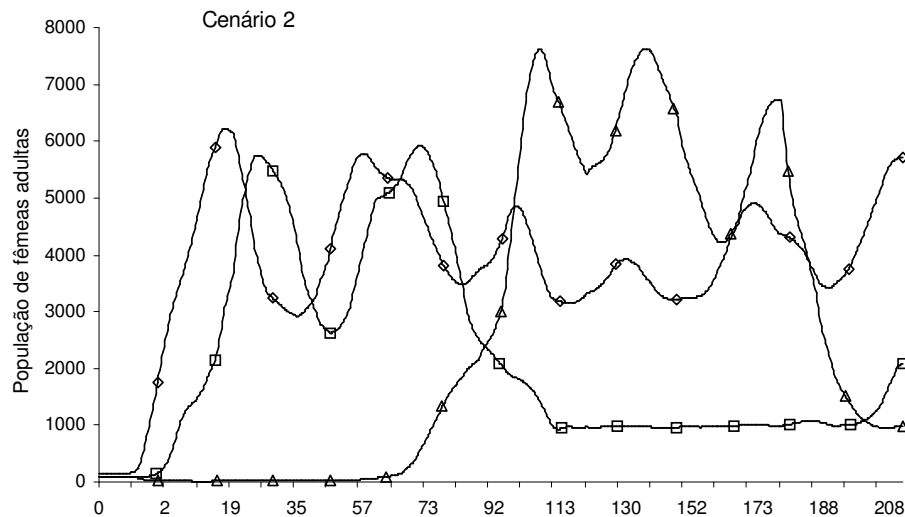
de *A. citricola* cresceu e, conseqüentemente, a população de *G. fausta* decaiu e manteve-se sob o nível representado por  $c'$ . Então, a população do inseto-praga passou a ser controlada pelo parasito exótico que oscilou em níveis populacionais altos (em comparação com os níveis atingidos pelas outras duas espécies), até decrescer no início do sétimo mês devido ao fator abiótico (temperatura). Imediatamente, o inseto-praga reiniciou seu crescimento. A seguir, o mesmo fenômeno foi observado em relação à população do parasito nativo, devido ao crescimento do inseto-praga e ao decréscimo do parasito exótico, pois passaram a existir mais pupas de *P. citrella* disponíveis para o parasitismo de *G. fausta*.

Aumentando-se os valores dos parâmetros referentes ao prejuízo na população do inseto-praga houve tendência de se manter tal população em níveis baixos, insuficientes para produzir um impacto positivo na população do parasito exótico. Em determinadas situações, valores de  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$  da ordem de  $10^{-3}$  levaram à extinção da população da praga e, conseqüentemente, do parasito exótico também. De modo semelhante, a diminuição dos valores do parâmetro  $c$  e o aumento dos valores do parâmetro  $c'$  são prejudiciais ao crescimento da população do parasito exótico, uma vez que, em ambas as situações, os níveis populacionais atingidos pelo inseto-praga são bem menores e, em certas situações, insuficientes para determinar o crescimento da população de *A. citricola*, levando-a à extinção.

O aumento na população inicial do parasito nativo levou a resultados semelhantes ao apresentado na Figura 1. A partir do terceiro mês de simulação, as populações

convergir para níveis semelhantes em todas as simulações realizadas, a população do parasito nativo estabilizou-se em torno do

valor atribuído a  $c'$  e as soluções finais foram as mesmas.



**Figura 2.** Dinâmica populacional de fêmeas de *Phyllocnistis citrella* (◇) em interação com o parasito nativo *Galeopsomyia fausta* (□) e o parasito exótico *Ageniaspis citricola* (Δ) no período de outubro a abril, no município de Limeira, SP, onde  $c = 400.000$  fêmeas,  $k_2 = k_3 = k_4 = k'_1 = 10^{-4}$ ,  $k''_1 = 10^{-3}$  e  $c' = 1.000$  fêmeas; sendo  $c$  e  $c'$ : capacidade de saturação para praga e parasito nativo, respectivamente;  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ : proporção de perda na população da praga, devido ao parasitismo;  $k'_1$  e  $k''_1$ : proporção de ganho nas populações dos parasitos nativo e exótico, respectivamente, devido ao parasitismo.

Nas simulações em que se reduziu a população do inseto-praga em 10 vezes, observou-se que o início do crescimento do parasito exótico foi atrasado em dois meses em relação ao apresentado na Figura 1.

Nas simulações em que foi variada a quantidade de fêmeas liberadas do parasito exótico, as populações apresentaram dinâmicas semelhantes a partir do quarto mês de simulação e alcançaram níveis populacionais

próximos ao final do período de simulação. A proporção final de fêmeas desse parasito e de fêmeas de *P. citrella* foi ligeiramente maior na situação em que se supôs a liberação de 100 fêmeas. Portanto, pode-se supor que, na prática, esta situação facilitaria uma maior reação do parasito exótico no que se refere ao controle do inseto-praga em situações adversas, favoráveis ao crescimento da população do inseto-praga.

**Cenário 3: presença da *P. citrella* e dos parasitos nativo e exótico, com longevidade de *A. citricola* correspondendo a 25% da longevidade de *G. fausta***

A pequena longevidade suposta implica em uma alta taxa de mortalidade para as fêmeas de *A. citricola*. Nesse caso, verificou-se que o parâmetro referente ao benefício decorrente do parasitismo ( $k''_1$ ) necessitou de valores acima de  $3 \times 10^{-3}$  para que a população do parasito exótico conseguisse se estabelecer no sistema. Portanto, para  $k''_1 < 10^{-3}$ , o crescimento desse parasito não se concretizou e o inseto-praga passou a ser controlado apenas pelo parasito nativo. Este limitante inferior para  $k''_1$  cresceu de acordo com o aumento do benefício ( $k'_1$ ) e da capacidade do meio ( $c'$ ) para o parasito nativo.

Ao fixar-se o valor de  $k''_1$  em  $3 \times 10^{-3}$ , tal parâmetro passou a exercer um efeito compensador sobre a alta taxa de mortalidade, permitindo a realização de simulações para valores baixos para a capacidade de saturação do meio para o inseto-praga.

Na variação dos valores de  $c$ ,  $c'$  e populações iniciais, foram observados os mesmos impactos descritos para o cenário anterior, porém a baixa longevidade do parasito exótico é uma maior restrição ao seu crescimento. Verificou-se que, quanto mais favorável for o meio para o parasito nativo (existência de uma maior variedade de hospedeiros), maior será o crescimento de sua população e, conseqüentemente, mais eficiente será seu parasitismo sobre a *P. citrella*. Dessa forma, como a longevidade do parasito exótico era pequena, o nativo tendeu a vencer a competição pelo parasitismo sobre

o inseto-praga e o parasito exótico tendeu a não se estabelecer sob tais condições.

Na variação das populações iniciais do parasito exótico, as maiores diferenças encontradas relacionaram-se ao tempo decorrido até o início do crescimento da população do parasito exótico (aproximadamente 90, 75, 60 e 30 dias para as situações correspondentes à liberação de 10, 100, 1.000 e 10.000 fêmeas, respectivamente). A redução da população inicial do inseto-praga em 10 vezes atrasou o início do crescimento da população do parasito exótico em cerca de um mês (Figura 3).

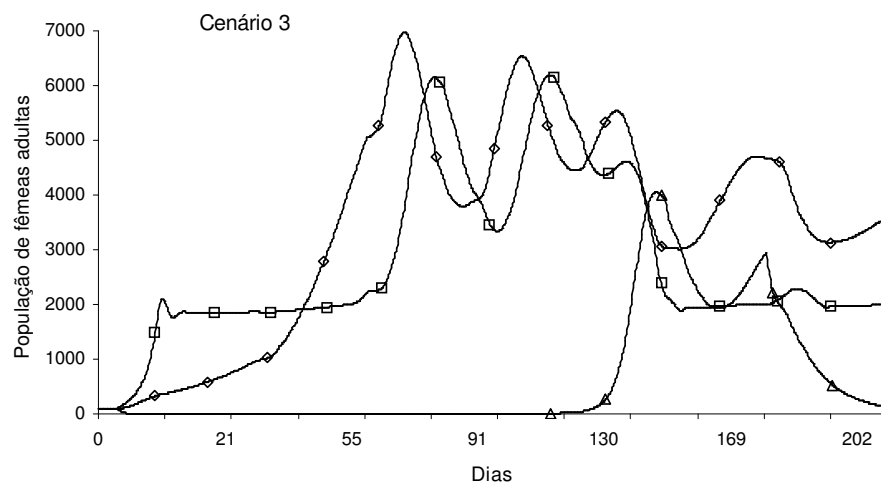
Na variação das populações iniciais do parasito exótico, as maiores diferenças encontradas relacionaram-se ao tempo decorrido até o início do crescimento da população do parasito exótico (aproximadamente 90, 75, 60 e 30 dias para as situações correspondentes à liberação de 10, 100, 1.000 e 10.000 fêmeas, respectivamente). A redução da população inicial do inseto-praga em 10 vezes atrasou o início do crescimento da população do parasito exótico em cerca de um mês (Figura 3).

Os cenários 2 e 3 foram analisados utilizando-se  $\phi'' = 0$ , visando representar a dependência do crescimento do parasito exótico em relação à presença do inseto-praga. Assim, ao se fazer  $\phi'' = 0$ , a entrada no compartimento  $L_a$  se dá apenas pelo ganho de parasitismo, função  $g''(L_m, A)$ .

Os resultados obtidos através das simulações realizadas nos três cenários apresentados ilustram a importância e a viabilidade do uso de técnicas de simulação como instrumento para a avaliação prognóstica da introdução de agentes de controle biológico,

através da análise da competição entre inimigos naturais nativo e exótico, e da eficiência de tais parasitos no controle biológico do inseto-praga. Entretanto, faz-se necessá-

ria a realização de experimentos biológicos para a aferição dos parâmetros biológicos do modelo e a apuração dos resultados obtidos.



**Figura 3.** Dinâmica populacional de fêmeas de *Phyllocnistis citrella* (◇) em interação com o parasito nativo *Galeopsomyia fausta* (□) e o parasito exótico *Ageniaspis citricola* (Δ) no período de outubro a abril, no município de Limeira, SP, onde  $c = 40.000$  fêmeas,  $k_2 = k_3 = k_4 = k'1 = 10^{-4}$ ,  $k''1 = 3 \times 10^{-3}$  e  $c' = 2.000$  fêmeas; sendo  $c$  e  $c'$ : capacidade de saturação para praga e parasito nativo, respectivamente;  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ : proporção de perda na população da praga, devido ao parasitismo;  $k'1$  e  $k''1$ : proporção de ganho nas populações dos parasitos nativo e exótico, respectivamente, devido ao parasitismo.

Períodos atípicos poderiam ser simulados mediante o acoplamento do modelo matemático referente ao crescimento fenológico da planta de citros aos modelos desenvolvidos. Desta forma, seriam contempladas variações mensais nos parâmetros referentes à capacidade de saturação do meio para as espécies, e à umidade relativa da região em análise. Isto permitiria avaliar, por exemplo, a influência da sazonalidade de

brotações na dinâmica das três populações. Ainda, a inclusão de dados econômicos no SIMCOBIM permitiria avaliar a relação custo-benefício mais apropriada para períodos futuros.

Ressalta-se que a estrutura computacional criada no SIMCOBIM permite a realização de futuras evoluções com um menor esforço possível. Tal flexibilidade permite, por exemplo, o estudo da interação da *P.*

*citrella* com outros parasitos em diferentes regiões do país, com o esforço mínimo de se alterar as bases de dados de parâmetros biológicos e a base de temperaturas médias da nova região geográfica em estudo.

#### 4 CONCLUSÕES

O software desenvolvido foi eficiente para simular sob diferentes cenários a dinâmica populacional da larva-minadora-da-folha-dos-citros em interação com seus inimigos naturais. As simulações permitiram concluir que:

1. Na ausência de parasitos, a população do inseto-praga, *P. citrella*, atinge o nível de dano econômico (ND) no prazo máximo de 60 dias. No controle biológico da *P. citrella* pelos dois parasitos, *G. fausta* e *A. citricola*, concomitantemente, o ND não é alcançado;
2. O início do crescimento efetivo da população de *A. citricola* se dá a partir de 60 dias, podendo demorar até 120 dias quando se supõe baixa longevidade, devido à competição;
3. A presença do parasito nativo, *G. fausta*, é essencial para o controle do inseto-praga, enquanto não se inicia o crescimento efetivo da população de *A. citricola*. Após o início desse crescimento, *A. citricola* domina o processo de parasitismo sobre a *P. citrella*;
4. Em monoculturas, quando a disponibilidade de hospedeiros para a *G. fausta* é pequena, *A. citricola* tende a deslocar a população do parasito nativo;

5. É adequada a decisão de liberação do parasito exótico somente após o inseto-praga atingir o nível de limiar econômico (NL). A liberação de 100 fêmeas no talhão (20 fêmeas/ha) é a mais apropriada dentre as quantidades testadas (10, 100, 1.000 e 10.000 fêmeas);
6. O SIMCOBIM, baseado em modelos matemáticos compartimentais e determinísticos, demonstra a viabilidade do uso de simuladores para a avaliação prospectiva do controle biológico da *P. citrella*;
7. Os resultados obtidos podem ser apurados na medida em que dados de campo, sobre a interação entre as três espécies em estudo, sejam coletados e publicados, permitindo o uso efetivo do SIMCOBIM no controle biológico aplicado.

#### REFERÊNCIAS

- ABECITRUS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS EXPORTADORES DE CÍTRICOS. **Laranja Brasil**: Disponível em: <[http://www.abecitrus.com.br/lbrasil\\_br.html](http://www.abecitrus.com.br/lbrasil_br.html)>. Acesso em: 01 mar. 2007.
- BOSCH, R. van den; MESSENGER, P. S.; GUTIERREZ, A. P. **An introduction to biological control**. New York: Plenum Press, 1985. 247p.
- CHAGAS, M.C.M. **Phyllocnistis citrella Stainton, 1856 (Lepidoptera: Gracilariidae): bioecologia e relação com o cancro cítrico**. 1999. 67p. Tese (Doutorado em Ciências), Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

- COSTA, V.A.; SÁ, L.A.N.; LASALLE, J.; DE NARDO, E.A.B.; ARELLANO, F.; FUINI, L.C. Indigenous parasitoids (Hym., Chalcidoidea) of *Phyllocnistis citrella* Stainton (Lep., Gracillariidae) in Jaguariúna, São Paulo State, Brazil: preliminary results. **Journal of Applied Entomology = Zeitschrift für Angewandte Entomologie**, v.123, n.4, p.237-240, 1999.
- EDELSTEIN-KESHET, L. **Mathematical models in biology**. Boston: McGraw-Hill, 1988. 586p. (Birkhäuser Mathematics Series).
- EDWARDS, O.R.; HOY, M.A. Biology of *Ageniaspis citricola* (Hymenoptera: Encyrtidae), a parasitoid of the leafminer *Phyllocnistis citrella* (Lepidoptera: Gracillariidae). **Annals of the Entomological Society of America**, v.91, n.5, p.654-660, 1998.
- FUNDECITRUS. **Principais doenças e pragas: larva minadora do citros**. Disponível em: <<http://www.fundecitrus.com.br/minador.html>>. Acesso em 23 fev. 2001.
- GRAZIANO, F. **Os números da citricultura**. São Paulo: IEA, 1997. 28p.
- LLÁCER, E.; URBANEJA, A.; JACAS, J.; GARRIDO, A. Introducción de *Galeopsomyia fausta* LaSalle, ectoparasitoide de pupas del minador de las hojas de los cítricos. **Levante Agrícola**: revista internacional de cítricos, 2. trimestre, p.159-164, 1998.
- THE MATHWORKS. MATLAB release 5.3.1. **Matlab helpdesk**. Natick, 1999.
- MURRAY, J.D. **Mathematical biology**. 2.ed. Berlin: Springer. 1993. 769p.
- PRESS, W.H.; TELOUSKY, S.A.; VETTERLING, W.T.; FLANERY, B.P. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 759p.
- SACARÍAS, E.N.; CANALES, A.C. ***Ageniaspis citricola* Logvinovskaya, 1983 (Hymenoptera: Encyrtidae): controlador de *Phyllocnistis citrella* “Minador de la hoja de los cítricos”: su introducción, producción e implantación en el Perú**. Lima: SENASA, 1999. 88p.
- SÃO PAULO (Estado). **Portal do Governo do Estado de São Paulo**: investimentos, SP: produção agrícola. Disponível em: <[www.investimentos.sp.gov.br/portal.php/informacoes/economia/agricola](http://www.investimentos.sp.gov.br/portal.php/informacoes/economia/agricola)>. Acesso em: 01 mar. 2007.
- SEVERO, N.C. The probabilities of some stochastic epidemic models. **Biometrika**, v.56, p.197-201, 1969.
- SILVEIRA NETO, S.; NAKANO, O.; BARBIN, D.; NOVA, N.A.V. **Manual de ecologia dos insetos**. São Paulo: Ceres, 1976. 416p.
- TERNES, S. **Modelagem e simulação da dinâmica populacional da larva-minadora-da-folha-dos-citros em interação com seus inimigos naturais**. 2001. 153p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp, Campinas, 2001.