

Universidade Técnica de Lisboa

Instituto Superior de Agronomia

Modelação de crescimento de populações de *Planococcus citri*
(Risso) em pomares de citrinos quando afectadas pelo
parasitismo de *Leptomastix dactylopii* Howard

Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agronómica

Orientador: Doutor António Maria Marques Mexia

Co-Orientador: Doutor António Gabriel da Silva St. Aubyn

Júri:

Presidente – Reitor da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais - Doutora Laura Monteiro Torres, professora catedrática da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro;

Doutor António Maria Marques Mexia, professor catedrático do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor José Carlos Franco Santos Silva, professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor Zvi Mendel, Professor of Institute of Plant Protection, Agricultural Research Organization, Israel;

Doutor António Gabriel da Silva St. Aubyn, na qualidade de especialista.

Carlos Jorge Marques Valente de Carvalho

Lisboa
2009

Universidade Técnica de Lisboa

Instituto Superior de Agronomia

Modelação de crescimento de populações de *Planococcus citri* (Risso) em pomares de citrinos quando afectadas pelo parasitismo de *Leptomastix dactylopii* Howard

Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agronómica

Orientador: Doutor António Maria Marques Mexia

Co-Orientador: Doutor António Gabriel da Silva St. Aubyn

Júri:

Presidente – Reitor da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais - Doutora Laura Monteiro Torres, professora catedrática da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro;

Doutor António Maria Marques Mexia, professor catedrático do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor José Carlos Franco Santos Silva, professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor Zvi Mendel, Professor of Institute of Plant Protection, Agricultural Research Organization, Israel;

Doutor António Gabriel da Silva St. Aubyn, na qualidade de especialista.

Carlos Jorge Marques Valente de Carvalho

Lisboa
2009

Este trabalho foi subsidiado pela
Fundação para a Ciência e Tecnologia
Através da Bolsa de Doutoramento
Paxxis XXI/BD/9154/96

Resumo

Este trabalho visa a criação de uma simulação (SimCitri) para computador sobre o crescimento de populações de *Planococcus citri* (Risso) em pomares de citrinos, condicionado pelo parasitismo de *Leptomastix dactylopii* Howard. A taxa de transformação dos valores na simulação depende da temperatura e são quantificados em intervalos discretos, durante os quais a temperatura é constante. SimCitri foi construída a partir de uma revisão sobre a estrutura e características de simulações e modelos aplicados em entomologia e dum estudo matemático sobre observações experimentais da biologia e comportamento de *P. citri* e *L. dactylopii*. A simulação, desenvolvida na linguagem VISUAL BASIC 6, está estruturada num menu de input de dados e um menu de output de resultados. O uso de matrizes para simular o desenvolvimento de um insecto permitiu obter escalonamento de desenvolvimento numa população. Resultados de SimCitri indicam que para haver pululação de *P. citri* é necessário haver dispersão. Após a largada, a redução da densidade de *L. dactylopii* no pomar a curto prazo afecta a eficiência de parasitismo. O fotoperíodo com menor tempo iluminado e temperatura constante mais elevada favorecem o parasitismo. Nalgumas simulações, populações de *P. citri* e de *L. dactylopii* crescem a densidades elevadas irreais.

Palavras-chave: *Planococcus citri*, *Leptomastix dactylopii*, modelo, simulação, citrinos, luta biológica, praga, parasitóide, Encyrtidae, Pseudococcidae

Simulation of *Planococcus citri* (Risso) population trends on citrus groves, affected by
Leptomastix dactylopii Howard parasitism

Abstract

The aim of this work is to develop a computer simulation (SimCitri) for *Planococcus citri* (Risso) population trends in citrus orchards under *Leptomastix dactylopii* Howard parasitism. The rate of change for simulation values occurs in "jumps" identified as "one hour". During this period, temperature is constant. SimCitri's background is based on a bibliographic review on structure and characteristics of models and simulations applied to entomology and on mathematical studies on experimental data for biology and behaviour of both *P. citri* and *L. dactylopii*. The simulation was developed in VISUAL BASIC 6 and is composed of an input data form and an output result form. The use of arrays to simulate insect development allowed population development gradation. SimCitri results show that dispersal is a basic condition for *P. citri* outbreak. After release in the orchard, *L. dactylopii* density reduction can affect parasitism efficiency. A photoperiod with less hours of light and higher constant temperature are more favourable to parasitism. Under certain simulation conditions, SimCitri's *P. citri* and *L. dactylopii* density output can be too high when compared to experimental data. Often SimCitri output is within the boundaries of the experimental data.

Key-words: *Planococcus citri*, *Leptomastix dactylopii*, model, simulation, citrus, biological control, pest, parasitoid, Encyrtidae, Pseudococcidae

Índice Geral

Resumo	5
Abstract	6
Índice Geral	7
Índice Quadros	10
Índice Figuras	11
1 Introdução	17
1.1 <i>Planococcus citri</i> (Risso) como praga	17
1.2 Modelação como ferramenta de estudo de <i>Planococcus citri</i> (Risso)	17
1.3 Modelação em Portugal	17
1.4 Objectivos	18
1.5 Estrutura do trabalho	18
1.6 Nomenclatura e terminologia	18
2 Simulação e modelação em entomologia	20
2.1 Introdução	20
2.2 Nomenclatura	20
2.3 Representação esquemática de sistemas e simulações	21
2.4 Construção de uma simulação	22
2.5 Porquê simular e o uso de modelos?	24
2.6 Simulação em entomologia – princípios e exemplos	24
2.6.1 Nomenclatura de simulações	25
2.6.2 Elementos de uma simulação e respectiva estrutura	25
2.6.3 Simulações e respectivos objectivos	30
2.6.4 Inputs, outputs e variáveis de simulações	32
2.6.5 Métodos matemáticos usados	32
3 Modelação em entomologia – revisão bibliográfica	35
3.1 Introdução	35
3.2 Desenvolvimento de organismos poiquilotérmicos	35
3.2.1 Introdução	35
3.2.2 Modelos empíricos	38
3.2.3 Modelos empíricos com parâmetros com significado biológico	40
3.2.4 Modelos mecanicistas	41
3.3 Postura e longevidade de organismos poiquilotérmicos	41
3.4 Distribuição espacial de organismos e proporção de ambiente ocupado	42
3.4.1 Introdução	42
3.4.2 Descrição matemática de distribuição espacial de populações	43
3.4.3 Índices de dispersão, agrupamento e concentração e relação média variância	45
3.4.4 Proporção de ambiente ocupado em função densidade por unidade de amostragem	46
3.5 Populações em reprodução e pululação	47
3.5.1 Introdução	47
3.5.2 Crescimento exponencial	47
3.5.3 Modelo logístico	48
3.5.4 Pululação de populações	49
3.6 Dispersão de organismos	51
3.7 Parasitismo entre insectos	53
3.7.1 Introdução	53
3.7.2 Modelos gerais	53
3.7.3 Exemplos de modelos de parasitismo entre insectos	54

4	Biologia e bioecologia de <i>Planococcus citri</i> (Risso) – revisão bibliográfica e estudos matemáticos	58
4.1	Introdução	58
4.2	<i>Planococcus citri</i> (Risso) – revisão de conhecimentos	58
4.2.1	Morfologia, reprodução e ciclo de vida	58
4.2.2	Padrão de ocupação espacial nos citrinos	60
4.2.3	Ciclo biológico	61
4.2.4	Dormência e migração sazonal	61
4.3	Estudos matemáticos sobre <i>Planococcus citri</i> (Risso)	62
4.3.1	Taxa diária de incubação dos ovos, desenvolvimento do insecto e longevidade da fêmea; fecundidade da fêmea em função da temperatura	62
4.3.2	Período de uma geração de <i>Planococcus citri</i> (Risso) e período de desenvolvimento de cada instar no campo	70
4.3.3	Densidade de colónias de <i>Planococcus citri</i> sobre os frutos, ao longo da estação	73
4.3.4	Taxa de redução instantânea relativa do número de indivíduos numa população de <i>Planococcus citri</i> (Risso)	81
4.3.5	Nível de infestação dos frutos por <i>Planococcus citri</i> (Risso) dependendo da densidade da colónia	83
4.3.6	Padrão de infestação de <i>Planococcus citri</i> (Risso)	86
4.3.7	Inimigos naturais	89
4.4	Conclusões	91
5	<i>Leptomastix dactylopii</i> Howard biologia e comportamento no campo – revisão bibliográfica e estudo matemático	93
5.1	Introdução	93
5.2	<i>Leptomastix dactylopii</i> Howard – revisão de conhecimentos	93
5.2.1	Morfologia e reprodução	93
5.2.2	Influência da luz e temperatura na actividade	94
5.2.3	Ciclo biológico	94
5.2.4	Utilização em luta biológica	94
5.3	Estudos matemáticos sobre <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard	103
5.3.1	Taxa diária de desenvolvimento, longevidade da fêmea e fecundidade dependentes da temperatura	103
5.3.2	Difusão e impacto da difusão na densidade populacional	107
5.4	Conclusões	110
6	SimCitri - Modelo de simulação de flutuação de populações de <i>Planococcus citri</i> (Risso) em citrinos	111
6.1	Introdução	111
6.2	Descrição geral	111
6.3	O desenvolvimento de SimCitri	118
6.3.1	Definição do Problema	118
6.3.2	Delimitação do tempo, do espaço e subsistemas do problema	118
6.3.3	Dados	118
6.4	Representação de insectos em SimCitri	122
6.5	Algoritmos	123
6.5.1	Algoritmos não matemáticos	123
6.5.2	Algoritmos matemáticos	124
6.6	Análise de sensibilidade e verificação de SimCitri	130
6.6.1	Carácter estocástico de SimCitri	130
6.6.2	Auto-regulação de populações em SimCitri	132
6.6.3	Período de uma geração e duração de um estádio	141
6.6.4	Parasitismo de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard	144
6.7	Discussão	164
6.7.1	Comparação do output de SimCitri com observações de campo de <i>Planococcus citri</i> (Risso)	164
6.7.2	Comparação do output de SimCitri com observações de campo de <i>Leptomastix</i>	165

<i>dactylopii</i> Howard	
6.7.3 Funcionamento geral de SimCitri	166
6.7.4 Classificação de SimCitri	167
7 Conclusões	169
Referências bibliográficas	171
Agradecimentos	180
Anexos	181
Anexo 1 Proposta glossário de nomenclatura relacionada com modelos e simulações	182
Anexo 2 Modelos de relação entre taxa de desenvolvimento ($r(T)$) e período de desenvolvimento (p) como função de temperatura constante (T)	192
Anexo 3 Índices de ocupação ambiental de organismos e respectivas fórmulas.	195
Anexo 4 "Equação de disco" de Holling	199
Anexo 5 Inimigos naturais de <i>Planococcus citri</i> (Risso) identificados em Portugal de acordo com Franco (1997).	202
Anexo 6 Crescimento exponencial e logístico de populações quando afectado por difusão contínua de organismos	203
Anexo 7 Cálculo do comprimento das matrizes de desenvolvimento de <i>Planococcus citri</i> (Risso) e <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard	207
Anexo 8 Algoritmo para determinação do horário nascer do sol/por do sol	209
Anexo 9 Conjunto de variáveis e parâmetros relevantes usados em SimCitri	212
Anexo 10 Código programação SimCitri em Visual Basic 6	213

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Exemplos de simulações aplicadas a protecção de plantas e designação de cultura e praga onde são aplicadas.	27
Quadro 4.1 - Proporção entre sexos de <i>Planococcus citri</i> (Risso).	59
Quadro 4.2 - Estimativa do zero de desenvolvimento (ZD) para <i>Planococcus citri</i> (Risso) (♀ - fêmeas).	63
Quadro 4.3 - Proporção de tempo para os instares ou estados de desenvolvimento em relação a diferentes períodos de vida de <i>Planococcus citri</i> (Risso).	65
Quadro 4.4 - Período de tempo (dias) necessário para o desenvolvimento do instar ou estágio de <i>Planococcus citri</i> (Risso), de acordo com a fonte de alimento e a temperatura.	66
Quadro 4.5 - Determinação dos valores dos parâmetros para a equação (Anexo 2, A2.12), utilizando o algoritmo modificado de Fletcher - Powell através de GENSTAT 5, adaptado para a taxa de desenvolvimento de <i>Planococcus citri</i> (Risso) dependente da temperatura.	67
Quadro 4.6 - Coeficientes de equivalência para <i>Planococcus citri</i> (Risso), determinados por Franco (1997) a partir dos dados apresentados por Gray (1954)	74
Quadro 4.7 - Resumo teste de Pearson (χ^2) para ajustamento do modelo de Wilson & Room (1983) a conjuntos de dados observados (densidade média de colónias de <i>Planococcus citri</i> (Risso) por frutos e número de frutos infestados no pomar) em pomares em Portugal e em Israel.	85
Quadro 4.8 - Estudo de ajustamento de histogramas, que descrevem o nível de infestação dos frutos por cochonilha algodão pela distribuição gama	88
Quadro 4.9 - Coeficientes de correlação (r) entre a densidade da colónia de cochonilha algodão e a frequência da ocorrência de auxiliares	91
Quadro 5.1 - Período (dias) de desenvolvimento e de longevidade de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard em função da temperatura (* valor estimado)	104
Quadro 5.2 - Cálculo dos valores dos parâmetros da equação (A2.12), com GENSTAT 5, usando o algoritmo modificado de Fletcher - Powell para a taxa de desenvolvimento e de envelhecimento de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard, em função da temperatura.	105
Quadro 5.3 - Fecundidade efectiva (número de descendentes emergidos) de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard.	107
Quadro 6.1 - Exemplo da forma de introdução das horas e temperatura em base de dados Access para correr em SimCitri (apresentam-se os dados em linhas por uma questão de arrumação, mas na base de dados, cada campo deverá ser colocado em colunas).	114

Índice de Figuras

Fig. 2.1 - Simbologia adoptada por Forrester (1961, 1968) para representar esquematicamente um sistema.	22
Fig. 2.2 - Esquema possível para a construção de uma simulação (adaptado de Jørgensen 1988).	23
Fig. 2.3 - Diagrama relacional para a simulação mais simples em entomologia, utilizando a notação de Forrester (1961, 1968).	29
Fig. 2.4 - Representação de estádios arbitrários de insectos (matrizes linha) e sub-estádios (cada célula/quadrado). D taxa de desenvolvimento, M taxa de mortalidade, I taxa de imigração, E taxa de imigração, R taxa de reprodução.	31
Fig. 3.1 - Variação hipotética do período de desenvolvimento (a) e da taxa de desenvolvimento (b) em função da temperatura para um insecto.	37
Fig. 3.2 - Padrões básicos de distribuição de populações.	43
Fig. 3.3 - (a) Na equação logística a taxa de crescimento específico de uma população, r , declina linearmente com o aumento da densidade da população N , produzindo apenas um ponto de equilíbrio K ; (b) As populações crescem	50
Fig. 4.1 - Ciclo de vida de <i>Planococcus citri</i> (Risso).	59
Fig. 4.2 - Representação esquemática da sequência de desenvolvimento de <i>Planococcus citri</i> (Risso).	64
Fig. 4.3 - Evolução da taxa de desenvolvimento de ovos de <i>Planococcus citri</i> (Risso) em função da temperatura. Dados do Quadro 4.4, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 4.5.	68
Fig. 4.4 - Evolução da taxa de desenvolvimento dos instares 1 + 2 de <i>Planococcus citri</i> (Risso) em função da temperatura. Dados do Quadro 4.4, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 4.5	68
Fig. 4.5 - Evolução da taxa de desenvolvimento dos instares 3 + 4 (pré-postura) de <i>Planococcus citri</i> (Risso) em função da temperatura. Dados do Quadro 4.4, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 4.5	69
Fig. 4.6 - Evolução da taxa de envelhecimento de fêmeas em postura de <i>Planococcus citri</i> (Risso) em função da temperatura. Dados do Quadro 4.4, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 4.5	69
Fig. 4.7 - Modelo polinomial para a fecundidade total das fêmeas de <i>Planococcus citri</i> (Risso) dependente da temperatura constante. Dados do Quadro 4.4	70
Fig. 4.8 - Duração (dias) de um geração de <i>Planococcus citri</i> (Risso) no campo em citrinos, de acordo com a data de infestação e pomar (# Qta Várzea, ⊗ Qta Bela Salema) (Os dados utilizados foram obtidos em Silva (1994, 2000))	72
Fig. 4.9 - Períodos de desenvolvimento dos estádios de <i>Planococcus citri</i> (Risso) sobre laranja doce, para o ano 1996, na Quinta da Várzea, Setúbal (Portugal).	73
Fig. 4.10 - Evolução para os anos 1994 e 1996 da população de <i>Planococcus citri</i> (Risso) no pomar da Bela Salema (Faro) em número de indivíduos por instares e por cochonilha equivalente	75
Fig. 4.11 - Evolução para os anos 1995 e 1996 da população de <i>Planococcus citri</i> (Risso) no pomar do Patação (Faro) em número de indivíduos por instares e por cochonilha equivalente.	76
Fig. 4.12 - Evolução para o ano 1996 da população de <i>Planococcus citri</i> (Risso) no pomar da Estreitinha (Santiago do Cacém) em número de indivíduos por instares e por cochonilha equivalente. Escala logarítmica para o eixo y1. Valores corrigidos para (instares 1 + 2) + 1	77
Fig. 4.13 - Evolução para o ano 1996 da população de <i>Planococcus citri</i> (Risso) no pomar da Quinta do Neto (Faro) em número de indivíduos por instar e por cochonilha equivalente. Escala logarítmica para o eixo y1. Valores corrigidos para (instares 1 + 2) + 1	77
Fig. 4.14 - Evolução para o ano 1996 da população de <i>Planococcus citri</i> (Risso) na Estação Experimental de Tavira (Tavira) em número de indivíduos por instar e por cochonilha equivalente.	78
Fig. 4.15 - Evolução da população de <i>Planococcus citri</i> (Risso) para os anos 1995 e 1996, para os locais acima assinalados, em número de indivíduos por instares e por cochonilha equivalente.	78

Fig. 4.16 - Evolução do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) por amostras de 10 frutos em pomares de citrinos em Israel na região da Galileia Ocidental no ano de 1993.	79
Fig 4.17 - Evolução do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) por amostras de 10 frutos em pomares de citrinos em Israel na região do Vale do Jordão no ano de 1993.	79
Fig. 4.18 - Evolução do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) por amostras de 10 frutos em pomares de citrinos em Israel na região do Vale Izrael no ano de 1993.	80
Fig. 4.19 - Evolução do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) por amostras de 10 frutos em pomares de citrinos em Israel na região do Vale Izrael no ano de 1994.	80
Fig. 4.20 - Evolução do número de indivíduos em populações de <i>Planococcus citri</i> (Risso) por ramo com fruto de laranjeira doce de acordo com modalidade de infestação com fêmeas no início da postura: A - 2, B - 4, C - 8, D - 16.	82
Fig. 4.21 - Evolução da proporção de frutos infestados nos pomares de citrinos em Portugal, dependendo do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) por fruto. Valores esperados de acordo com o modelo de Wilson & Room (1983), ajustados com os parâmetros <i>a</i> e <i>b</i> do Quadro 4.7. Esperado 1 valores Portugal, Esperado 2 valores Israel.	86
Fig. 4.22 - Evolução da proporção de frutos infestados nos pomares de citrinos em Israel, dependendo do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) por fruto. Valores esperados de acordo com o modelo de Wilson & Room (1983), ajustados com os parâmetros <i>a</i> e <i>b</i> do Quadro 4.7. Esperado 1 valores Portugal, Esperado 2 valores Israel.	86
Fig. 4.23 - Ajustamento da distribuição gama a um histograma de frequência do número de frutos por <i>Planococcus citri</i> (Risso) classificados de acordo com a densidade de infestação por cochonilha algodão equivalente.	88
Fig. 5.1 - Número médio de indivíduos <i>Planococcus citri</i> (Risso) por fruto após a largada de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard em 1993 na província Emeq Izrael Israel. Amostras de 10 frutos por local por observação. Largada (tratamento) de <i>L. dactylopii</i> em 11 pomares numa concentração de 5000 parasitóides/ha.	96
Fig. 5.2 - Percentagem média por fruto de parasitismo de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard sobre <i>Planococcus citri</i> (Risso) em 1993 na província Emeq Izrael, Israel. Amostras de 10 frutos por local por observação. Largada (tratamento) de <i>L. dactylopii</i> em 11 pomares numa concentração de 5000 parasitóides/ha.	96
Fig. 5.3 - Comparação da actividade de insectos auxiliares em grupos de árvores tapadas com rede (tapado) com a actividade de insectos auxiliares + <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard no restante pomar sobre populações de <i>Planococcus citri</i> (Risso). Dados de 1994 da província de Emeq Izrael, Israel, largada de 5000 parasitóides/ha a 6 de Junho. Leituras médias de 10 frutos amostrados por modalidade com 3 repetições para cada modalidade.	97
Fig. 5.4 - Comparação da actividade de insectos auxiliares em grupos de arvores tapadas com rede (tapado) com a actividade de insectos auxiliares + <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard no restante pomar sobre populações de <i>Planococcus citri</i> (Risso). Dados de 1994 da província de Emeq Izrael, Israel, largada de 5000 parasitóides/ha a 6 de Junho. Leituras médias de 10 frutos amostrados por modalidade com 3 repetições para cada modalidade.	98
Fig. 5.5- Largada em Abril de 5000 <i>Leptomastix dactylopii</i> /ha. Verificação à colheita de frutos. Dados 1995 Israel em Emeq Izrael. Tratamento 12 pomares, testemunha 22 pomares. A percentagem de parasitismo inclui também o parasitismo natural.	99
Fig 5.6 - Número médio de <i>Anagyrus pseudococci</i> (Girault) (A) e <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard (L) emergidos de batatas armadilha 1 mês após a largada daqueles parasitóides no campo. Dados 1996, Emeq Izrael, Israel. Tr - tratamento, Ts - testemunha.	100
Fig 5.7 - Número médio de <i>Anagyrus pseudococci</i> (Girault) (A) e <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard (L) emergidos de batatas armadilha 2 meses após a largada daqueles parasitóides no campo. Dados 1996, Emeq Izrael, Israel. Tr - tratamento, Ts - testemunha.	100
Fig. 5.8 - Evolução do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) e <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard para amostras de 16 frutos após tratamento com este parasitóide (5000 indivíduos) no início de Junho num pomar em Portugal, Estreitinha, Santiago do Cacém, 1996.	101
Fig 5.9 - Evolução do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) e <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard para amostras de 16 frutos após tratamento com este parasitóide (5000 indivíduos) no início de Junho num pomar em Portugal, Barrocal, Messines, 1996.	101

Fig 5.10 – Evolução do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) e <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard para mostras de 16 frutos após tratamento com este parasitóide no início de Junho (5000 indivíduos) num pomar em Portugal, Pereirinha, Moncarapacho, 1996.	102
Fig 5.11 – Evolução do número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) e <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard para mostras de 16 frutos após tratamento com este parasitóide (5000 indivíduos) no início de Junho num pomar em Portugal, Estação Experimental de Tavira, Tavira em 1996.	102
Fig. 5.12 - Evolução de taxa de desenvolvimento de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard em função da temperatura. Dados do Quadro 5.1, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 5.2.	106
Fig. 5.13 - Evolução de taxa de envelhecimento de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard em função da temperatura. Dados do Quadro 5.1, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 5.2.	106
Fig. 5.14 - Evolução da densidade de <i>Leptomastix dactylopii</i> de acordo com as equações (5.2) e (5.4) considerando a população inicial $N_0 = 1000$ parasitoides, $K = 100$ cochonilhas/m ² , $M_i = 18,86$ m.dia ⁻¹ e $r = 0,128$ indivíduos/dia.	110
Fig. 6.1 - Fluxograma da simulação SimCitri.	112
Fig. 6.2 - Descrição da simulação SimCitri em diagrama relacional de acordo com a notação de Forrester (1961).	113
Fig 6.3 - Menu de input de dados para a simulação SimCitri.	115
Fig. 6.4 - Exemplo de output de SimCitri em forma de gráfico representando o desenvolvimento de <i>Planococcus citri</i> (Risso) dividido pelos estádios ovo, instares 1 +2, instares 3+4 prépostura, instar 4 em postura.	116
Fig. 6.5 - Exemplo de output de SimCitri em forma de base de dados representando o desenvolvimento de <i>Planococcus citri</i> (Risso) dividido pelos estádios ovo, instares 1 +2, instares 3+4 prépostura, instar 4 em postura.	117
Fig. 6.6 - Exemplo de output de SimCitri em forma de HTML representando o desenvolvimento de <i>Planococcus citri</i> (Risso) dividido pelos estádios ovo, instares 1 +2, instares 3+4 prépostura, instar 4 em postura.	117
Fig. 6.7 – Exemplo de funcionamento do algoritmo de desenvolvimento em SimCitri (Td- Taxa desenvolvimento).	124
Fig. 6.8 - Resultado simulação para mostrar o carácter aleatório de SimCitri. Dados iniciais: 1 colónia, 1 fêmea no 3º - 4º instar em pré-postura, ausência de difusão, predadores e <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard, capacidade de sustentação 100 cochonilha equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e duração da simulação 100 dias.	131
Fig. 6.9 – Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.8 com objectivo de mostrar o carácter aleatório da fase inicial de distribuição dos dados da simulação.	131
Fig. 6.10 – Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.8 com objectivo de mostrar o carácter aleatório da fase inicial de distribuição dos dados da simulação.	132
Fig. 6.11 - Resultado simulação SimCitri para 1 colónia, 1 fêmea no instar 3 + 4, ausência de difusão, predadores, de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard. A capacidade de sustentação 1 cochonilha equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e duração da simulação 50 dias.	133
Fig. 6.12 – Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.11 com objectivo de mostrar a influência do conceito de cochonilha equivalente e da função logística na composição da população de <i>Planococcus citri</i> (Risso).	133
Fig. 6.13 – Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.11 com objectivo de mostrar a influência do conceito de cochonilha equivalente e da função logística na composição da população de <i>Planococcus citri</i> (Risso).	134
Fig. 6.14 - Resultado simulação SimCitri para 1 colónia, 1 fêmea no instar 3 + 4, ausência de difusão, ausência de predadores, ausência de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard capacidade de sustentação do meio 10 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e duração da simulação 50 dias.	135
Fig. 6.15 – Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig. 6.14 com objectivo de mostrar a influência do conceito de cochonilha equivalente e da função logística na composição da população	136

de *Planococcus citri* (Risso).

- Fig 6.16 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.14 com objectivo de mostrar a influência do conceito de cochonilha equivalente e função logística na composição da população de *Planococcus citri* (Risso). 136
- Fig. 6.17 - Resultado de SimCitri para verificação da limitação de populações de *Planococcus citri* (Risso) pela função logística para simulação com 5 colónias, 10 indivíduos em instar 1 + 2, 10 indivíduos no instar 3 + 4, 10 fêmeas adultas, ausência de difusão, ausência de predadores, ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard capacidade de sustentação 100 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e período de 200 dias. 137
- Fig. 6.18 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.17 com objectivo de mostrar a influência da função logística na limitação da população de *Planococcus citri* (Risso). 137
- Fig. 6.19 - Resultado de SimCitri para verificação da limitação de populações pela função logística para simulação com 5 colónias, 10 indivíduos em instar 1 + 2, 10 indivíduos no instar 3 + 4, 10 fêmeas adultas, difusão de indivíduos para outras colónias, ausência de predadores, ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard capacidade de sustentação 100 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e período de 200 dias. 139
- Fig. 6.20 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.19 com objectivo de mostrar a influência da função logística na limitação de uma população *Planococcus citri* (Risso) em dispersão. 139
- Fig. 6.21 - Resultado de SimCitri para verificação da limitação do número de indivíduos durante uma geração de *Planococcus citri* (Risso) pela função logística com 1 colónia, 600 indivíduos em instar 1 + 2, ausência de difusão de indivíduos para outras colónias, ausência de predadores, ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard capacidade de sustentação 15 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura sinusoidal de 16°C - 28°C e período de 24 dias. 140
- Fig. 6.22 - Resultado de SimCitri para verificação da limitação do número de indivíduos durante uma geração de *Planococcus citri* (Risso) pela função logística com 1 colónia, 600 indivíduos em instar 1 + 2, difusão de indivíduos para outras colónias, ausência de predadores, ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard, capacidade de sustentação 15 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura sinusoidal de 16-28°C e período de 24 dias. 141
- Fig. 6.23 - Resultado de SimCitri para verificação do período de uma geração de *Planococcus citri* (Risso). Simulação para 51 dias com temperatura horária calculada a partir dos valores de temperatura máxima e mínima observadas no campo, capacidade de sustentação do meio de 30 cochonilha equivalente, 1 colónia com 2 ovos no início da simulação, 12 horas de luz, ausência de dispersão, ausência de predadores e ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard. 142
- Fig. 6.24 - Resultado de SimCitri para verificação do período de desenvolvimento de cada estágio de *Planococcus citri* (Risso). Simulação para 77 dias com temperatura horária calculada a partir dos valores de temperatura máxima e mínima observadas no campo, capacidade de sustentação do meio de 30 cochonilha equivalente, 1 colónia com 2 ovos no início da simulação, 12 horas de luz, ausência de dispersão, ausência de predadores e ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard. 143
- Fig 6.25 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de indivíduos em instares 3 + 4 para verificação da influencia do fotoperíodo sobre o parasitismo de *Leptomastix dactylopii* Howard sobre *Planococcus citri* (Risso). Fotoperíodo 6L:18E, temperatura constante de 26°C, 5 colónias de *P. citri* cada uma com 10 indivíduos em cada estágio, ausência de predadores, migração de populações de *P. citri*, 30 dias de simulação, 2 parasitóides m². 145
- Fig. 6.26 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides adultos, nas mesmas condições que na Fig. 6.25. 145
- Fig. 6.27 - Resultado de simulação de SimCitri para percentagem de parasitismo, nas mesmas condições que na Fig. 6.25. 146
- Fig 6.28 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de indivíduos em instares 3 + 4 nas mesmas condições que na Fig. 6.25, excepto fotoperíodo 18L:6E. 146
- Fig. 6.29 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides adultos, nas mesmas condições que na Fig. 6.28. 147
- Fig. 6.30 - Resultado de simulação de SimCitri para percentagem de parasitismo, nas mesmas condições que na Fig. 6.28. 147
- Fig. 6.31 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de indivíduos em instares 3 + 4 para verificação da influência da dispersão de *Planococcus citri* (Risso) sobre o parasitismo por 148

<i>Leptomastix dactylopii</i> Howard. Fotoperíodo 6L:18E, temperatura constante de 26 °C, 5 colónias de <i>P. citri</i> cada uma com 10 indivíduos em cada estadio, ausência de predadores, migração de populações de <i>P. citri</i> , 30 dias de simulação, 2 parasitóides/m ² .	
Fig. 6.32 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides adultos, nas mesmas condições que na Fig. 6.31.	149
Fig. 6.33 - Resultado de simulação de SimCitri para percentagem de parasitismo, nas mesmas condições que na Fig. 6.31.	149
Fig. 6.34 - Resultado de simulação de SimCitri para percentagem de frutos infestados por <i>Planococcus citri</i> (Risso), nas mesmas condições que na Fig. 6.31.	150
Fig 6.35 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de ovos e indivíduos em instares 1 + 2 e 3 + 4 para verificação da influência de predadores sobre as populações de <i>Planococcus citri</i> (Risso) e <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard e a relação de parasitismo entre estas espécies. Fotoperíodo 6L:18E, temperatura constante de 26 °C, 5 colónias de <i>P. citri</i> cada uma com 10 indivíduos em cada estadio, presença de predadores, migração de populações de <i>P. citri</i> , 30 dias de simulação, 2 parasitóides/m ² .	151
Fig. 6.36 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides nas mesmas condições que na Fig. 6.35.	151
Fig. 6.37 - Resultado de simulação de SimCitri para frutos infestados por <i>Planococcus citri</i> (Risso) nas mesmas condições que na Fig. 6.35.	152
Fig 6.38 - Resultado de simulação de SimCitri para o parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.35.	152
Fig. 6.39 - Resultado de simulação de SimCitri para verificação da influência da temperatura no número médio de cochonilhas por fruto, número médio de cochonilhas no instar 3 + 4 pré-postura por fruto e de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard por m ² , para um período de 50 dias, temperatura constante de 21,5°C, capacidade de sustentação do meio de 30 indivíduos por fruto, fotoperíodo com 12 horas de luz, população inicial de <i>P. citri</i> em cinco colónias com 10 indivíduos para cada estadio desenvolvimento, dispersão da cochonilha e largada de 0,2 parasitóides/m ² .	154
Fig. 6.40 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.39.	155
Fig. 6.41 - Resultado de simulação de SimCitri nas mesmas condições que na Fig. 6.39 mas temperatura constante de 25,5°C.	155
Fig. 6.42 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.39 mas temperatura constante de 25,5°C.	156
Fig 6.43 - Resultado de simulação de SimCitri nas mesmas condições que na Fig. 6.39 mas temperatura constante de 30,5 °C.	156
Fig 6.44 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.39 mas temperatura constante de 30,5°C.	157
Fig 6.45 - Resultado de simulação de SimCitri para verificação do valor da influência da área de descoberta (0,1) no número médio de cochonilhas por fruto, número médio de cochonilhas no instar 3 + 4 por fruto e de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard por m ² , para um período de 50 dias, temperatura constante de 25,5°C, capacidade de sustentação do meio de 30 indivíduos por fruto, fotoperíodo com 12 horas de luz, população inicial de <i>P. citri</i> em cinco colónias com 10 indivíduos para cada estadio desenvolvimento, dispersão da cochonilha e largada de 0,2 parasitóides/m ² .	158
Fig 6.46 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.45.	158
Fig. 6.47 - Resultado de simulação de SimCitri nas mesmas condições que na Fig. 6.45 mas área de descoberta de 0,01.	159
Fig. 6.48 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.45 mas área de descoberta de 0,01.	159
Fig 6.49 - Resultado de simulação de SimCitri para verificação da dose de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard no número médio de <i>Planococcus citri</i> (Risso) por fruto e número médio de cochonilhas no instar 3 + 4 pré-postura por fruto, para um período de 50 dias, temperatura constante de 25, 5 °C, capacidade de sustentação do meio de 30 indivíduos por fruto, fotoperíodo com 12 horas de luz, população inicial de <i>P. citri</i> em cinco colónias com 10 indivíduos para cada estado de	161

desenvolvimento, dispersão da cochonilha, largada de 0,1 parasitóides m², ausência de predadores.

Fig 6.50 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.49. 162

Fig 6.51 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides nas mesmas condições que na Fig. 6.49. 162

Fig 6.52 - Resultado de simulação de SimCitri nas mesmas condições que na Fig. 6.49 mas foram largados 1 parasitóide/m². 163

Fig 6.53 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.49 mas foram largados 1 parasitóide/m². 163

Fig 6.54 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides nas mesmas condições que na Fig. 6.49 mas foram largados 1 parasitóide m². 164

1 Introdução

1.1 *Planococcus citri* (Risso) como praga

Planococcus citri (Risso) (Hemiptera: Pseudodoccidae) é o pseudococcídeo mais frequentemente identificado a nível mundial, como uma praga dos citrinos com importância económica (Franco 1997, Franco et al. 2000). A sua distribuição mundial estende-se a regiões tão diferentes como Austrália (Smith et al. 1997), África do Sul (Hatting & Tate 1997), Portugal (Franco 1997, Franco et al. 2000, 2004), Israel (Blumberg et al. 1997), Índia (Krishnamoorthy & Singh 1987) ou Texas (EUA) (Meyerdirk 1983). Apesar de estudos extensivos sobre a biologia da cochonilha algodão dos citrinos (*P. citri*), dinâmica de populações e interacção destas populações com os ambientes abiótico e biótico (e.g., Bodenheimer 1951, Tingle 1985, Klein 1994, Yang & Sadof 1995, Franco 1997), ainda subsistem faltas de conhecimento sobre aqueles temas. Esta falta de conhecimento impede, muitas vezes, uma protecção de plantas equilibrada e racional contra as populações de *P. citri*. As particularidades da acção de populações de *P. citri* sobre citrinos foi alvo de estudo pormenorizado por Franco (1997) e Silva (1994, 2000).

1.2 Modelação como ferramenta de estudo de *Planococcus citri* (Risso)

A modelação em ecologia e biologia pode colocar questões e apontar linhas de investigação para fenómenos não completamente compreendidos (Jorgensen 1988, Boote et al. 1996). Tendo por base este ponto de vista, a dinâmica de pragas e a correspondente luta biológica deverá ser encarada como uma aplicação de princípios de ecologia de populações. Apenas desta forma se poderá ultrapassar o uso empírico da luta biológica baseada muitas vezes em documentação insuficiente (May & Hassel 1988). Apoiados nestas considerações, investigadores no Wye College, London University a partir de meados da década de 1980, iniciaram o desenvolvimento de uma simulação para computador com o objectivo de estudar a pululação de populações de *P. citri* e a interacção com inimigos naturais, sobre ornamentais e sob ambiente condicionado (Copland 1984, Varley & Copland comunicação pessoal). Porém, este trabalho utilizava equações de natureza empírica e a concepção básica era demasiado simplista e redutora da realidade. No entanto, a simulação apresentada nesta tese só foi possível graças ao trabalho pioneiro dos autores anteriormente citados.

1.3 Modelação em Portugal

A quantidade de trabalhos feitos em Portugal sobre modelos que caracterizem seres vivos em geral e as Ciências Agrárias em particular, é reduzida, quer em número, quer em temas. Os modelos aplicados a entomologia são mais raros ainda. A maioria dos modelos restringem-se ao estudo de plantas, nomeando alguns exemplos o Eucalipto (*Eucalyptus globus* Labill) (Tomé 1987, 1988, Carvalho 2000, Ferreira 1998), o pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Aiton) (Ferreira 1998, Fernandes 2000, Gonçalves 2003), o tomateiro (Abreu 2004) e o sobreiro (*Quercus suber* L.) (Vasquez Pique 2002). Qualquer destes modelos tem como objectivo final a previsão de produção da cultura, expresso em termos de biomassa. Porém, alguns dos modelos foram também desenvolvidos para o mundo animal, tendo por

base um estudo e aplicação ecológica. Refira-se alguns modelos de interesse cinegético como o estudo do estado de conservação de populações do Peneireiro-das-torres (*Falco naumanni*) (Catry 2005); outro modelo tenta prever a ocorrência do corço (*Capreolus capreolus* L.) no distrito de Bragança baseado em variáveis ambientais, ocupação do solo e sociais (Brito 2001). Por fim, refiram-se dois exemplos de modelos aplicados à entomologia. O primeiro modelo tem por objectivo a previsão do ataque de ecolitídeos ao pinheiro bravo. Este modelo foi desenvolvido com base em fontes bibliográficas e foi adaptado para as condições nacionais (Pinto 1996). O segundo modelo foi baseado em técnicas de Vida Artificial para a mosca da azeitona (*Batrocera oleae* (Gmelin)) com o objectivo de reproduzir os períodos de desenvolvimento e taxas de mortalidade de uma mosca real (Costa et al. 1998).

1.4 Objectivos

O objectivo final deste trabalho será construir uma simulação para computador (denominada SimCitri) com dois níveis tróficos que permita o estudo teórico e previsão a curto prazo de pululações de populações de *P. citri* sobre pomares de citrinos, tanto na ausência como na presença de inimigos naturais. Relevo especial será dado ao parasitóide *Leptomastix dactylopii* Howard (Hymenoptera: Encyrtidae).

Convém referir que a construção de uma simulação passa por diversas fases, as quais obrigam ao cumprimento de objectivos intermédios, no caso de SimCitri análise dos principais modelos matemáticos e simulações utilizados em entomologia; uso desses modelos para estudar a biologia e aspectos de comportamento no campo de *P. citri* e *L. dactylopii*.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi estruturado em sete Capítulos, incluindo a Introdução. No Capítulo dois será feita uma análise sobre simulações de computador para entomologia, sua representação, nomenclatura relacionada e caracterização. No Capítulo três será realizada uma revisão geral de modelos matemáticos aplicados à entomologia. Nos Capítulos quatro e cinco, efectuar-se-á uma revisão bibliográfica, seguida de alguns estudos quantitativos respectivamente sobre *P. citri* e *L. dactylopii*. No Capítulo seis descrever-se-á SimCitri, características e comportamento face a alguns dados de campo, bem como análise de sensibilidade da simulação. No Capítulo sete serão apresentadas as conclusões deste trabalho.

1.6 Nomenclatura e terminologia

Este trabalho obedece a um conjunto de regras e convenções aplicadas na terminologia ao longo do texto e no final para a apresentação das referências bibliográficas. Para a terminologia técnica ligada às ciências agronómicas, foram seguidas as regras apresentadas em Amaro & Baggiolini (1982), Carvalho (1986) e Cadima (1985). Para representações em linguagem matemáticas de acordo com Almeida (1997) e medidas de acordo com Brownridge (2001), nomes científicos para géneros e espécies em itálico e estrangeirismo entre aspas. A apresentação de referências bibliográficas obedeceu ao princípio de máxima simplicidade. A lista de documentos *On-line* foi elaborada de acordo com as

regras da “American Psychological Association” (Anónimo 1999); a lista de documentos em papel foi elaborada de acordo com Turchin (1998), obedecendo à lista de abreviaturas ISO. A referência a equações, quadros ou figuras incluídos nos anexos serão precedidos pela letra "A". Por exemplo a equação 1 do Anexo dois será denominada como (A2.1). De forma semelhante, o primeiro quadro e a primeira figura do Anexo 2 serão denominados como Quadro A2.1 e Fig. A2.1 respectivamente.

A linguagem usada neste trabalho foi revista de acordo com o Dicionário da Língua Portuguesa Contemporânea da Academia de Ciências de Lisboa (Casteleiro et al. 2001). Qualquer termo usado neste trabalho com alusão a modelos, simulações ou informática, implicou previamente a consulta daquele dicionário.

2 Simulação e modelação em entomologia

2.1 Introdução

A utilização de simulações para computador baseadas em modelos matemáticos, tornou-se frequente na actualidade. A crescente utilização de tais simulações foi, e ainda é, estimulada pela melhoria das capacidades técnicas do computador, generalização de domínios de aplicação da informática e respectiva presença quase universal. (Monteith 1996). As diversas disciplinas de entomologia onde a simulação é usada como uma ferramenta de investigação e/ou de aplicação prática são tão distintas como ecologia (e. g., Graf et al. 1992, Xia et al. 1991, Provencher & Riechert 1994, Colbert et al. 1999), fisiologia (e. g., Berry et al. 1991b, Costa et al. 1998), comportamento (e. g., Godfray & Waage 1991, Berry et al. 1991b, Korzukhin & Porter 1994, Provencher & Riechert 1994) ou protecção de plantas (e. g., Calvin et al. 1988, Johnson 1992), apenas para citar alguns exemplos.

No âmbito da representação conceptual da realidade, traduzida em linguagem informática, os termos "simulação" e "modelação" são frequentemente utilizados como sinónimos. Esta afirmação é ainda mais pertinente quando não existe uniformidade na terminologia relacionada com o desenvolvimento de modelos e simulações aplicados a seres vivos. De acordo com Doucet & Sloep (1992), **simular** é reproduzir ou imitar um processo por qualquer meio com o fim de obter uma resposta em relação a qualquer assunto em estudo. Por outro lado, modelação é a acção de modelar e modelar é o acto de projectar, por exemplo um modelo. Um **modelo** é uma representação formal e simplificada da realidade de um fenómeno ou conjunto de fenómenos (Casteleiro et al. 2001, Southwood 1978, Jørgensen 1988), utilizado como uma ferramenta para a resolução de um problema (Southwood 1978, Jørgensen 1988). Com base na discussão anterior define-se simular como a reprodução de um conjunto de condições ou circunstâncias, de forma a retratar determinada situação (Casteleiro et al. 2001) e simulação como um método de análise que consiste em substituir um fenómeno ou um sistema por um modelo ou conjunto de modelos mais simples (Crowther et al. 1995, Casteleiro et al. 2001). Por conseguinte, considera-se que a definição de simulação é mais abrangente e rigorosa para o tipo de trabalho que consiste num programa de previsão desenvolvido para computador, pelo que não se utilizará o termo modelação.

As razões para se trabalhar com simulações são muitas, tal e qual como a forma de as realizar (Doucet & Sloep 1992) e apresentar. Neste Capítulo serão apresentados e discutidos os conceitos relacionados com simulações de computadores baseadas em modelos matemáticos e aplicadas a ciências da vida. Com o fim de se alcançar este objectivo, este Capítulo foi dividido em cinco partes incluindo introdução, nomenclatura relacionada com simulação e modelação, representação esquemática de simulações, descrição dos passos para construção de simulações e simulação em entomologia.

2.2 Nomenclatura

Tal como referido na Introdução (2.1), não foram encontradas referências apresentando uma terminologia uniformizada sobre simulação e modelação. Frequentemente poderá ser lido na literatura o mesmo nome aplicado a dois ou mais conceitos distintos e dois ou mais nomes aplicados

ao mesmo conceito. Para se estabelecer um critério de uniformidade neste domínio, propõe-se um glossário preliminar sobre simulação e modelação e termos relacionados (Anexo 1).

Algumas regras foram estabelecidas na elaboração deste glossário. Primeiro apresentar uma definição para conceitos idênticos descritos na bibliografia. Adotar terminologia portuguesa já existente ou propor a palavra que melhor define o conceito. Na falta de terminologia portuguesa, empregar a palavra ou expressão que melhor se aproxima do conceito em causa. Adotar terminologia estrangeira para termos chave utilizados internacionalmente e já adoptados à Língua Portuguesa. As definições propostas para a classificação de modelos, simulações e sistemas foram organizados de uma forma dicotómica para a maioria dos casos e apenas algumas vezes em chaves de três entradas. Uma vez que o glossário foi organizado de uma forma alfabética, conceitos relacionados serão realçados sublinhando palavras. Quando possível, a terminologia coligida da bibliografia será apresentada em conjunto e em itálico com a denominação em português. Se necessário, a definição será acompanhada por uma curta discussão.

A proposta de classificação de modelos, simulações e sistemas não é obrigatoriamente hierárquica. Como tal, o facto de um modelo, simulação ou sistema estar incluído numa definição de acordo com um critério, não obriga também a estar incluído em definições de critérios paralelos ou complementares. Como resultado, muitos termos poderão ser aplicados para definir um determinado modelo, simulação ou critério.

Este glossário deverá ser encarado como preliminar e um ponto de partida para o estabelecimento de uma terminologia em português padronizada para aplicação da modelação e simulação nas ciências da vida. Este pressuposto é especialmente importante na ciência da simulação e modelação, sempre sujeita a novas ideias e uma dinâmica de evolução intensa, muitas vezes acompanhada por terminologia nova.

2.3 Representação esquemática de sistemas e simulações

Existem diversas formas de representar em esquema as relações entre elementos de um sistema ou simulação. Exemplos deste tipo de representações poderão ser consultados em Jørgensen (1988), Doucet & Sloep (1992), Sharov (1996) e Billington (1997). Não existe nenhuma forma de representação simbólica genérica que possa retratar qualquer tipo de sistema sem apresentar algum género de limitação.

Uma das representações esquemáticas de sistemas mais comuns é a simbologia de Forrester (1961, 1968) (Sharov 1996), a qual será apresentada e descrita. Forrester (1961, 1968) formalizou o conceito de factor - processo e aplicou-o à dinâmica industrial. Mais tarde este formalismo tornou-se muito popular entre os ecologistas para a análise de ecossistemas (e.g. Graf et al. 1985, 1992, Coulson et al. 1985, Xia et al. 1991, Sharov 1996). A simbologia de Forrester (1961, 1968) é baseada na analogia de “tubo e tanque” (Fig. 2.1). Um exemplo da sua aplicação poderá ser visto nas Figs. 2.3, 2.4 e 6.2.

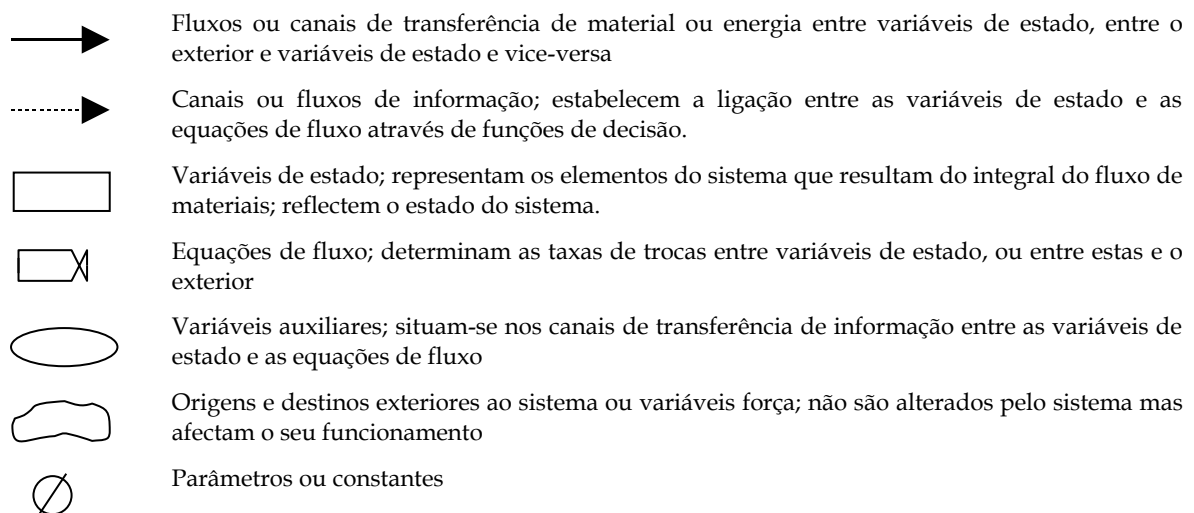


Fig. 2.1 - Simbologia adoptada por Forrester (1961, 1968) para representar esquematicamente um sistema.

O sistema é considerado como um conjunto de tanques ligados por tubos com válvulas, as quais podem regular o fluxo de matéria de um local para o outro. Para além do fluxo de matéria, também existe fluxo de informação que regula as válvulas. Estas válvulas são equivalentes a processos e a quantidade de material num tanque é uma variável ou um factor porque podem afectar os processos através do fluxo de informação. Os diagramas de Forrester têm a vantagem de serem facilmente traduzidos como equações diferenciais. Cada processo transforma-se num termo da equação diferencial que determina a dinâmica da equação final. No entanto, este tipo de representação tem algumas limitações quando aplicado a ciências da vida. Em primeiro lugar, nos seres vivos, a distinção entre fluxos de matéria e informação não é evidente porque informação não pode ser transmitida sem matéria. Segundo, só um tipo de processo é considerado no qual matéria se move de um tanque para o outro. Esta é uma boa representação de organismos a mudar de instar, por exemplo. Porém, é impossível aplicar este modelo em processos que envolvem dois ou mais participantes. Por exemplo, caso um parasitóide entre no corpo do hospedeiro, é impossível fazer um “tubo” que tem início em dois “tanques”, hospedeiro e parasitóide, e termina no “tanque” hospedeiro parasitado. Terceiro, apenas um nível de processos é considerado. Em alguns casos é importante considerar processos a dois níveis espaciais, e. g., a dinâmica de um insecto fitófago pode ser considerada ao nível da planta hospedeira e ao nível da população das plantas hospedeiras (Sharov 1996).

2.4 Construção de uma simulação

Não existe nenhum método padrão para construir uma simulação ou um modelo. Jørgensen (1988) propõe um esquema possível para o efeito (Fig. 2.2).

O início de construção de uma simulação começa com a definição do problema, tendo em conta aspectos como espaço, tempo e subsistemas. A definição dos subsistemas é fundamental para uma análise mais pormenorizada de sistema como um todo. Frequentemente, o número de subsistemas a incluir na simulação é inferior ao planeado devido à falta de informação (Jørgensen 1988).

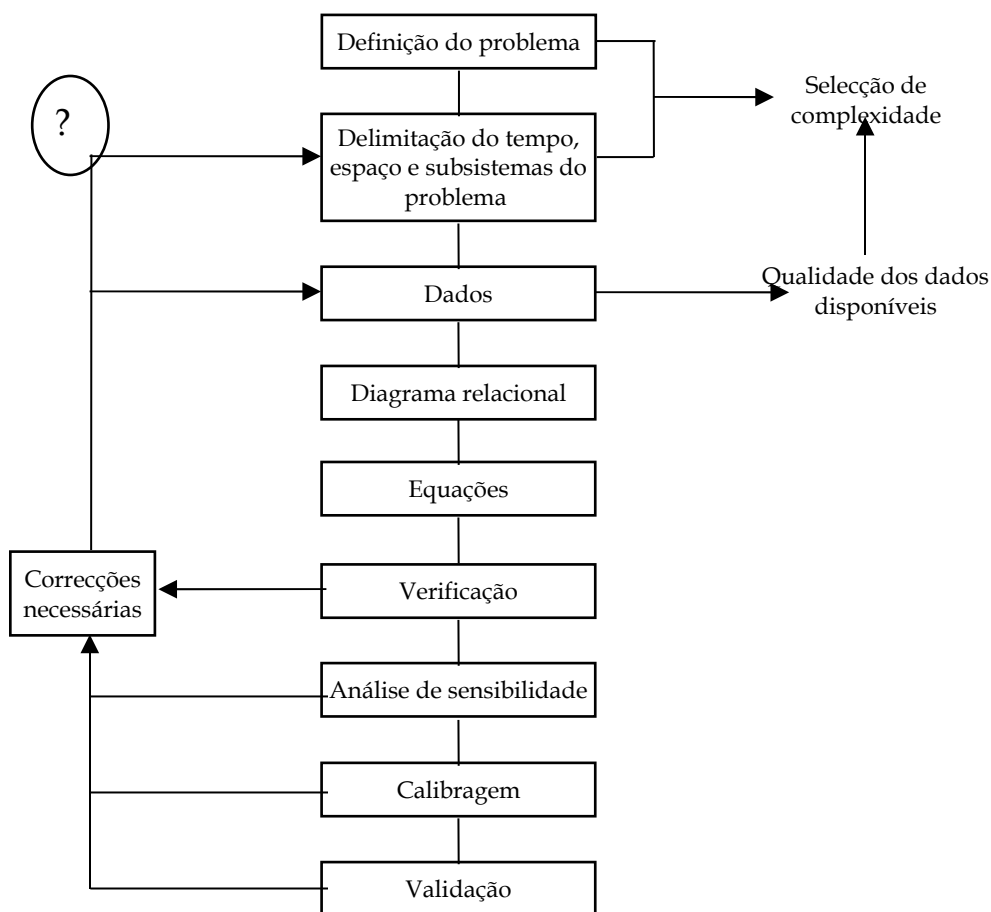


Fig. 2.2 - Esquema possível para a construção de uma simulação (adaptado de Jørgensen 1988).

O nível de complexidade da simulação deverá ser estudado com atenção. A construção de simulações mais complexas não transmite necessariamente maior rigor da estrutura e relações do sistema real (Jørgensen 1988), mas poderá mostrar maior pormenor (Loomis et al. 1979). A possível falta de potência de previsão da simulação complexa é o resultado do aumento de parâmetros utilizados, aumentando conseqüentemente o nível de incerteza porque o cálculo do valor dos parâmetros e taxas de conversão não são completamente isentos de erro (Jørgensen 1988). Portanto, o equilíbrio entre simplicidade e complexidade da simulação deverá ser o resultado de um compromisso que permita resolver o problema da forma mais simples e ao mesmo tempo com o rigor e flexibilidade necessários (Monteith 1996). Para se atingir este objectivo, Passioura (1996) recomenda que a simulação seja a mais simples possível e pouco exigente em dados e sempre que existam dúvidas sobre a estrutura mecanicista dos modelos da simulação, estes deverão ser baseados em sólidas relações empíricas entre as principais variáveis. Caso a simulação utilize apenas modelos empíricos, estes deverão ser utilizados apenas nas condições em que foram criados. Também a validade do ajustamento de qualquer modelo depende principalmente da diferença entre as condições experimentais em que foi obtido e as condições ambientais em que é aplicado. Para além dos aspectos atrás referidos, o sucesso do modelo é muitas vezes afectado pela inevitável modificação do desempenho biológico do insecto sob condições artificiais (Battisti & Cescatti 1994).

2.5 Porquê simular e o uso de modelos?

De acordo com Doucet & Sloep (1992), o uso de um modelo ou de uma simulação parece ter vantagens quando comparado com o uso do sistema ou objecto reais, considerando que um modelo ou uma simulação é sempre uma forma indirecta de estudar o sistema ou o objecto reais. Em entomologia esta última afirmação é particularmente apropriada porque nunca se sabe qual a grandeza do desvio da resposta da simulação em relação à resposta do sistema real, especialmente se este não está disponível. Então, quais são as razões que tornam vantajosa a utilização de uma simulação ou de um modelo? Um modelo pode ser utilizado como uma ferramenta de observação em sistemas complexos (Getz & Gutierrez 1982, Jørgensen 1988, Sinclair & Seligman 1996) e no estudo de causa/efeito quando é difícil determinar a causa, ou causas responsáveis por um determinado efeito observado no sistema (Doucet & Sloep 1992); forma de mostrar as propriedades mais importantes do sistema (Getz & Gutierrez 1982, Jørgensen 1988, Freier et al. 1996); forma de mostrar aspectos em falta no nosso conhecimento e em consequência, apontar linhas prioritárias de investigação (Getz & Gutierrez 1982, Jørgensen 1988, Boote et al. 1996); forma teórica de testar hipóteses para as quais não existem dados (Getz & Gutierrez 1982, Provencher & Riechert 1994); fazer testes de hipóteses (Jørgensen 1988, Boote et al. 1996), muitas vezes reduzindo o tempo de observação de processos que no sistema real seriam morosos (Doucet & Sloep 1992); por causas éticas de restrição do uso de seres humanos ou outros animais em experiências (Doucet & Sloep 1992); forma de resumir conhecimento (Boote et al. 1996); para fins educativos (Doucet & Sloep 1992, Sinclair & Seligman 1996); forma de reduzir despesas em experiências caras (Godfray & Waage 1991); forma de estudar problemas específicos de gestão (Getz & Gutierrez 1982).

Mais razões para o uso de modelos e simulações poderiam ser apontados. Portanto, o uso de modelos e simulações parece trazer vantagens consideráveis, tanto em investigação aplicada como investigação teórica. Neste trabalho, os principais objectivos de desenvolver uma simulação sobre *P. citri* e *L. dactylopii* é estudar aspectos de comportamento no campo destas espécies, bem como fazer uma síntese dos conhecimentos existentes.

2.6 Simulação em entomologia – princípios e exemplos

Actualmente, a quantidade de simulações desenvolvidas para entomologia é considerável. Como consequência, o tipo de abordagem na construção de simulações é ampla e variada, dependendo de factores como o assunto a simular, métodos matemáticos usados, domínio científico (ecologia, economia, fisiologia, etc.), objectivo de previsão ou de análise de sistemas, tipo de ecossistema simulado, output, forma de gestão do ecossistema e muitos outros factores. Esta falta de homogeneidade na construção de uma simulação torna difícil uma revisão e resumo gerais da literatura sobre este assunto. Estas dificuldades são ainda mais acentuadas após tentativas de organização de simulações em classes categorizadas. Muitas vezes a definição destas categorias é limitada na sua concepção devido a classificações artificiais de sistemas. Por exemplo, a simulação classificada como “de gestão” (direccionada para um output relacionado com estragos e prejuízos

causados por uma praga numa cultura), de certeza que inclui informação “fenológica” relacionada tanto com a praga como com a cultura.

2.6.1 Nomenclatura de simulações

A nomenclatura usada para designar uma simulação não segue uma regra específica. Estes nomes aparecem escritos em letras maiúsculas, numa mistura de letras maiúsculas e minúsculas e muitas vezes reduzidos a um acrónimo. De qualquer modo, a maior parte das designações de simulações são sugestivas da cultura e/ou da praga à qual (ou quais) são aplicadas. Algumas simulações não têm mesmo nome (Quadro 2.1).

Por análise do Quadro 2.1 verifica-se que os nomes por extenso de imediato revelam a(s) espécie(s) envolvida(s) da simulação. Os acrónimos não transmitem qualquer ideia das espécies objecto da simulação. Alguns acrónimos podem ainda causar alguma confusão. Um nome por praga identifica de imediato o objecto da simulação, mas não é tão descritivo como um nome por extenso, que para além do nome da praga também inclui o nome da cultura. A grande vantagem de um nome por praga é a sua simplicidade. Dando prioridade a este critério, o nome da simulação descrita no Capítulo 6 fica justificado.

2.6.2 Elementos de uma simulação e respectiva estrutura

Analisando a estrutura de simulações para computador em entomologia, distinguem-se dois grupos principais: aquelas que são compostas por apenas uma sequência de modelos num único programa (e. g., Mckibben et al. 1991, Axelsen 1997, Costa et al. 1998, Song et al. 2003) e aquelas que apresentam uma estrutura modular, compostas por conjuntos de módulos operando de uma forma quase independente. Cada módulo corresponde a um programa, interagindo com os outros módulos derivando desta interacção o output final (e. g., Calvin et al. 1988, Xia et al. 1991, Berry et al. 1991b, Johnson 1992, Knaust & Poehling 1996, Jackman et al. 1997b, Colbert et al. 1999, Gosselke et al. 2001).

O tipo de simulação cuja estrutura é composta por módulos é mais complexa, mas apresenta vantagens consideráveis. A primeira vantagem é o resultado de um aspecto prático, pela possibilidade de ligar diferentes programas escritos em diversas linguagens. Cada módulo pode trabalhar por si próprio. Também, durante a concepção da simulação, é mais fácil construir em primeiro lugar pequenas rotinas com uma funcionalidade limitada e bem descritas e mais tarde construir o produto final a partir destas pequenas rotinas (Evert & Baker 1999). A quantidade de módulos numa simulação em entomologia pode alcançar desde algumas unidades até algumas dezenas. Como consequência, a estrutura da simulação aumenta de complexidade no sentido de simulação genérica para a simulação analítica.

Quadro 2.1 - Exemplos de simulações aplicadas a protecção de plantas e designação de cultura e praga onde são aplicadas.

Classe de designação	Designação (acrónimo)	Praga	Cultura	Objectivos	Referência
Nome por extenso	<i>Western Spruce Budworm damage Model</i>	<i>Choristoneura fumiferana</i> (Clem.)	Coníferas	Avaliação de decisões de gestão	Adams 2000
Nome por extenso	<i>Gypsy Moth Modelling Programs</i>	<i>Lymantria dispar</i> L.	Folhosas	Estudo da dinâmica da praga e cálculo de prejuízos	Colbert et al. 1999
Nome por extenso	<i>Sorghum pest management report database system</i>	Vários	Sorgo	Classificar a nocividade da praga; gestão da praga	Jackman et al. 1997b
Nome por praga	<i>Dasyneura</i> -population	<i>Dasyneura brassica</i> Winn	Nabo	Estudo exaustivo da tabela de vida	Axelsen 1997
Nome por inimigos naturais	Bio-control Parasite	Vários	Várias	Descrição da interacção de populações hospedeiro/parasitóide; Cálculo prejuízos	DeGrandi-Hoffman et al. 1997
Nome por extenso	Boll Weevil DISpersal (BWDISP)	<i>Anthonomus grandis</i> Boheman	Algodão	Previsão de expansão da praga	Mckibben et al. 1991
Nome por extenso	RICE WATER WEEVIL MODEL (ACZ-TX)	<i>Sitophilus oryzae</i> (L.)	Arroz	Previsão de emergência da praga	Jackman et al. 1997a
Nome por extenso	SORGHUM MIDGE SIMULATION MODEL (ACN-TX)	<i>Contarinia sorghicola</i> (Coquillett)	Sorgo	Previsão local de densidades populacionais	Jackman et al. 1997c
Nome por extenso	PECAN NUT CASE BEARER MODEL (ACJL-TX)	<i>Acrobasis nuxvorella</i> Neunzig	Pecan	Tomada decisão tratamento	Jackman et al. 1997d
Acrónimo	GETLAUS01	<i>Sitobion avenae</i> (F.) <i>Rhopalosiphum padi</i> (L.) <i>Metopolophium dirhodum</i> (Walker)	Trigo	Estudo relação cultura, pragas e auxiliares	Gosselke et al. 2001
Sem nome	--	<i>Rhagoletis indifferens</i> Curran	Cereja	Previsão de emergência da praga	Song et al. 2003
Sem nome	--	<i>Empoasca fabae</i> (Harris) + 2 doenças	Batata	Impacto económico	Jonhson et al. 1987 Jonhson 1992
Sem nome	--	<i>Rastrococcus invadens</i> Williams + 2 parasitoides (<i>Gyranusoidea</i> spp., <i>Anagyrus</i> spp.)	Manga Citrinos	Estudo de competição entre parasitóides	Godfray & Waage 1991
Sem nome	--	Pyralidae	Arroz	Dinâmica populações, impacto económico	Graf et al. 1992

Quadro 2.1 - Exemplos de simulações aplicadas a protecção de plantas e designação de cultura e praga onde são aplicadas (continuação).

Classe de designação	Designação (acrónimo)	Praga	Cultura	Objectivos	Referencia
Nome por extenso	--	<i>Lyctocoris campestris</i> (predador) <i>Plodia interpunctella</i> (praga)	Milho armazenado	Optimização tratamento biológico	Throne et al. 2000
Acrónimo	SCIM	<i>Anticarsia gemmatalis</i> Hübner <i>Nezara viridula</i> (L.) <i>Helicoverpa zea</i> (Boddie)	Soja	Modelo de investigação	Mishoe & Wilkerson 1992
Sem nome	--	<i>Ostrinia nubilalis</i> (Hubnes)	Milho	Tomada decisão tratamento	Calvin et al. 1988
Sem nome	--	Afídeos	Macieiras	Dinâmica populações	Graf et al. 1985
Sem nome	--	<i>Batrocera oleae</i> (Gmelin)	Oliveira	Dinâmica populações	Costa et al. 1998
Acrónimo	SYMSYSB	<i>Scirpophaga incertulas</i> (Walker)	Arroz.	Dinâmica populações	Xia et al. 1991
Nome por praga	TAMBETLE	<i>Dendroctonus frontalis</i> Zimmermann	Pinheiros.	Dinâmica populações	Coulson et al. 1985
Nome por localização geográfica	ArkansasModel	<i>Dendroctonus frontalis</i> Zimmermann	Pinheiros	Dinâmica populações	Calvin et al. 1988
Acrónimo	MPBMOD	<i>Dendroctonus ponderosae</i> Hopkins	Pinheiros	Dinâmica populações Impacto económico	Calvin et al. 1988
Acrónimo	GTLAUS	<i>Sitabion avenae</i> (Fabr.)	Trigo	Dinâmica populações	Freier et al. 1996
Sem nome	--	<i>Helicoverpa zea</i> (Boddie)	Milho	Tomada decisão tratamento	Coop et al. 1993
Sem nome	--	<i>Solenopsis invicta</i> Buren	--	Dinâmica de colónia da formiga	Korzukhin & Porter 1994
Nome por praga	MiteSim	<i>Oligonychus pratensis</i> (Banks)	Milho	Influência de factores ambientais sobre ácaros	Berry et al. 1991a, 1991b
Sem nome	--	<i>Frankliniella occidentalis</i> (Pergande)		Dinâmica populações	Wang & Shipp 2001
Sem nome	--	Várias	--	Dinâmica populações de aranhas	Provencher & Riechert 1994

Os elementos comuns em todas as simulações são sempre o input, o output e pelo menos uma equação que regula a taxa de transformação de input em output. O input mais simples numa simulação em entomologia será representado por uma única variável força, agindo como o principal agente condutor de todo o processo. A estrutura mais simples deste tipo de simulação, composta por um único modelo, está representada na Fig. 2.3, podendo notar-se a ausência de variáveis de estado.

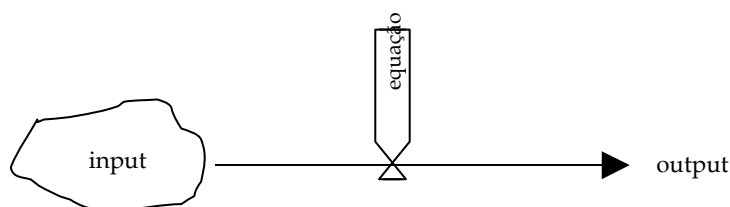


Fig. 2.3 - Diagrama relacional para a simulação mais simples em entomologia, utilizando a notação de Forrester (1961, 1968).

Usando as definições propostas no Anexo 1, esta é uma simulação de “caixa negra”. Simulações de caixa negra estão geralmente relacionadas com previsão em protecção de plantas, como por exemplo o cálculo da data de aparecimento de uma praga. Um exemplo do tipo de modelo usado é o cálculo dos graus dias como estimativa do desenvolvimento de insectos (Capítulo 3.2.2, Anexo 2), sendo o input a temperatura ambiente, a equação o somatório de graus dia e o output o número de graus dia acumulados.

Em simulações mais complexas, o número de inputs aumenta e diversas variáveis de estado são introduzidas. A forma que as variáveis de estado são representadas pode ser por um simples escalar (e. g., Adams 2000, Costa et al. 1998, Godfray & Waage 1991) ou com matrizes (e. g., Coop et al. 1993, Korzukhin & Porter 1994, Berry et al. 1991b, Fan et al. 1991, Provencher & Riechert 1994, Wang et al. 1977, Graf et al. 1991). Geralmente, as matrizes são unidimensionais e representam um estágio específico de desenvolvimento do insecto.

O uso de matrizes como variáveis de estado para a representação do estágio de desenvolvimento de um organismo poiquilotérmico, permite imitar o escalonamento no desenvolvimento dos descendentes (Graf et al. 1985). Cada célula representa um sub-estádio. O comprimento da matriz pode ser calculada de acordo com o método de Manetsch (1976), adaptado por Graf et al. (1985) (2.1), (Fig. 2.4). Este autor propôs uma fórmula para determinar o q número de sub-estádios de um estágio na vida de um insecto. A taxa de transição entre sub-estádios determina a frequência de distribuição do período de desenvolvimento de indivíduos num estágio. O método de cálculo introduzido em (2.1) tem a vantagem de produzir um escalonamento proporcional ao comprimento do estágio considerado.

$$q = \frac{t^2}{s^2} \quad (2.1)$$

t^2 - tempo médio de desenvolvimento

s^2 - variância de T

O valor das variáveis de estado é transformado na simulação através de equações. Por exemplo, se o número de insectos num estádio é representado por um escalar, pode ser transformado num número mais pequeno por mortalidade ou desenvolvimento por acção de uma determinada taxa. No caso de mortalidade ou emigração, o número de insectos é simplesmente reduzido, enquanto que para desenvolvimento, o valor da variável de estado é simplesmente “transportado” para outra variável de estado. O mesmo princípio é também utilizado em variáveis de estado representadas por matrizes. Os valores da variável de estado numa célula são simplesmente reduzidos ou “transportados” para outra célula (Fig 2.4). De forma similar, o número de insectos num modelo poderá aumentar por reprodução, imigração ou acumulação de indivíduos em determinado estado de desenvolvimento.

2.6.3 Simulações e respectivos objectivos

Nas simulações aplicadas à entomologia, dois importantes grupos de objectivos deverão ser apontados. Simulações cujo propósito principal é a caracterização económica do impacto de uma praga, por vezes em simultâneo com uma doença, numa cultura (Quadro 2.1) (e. g., Wang et al. 1977, Calvin et al. 1988, Wilkerson & Mishoe 1990, Andrews & Brown 1992, Coop et al. 1993, Jackman et al. 1997b, Jonhson et al. 1987, 1992), geralmente relacionadas com tomada de decisão e o uso de diversos meios de luta; simulações cujo objectivo principal é a caracterização ecológica ou biológica de uma espécie, a qual não tem que ser necessariamente uma praga. (e. g., Graf et al. 1985, 1992, Colbert et al. 1999, Hughes & Gilbert 1968, Costa et al. 1998, Xia et al. 1991, Coulson et al. 1985, Freier et al. 1996, Korzukhim & Porter 1994, Berry et al. 1991b, Fan et al. 1991, Provencher & Riechert 1994, Godfray & Waage 1991, Mckbhien et al. 1997, Axelsen 1993, Gosselke et al. 2001).

Entre este último tipo de modelos, o *Gypsy Moth Modelling Programs* (Colbert et al. 1999) merece especial atenção. Os efeitos negativos causados no ambiente pelo lepidóptero desfolhador *L. dispar* foi tão importante após a introdução desta espécie na América do Norte, (Ravlin & Stein 2001), que muitos recursos foram mobilizados para o estudo desta praga. O *Gypsy Moth Modelling Programs* tem uma estrutura de quatro módulos, os quais fornecem informação sobre a dinâmica de populações durante um determinado período de tempo numa floresta, incluindo a interacção com inimigos naturais e cálculo de prejuízos. O módulo mais desenvolvido é o *Gypsy Moth Life System Model* (GMLSM), a partir do qual foi elaborada uma versão mais simplificada, a *Reduced GMLSM*. O GMLSM é um módulo muito completo que faz a simulação da dinâmica de populações de *L. dispar* dentro de uma única floresta durante um intervalo de tempo de alguns anos, nomeadamente crescimento, alimentação e mortalidade, seguindo grupos de indivíduos da mesma idade através do método do grau dia. Com o fim de atingir estes objectivos, GMLSM também simula a dinâmica dos inimigos naturais, incluindo predadores, parasitóides e patógenos que afectam e são afectados por *L. dispar*. Como a folhagem cresce ao mesmo tempo que a praga se alimenta, o balanço de crescimento da matéria vegetal está também representado numa base de dados específica para cada essência florestal.

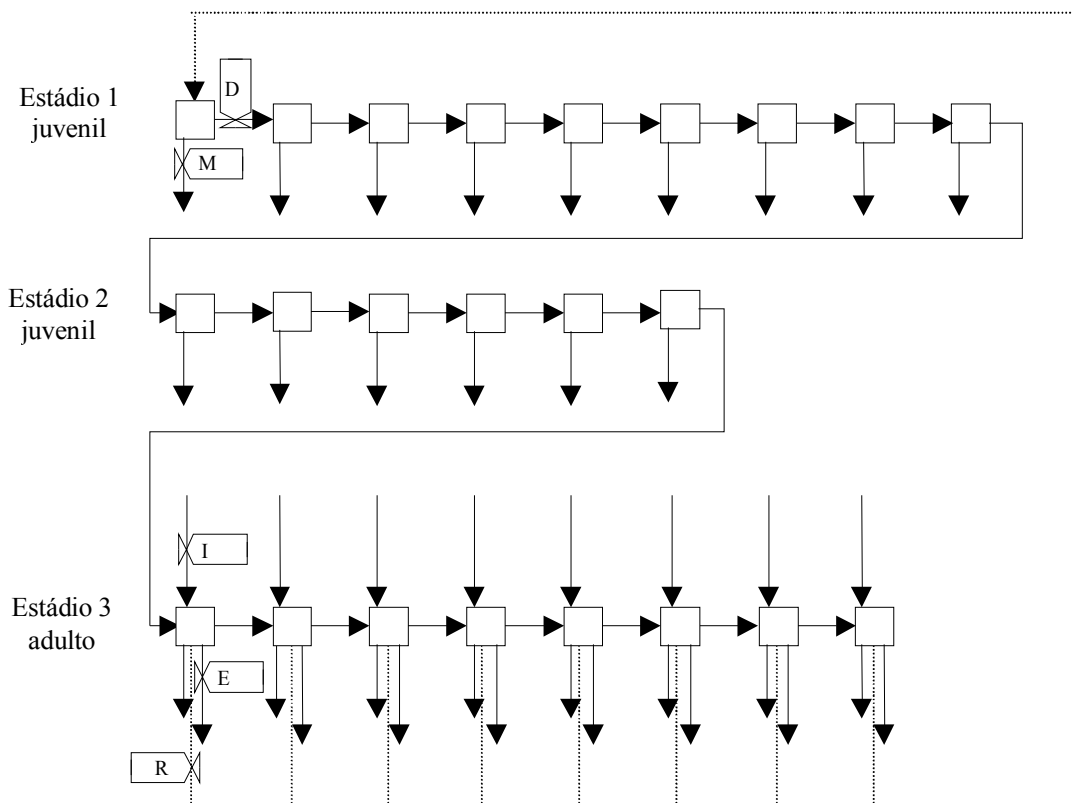


Fig. 2.4 - Representação de estádios arbitrários de insetos (matrizes linha) e sub-estádios (cada célula/quadrado). D taxa de desenvolvimento, M taxa de mortalidade, I taxa de imigração, E taxa de emigração, R taxa de reprodução.

O utilizador pode iniciar o programa a partir de uma série de condições pré-definidas, ou utilizar um menu para fornecer as condições iniciais, método de gestão da praga, incluindo a aplicação de meios de luta biológica com vírus ou bactérias, meios de luta química com insecticidas, meios de luta biotécnica como confusão sexual, largada de ovos estéreis ou, finalmente meios de luta física por aplicação de técnicas florestais diversas. Outra simulação é o *Ordinary Differential Equations Model* composto por três equações diferenciais acopladas, representando respectivamente *L. dispar*, a folhagem da floresta e os inimigos naturais. Esta simulação forneceu resultados muito importantes sobre a estabilidade e comportamento assintótico de sistema de três níveis tróficos. A última simulação é o *Stand-Damage Model*.

O exemplo de *Gypsy Moth Modelling Programs* revela a importância da utilização destas simulações, mas antes da introdução de espécies exóticas numa nova região. Godfray & Waage (1991) demonstram bem este aspecto num estudo simulado da introdução de duas espécies de parasitóides para combater uma praga.

Em ambos os tipos de simulações apresentados, tanto de objectivos principais de índole económico como de índole ecológico e biológico, terá sempre que incluir um modelo fenológico para prever o desenvolvimento de insectos, ou pelo menos, a emergência dos estados nocivos. As simulações de gestão estão muitas vezes acopladas com uma simulação sobre o crescimento da cultura. Apenas desta forma será possível estimar potenciais estragos ou prejuízos (e. g., Jonhson et al.

1987, Calvin et al. 1988, Andrews & Brown 1992, Johnson 1992, Mishoe & Wilkerson 1992, Gosselke et al. 2001)

2.6.4 Inputs, outputs e variáveis de simulações

Os diferentes tipos de input em simulações em entomologia podem ser variáveis força, variáveis de estado e variáveis auxiliares. As variáveis força são os elementos condutores do sistema, como por exemplo temperatura (e.g., Berry et al. 1991a, 1991b, Fan et al. 1991, Graf et al. 1991, Xia et al. 1991, Coop et al. 1993, Costa et al. 1998), humidade (Berry et al. 1991), fotoperíodo, intensidade de precipitação ou aplicação de pesticidas (Gosselke et al. 2001). O input variável força pode ser efectuado apenas no início da simulação (e. g., fotoperíodo constante), ou durante o decurso da simulação, uma vez, de vez em quando ou mesmo regularmente (e. g., temperatura diária).

As variáveis de estado estão relacionadas com factores que são estudados na simulação e cuja taxa e intensidade de transformação estão dependentes das variáveis força. Eventualmente, o valor de uma variável de estado de um módulo da simulação, poderá ser o input de outro módulo (e. g. Colbert et al. 1999, Adams 2000, ver Capítulo 6). O input de valores para variáveis de estado tanto é feita apenas uma vez no início como durante a simulação. Os inputs que podem ser identificados e usados como variáveis de estado são número de ovos por unidades de amostragem (e. g., Graf et al. 1985, Calvin et al. 1988, Berry et al. 1991b), número de massas de ovos (e. g., Fan et al. 1991), número de adultos por unidade de amostragem (e. g., Graf et al. 1985, Berry et al. 1991b), número de estados imaturos por unidade de amostragem (e. g., Berry et al. 1991b, Coop et al. 1993) ou data de observação de um determinado fenómeno (e. g., Calvin et al. 1988, Coop et al. 1993, Jackman et al. 1997a).

Quando comparado com os diferentes tipos de input, os output são de natureza um pouco diferentes. Geralmente os output estão mais limitados a datas de postura (Schoub & Stone 1994), datas de emergência (Graf et al. 1991, Jackman et al. 1997d), taxas de parasitismo (Godfray & Waage 1991), número de indivíduos por unidade (Graf et al. 1991) ou estragos causados em termos de tecido vegetal (Jonhson et al. 1987, Graf et al. 1991). Resulta pois, que o output não é mais do que a representação de intensidades de uma variável.

2.6.5 Métodos matemáticos usados

O leque de métodos usados em simulações em entomologia é vasto. Equações diferenciais, equações com derivadas parciais, equações de diferenças, regressões estatísticas ou simples aritmética são de uso bastante comum. Não existe nenhuma regra para a selecção específica de um método matemático numa simulação. Algumas simulações conjugam dois ou mais destes métodos.

O uso de equações diferenciais ou com derivadas parciais está relacionado com simulações desenvolvidas para estudos teóricos de sistemas. Por exemplo Godfray & Waage (1991) em estudos de previsão de resultados de luta biológica; Colbert et al. (1999) no estudo da dinâmica de *L. dispar*; Adams (2000) no estudo de *C. fumiferana*; Graf et al. (1985) no estudo de afídeos em pomares de macieiras; ou no estudo do movimento de organismos (Holmes et al. 1994). Também se pode

considerar o estudo de um sistema a longo prazo ou quando se supõe que uma população está sempre activa ao longo do ano (Colbert et al. 1999).

As equações de diferenças de certa forma são utilizadas nas mesmas condições que as equações diferenciais, mas o factor tempo é assumido discreto, com saltos bem definidos (e. g., entre gerações). Um exemplo pode ser visto em Korzukhin & Porter (1994) numa simulação sobre a dinâmica e interacção de colónias da formiga *S. invicta*. Simulações complexas, baseadas em várias equações de diferenças, são mais fáceis de traduzir em termos de linguagens de computador do que simulações homólogas baseadas em equações diferenciais (Southwood 1978). A razão reside no facto das equações diferenciais descreverem uma variável de estado através da actual taxa de transformação em termos do actual estado dessa mesma variável de estado. Em contraste, as equações de diferenças descrevem o próximo estado da variável em termos do seu estado actual (Doucet & Sloep 1992).

Aritmética simples é muitas vezes utilizada nas mais complexas simulações. Por exemplo, Xia et al. (1991) estimaram taxas de desenvolvimento por extrapolação linear entre dois pontos consecutivos conhecidos de taxa de desenvolvimento de um insecto. Johnson (1992) estimou a intensidade de alimentação de cicadelídeos a partir da multiplicação entre a densidade da população e a área de plantas.

As equações com derivadas parciais descrevem o comportamento de funções com mais de uma variável (Doucet & Sloep 1992). Este tipo de equações é muito utilizado em simulações envolvendo movimento de organismos porque tomam em consideração simultaneamente alterações contínuas no espaço e no tempo (Holmes et al. 1994). Um exemplo de um caso simples poderá ser visto no Capítulo 3.5. Assuntos como dispersão de organismos, invasão, dinâmica de populações em habitats descontínuos (e.g., dinâmica de populações de animais terrestres dentro de um arquipélago), dispersão mediada por coexistência de organismos e formação de padrões em ambientes homogéneos são estudados por este tipo de equações (Holmes et al. 1994).

Os modelos estatísticos são uma das melhores formas de resumir dados colhidos sob condições em constante mudança e sujeitas a variação aleatória. A análise de dados por regressão realça as variáveis importantes que contribuem para a dinâmica do sistema. Contudo, simulações baseadas em técnicas estatísticas de regressão não poderão ser aplicadas em condições diferentes daquelas em que os dados originais foram colhidos (Coulson et al. 1985).

A teoria matemática das probabilidades pode ser aplicada a simulações na área das ciências da vida. Em oposição a uma abordagem probabilística das simulações temos uma abordagem determinista. Quando a teoria das probabilidades é introduzida na formulação de modelos obtém-se um modelo estocástico (Anexo 1). Quando uma simulação contém pelo menos um modelo estocástico, esta poderá ser considerada uma simulação estocástica. Por outro lado, para se obter uma simulação inteiramente determinista, todos os seus modelos terão que ser deterministas (e. g., Knaust & Poehling 1996, Provencher & Riechert 1994). Os modelos estocásticos são de uma forma geral mais difíceis de trabalhar do que modelos deterministas. No entanto os modelos estocásticos são utilizados para prever ou explicar fenómenos que estão para além das possibilidades dos modelos deterministas. Os

modelos estocásticos são utilizados quando pequenos números de indivíduos estão em causa ou para prever o movimento de um animal (Doucet & Sloep 1992). Os modelos estocásticos também são utilizados quando é necessário prever qualquer aspecto particular de uma praga (e. g. data de ocorrência para estragos, densidade de uma praga numa determinada data) numa cultura num local muito específicos. Este tipo de modelos é mais utilizado em previsão de situações muito específicas e não numa situação mediana representando a condição da praga a nível regional. (Schaub & Stone 1994).

3 Modelação em entomologia - revisão bibliográfica

3.1 Introdução

Como referido no Capítulo 2.5, um modelo matemático pode ser entendido como uma ferramenta para estudar um fenómeno (Doucet & Sloep 1992). A diversidade de modelos matemáticos aplicados em entomologia é extensa e com estas ferramentas os cientistas tentam descrever ou explicar fenómenos como por exemplo desenvolvimento (e.g., Tingle & Copland 1988, Ali & Gaylor 1992, Harrari et al. 1998, Wermelinger & Seifert 1999), postura (Wermelinger & Seifert 1999), movimento (Mckibben et al. 1991) ou interacção entre espécies (predação, parasitismo, competição, etc.) (Godfray & Waage 1991). Resumindo, é virtualmente possível modelar e simular qualquer fenómeno em entomologia. Dependendo das regras e pressupostos na base de construção de um modelo, estes podem dividir-se nos dois grandes grupos de modelos mecanicistas e modelos empíricos. Uma das razões da importância desta distinção reside no facto do leque de situações em que cada tipo de modelo poderá ser aplicado. Os modelos empíricos são descritivos e desprovidos de qualquer fundamentação de teoria de populações ou de teoria biológica (Berryman 1997), facto pelo qual estão sempre condicionados a uma aplicação dentro das condições em que foram desenvolvidos. Pelo contrário, os modelos mecanicistas foram desenvolvidos com base em leis científicas fundamentais e podem ser utilizados em qualquer tipo de situações (e. g., Sharpe & DeMichelle 1977). O uso de cada um dos tipos de modelo depende de vários factores tais como a quantidade e amplitude dos dados disponíveis, características do output e objectivo da simulação.

A aplicação de um modelo matemático específico numa simulação passa por um processo de selecção devido à quantidade de equações homólogas passíveis de aplicação a um mesmo fenómeno (e.g., desenvolvimento, postura, parasitismo, predação, competição movimento, etc.). Nesta perspectiva, ao longo deste Capítulo apresentar-se-ão, discutir-se-ão e comparar-se-ão os modelos mais comuns aplicados em entomologia, necessários à construção de uma simulação. A lista de modelos aplicados ao desenvolvimento de insectos e índices de ocupação ambiental serão respectivamente apresentados nos Anexos 2 e 3. No Anexo 4 apresentar-se-á um modelo de predação.

3.2 Desenvolvimento de organismos poiquilotérmicos

3.2.1 Introdução

Os organismos poiquilotérmicos como os insectos, não têm possibilidade de regular a temperatura interna do corpo e portanto, o seu desenvolvimento depende directamente da temperatura ambiente (Carvalho 1986, Gullan & Cranston 1994, Sharov 1996). Como os organismos são formados por compostos químicos, e estes compostos são mantidos em equilíbrio dentro do corpo por reacções que obedecem às leis da termodinâmica, a temperatura tem uma influência fundamental (Hoffman 1985). A influência da temperatura na biologia dos insectos (fecundidade, desenvolvimento, longevidade e actividade) é tão grande, que muitos estudos da dinâmica de insectos são feitos quase exclusivamente com base neste factor (Worner 1992). Outro aspecto importante é que a amplitude de temperaturas para os processos biológicos ocorrerem é muito estreito devido às propriedades de moléculas biológicas e aos respectivos coeficientes de reacções químicas Q_{10} (Hoffman 1985).

Apesar da amplitude de temperaturas para o desenvolvimento de insectos ser estreita, várias fases podem ser definidas. Wagner et al. (1984) apresentou uma descrição simplificada de curva de períodos de desenvolvimento e de taxas de desenvolvimento em função da temperatura da forma que se segue, procedendo-se a algumas adaptações. O limite inferior desta amplitude é designado zero de desenvolvimento. Abaixo deste valor não existe desenvolvimento. Para temperaturas acima deste valor, o período de desenvolvimento de um insecto torna-se cada vez menor, até um valor mínimo. Após este valor, com o aumento de temperatura, o período de desenvolvimento torna a aumentar, até ao ponto em que pára (Fig. 3.1a). Se o valor recíproco dos períodos de desenvolvimento for calculado, obtém-se a taxa de desenvolvimento (3.1).

$$\text{Taxa de desenvolvimento} = \frac{1}{\text{Período de desenvolvimento}} \quad (3.1)$$

De uma forma geral, e tendo em consideração aspectos práticos para a utilização da taxa de desenvolvimento em simulações, selecciona-se a unidade de tempo tanto em horas como em dias, para que o período de desenvolvimento do insecto seja superior a um. Se o período de desenvolvimento for superior a um por unidade de tempo, então a taxa de desenvolvimento toma valores máximos e mínimos entre zero (exclusive) e um. Se se marcar a taxa de desenvolvimento em gráfico em função da temperatura, obtém-se uma curva sigmóide (Fig. 3.1b). No limite térmico inferior, a curva de taxa de desenvolvimento aproxima-se da assíntota que passa pelo ponto de zero de desenvolvimento. À medida que as temperaturas aumentam acima do limite térmico mínimo, verifica-se uma sobre compensação no aumento das taxas de desenvolvimento até que os valores que aumentam se tornam proporcionais ao aumento de temperatura e, em consequência, obtém-se a porção linear da curva sigmóide. O desenvolvimento começa a diminuir à medida que a temperatura óptima de desenvolvimento (i.e., temperatura associada com a taxa de desenvolvimento mais rápida) é alcançada e se a temperatura continua a aumentar existe uma subcompensação na taxa de desenvolvimento. A partir deste ponto, a taxa de desenvolvimento reduz-se acentuadamente. Nos intervalos adjacentes à temperatura para a máxima taxa de desenvolvimento, a curva não é simétrica (Wagner et al. 1984).

Muitos modelos descrevem o período de desenvolvimento ou de taxa de desenvolvimento em função da temperatura para insectos. Os modelos para a taxa de desenvolvimento são frequentemente usados para previsão de períodos de desenvolvimento de insectos porque os respectivos valores por unidade de tempo (e. g., dia⁻¹ ou hora⁻¹) podem ser acumulados, mesmo para ambientes de temperatura flutuante, e quando o somatório atinge o valor 1, o desenvolvimento máximo foi alcançado (Stinner et al. 1975, Wagner et al. 1984).

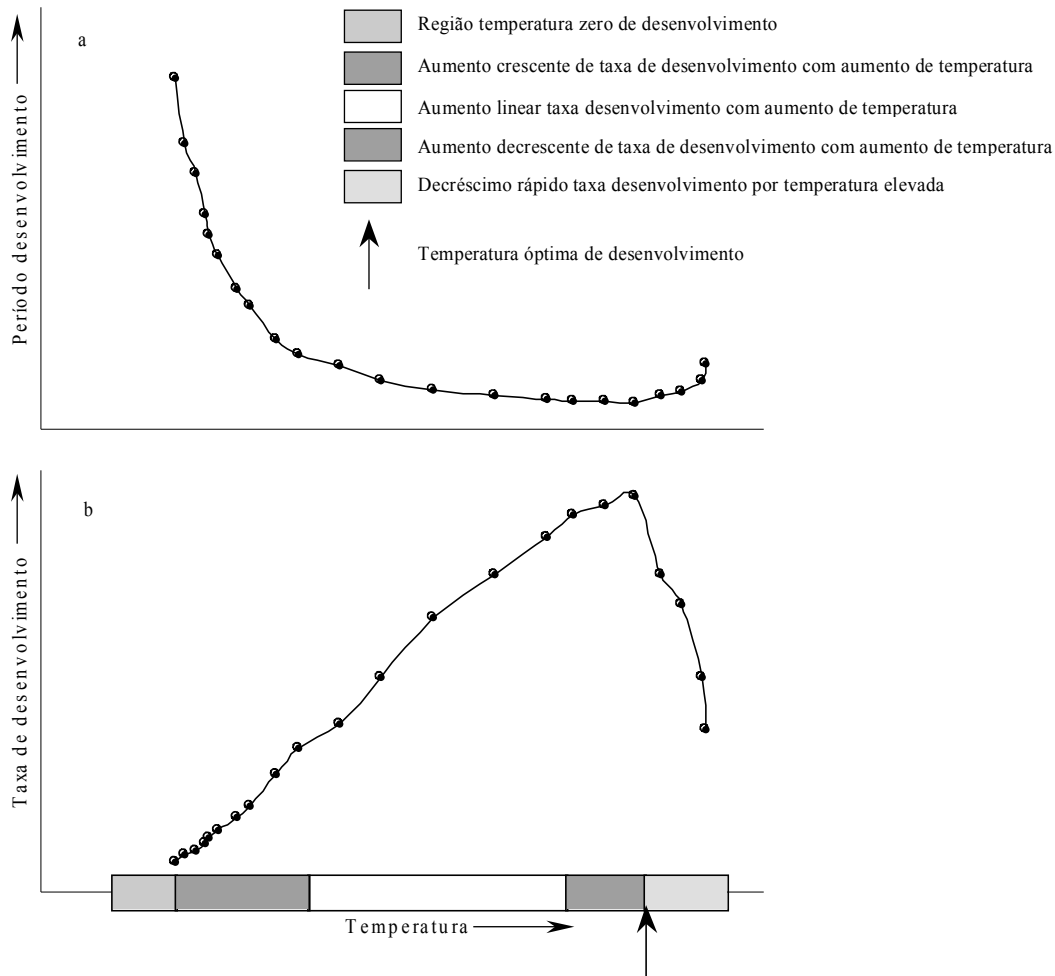


Fig. 3.1 - Variação hipotética do período de desenvolvimento (a) e da taxa de desenvolvimento (b) em função da temperatura para um insecto.

Este princípio aplica-se também a uma fracção de desenvolvimento do insecto. A partir desta definição, esta relação pode ser escrita de acordo com a expressão matemática (3.2) para temperaturas constantes (Stinner et al. 1974).

$$R_T \times t_T = 1 \quad (3.2)$$

R_T - Taxa de desenvolvimento à temperatura T

t_T - período para desenvolvimento à temperatura T

Contudo, na natureza, a temperatura não é constante e varia ao longo do tempo (i. e. temperatura é função do tempo). Portanto, a relação (3.2) terá que se transformar em (3.3) (Stinner et al. 1974, Logan 1988, Worner 1992)

$$D = \int_{t_0}^{t_M} r[T(t)] dt \quad (3.3)$$

r - Taxa de desenvolvimento, função da temperatura T e esta função do tempo t

D - Índice de desenvolvimento do indivíduo

t_0 - Tempo no momento 0

t_M - Tempo em que o desenvolvimento máximo é alcançado

No entanto, como a solução analítica de (3.3) não é possível, esta equação pode ter uma solução aproximada somando as taxas ao longo de intervalos discretos de tempo (Worner 1992), os quais deverão ser tão pequenos quanto possível para maior precisão (3.4) (Stinner et al. 1974, Worner 1992).

$$D = \sum_{t_0}^{t_M} r[T(t)] \quad (3.4)$$

A maior parte dos estudos de desenvolvimento de insectos são feitos em relação a temperatura constante (e. g., Tingle & Copland 1988, Ali & Gaylor 1993, Subramanyan & Hagstrum 1993, Harari et al. 1998, Wermelinger & Seifert 1999), mas alguns são feitos em regimes de temperatura oscilante (Dallwitz 1984, Tingle & Copland 1988, Hagstrum & Milliken 1991, Battisti & Cestacatti 1994, Manel & Debouzie 1994, 1995, Liu et al. 1995, Harari et al. 1998). As metodologias aplicadas a estudos de desenvolvimento de insectos sob temperatura oscilante são mais complexas, mas são baseadas em metodologias utilizadas para estudos de desenvolvimento sob temperatura constante (e. g., Dallwitz 1984, Hagstrum & Milliken 1991, Manel & Debouzie 1994, Liu et al. 1995). Muitas vezes estas metodologias usam a equação (3.4), onde $r(T)$ foi calculado a partir de alguma equação presente no Anexo 2.

Desde a época que o modelo dos graus dias começou a ser utilizado como a primeira tentativa para modelar o desenvolvimento de insectos (ver Capítulo 3.2.2), houve um aumento na complexidade nos modelos à medida que crescia a procura por modelos mais rigorosos. Também os avanços nos conhecimentos sobre fisiologia de insectos e termodinâmica de organismos permitiram o desenvolvimento de modelos mais precisos, com bases mais fundamentadas. Na colecção de modelos existentes, pode-se verificar uma evolução que começa com modelos cujos coeficientes são inteiramente empíricos (modelos empíricos) no sentido de modelos cujos coeficientes têm interpretação biológica ou termodinâmica (modelos mecanicista).

3.2.2 Modelos empíricos

A primeira tentativa para se descrever o desenvolvimento de organismos utilizando temperatura e tempo ocorreu em meados do século XVIII (Zalom et al. 1983, Higley et al. 1986). O primeiro modelo para descrever desenvolvimento poiquilotérmico, incluindo insectos, em função da temperatura, foi o método dos graus-dia, com referências ao seu uso desde meados do século XIX (Wagner et al. 1984). Este método é baseado na lei de soma de calor (Bodenheimer 1951). Esta lei da duração de desenvolvimento de insectos em função de acumulação de calor acima do zero de desenvolvimento (Zalom et al. 1983, Higley et al. 1986), muitas vezes descrito como graus-dia e assumido como constante e específico para cada espécie (Baskerville & Emin 1969). Esta metodologia

considera uma relação linear entre a taxa de desenvolvimento e a temperatura, traduzida em linguagem matemática pela equação da recta (A2.1). A partir desta equação é possível calcular o zero de desenvolvimento (3.6) e constante térmica (3.7) (Sharov 1996), após apresentar a equação (A2.1) na forma (3.5).

$$r(T) = a + bT \quad (3.5)$$

$$T_b = -\frac{a}{b} \quad (3.6)$$

$$S = \frac{1}{b} \quad (3.7)$$

T_b - zero de desenvolvimento

S - constante térmica de desenvolvimento

O método do grau-dia, ainda, é largamente utilizado, por vezes com adaptações para melhor estimativa do desenvolvimento de organismos (Higley et al. 1986, Zalom et al. 1983, Pruess 1983, McDonald 1990). A vantagem deste método reside na quantidade mínima de dados para a sua formulação, é fácil de aplicar e calcular e muitas vezes fornece resultados aproximadamente correctos (Wagner et al. 1984). Contudo, este modelo só é válido para o intervalo de temperaturas médias, quando a taxa de desenvolvimento aumenta linearmente com a temperatura (Fig. 3.1). Outra desvantagem é a de o zero de desenvolvimento e a constante térmica serem determinados empiricamente. Por estas razões, o número de graus-dia necessários para completar o desenvolvimento é demasiado baixo para temperaturas próximo do zero de desenvolvimento e demasiado elevada para temperaturas elevadas ao nível da taxa máxima de desenvolvimento ou um pouco acima. (Howe 1967, Manel & Debouzie 1995). Estes factos são importantes e devem ser considerados quando se interpretam os resultados obtidos pelo método do grau-dia (Baskerville & Emin 1969).

Janisch (1925) apresentou um modelo empírico com catenárias simétricas e assimétricas que descrevem o tempo de desenvolvimento em função da temperatura (A2.2) Este modelo foi usado com alguns graus de sucesso mas foi criticado por ajustamentos inadequados e dificuldades de cálculo (Wagner et al. 1984).

Belehrádek (1935) apresentou uma alternativa ao modelo dos graus-dia e descreve o período de desenvolvimento com uma equação que se torna linear numa escala logarítmica (A2.3). No entanto este método não descreve bem o período de desenvolvimento em temperaturas extremas (Wagner et al. 1984).

Logan (1988) apresentou as equações exponenciais (A2.4) e (A2.5) que apenas descreve a porção ascendente da curva da taxa de desenvolvimento, desde o zero de desenvolvimento até à região linear (Fig. 3.1 b). A equação (A2.5) tem a vantagem de permitir o cálculo do zero de desenvolvimento.

Polinómios de graus diversos foram usados para descrever a taxa de desenvolvimento em função da temperatura (Harcourt & Yee 1982, Tingle & Copland 1988). O uso de polinómios permite um elevado grau de ajustamento do modelo aos dados, mas o aumento do grau do polinómio não transmite maior realidade biológica do fenómeno em estudo.

Davidson (1942, 1944) utilizou a equação logística (A2.7) para descrever as taxas de desenvolvimento em função da temperatura, mas não é descritiva em uma ou ambas extremidades da curva ajustada (Wagner et al. 1984).

Pradahan (1945, 1946) utilizou uma equação similar à distribuição normal (A2.8) para descrever a taxa de desenvolvimento em função da temperatura, mas tem a desvantagem de ser simétrica à volta da temperatura para taxa máxima de desenvolvimento (Howe 1967). Taylor (1982) também apresentou um modelo semelhante (A2.9), mas com a possibilidade de simplificar a análise de interações entre taxa de desenvolvimento e temperatura, escalonando o eixo da temperatura pelo parâmetro T_σ e posicionar a curva próximo de zero, posicionando T_M à volta deste valor. A transformação matemática é feita pela mudança de variável através da equação (3.8). Após a conversão a esta escala, todas as curvas de taxa de desenvolvimento parecem similares, excepto que têm diferentes alturas (Taylor 1982).

$$\frac{T - T_M}{T_\sigma} \quad (3.8)$$

Stinner et al. (1974) descreveu os efeitos da temperatura sobre as taxas de desenvolvimento com uma equação sigmóide modificada (A2.10). O resultado desta regressão produz uma curva semelhante à logística, mas com um decréscimo para temperaturas superiores à temperatura para taxa máxima de desenvolvimento. Da mesma forma que a equação de Pradahan (A2.8), este modelo é simétrico à volta do ponto de taxa máxima de desenvolvimento e como tal, também tem desvantagens para temperaturas elevadas (Logan et al. 1976).

3.2.3 Modelos empíricos com parâmetros com significado biológico

Logan et al. (1976) apresentou um modelo para descrever a taxa de desenvolvimento em função da temperatura, cujos parâmetros têm interpretação biológica. Este modelo foi mais tarde modificado por Lactin et al. (1995) (A2.11). Esta equação ajusta-se bem a toda a amplitude de temperaturas para o desenvolvimento de insectos. Tem também a vantagem de permitir o cálculo do zero de desenvolvimento e de se ajustar às porções não lineares da taxa de desenvolvimento em função da temperatura (Lactin et al. 1995). A equação apresentada por Hilbert & Logan (1983) (A2.15) tem também as mesmas propriedades que a equação de Logan et al. (1976). No entanto é biologicamente irrealista, porque prevê que a taxa de desenvolvimento aumenta sem limite à medida que a temperatura baixa para valores inferiores ao zero de desenvolvimento (Lactin et al. 1995). A equação de Logan et al. (1979) (A2.13) tem um comportamento semelhante a (A2.4) e (A2.5). Esta equação permite o cálculo do zero de desenvolvimento e contém um limite de temperatura inferior,

onde o desenvolvimento é quase nulo. Nesta equação, o limite próximo de zero de desenvolvimento não é assintótico, mas sim pelo contrário, intercepta o eixo das abcissas.

Wang et al. (1982) apresentou um modelo com seis parâmetros (A2.14) que permite a estimativa do zero de desenvolvimento e que não é simétrico em ambos os lados da curva da taxa de desenvolvimento à volta do óptimo de desenvolvimento. Contudo, a curva não é assintótica na aproximação ao zero de desenvolvimento.

Briere et al (1999) conceberam dois modelos respectivamente com três e quatro coeficientes (A2.17, A2.18). Neste modelo existem coeficientes com significado ecológico. A vantagem deste modelo é permitir o cálculo das temperaturas mínimas e máximas de desenvolvimento.

3.2.4 Modelos mecanicistas

Porém, nenhum dos modelos anteriores é baseado em leis biofísicas e a extrapolação das suas linhas de regressão não pode ser justificada. Em contraste, alguns investigadores tentaram explicar as leis da termodinâmica de processos biológicos, de acordo com as leis de equilíbrio químico. Esta visão mecanicista de modelação descreve os mecanismos que conduzem o desenvolvimento e, portanto, fornecer um melhor entendimento das respostas de desenvolvimento dos insectos à temperatura. Partindo deste princípio, o resultado das regressões poderá ser estendido para além dos dados disponíveis (para fins de previsão), desde que, estas extrapolações não passem para além dos limites de temperatura especificados em teoria de modelação ou sustentáveis para a vida (Wagner et al. 1984). Com o fim de ultrapassar este problema, Sharpe & DeMichele (1977) apresentaram modelo mecanicista complexo contendo seis coeficientes (A2.12). Este modelo descreve as respostas não lineares da taxa de desenvolvimento tanto a elevadas e a baixas temperaturas, assim como a resposta linear a temperaturas intermédias (Wagner et al. 1984). Cada parâmetro por si próprio descreve uma porção da curva de taxa de desenvolvimento. Tirando ou acrescentando coeficientes à equação, o modelo poderá ser ajustado à parte inferior, intermédia ou superior da curva de taxa de desenvolvimento em função da temperatura (Wagner et al. 1984). Contudo, este modelo não permite o cálculo do zero de desenvolvimento.

O Modelo de Sharpe & DeMichele (1977) tem sido usado com frequência em entomologia e acarologia algumas vezes para utilização em simulações de dinâmica de populações de diferentes espécies. Por exemplo, Kim et al (2001) usaram este modelo para descrever taxas de desenvolvimento.

3.3 Postura e longevidade de organismos poiquilotérmicos

A informação disponível sobre modelos de postura e longevidade dependentes da temperatura é reduzida quando comparado com modelos sobre desenvolvimento. Por vezes, os autores adaptam modelos sobre desenvolvimento tanto a postura como a longevidade.

Wermelinger & Seifert (1999) utilizaram o modelo linear e a equação de Logan et al. (1976) modificada por Lactin et al. (1995) (A2.1 e A2.11 respectivamente) para modular os padrões de postura de *Ips typographus* (L.) (Coleoptera: Scolytidae) como função de temperatura constante. No caso desta espécie, a curva de postura em função da temperatura tem uma forma sigmóide, idêntica à curva de taxa de desenvolvimento (Fig. 3.1 b). Com o modelo linear, aqueles autores conseguiram

calcular o “zero de postura”. Com o segundo modelo, Wermelinger & Seifert (1999) calcularam o zero de postura, temperatura para máxima postura e temperatura máxima de postura.

Régnière (1983) descreveu a longevidade de fêmeas de *Choristoneura fumiferana* (Clem.) (Lepidoptera: Tortricidae) em função da temperatura com um polinómio de segundo grau. Neste caso, a longevidade decresce continuamente de uma forma quadrática em função de temperatura constante entre 8°C e 35°C.

3.4 Distribuição espacial de organismos e proporção de ambiente ocupado

3.4.1 Introdução

A caracterização do comportamento de uma espécie passa pela definição de padrões de ocupação do ambiente por parte dos seus indivíduos. Na realidade, a distribuição espacial é uma das propriedades ecológicas mais características de uma espécie. Ao contrário de taxas de crescimento e de reprodução que, muitas vezes, varia mais entre gerações de uma mesma espécie do que entre espécies, a distribuição espacial é uma característica que distingue espécies (Taylor 1984).

Diversas causas podem levar à organização de organismos em padrões: (1) factores vectoriais resultantes da acção de forças ambientais externas (e. g., vento, correntes de água e intensidade de luz); (2) factores reprodutivos inerentes ao modo reprodutivo de organismos (e. g., clonagem); (3) factores sociais causados por comportamentos inatos (e. g., comportamento territorial); (4) factores co-activos resultantes de interacções intra-específicas (e. g., competição) e (5) factores estocásticos resultantes de variação aleatória dos factores anteriores (Hutchinson 1953). Portanto, os processos que contribuem para padrões espaciais podem ser considerados tanto intrínsecos à espécie (e. g., reprodutivos, sociais, e co-activos) ou extrínsecos (e. g., vectoriais) (Ludwig & Reynolds 1988)

Para além da informação relacionada com a densidade de uma população, a variabilidade inerente a um conjunto de amostras pode dar informação importante sobre a distribuição espacial ou dispersão de uma espécie (Davis 1994).

A detecção de um padrão de distribuição de uma população pode ser obtido por diferentes métodos. Como exemplos refiram-se distribuições estatísticas (Ludwig & Reynolds 1988, Sharov 1996), a lei da potência de Taylor (Southwood 1978, Sharov 1996), regressão de agrupamento médio, análise geoestatística (Sharov 1996), método do quadrado-variância e métodos de distância (Ludwig & Reynolds 1988). O uso de diferentes métodos para identificar o padrão de distribuição, está relacionado com a dimensão e características da unidade de amostragem (Ludwig & Reynolds 1988, Davis 1994). Por exemplo, pode-se definir uma unidade de amostragem natural para organismos, que ocorre em segmentos discretos de habitat, como por exemplo térmitas num tronco caído ou insectos no interior de frutos. Pelo contrário, para organismos que ocorrem em habitats contínuos como por exemplo árvores numa floresta ou gramíneas numa savana, tem que se definir uma unidade de amostragem arbitrária. Neste tipo de amostragem, a dimensão da unidade de amostragem merece especial atenção. A dimensão de uma unidade de amostragem pode levar à conclusão que um organismo tem uma distribuição aleatória se a unidade de amostragem for de pequena dimensão, ou

os mesmos organismos podem ter uma distribuição agregada se a unidade de amostragem for grande (Ludwig & Reynolds 1988).

A estimativa de densidade e distribuição são factores importantes necessários para responder a questões como: como é possível estimar-se a densidade de uma população com um determinado grau de precisão? Quantas amostras são necessárias para se tomar uma decisão em protecção de plantas? Como se poderá planejar um programa de amostragem eficiente? (Davis 1994). Outra justificação importante para aplicação de métodos de estimativa de densidade e distribuição reside no facto de que tempo e custos de amostragem envolvidos na contagem de cada insecto numa população são habitualmente impraticáveis tanto em programas de investigação como em protecção contra pragas (Davis 1994). Por outras palavras, permite a optimização de programas de amostragem.

Neste Capítulo prestar-se-á apenas atenção a amostragem em segmentos discretos do ambiente. Esta decisão reside no facto de indivíduos e colónias de *P. citri* se acumularem em porções definidas do hospedeiro (e. g., Franco 1997). Para discussões pormenorizadas e métodos de análise de padrões naturais de distribuição de organismos, ver Southwood (1978), Taylor (1984), Ludwig & Reynolds (1988), Kuno (1991) e Davis (1994).

3.4.2 Descrição matemática de distribuição espacial de populações

Tradicionalmente, são reconhecidos três tipos básicos de padrões em comunidades: aleatório, agregado e uniforme (Fig. 3.2) (Ludwig & Reynolds 1988, Davis 1994, Sharov 1996).

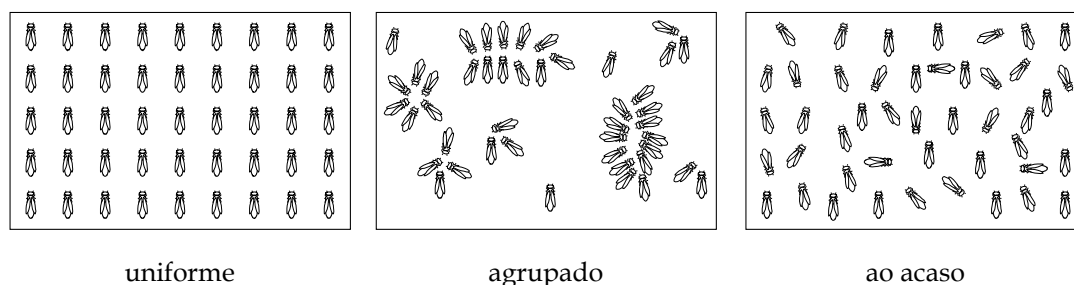


Fig. 3.2 - Padrões básicos de distribuição de populações.

Se indivíduos de uma espécie estão espacialmente distribuídos sobre unidades de amostragem discreta ou natural e se, num determinado momento se efectuar uma amostragem de indivíduos por unidade de amostragem, então, é possível resumir estes dados em termos de uma distribuição estatística (Ludwig & Reynolds 1988).

A classificação estatística do tipo de distribuição de insectos é o resultado da comparação entre os valores da média de indivíduos por unidade de amostragem (m) e variância associada (σ^2) (Ludwig & Reynolds 1988).

- | | | |
|---|------------------|----------------|
| 1 | Padrão aleatório | $\sigma^2 = m$ |
| 2 | Padrão agregado | $\sigma^2 > m$ |
| 3 | Padrão uniforme | $\sigma^2 < m$ |

O modelo mais simples para descrever o padrão de distribuição de indivíduos como a frequência de distribuição do número de indivíduos por unidade de amostragem é a distribuição de Poisson com um único parâmetro, a média m (3.9) (Kuno 1991).

$$P(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \quad (3.9)$$

$P(x)$ probabilidade de se encontrar x indivíduos em uma dada unidade de amostragem

Este modelo assume uma disposição puramente aleatória dos indivíduos por unidade de amostragem e serve como o primeiro passo para a detecção do padrão de distribuição dos dados observados em cada uma das três categorias uniforme, aleatório ou agregado (Ludwig & Reynolds 1988, Kuno 1991). A distribuição de Poisson ajusta-se ao estudo de organismos com padrões de distribuição porque a variância e média são de grandeza semelhante (Ludwig & Reynolds 1988). Apesar da definição de três categorias de distribuição, o padrão mais observado na distribuição de insectos em geral é a agregada (Kuno 1991, Davis 1994). Davis (1994) refere como exemplo de distribuição aleatória a que acontece para densidades populacionais de insectos baixas.

Se a hipótese de distribuição aleatória é rejeitada, então a hipótese para distribuição agregada deverá ser testada (Ludwig & Reynolds 1988).

Entre as possíveis distribuições estatísticas com variância maior do que a média, os ecologistas utilizam principalmente a distribuição binomial negativa (3.10) (Ludwig & Reynolds 1988, Kuno 1991) para descrever padrões agregados.

$$P(x) = \binom{k+x-1}{x} \left(\frac{m}{k+m} \right)^x \left(1 + \frac{m}{k} \right)^{-k} \quad (3.10)$$

x - número de indivíduos por unidade de amostragem

m - número médio de indivíduos por unidade de amostragem

k - Expoente não negativo característico

Esta função (3.10) descreve distribuição de populações tão bem que raramente se encontram dados de campo que apresentem diferenças significativas do modelo. Este facto, deve-se à plasticidade inerente que caracteriza a distribuição binomial negativa, isto é, os resultados serão semelhantes partindo de diferentes pontos de partida tal como heterogeneidade nas unidades de amostragem, distribuição aleatória de colónias, verdadeira agregação, etc. (Ascombe 1950).

Os padrões de distribuição uniformes na natureza são raros (Ludwig & Reynolds 1988) e portanto não serão desenvolvidos neste trabalho. Refira-se apenas que se descreverem padrões de organismos com distribuição uniforme, utiliza-se a distribuição binomial.

Para mais informações sobre o ajustamento destas distribuições a dados de campo consultar Southwood (1978) e Ludwig & Reynolds (1988).

3.4.3 Índices de dispersão, agrupamento e concentração e relação média variância

Após verificação do padrão de distribuição pelo uso de distribuições estatísticas, o conjunto de dados tem propriedades quantitativas que podem também ser descritos em termos de parâmetros com significado ecológico: índices de dispersão, índices de agrupamento, índices de concentração e índices de relação média variância (Anexo 3). O estudo destas propriedades é baseado na relação entre a média da amostra e da respectiva variância. Esta análise só é possível porque em distribuições estatísticas discretas a variância está relacionada com a média (Kuno 1991, Pielou 1977, Ludwig & Reynolds 1988).

Índices de dispersão são índices que permitem a medida do grau de agregação de comunidades de organismos. Esta terminologia é utilizada para os índices ecológicos (A3.1 a A3.3) (Ludwig & Reynolds 1988).

O índice \hat{k} da distribuição binomial negativa é também utilizado como um índice de dispersão, mas apresenta também algumas desvantagens (A3.4 a A3.6).

O conceito de “índice de agrupamento” introduzido por Lloyd (1967) representa o número médio de indivíduos por indivíduos coexistentes na mesma superfície de amostragem (Ludwig & Reynolds 1988, Kuno 1991), isto é, a concentração populacional a que cada indivíduo está sujeito (A3.8) (Kuno 1991).

Os índices de concentração, por outro lado, são um conceito estatístico que corresponde à grandeza de variação de densidade populacional entre unidades de amostragem (Patil & Stiteler 1974). Existem vários índices para medir esta grandeza (A3.9 a A3.12).

Todos os índices anteriormente referidos são simples funções da média m e da variância σ^2 . Em consequência, pode deduzir-se que, a partir de uma série adequada de amostras de populações de uma determinada espécie, o cálculo da relação média/variância para cada amostra poderá fornecer informação sintetizada do padrão de ocupação espacial da espécie (Kuno 1991). Estas equações apresentam-se nas equações A3.13 e A3.14.

Entre estas equações, a lei da potência de Taylor merece especial referência. Esta equação poderá ser escrita na forma (3.11), após a transformação logarítmica da equação (A3.13).

$$\log s^2 = \log a + b \log m \quad (3.11)$$

A lei da potência de Taylor é inteiramente empírica (Kuno 1991) e os coeficientes $\log a$ e b são determinados por regressão linear de $\log m$ em relação a $\log s^2$. O parâmetro b é um coeficiente considerado como específico para cada espécie e reflecte o modo de dispersão causado pela densidade e é inteiramente independente de outros factores como por exemplo o número de amostras, dimensão da unidade de amostragem, etc., enquanto o coeficiente a , em contraste, reflecte exclusivamente factores artificiais não ligados à espécie (Taylor 1961, Taylor 1984, Taylor 1978, Taylor et al. 1988). Contudo, o pressuposto de um parâmetro b constante para uma espécie é criticada por diversos

autores, sob vários pontos de vista (Kuno 1991, Wilson 1994). Como exemplo, Franco (1997) e Nestel et al. (1995) encontraram diferentes valores para o coeficiente b calculado para *P. citri* sobre *Citrus* spp. (1,71 e 1,61, respectivamente), após juntarem dados obtidos ao longo do ano, trabalhando aqueles autores respectivamente em Portugal e Israel. Este tipo de contradição entre aspectos teóricos e observações de campo da lei da potência de Taylor, levou Kuno (1991) a referir que é muito difícil atribuir qualquer significado ecológico aos parâmetros a e b desta equação. Portanto, aquele autor recomenda o uso da lei da potência de Taylor como um puro modelo descritivo para uma elevada amplitude de valores de m , tendo o cuidado de evitar enganos provocados por extrapolações dos índices a e b . Contudo, num estudo da capacidade dos modelos (A3.13) e (A3.14) para descrever padrões de distribuição de organismos, a lei da potência de Taylor mostrou melhor ajustamento aos dados (Taylor et al. 1978), sendo no entanto as diferenças observadas entre os modelos de Kuno e de Taylor mínimas (Kuno 1991).

3.4.4 Proporção de ambiente ocupado em função da densidade por unidade de amostragem

Um método alternativo de amostragem que traduza o número de insectos por unidade de amostragem é a amostragem binomial (presença/ausência de indivíduos), a qual poupa tempo quando os organismos são abundantes (Wilson & Room 1983). Os programas de amostragem baseados na amostragem binomial são também menos dispendiosos por amostragem e poderá ser o único método viável de amostragem no campo. A maior desvantagem da amostragem binomial é que são necessárias mais amostras para se estimar a densidade da população com um determinado nível de precisão. Para além desta desvantagem, a relação assintótica entre a densidade da população e a proporção de ambiente infestado poderá limitar a utilidade do método binomial em amostragens com densidades populacionais baixas (Davis 1994).

Com o objectivo de se efectuarem amostragens binomiais, vários autores tentaram encontrar a relação entre a proporção de plantas, ou partes de plantas, e o número médio de insectos por unidade de amostragem (Ingram & Green 1972, Sterling 1975, Wilson & Room 1983). Entre estes modelos, o modelo de Wilson & Room (1983) (3.12) acumula as características de explicar a variável dependente para uma grande amplitude de densidades e os respectivos coeficientes são os mesmos que os descritos na lei da potência de Taylor.

$$P = 1 - e^{-m \frac{\ln am^{(b-1)}}{am^{(b-1)} - 1}} \quad (3.12)$$

P - proporção de unidades de amostragem infestadas

m - densidade média de organismos por unidade de amostragem

a - parâmetro da lei de potência de Taylor

b - parâmetro da lei de potência de Taylor

Este modelo foi desenvolvido com base na relação entre o parâmetro k da distribuição da binomial negativa da proporção de unidades de amostragem não infestadas e lei da potência de

Taylor. Esta equação (3.12) é única entre as equações binomiais, na medida em que estima a proporção de unidades de amostragem infestadas como função da densidade média de organismos por amostra e respectiva variância e, apesar de ser derivada da distribuição binomial negativa, é aplicável para espécies com padrões espaciais agregados, aleatórios e uniformes (Wilson 1994).

3.5 Populações em reprodução e pululação

3.5.1 Introdução

A reprodução é uma das principais características de organismos vivos. Sem factores limitantes, os organismos reproduzir-se-iam e aumentariam a sua densidade até ao infinito (Sharov 1996). Contudo, na natureza, o crescimento de uma população está sempre limitado por alguma variável força. Muitas vezes, em ecossistemas agrícolas o crescimento de uma população ultrapassa os valores aceitáveis pelo homem num curto espaço de tempo. Em linguagem ecológica, tal crescimento é designado como pululação. Portanto, como se definirá uma pululação? Uma pululação é um crescimento explosivo na abundância de uma espécie que ocorre num espaço de tempo relativamente curto (Berryman 1987). Um estudo mais completo e abrangente de uma pululação poderá ser obtida em linguagem matemática, como se segue no Capítulo 3.5.4.

3.5.2 Crescimento exponencial

Thomas Robert Malthus (1766-1834) foi o primeiro autor a compreender que qualquer espécie poderá crescer de acordo com uma série geométrica. Por exemplo, se uma espécie não tem sobreposição de gerações e cada organismo produz R descendentes, então, o número de descendentes na geração seguinte será dado pela equação (3.13)

$$N_{t+1} = N_t R \quad (3.13)$$

Este crescimento pode também ser descrito pela equação diferencial (3.14)

$$\frac{dN}{dt} = rN \quad (3.14)$$

Sendo o número total de indivíduos na população nas gerações $t = 0, 1, 2, 3 \dots$ igual a (3.15):

$$N_t = N_0 R^t \quad (3.15)$$

Quando t é grande, então a função (3.15) aproxima-se a uma função exponencial (3.16).

$$N_t = N_0 e^{rt} \quad (3.16)$$

O parâmetro r é conhecido como o parâmetro Maltusiano, taxa intrínseca de crescimento, taxa de crescimento natural ou taxa de crescimento de uma população (Sharov 1996).

A aplicação do modelo exponencial envolve algumas simplificações, as quais são reprodução contínua (e. g., ausência de sazonalidade), todos os organismos são idênticos (e. g., ausência de estrutura etária) e ambiente com condições constantes no espaço e no tempo (e. g., Os recursos são ilimitados e sempre disponíveis). Exemplos de ambientes onde se podem encontrar estas condições são em culturas laboratoriais de microorganismos e cultura em massa de insectos. Se a população for composta por um grande número de indivíduos, o modelo fornece resultados relativamente precisos, mesmo que as condições ideais anteriormente referidas não se verifiquem. Os organismos podem diferir na sua idade, sobrevivência e mortalidade mas as suas taxas de nascimento e de mortalidade são transformadas em média.

O parâmetro r do modelo exponencial poderá ser interpretado como a diferença entre o nascimento (reprodução) e a taxa de mortalidade (3.17) (Sharov 1996).

$$N_t = N_0 e^{(b-m)t} \quad (3.17)$$

b - Taxa de nascimento (número de organismos produzidos por cada organismo da população, por unidade de tempo).

m - Taxa de mortalidade (probabilidade de morte de um organismo na população por unidade de tempo).

3.5.3 Modelo logístico

As populações não poderão crescer indefinidamente, devido pelo menos à falta de recursos alimentares. Então, um modelo que combina os processos ecológicos de reprodução e competição foi desenvolvido pelo matemático belga Pierre Verhulst (1838), o qual sugeriu que a taxa de crescimento de uma população poderá ser limitada, isto é, poderá depender da densidade populacional (3.18).

$$r = r_0 \left(1 - \frac{N}{K} \right) \quad (3.18)$$

r - taxa intrínseca instantânea de crescimento

r_0 - crescimento da população na ausência de competição intra-específica, isto é, efeito líquido entre reprodução e mortalidade (excluindo mortalidade causada por factores de densidade populacional).

K - capacidade de sustentação do meio.

Este modelo ficou conhecido como o modelo logístico, descrito pela equação diferencial (3.19) (Sharov 1996).

$$\frac{dN}{dt} = rN = r_0 N \left(1 - \frac{N}{K} \right) \quad (3.19)$$

Para uma dada área, a taxa de crescimento de uma população decresce com o aumento do número de indivíduos, N , e r alcança o valor 0 quando $N = K$. O parâmetro K é o limite superior de crescimento da população. Este parâmetro K é interpretado como a quantidade de recursos que

suporta o número K de organismos para uma determinada área. Se o número de indivíduos ultrapassa K , então a taxa de crescimento da população torna-se negativa e o número de indivíduos declina. A dinâmica de crescimento da população poderá ser descrita pela equação diferencial (3.19) (Sharov 1996). A qual tem a seguinte solução (3.20)

$$N_t = \frac{N_0 K}{N_0 + (K - N_0)e^{(-Kr_0 t)}} \quad (3.20)$$

E a fórmula análoga discreta (3.21)

$$N_{t+1} = N_t e^{r_0 \left(1 - \frac{N_t}{K}\right)} \quad (3.21)$$

O modelo logístico tem dois pontos de equilíbrio, $N = 0$ e $N = K$. O primeiro ponto de equilíbrio é instável porque qualquer desvio deste equilíbrio leva ao crescimento da população. O segundo ponto de equilíbrio é teoricamente estável porque após uma pequena perturbação, a população regressa ao estado de equilíbrio. Contudo, em certas situações no campo, o parâmetro K não tem um significado concreto para populações cuja dinâmica é determinada pelo balanço entre reprodução e mortalidade, tal como na maioria de espécies de insectos. Neste caso, a população de equilíbrio não corresponde necessariamente à quantidade de recursos, e portanto, o termo “capacidade de sustentação” torna-se confuso. Por exemplo, a população em equilíbrio poderá depender da mortalidade causada por inimigos naturais (Sharov 1996).

3.5.4 Pululação de populações

Desenvolvendo-se a equação (3.18), obtém-se (3.22)

$$r = r_0 - \frac{r_0}{K} N \quad (3.22)$$

Se r_0 for representado por a_0 e $-\frac{r_0}{K}$ representado por a_1 , obtém-se a equação (3.23)

$$r = a_0 + a_1 N \quad (3.23)$$

De acordo com Berryman (1987), a_0 tem o mesmo significado que r_0 e a_1 representa a acção negativa entre organismos, acção esta dependente da densidade. Uma representação gráfica de (3.23) mostra as posições de a_0 (ou r_0), a_1 e K Fig. (3.3).

Pela Fig. 3.3 pode verificar-se que

$$K = -\frac{a_0}{a_1} \quad (3.24)$$

Sempre que o valor de N é perturbado, mais tarde regressará à posição de equilíbrio K . Portanto, se o crescimento da população obedece ao modelo logístico, só há possibilidade de mudança de K se o valor K aumentar, consequência do aumento de a_0 ou redução de a_1 (Fig. 3.3). Como estes dois parâmetros podem ser afectados por factores ambientais ou genéticos, K poderá aumentar se:

- 1) o ambiente torna-se mais favorável para reprodução e/ou sobrevivência de uma espécie;
- 2) um aumento na frequência de genes para taxas de reprodução elevadas, redução na utilização de recursos (competição intra-específica mais baixa), melhor defesa ou fuga aos inimigos naturais, maior resistência a condições físicas mais agrestes, etc.

As espécies com este tipo de população tomam o nome de “populações gradiente”, definidas como não sendo auto-prepétuadas, sendo inteiramente dependentes de factores ambientais ou externos. Estas populações aparecem e desaparecem à medida que as variáveis força mudam no espaço e no tempo, não se espalham autonomamente dos seus pontos de origem e há pouca evidência de acções mutualistas a alta densidades (Berryman 1987).

Em trabalhos separados, Browning (1994) e Franco (1997) referem que *P. citri* segue este padrão de população.

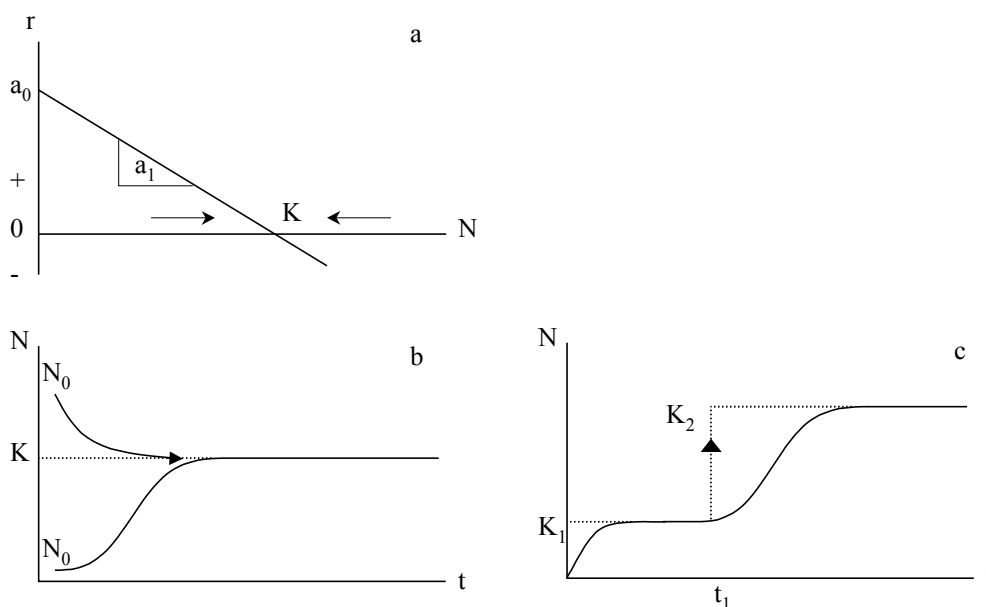


Fig. 3.3 - (a) Na equação logística a taxa de crescimento específico de uma população, r , declina linearmente com o aumento da densidade da população N , produzindo apenas um ponto de equilíbrio K ; (b) As populações crescem ou decrescem em direcção do ponto de equilíbrio K ; (c) uma população ocorre se K cresce subitamente de K_1 para K_2 no tempo t_1 (Berryman 1987).

3.6 Dispersão de organismos

Os primeiros estudos de populações concentraram-se na respectiva dinâmica local, sem considerar os movimentos de organismos. No entanto, os processos espaciais são muito importantes para a vida de muitas espécies. Estes movimentos podem modificar o comportamento do sistema em tal forma, que os modelos locais são incapazes de prever a alteração das populações (Sharov 1996).

Alguns estudos ecológicos não podem ser efectuados sem a análise de dispersão de organismos, como por exemplo, invasão de espécies recentemente introduzidas, epidemias, etc. (Sharov 1996).

Um dos primeiros modelos que descreve o movimento de organismos foi o de Skellam (1951). Este modelo é designado como um modelo de difusão porque foi desenvolvido com base no movimento aleatório de partículas (Sharov 1996, Holmes et al. 1994). Os modelos de difusão têm a vantagem de se poderem aplicar a qualquer distribuição inicial de organismos. O modelo de difusão mais simples é o modelo de com uma única dimensão no espaço (3.25):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (3.25)$$

N - densidade da população

D - coeficiente de difusão

t - tempo

x - dimensão única de espaço

Esta equação indica que a taxa de alteração na população ao longo do tempo é proporcional à densidade dessa população num espaço contínuo, aumentando onde a densidade é baixa e decrescendo onde a densidade é elevada. (Sharov 1996). Pela equação (3.25) também é possível prever a distância percorrida por um indivíduo a partir de um ponto inicial. Após um estudo matemático da equação (3.25), os resultados mostram que o organismo médio demora muito tempo para percorrer grandes distâncias por difusão. Outra previsão é que existe uma probabilidade finita mínima que um indivíduo percorra uma distância longa num curto espaço de tempo (Holmes et al. 1994).

Skellam (1951) combinou uma equação de difusão a duas dimensões no espaço com crescimento exponencial local de populações (3.26) para descrever invasões de organismos recém introduzidos.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + rN \quad (3.26)$$

Este modelo pressupõe que todos os indivíduos se dispersam e reproduzem simultaneamente e que não existe diferenças entre as capacidades de dispersão dos indivíduos.

A solução para este modelo prevê que se a população fosse largada num único ponto, então, a sua distribuição seria do tipo uma distribuição normal a duas dimensões (3.27) (Sharov 1996) e que a área ocupada pelo novo invasor iria crescer linearmente com o tempo (Holmes et al. 1994).

$$N(x, y, t) = \frac{N(0,0,0)}{4\pi Dt} e^{\left(rt - \frac{x^2 + y^2}{4Dt} \right)} \quad (3.27)$$

Uma das características mais interessantes deste modelo é que prevê a expansão assintótica da frente da população. A taxa de expansão, V , é definida como a distância entre locais com a mesma densidade populacional em dois períodos de tempo considerados.

O modelo de Skellam fornece a equação seguinte para a taxa de difusão da população (3.28):

$$V = \sqrt{4rD} \quad (3.28)$$

Em que ambos os coeficientes r e D (coeficiente de difusão), poderão ser estimados em experiências independentes. O coeficiente r representa a taxa intrínseca de crescimento da população e D poderá ser estimado por experiências usando a técnica de marcação, largada e recaptura de organismos. O coeficiente de difusão poderá ser estimado de acordo com a fórmula (3.29) (Skellam 1973).

$$D = \frac{2M_t^2}{\pi t} \quad (3.29)$$

M_t - deslocamento de organismos recapturados t unidades de tempo após a sua largada

Contudo, nalguns casos, durante a dispersão, os organismos não obedecem a um crescimento exponencial, mas sim, a um crescimento logístico. Este tipo de modelos produz ondas de invasores que se dispersam com uma velocidade constante (Holmes 1994). Neste, caso o modelo escreve-se (3.30):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + rN \left(1 - \frac{N}{k} \right) \quad (3.30)$$

Este modelo também produz ondas de invasores que se aproxima da taxa de expansão de populações, tal como apresentado em (3.26) (Holmes et al. 1994). Este facto facilita a análise de movimentos de populações sujeitas a crescimento logístico através dos modelos descritos.

3.7 Parasitismo entre insectos

3.7.1 Introdução

Predação e parasitismo são exemplo de interações ecológicas antagónicas em que uma espécie toma vantagem sobre outra espécie. Os predadores utilizam a respectiva presa apenas como fonte de alimento, enquanto os parasitas utilizam o seu hospedeiro como alimento e habitat (Amaro & Baggiolini 1982, Sharov 1996). No caso de parasitismo entre insectos, se a espécie parasita tem vida livre no estado de adulto, é designada parasitóide (Amaro & Baggioloni 1982, Sharov 1996). Geralmente, a larva parasitóide mata o seu hospedeiro (Sharov 1996). Também, parasitóides e hospedeiros, têm frequentemente ciclos de vida sincronizados e os modelos poderão utilizar saltos

discretos no tempo que correspondem às gerações (Sharov 1996) Estes três aspectos da biologia de parasitoides condiciona o tipo de construção matemática dos modelos e das suas hipóteses básicas.

3.7.2 Modelos gerais

Alguns modelos foram desenvolvidos como descritivos e interpretativos da relação de parasitismo entre parasitóide e hospedeiro. Para revisões gerais ver Hassel et al. (1977), May & Hassel (1988). A primeira abordagem de modelos hospedeiro/parasitóide é feito por um modelo geral (equações (3.31) a (3.35)), e a partir de cada modelo podem-se construir diversas equações, cada uma adoptada a condições específicas. Portanto, a lista de equações que descreve a relação entre hospedeiro/parasitóide é longa e exaustiva e a apresentação de cada uma ultrapassa o âmbito deste trabalho.

O modelo mais simples é representado pela fórmula (3.31):

$$\begin{aligned} H_{t+1} &= rH_t f(H_t, P_t) \\ P_{t+1} &= cH_t [1 - f(H_t, P_t)] \end{aligned} \quad (3.31)$$

Em que r representa a taxa intrínseca de crescimento da população, $f(H_t, P_t)$ representa a proporção de população hospedeira (H_t) não parasitada pelos P_t parasitoides na geração t e c representa o número médio de parasitoides que emergem de um único hospedeiro. Pode-se verificar que cada modelo é representado por duas equações, uma para o número de hospedeiros e outra para o número de parasitoides. Sob este tipo geral de modelo vários autores desenvolveram equações da relação hospedeiro/parasitóide muito utilizadas em ecologia, nomeadamente Thompson (1924), Nicholson & Bailey (1935) e Rogers (1972) (ver Capítulo 3.7.3).

Contudo, este modelo não toma em linha de conta auto limitação da população de hospedeiros na ausência de parasitismo e portanto, outros modelos gerais foram propostos como por exemplo (3.32).

$$\begin{aligned} H_{t+1} &= H_t g(H_t) f(H_t, P_t) \\ P_{t+1} &= cH_t [1 - f(H_t, P_t)] \end{aligned} \quad (3.32)$$

Neste modelo, r é substituído por uma função auto limitadora da densidade $g(H_t)$. Caso as populações do hospedeiro sejam afectadas por auto-limitação, os parasitoides afectaram $H_t g(H_t)$ hospedeiros. (3.33).

$$\begin{aligned} H_{t+1} &= r[H_t g(H_t)] f(H_t, P_t) \\ P_{t+1} &= c[H_t g(H_t)] [1 - f(H_t, P_t)] \end{aligned} \quad (3.33)$$

Caso a auto-limitação das populações do hospedeiro ocorra após o parasitismo, os parasitoides actuaram apenas sobre os $H_t f(H_t, P_t)$ hospedeiros não atacados (3.34):

$$\begin{aligned} H_{t+1} &= rH_t g[H_t f(H_t, P_t)] f(H_t, P_t) \\ P_{t+1} &= cH_t [1 - f(H_t, P_t)] \end{aligned} \quad (3.34)$$

Considerando um modelo geral em que a população do hospedeiro está sujeita a auto-limitação antes e após parasitismo, obtém-se o modelo (3.35):

$$\begin{aligned} H_{t+1} &= rH_t g(H_t) f(H_t, P_t) \\ P_{t+1} &= cH_t [1 - f(H_t, P_t)] \end{aligned} \quad (3.35)$$

A análise de três modelos incluídos no tipo geral (3.31) será apresentada pela sua simplicidade nas hipóteses básicas, construção e variedade de situações em que poderão ser utilizados.

3.7.3 Exemplos de modelos de parasitismo entre insectos

Modelo de Thompson (1924)

O primeiro modelo de parasitismo entre insectos foi apresentado por Thompson (1924). Este modelo assume que a fêmea parasitóide põe os ovos aleatoriamente em hospedeiros individuais e não distingue entre indivíduos saudáveis e parasitados. Neste caso, o número de ovos postos num hospedeiro deverá ter uma distribuição de Poisson (3.9). Neste caso $P(x)$ é a proporção de hospedeiros nos quais são postos x ovos de parasitóide, e m é o número médio de ovos de parasitóide por um parasitóide. Os hospedeiros sobreviventes são aqueles que recebem zero ovos de parasitóide. A proporção de hospedeiros sobreviventes é igual a $P(0)=e^{-m}$. Então, o modelo de parasitismo completo poderá ser escrito como (3.36):

$$\begin{aligned} H_{t+1} &= H_t e^{\left(-\frac{PF}{H_t}\right)} r_0 \\ P_{t+1} &= H_t \left(1 - e^{-\frac{P_t F}{H_t}}\right) q \end{aligned} \quad (3.36)$$

Onde

H - densidade de hospedeiros

P - densidade de fêmeas de parasitóides

t - momento no tempo t

F - fecundidade da fêmea parasitóide

PF - densidade de ovos postos por todas as fêmeas parasitóides por unidade de área

$\frac{PF}{H}$ - número médio de ovos por cada hospedeiro

q - proporção de fêmeas na população

r_0 - taxa intrínseca de crescimento da população

A primeira equação descreve a sobrevivência e reprodução. Na segunda equação, cada hospedeiro parasitado produz um parasitóide adulto na próxima geração. Então, o número de parasitóides é multiplicado pela proporção q de fêmeas para calcular o número potencial de organismos que porão ovos na próxima geração.

O modelo de Thompson considera que a fêmea parasitóide consegue fazer a postura de todos os seus ovos. Este pressuposto não é necessariamente correcto porque assume capacidades ilimitadas de busca dos parasitóides. Na natureza, os parasitóides frequentemente não conseguem efectuar toda a postura potencial porque as fêmeas não encontram hospedeiros suficientes. Como consequência, o modelo de Thompson poderá sobrestimar a taxas de parasitismo, especialmente se a densidade de hospedeiros é baixa.

Modelo de Nicholson & Bailey (1935)

O modelo de Nicholson & Bailey (1935) assume que a fêmea parasitóide é capaz de examinar a área a ("área de descoberta") durante o seu tempo de vida. Quando um hospedeiro é encontrado, o parasitóide deposita-lhe um ovo. Contudo, o mesmo hospedeiro poderá ser encontrado várias vezes pelo mesmo parasitóide porque se assume que este último não poderá distinguir entre hospedeiros parasitados e saudáveis.

Como em cada encontro com o hospedeiro resulta na postura de um ovo, a fecundidade total será o produto da área de descoberta pela densidade do hospedeiro, $F = aH$. Substituindo o valor F do modelo de Thompson obtém-se (3.37).

$$\begin{aligned} H_{t+1} &= H_t e^{-aP_t} r_0 \\ P_{t+1} &= H_t (1 - e^{-aP_t}) q \end{aligned} \tag{3.37}$$

No modelo Nicholson Bailey, a fecundidade potencial dos parasitóides não é limitada. A fêmea parasitóide põe um ovo em cada encontro com o hospedeiro, mesmo que o número de encontros seja grande. Então, o modelo poderá estimar as taxas de parasitismo para elevadas densidades do hospedeiro.

Modelo de Rogers (1972)

O modelo de Rogers (1972) aplica ao modelo de Holling (1959a, b) o sistema hospedeiro/parasitóide (Anexo 4), o qual foi originalmente desenvolvido para sistemas presas/predadores. O modelo de Rogers assume dois tipos de limitações nas interacções

hospedeiro/parasitóide, fecundidade limitada (como no modelo de Thompson (1924)) e busca limitada (como no modelo de Nicholson & Bailey (1935)).

O modelo de Holling (1959a, b) é usado para modelar a resposta funcional dos parasitóides. O número de hospedeiros atacados por uma fêmea parasitóide é igual a (3.38).

$$H_a = \frac{aHT}{1 + aHT_h} \quad (3.38)$$

H_a - número total de hospedeiros atacados

T - tempo total considerado

T_h - tempo de lide por hospedeiro

Nesta equação pode considerar-se $T = 1$ porque a taxa de busca é considerado pelo período de vida da fêmea parasitóide. O período de vida pode ser fixado no valor 1 porque o salto no tempo é igual a uma geração. A razão $T/T_h = F_{\max}$ é a fecundidade máxima da fêmea parasitóide. Então:

$$H_a = \frac{aHF_{\max}}{F_{\max} + aH} \quad (3.39)$$

Quando uma fêmea parasitóide ataca o hospedeiro põe n ovos. Então, a fecundidade real será $F = H_n$. Substituindo este valor de F no modelo de Thompson (1924) obtém (3.40):

$$\begin{aligned} H_{t+1} &= H_t e^{\left(-\frac{aP_t F_{\max}}{F_{\max} + aH_t} \right)} r_0 \\ P_{t+1} &= H_t \left(1 - e^{-\frac{aP_t F_{\max}}{F_{\max} + aH_t}} \right) q \end{aligned} \quad (3.40)$$

Os modelos anteriores dos sistemas hospedeiro/parasitóide são instáveis (Varley & Gradwell 1970, Sharov 1996). Por outras palavras, estes modelos geram oscilações com amplitude crescente com o tempo. Porém, na natureza as populações de parasitóides e hospedeiros nunca apresentam oscilações com aumento de amplitude infinita. Isto não quer dizer que os modelos não descrevam os mecanismos envolvidos nas relações entre hospedeiros e parasitóides, mas sim que outros factores ecológicos podem estabilizar o sistema completa ou parcialmente. Também foi demonstrado que a heterogeneidade espacial e a dispersão de parasitóides pelos agrupamentos de hospedeiros também podem estabilizar o sistema (Sharov 1996).

4 Biologia e bioecologia de *Planococcus citri* (Risso) – revisão bibliográfica e estudos matemáticos

4.1 Introdução

A elaboração de uma simulação para o estudo da evolução de populações de *P. citri* e das variações do ciclo de vida ao longo do ano requiere conhecimento aprofundado da bioecologia daquela espécie e quantificação de alguns aspectos como o desenvolvimento, o período de vida e a fecundidade em função da temperatura, o período de uma geração no campo dependente da data e respectiva duração de cada estágio; a densidade da colónia ao longo da estação, taxa intrínseca de redução da população, padrão de infestação do fruto e nível de infestação do fruto em função da densidade da colónia.

Diversos estudos foram desenvolvidos sobre a biologia de *P. citri* e respectiva dinâmica populacional (e.g., Bodenheimer 1951, Sayed et al. 1962a, Tingle 1985, Pereira 1991, Islam 1993, Klein 1994, Nestel et al. 1995, Arai 1996, Franco 1997, Pedreira 1997, Silva 2000). Nestes estudos, a temperatura e a fenologia da planta foram considerados como os principais factores que determinam a dinâmica populacional de *P. citri* (Franco 1997). Apesar de *P. citri* poder desenvolver-se em todos os órgãos de citrinos com tecidos verdes, as populações desta espécie tendem a colonizar frutos em desenvolvimento, apresentando um padrão de distribuição agregado (Nestel 1995, Franco 1997). Nos estudos que se seguem toma-se a unidade de amostragem “fruto” o conjunto formado pelo fruto e respectivo pedúnculo.

O objectivo deste Capítulo é resumir a informação sobre a fisiologia de *P. citri*, aspectos da vida e da bioecologia sob forma quantitativa. Para atingir este fim, o presente Capítulo será dividido em dois Sub-Capítulos, nomeadamente uma revisão dos conhecimentos sobre a cochonilha algodão dos citrinos e quantificação de alguns aspectos da biologia de *P. citri*, quantificação esta baseada em dados experimentais e dados bibliográficos.

4.2 *Planococcus citri* (Risso) – revisão de conhecimentos

4.2.1 Morfologia, reprodução e ciclo de vida

P. citri é uma espécie que apresenta dimorfismo sexual acentuado, característica comum em todos os Coccoidea biparentais (Ben-Dov 1994). Os machos adultos são alados e sofrem metamorfose completa durante o seu desenvolvimento. As fêmeas são neoténicas (Gullan & Cranston 1994) (Fig. 4.1), ou seja são semelhantes a indivíduos jovens.

Após a eclosão, ambos os machos e fêmeas passam por primeiro e segundo instares. Depois do segundo instar, as fêmeas desenvolvem-se passando pelo terceiro instar, sendo adultas ao quarto instar. O macho passa pelos estádios de pré-pupa, pupa e finalmente adulto. O estado de pupa ocorre no interior de um casulo, mas a pupa é móvel quando perturbada (Franco 1997, Franco et al. 2000).

A distinção dos diferentes instares de *P. citri* é importante do ponto de vista ecológico porque estão directamente relacionados com as relações tróficas que esta espécie pode estabelecer com parasitóides. Por exemplo, *Leptomastidea abnormis* (Girault) parasita principalmente primeiro e segundo instares de cochonilha, enquanto *Anagyrus pseudococci* (Girault) e *Leptomastix dactylopii* Howard parasitam preferencialmente terceiros e quartos instares (Noyes & Hayat 1994).

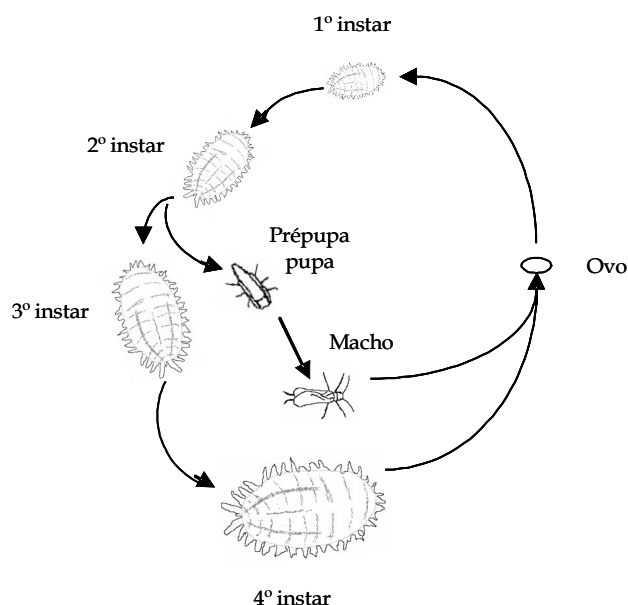


Fig. 4.1 - Ciclo de vida de *Planococcus citri* (Risso).

A proporção sexual de *P. citri*, ou relação entre o número de indivíduos de um sexo e o número total de indivíduos, depende de vários factores (Franco 1997) (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Proporção entre sexos de *Planococcus citri* (Risso).

Proporção de machos	Condições ambientais	Referência bibliográfica
0,50	--	James (1937)
0,40	Fêmeas com 28 - 52 dias	Nelson-Rees (1960)
0,84	Fêmeas com 118 dias	
Acréscimo	Verão	Bodenheimer (1951)
Decréscimo	Inverno	

Pode-se observar no Quadro 4.1 que a idade das fêmeas tem influência na proporção sexual de *P. citri*. Bodenheimer (1951) observou que o acréscimo na proporção de machos nas populações de Verão pode resultar de diversos factores que interactuam em conjunto, como o aumento de temperatura e fotoperíodo, conjuntamente com o aumento de alimento. A qualidade do alimento pode ter influência na proporção de machos (Panis 1969, Yang & Sadof 1995), tal como foi observado pelos testes de Yang & Sadof (1995) desenvolvidos em diferentes cultivares de *Coleus blumei* 'Bellevue' (Bentham).

Subsistem ainda algumas dúvidas acerca da possibilidade de reprodução partenogenética de *P. citri* (Carvalho 1988). No entanto, vários autores apontam para a reprodução de *P. citri* como sendo apenas sexual (James 1937, Bodenheimer 1951, Gray 1954, Silva 1991). Silva (1991) não observou reprodução partenogenética em fêmeas de *P. citri* criadas na ausência de machos. Esta autora sugeriu a hipótese da partenogénese observada por outros investigadores (e.g., Panis 1969) poder ter ocorrido com outras espécies e que apenas os recentes conhecimentos de sistemática permitiram a sua distinção

de *P. citri*. Em qualquer dos casos de reprodução, *P. citri* é ovípara (Panis 1969, Silva 1991, Franco 1997).

4.2.2 Padrão de ocupação espacial nos citrinos

A cochonilha *P. citri* pode ser encontrada em qualquer órgão da parte aérea das plantas de citrinos, sob a forma de ninfas, pré-pupas, pupas ou adultos, quer a alimentar-se, quer a efectuar postura ou no período de dormência (Meyerdirk et al. 1981, Franco 1997). Os órgãos de alimentação restringem-se a frutos ou raminhos jovens (Franco 1997, Mendel et al. 1999), ou seja, partes de plantas que acumulam metabolitos secundários (Mendel et al. 1999). Franco (1997) sugere que os indivíduos de *P. citri* instalam-se e alimentam-se em áreas “sink” da árvore, como os órgãos já referidos anteriormente. Contudo, nem todos esses órgãos apresentam o mesmo valor nutricional para *P. citri* (Franco 1997). Pedreira (1997) observou que a fecundidade das fêmeas é mais elevada quando crescem em frutos, comparativamente a rebentos ou folhas.

Diversos autores discutem, igualmente, a presença de cochonilhas em raízes, pelo menos durante o período de dormência (Bodenheimer 1951, Rivnay 1961, Carvalho 1988, Garrido & Ventura 1993, Klein 1994, Mendel et al. 1999). A informação disponível não é concordante neste ponto e os trabalhos mais recentes não revelaram a presença de *P. citri* em raízes (Klein 1994, Franco 1997).

O padrão de ocupação dos citrinos por *P. citri* foi estudado em toranjeira (*Citrus x paradisi* Macfadyen), no Texas e Israel (Meyerdirk et al. 1981, Nestel et al. 1995), em citrinos em Creta (Alexandrakis 1984) e em laranja-doce (*Citrus x sinensis* (L.) Osbeck), em Portugal (Franco 1997).

Meyerdirk et al. (1981) observaram que, durante o período de desenvolvimento dos frutos (desde Maio até Novembro), 97% das amostras de populações obtidas localizavam-se nos frutos. Nestes órgãos, as densidades eram significativamente mais elevadas, comparativamente com as densidades registadas em folhas ou rebentos. Os resultados de Franco (1997) mostraram que o número de cochonilhas aumenta rapidamente durante a estação de crescimento dos frutos, quando comparado com rebentos ou tronco. Todavia, em termos de número relativo, a proporção de cochonilhas apenas aumenta entre Junho e Agosto, quando comparado com rebentos ou tronco. Tanto Meyerdirk et al. (1981) como Franco (1997) não encontraram nenhuma diferença significativa nas densidades de colónias de *P. citri* em frutos colhidos em diferentes localizações da árvore.

Nstel et al. (1995) estudaram o padrão de distribuição de *P. citri* em frutos utilizando a lei da potencia de Taylor (ver Cap. 3.4.3). Estes autores concluíram que não existia qualquer diferença significativa entre o padrão de distribuição da cochonilha nos frutos nos meses de Junho, Julho, Setembro e Outubro (período de crescimento do fruto), apesar de terem sido registadas diferenças significativas de densidades de colónias de *P. citri* durante este período. Este facto permitiu agregar os resultados e apresentar um índice global de agregação, $b = 1,61$, correspondendo a distribuição agregada.

Os resultados de Franco (1997) foram diferentes dos apresentados por Nestel et al. (1995). Convém também referir que o método de amostragem de populações de *P. citri* em Franco (1997) foi efectuado sobre frutos ao nível da árvore, enquanto que Nestel et al. (1995) efectuaram a amostragem

de populações da cochonilha sobre frutos ao nível do pomar. Também Franco (1997) efectuou amostragens sobre laranjeira doce em Portugal, enquanto Nestel et al. (1995) efectuaram amostragens sobre toranjeira em Israel. No que respeita à estabilidade do coeficiente b da lei da potência de Taylor relativo a *P. citri* sobre frutos, durante a respectiva estação de crescimento dos frutos, os valores de b foram diferentes entre os meses de Junho (1,08), Agosto (1,68), e Novembro (1,83). Este autor justifica este resultado como uma consequência de que em Junho inicia-se a colonização dos frutos e, de acordo com Southwood (1978), durante o período inicial de colonização de um habitat, o padrão de distribuição de um organismo aproxima-se de uma distribuição ao acaso (o coeficiente b tende para o valor 1). Franco (1997) demonstrou igualmente que *P. citri* apresenta uma distribuição agregada nos ramos.

Alexandrakis (1984) refere que a evolução da densidade das colónias de *P. citri* apresenta-se semelhante nos diferentes quadrantes da árvore (Norte, Sul, Este, Oeste), entre Julho e Dezembro, excepto durante os meses de Setembro e Outubro. Durante este período, o autor registou densidades elevadas daquela cochonilha no quadrante Norte.

Os resultados de Meyerdirk et al. (1981) e Franco (1997) suportam, com base em estudos quantitativos, o conceito de que *P. citri* tende a acumular-se em frutos, durante o final da Primavera, Verão e Outono, tal como referido previamente por outros autores (Benassy et al. 1976, Mineo & Vigianni 1976b).

4.2.3 Ciclo biológico

P. citri é uma espécie multivoltina nas condições climáticas mediterrânicas (Franco 1997). A estimativa do número de gerações por ano em citrinos varia bastante, de acordo com o autor e região em que o estudo foi realizado. Como exemplos, é referido um mínimo de duas a três gerações por ano no Norte de Itália (Tremblay 1988) até a um máximo de sete a oito gerações em Israel (Bodheneimer 1951). Em Portugal, quer observações directas no campo quer estimativas matemáticas baseadas no método de graus-dia são concordantes e variam entre três a cinco gerações por ano (Carvalho 1988, Franco 1994 dados não publ, Franco 1997).

Apesar da apresentação de um número definido de gerações por ano para *P. citri*, as observações no campo são sempre difíceis devido à ocorrência de gerações sobrepostas (Pedigo 1996, Franco 1997). A definição de geração em *P. citri* é condicionada pelo escalonamento da postura, eclosão dos ovos e taxa de desenvolvimento de cada indivíduo. Diferenças na qualidade do alimento e a existência de áreas com diferentes microclimas no pomar podem influenciar igualmente a sobreposição de gerações (Franco 1997).

4.2.4 Dormência e migração sazonal

A adaptabilidade de *P. citri* demonstrada pela colonização dos citrinos, permite uma dinâmica de movimentos sazonais e localizações preferenciais das populações no interior da árvore, reguláveis sempre pela fenologia e condições climáticas. Estes movimentos são o resultado de períodos desfavoráveis, durante o ano, para a reprodução e/ou desenvolvimento e constituem uma

componente da dormência de *P. citri* (Franco 1997). A dormência deve ser entendida como qualquer período do ciclo de vida em que o crescimento, desenvolvimento e reprodução são suprimidos, quer por factores externos ou internos. Dormência pode ocorrer periodicamente ou ocasionalmente (Denlinger 1986).

De acordo com informações de diversos autores, *P. citri* é uma espécie cuja dormência apenas foi observada durante o Inverno (hibernação), em qualquer instar de desenvolvimento da fêmea, como descrito no Capítulo 4.2.1 (e.g., Rivnay 1961, Delrio et al. 1981, Viggiani & Battaglia 1984). Franco (1997) refere que a cochonilha algodão dos citrinos entra em hibernação em qualquer estágio de desenvolvimento como uma consequência da existência de sobreposição de gerações durante o período normal de actividade da espécie. Todavia, diferentes autores referem a predominância de um estágio específico de desenvolvimento durante o período de hibernação (e.g., Rivnay 1961, Delrio et al. 1981, Viggiani & Battaglia 1984). Observações realizadas em Portugal (Carvalho 1988, Franco 1994 dados não publ) sugerem que *P. citri* hiberna em diferentes estádios de desenvolvimento, normalmente dispersos no tronco, ramos e periferia da copa.

Na Primavera, após a hibernação, ocorre uma migração de fêmeas adultas para o tronco ou ramos, nos quais efectuam a postura (Franco 1997). Após a eclosão, as ninfas neonatas migram para a periferia da copa, instalando-se preferencialmente nos frutinhos (Bobenheimer 1951, Ortu & Delrio 1983, Smith et al. 1988, Franco 1994). Durante a Primavera, Verão e parte do Outono, em Portugal, Franco (1994) encontrou migrações contínuas de cochonilhas no tronco, com menor actividade durante o resto do ano. Michelakis & Hamid (1995), em Creta, registaram também migrações, da copa para o tronco, entre Junho e Outubro com maior intensidade no final do Verão.

4.3 Estudos matemáticos sobre *Planococcus citri* (Risso)

4.3.1 Taxa diária de incubação dos ovos, desenvolvimento do insecto e longevidade da fêmea; fecundidade da fêmea em função da temperatura

O efeito de temperatura constante no desenvolvimento de *P. citri*, longevidade e fecundidade foi estudado exaustivamente por diversos autores (ver referências bibliográficas no Quadro 4.4). Estudos homólogos sobre o efeito de temperatura variável na biologia de *P. citri* não foram encontrados. Apenas Franco (1997) e Nelson-Rees (1960) apresentaram resultados pontuais para o período de desenvolvimento de *P. citri* sob temperatura flutuante, considerando pequenas amplitudes. O conjunto de dados disponíveis sobre o desenvolvimento, longevidade e fecundidade de *P. citri* em função da temperatura, é suficiente para o ajustamento de modelos matemáticos com o propósito de simulação.

Um dos resultados importantes destes trabalhos foi a determinação de limites inferiores de temperatura para o desenvolvimento (Quadro 4.2). Estas estimativas podem ser utilizadas como valores mínimos de referência para a ocorrência de processos fisiológicos, assim como de actividade, exemplo postura, alimentação, deslocação e acasalamento.

O objectivo deste Capítulo é determinar as curvas das taxas de desenvolvimento, longevidade e postura de *P. citri* utilizando dados disponíveis na literatura. Para o efeito, seleccionaram-se os

modelos de Sharpe & DeMichele 1977 modificado por Schoolfield et al. (1981) e polinomial (Anexo 2, A2.12 e A2.6). Também se propõe uma metodologia diferente de Wagner et al. (1984), para o ajustamento do primeiro modelo.

Material e métodos

As relações ecológicas de *P. citri* com parasitóides dependem do estado de desenvolvimento e tamanho do corpo (e.g., Jong & van Alphen 1989). Além disso, o tamanho do corpo está relacionado com o instar. Por essa razão, para o propósito de modelação que inclua relações tróficas, a sequência de desenvolvimento de *P. citri* pode ser considerada como ovo, o conjunto formado pelos instares um e dois (instar 1+2), o conjunto formado pelos instares três e quatro fêmea pré-postura (instar 3+4) e, finalmente, quarto instar fêmea em postura.

Quadro 4.2 - Estimativa do zero de desenvolvimento (ZD) para *Planococcus citri* (Risso) (♀ - fêmeas).

ZD (°C)	Observação	Referência bibliográfica
8,4	postura	Bodenheimer (1951)
13,3 ♀	desenvolvimento de ninfas	Sayed et al. (1962)
12,9	da eclosão à eclosão de nova geração	Tingle (1985)
12,3		Islam (1993)
7,7 ♀	desenvolvimento de ninfas	Arai (1996)
8,0 ♀	Período de pré-postura	
4,2 ♀	da eclosão à postura	

Entre os valores apresentados no Quadro 4.2, o limite estimado por Tingle (1985) foi adoptado como o limite inferior de temperatura para a incubação de *P. citri*, desenvolvimento ninfal, envelhecimento de fêmea adulta e postura.

O modelo de Sharpe & DeMichele (1977), modificado por Schoolfield et al. (1981) foi usado para construir as curvas da taxa diária de incubação dos ovos, taxas diárias de desenvolvimento para instar 1+2 e instar 3+4 instar e taxa diária de envelhecimento de fêmeas em postura em função da temperatura. Os coeficientes foram estimados com GENSTAT 5 (Payne et al. 1994), utilizando o algoritmo modificado de Fletcher-Powell, o qual se baseia em diferenças numéricas. Para determinar os pontos de convergência do modelo (A2.12), foram necessários os valores iniciais. Esses valores iniciais foram estabelecidos tendo como referência os valores apresentados por Sharpe & DeMichele (1977) e Schoolfield et al. (1981).

Os dados originais para ajustamento ao modelo (A 2.12) foram obtidos a partir da bibliografia. Os dados considerados para *P. citri* foram os períodos de incubação, desenvolvimento e longevidade, a maioria determinados em condições de temperatura constante. Cada um destes períodos foi convertido a taxas de acordo com a seguinte expressão matemática (4.1):

$$\text{taxa de desenvolvimento (tempo}^{-1}\text{)} = \frac{1}{\text{período de desenvolvimento}} \quad (4.1)$$

Os dados disponíveis não especificam, para todas as temperaturas utilizadas, os períodos de desenvolvimento para cada instar ou o período de incubação dos ovos. Para ultrapassar esta falta de dados, foram realizadas extrapolações, considerando que cada estágio ou instar contribui com uma proporção fixa para o desenvolvimento global (Fig. 4.2).

Dentro do período total de desenvolvimento de *P. citri* desde ovo até à morte da fêmea adulta, a proporção para cada fase de desenvolvimento para ovo, instar 1+2, instar 3+4 e fêmea em postura foi estimada com base no trabalho de Arai (1996). Este autor determinou separadamente, sob diversas temperaturas, o período que cada instar necessita para completar o seu desenvolvimento, o período de incubação e a longevidade do 4º instar, incluindo os períodos de pré-postura e postura. Arai (1996) determinou, igualmente, os períodos ovo - emergência dos adultos e eclosão - postura. Agrupando os dados de diferentes temperaturas, foi possível calcular, como proporção, a contribuição média de cada estágio ou instar para o processo de desenvolvimento global.

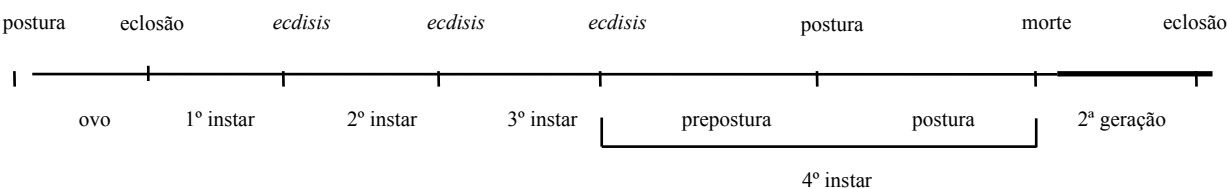


Fig. 4.2 - Representação esquemática da sequência de desenvolvimento de *Planococcus citri* (Risso).

Para facilitar o ajustamento do modelo, foram utilizados apenas alguns valores de todos os dados disponíveis (Quadro 4.4). O critério de selecção consistiu na eliminação de todos os valores com taxa de desenvolvimento inferior ao valor já considerado anteriormente (valor este de temperatura mais baixa), se a temperatura aumenta. Para valores superiores a 30°C, não foi utilizado este critério. Este procedimento justifica-se para ultrapassar a heterogeneidade dos dados e condições experimentais e, consequentemente, para permitir convergência na determinação dos coeficientes de regressão.

Retirando termos do denominador da equação (A2.12), o modelo estimado pode ser limitado às variações mais baixa, intermédia ou superior da curva da taxa de desenvolvimento (Wagner et al. 1984, ver Capítulo 3.2.3). Esta característica do modelo permite o ajustamento de uma equação com quatro parâmetros que possibilita prever a taxa de envelhecimento das fêmeas em postura. Considerou-se que a taxa de envelhecimento de fêmeas em postura, aumenta quase que exponencialmente com o acréscimo da temperatura. Deste modo, o último termo do denominador desaparece desde que se admita que não existe declínio desta taxa com a exposição a temperaturas elevadas.

Para a taxa de incubação dos ovos, desenvolvimento do 1º + 2º instares e 3º instar + 4º instar (fêmeas em pré-postura) foram determinados 6 parâmetros da equação (A2.12).

Alguns modelos apresentados no Anexo 2, cujos coeficientes têm significado biológico, podem ser usados para determinar a curva da fecundidade total das fêmeas, dependente de

temperatura constante (e.g., Wermelinger & Seifert 1999). Refira-se como exemplo o modelo apresentado em (A2.11). Todavia, a falta de uma coleção robusta de dados pode limitar o ajustamento do modelo. Assim, optou-se por modelos empíricos, especificamente o modelo polinomial (A2.6), utilizando o software Microsoft EXCEL 2003 para estimar a curva de fecundidade das fêmeas dependente de temperatura constante.

Resultados

Admite-se que o sistema proposto para determinar a proporção que cada estado de desenvolvimento ou instar contribui dentro do período total de vida de um indivíduo *P. citri* é aceitável. A justificação reside nos valores baixos de desvio padrão obtidos quando comparados com os correspondentes valores médios (Quadro 4.3). A incubação foi estimada como sendo um período curto, enquanto o período de pré-postura foi estimado como sendo um período longo. Como tal, pela Fig. 4.3 pode-se verificar que a taxa de desenvolvimento para ovos (incubação) é relativamente elevada quando comparado com a taxa homóloga para terceiros mais quartos instares em prépostura (Fig. 4.5)

Quadro 4.3 - Proporção de tempo para os instares ou estados de desenvolvimento em relação a diferentes períodos de vida de *Planococcus citri* (Risso).

Período de vida	Desenvolvimentos das ninfas		Desenvolvimentos das ninfas + pré-postura		Incubação + desenvolvimento das ninfas + pré-postura	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Instar ou estado						
Incubação					0,083	0,0124
1º+2º instares	0,603*	--	0,300*	--	0,276*	--
3º instar	0,397	0,0343	0,212	0,0171	0,193	0,0146
Pré-postura			0,488	0,0275	0,448	0,0295

* o valor médio foi calculado pela subtração entre 1 e valores complementares

Os valores do Quadro 4.4 apresentam a evolução dos períodos de desenvolvimento de *P. citri* em função do aumento da temperatura, tal como descrito no Capítulo 3.2.1. Por vezes, esta evolução oscila com grande amplitude entre pontos. Estas variações podem ser devidas a diferenças nas condições experimentais, variação intra-específica de *P. citri* relacionada com a origem geográfica e utilização de diferentes métodos de estimação dos diferentes conjuntos de pontos.

De acordo com o Quadro 4.5, a convergência foi determinada para todos os parâmetros nas quatro curvas ajustadas. Ambos os R^2 e valores F ($p < 0,05$) são elevados, dando origem a um bom ajustamento do modelo aos dados. Os valores determinados para cada parâmetro estão dentro ou próximo dos valores apresentados por Sharpe & DeMichele (1977), Schoolfield et al. (1981) e Wagner et al. (1984) para organismos poiquilotérmicos. Apenas o valor ΔH_L ($-410647 \text{ cal mol}^{-1}$) para a taxa de envelhecimento das fêmeas em postura é pequeno quando comparado com os valores apresentados por outros autores.

Como esperado, a evolução das taxas de desenvolvimento de *P. citri* de acordo com a temperatura apresentam um modelo ligeiramente sigmóide (ver Capítulo 3.2.3). De acordo com o modelo estimado, *P. citri* é uma espécie que atinge a temperatura óptima de desenvolvimento por volta de 30°C, para todos os estádios considerados (Figs. 4.3 a 4.5). Esta observação contradiz os valores referidos por Franco (1997), que sugere, baseado em dados experimentais, que a temperatura óptima para o desenvolvimento dos ovos e ninfas é inferior a 30°C.

Quadro 4.4 - Período de tempo (dias) necessário para o desenvolvimento do instar ou estágio de *Planococcus citri* (Risso), de acordo com a fonte de alimento e a temperatura.

Temperatura (°C)	Alimento	Tempo de desenvolvimento (dias)			Fecundidade (ovos)	Referências bibliográficas
		Incubação	1°+2° instar	3° instar + pré-postura		
17	--		42,3 [#]			Sayed et al. (1962a)
18	brochos batata	6,7 [#]	22,4 [#]	52,0 [#]		Islam (1993)
					304,4	Tingle (1985)
20	folhas <i>Citrus</i> limão	5,6	21,2	36,6		Arai (1996)
					19,7	Silva (em prep.)
21	brochos batata	4,3 [#]	14,5 [#]	33,6 [#]		Islam (1993)
22		3,8 [#]	12,7 [#]	29,5 [#]		Tingle (1985)
22,5	folhas <i>Citrus</i>	3,9	15,2	37,4	13,6	Arai (1996)
23	brochos batata limão		13,3 [#]			Sayed et al. (1962a)
					12,7	Silva (em prep.)
23,5			14,8 [#]			Nelson-Rees (1960)
24	brochos batata	3,5 [#]	11,6 [#]	26,9 [#]		Islam (1996)
25	folhas <i>Citrus</i>	4,0	13,7	31,3	9,8	Arai (1996)
25,1*	limão					339,0
						Franco (1997)
26	brochos batata limão	2,6 [#]		20,3 [#]		Tingle (1985)
			13,3 [#]			Pedreira (1997)
					13,5	Silva (em prep.)
27	folhas <i>Citrus</i>	3,2	12,8	28,8	11,7	Arai (1996)
27,5		4,0	12,0	27,5	5,7	
28	brochos batata		10,6 [#]			Sayed et al. (1962a)
29,6*						164,9
						Nelson-Rees (1960)
30		2,5 [#]	8,4 [#]	19,6 [#]		Islam (1993)
						83,6
						Tingle (1985)
31,1*						75,5
						Nelson-Rees (1960)
33		2,7 [#]	8,9 [#]	20,7 [#]		Islam (1993)

*valores médios da temperatura

[#] valores obtidos na bibliografia com coeficientes do Quadro 4.3

De acordo com Ratte (1985), a longevidade dos insectos reduz-se com o aumento da temperatura. A taxa de envelhecimento de fêmeas em postura parece seguir esta regra, aumentando

rapidamente com a temperatura (Fig. 4.3). Como consequência de temperaturas superiores a 35°C, e de acordo com o modelo, a vida das fêmeas em postura reduz-se consideravelmente. Por causa deste facto, a fecundidade das fêmeas tende a ser menor para valores elevados de temperatura (Fig. 4.7).

Quadro 4.5 - Determinação dos valores dos parâmetros para a equação (Anexo 2, A2.12), utilizando o algoritmo modificado de Fletcher - Powell através de GENSTAT 5, adaptado para a taxa de desenvolvimento de *Planococcus citri* (Risso) dependente da temperatura.

Desenvolvimento	Parâmetro	Valores iniciais	Valores determinados	R ²	F
Ovo	□(25°C)	--	0,3983	0,962	182,66
	$\Delta H_A^\#$	13000	23303		
	□H _L	-56000	-192086		
	$T_{1/2L}$	281	288,33		
	□H _H	55000	54946		
	$T_{1/2H}$	300	303,645		
1º+2º instar	□(25°C)	--	0,1020	0,948	128,66
	$\Delta H_A^\#$	9499	9500		
	□H _L	-32000	-76046		
	$T_{1/2L}$	280	291,14		
	□H _H	65000	64999		
	$T_{1/2H}$	300	308,58		
3º+4º instar	□(25°C)	--	0,0551	0,970	245,55
	$\Delta H_A^\#$	8000	20599		
	□H _L	-27000	-108145		
	$T_{1/2L}$	280	288,78		
	□H _H	50000	42979		
	$T_{1/2H}$	300	303,5		
Envelhecimento	□(25°C)	--	0,11133	0,981	214,72
	$\Delta H_A^\#$	8000	30293		
	□H _L	-28000	-410647		
	$T_{1/2L}$	279,5	288,04		

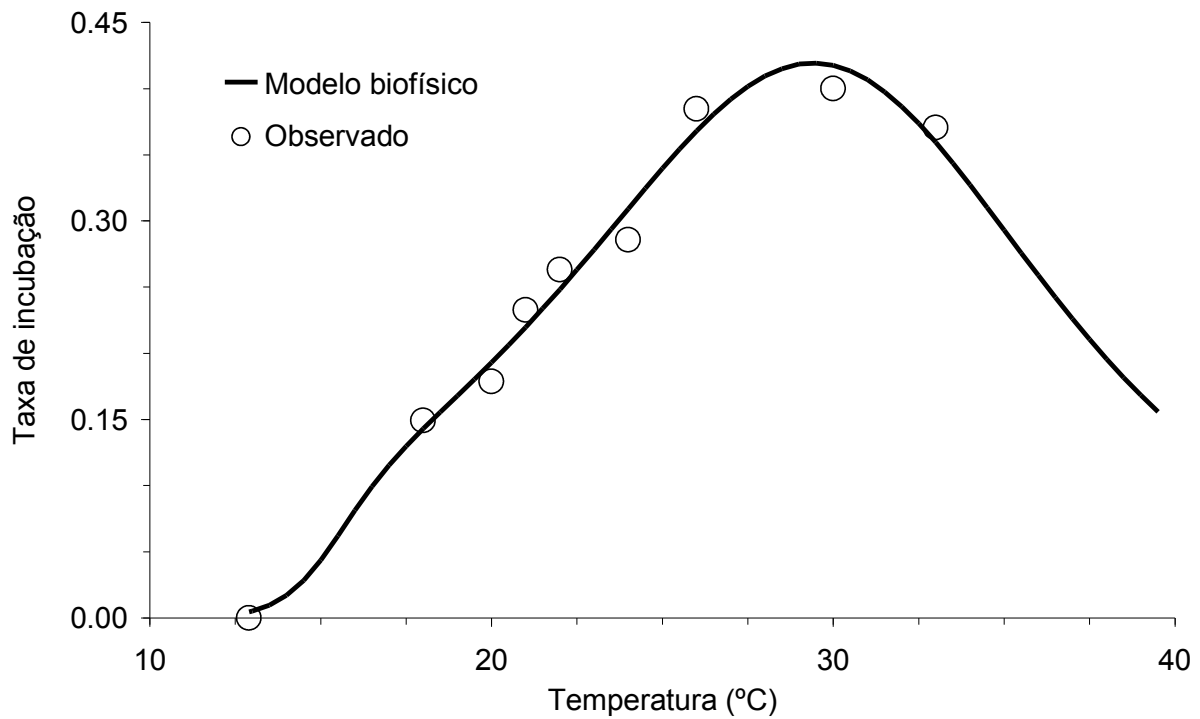


Fig. 4.3 - Evolução da taxa de desenvolvimento de ovos de *Planococcus citri* (Risso) em função da temperatura. Dados do Quadro 4.4, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 4.5.

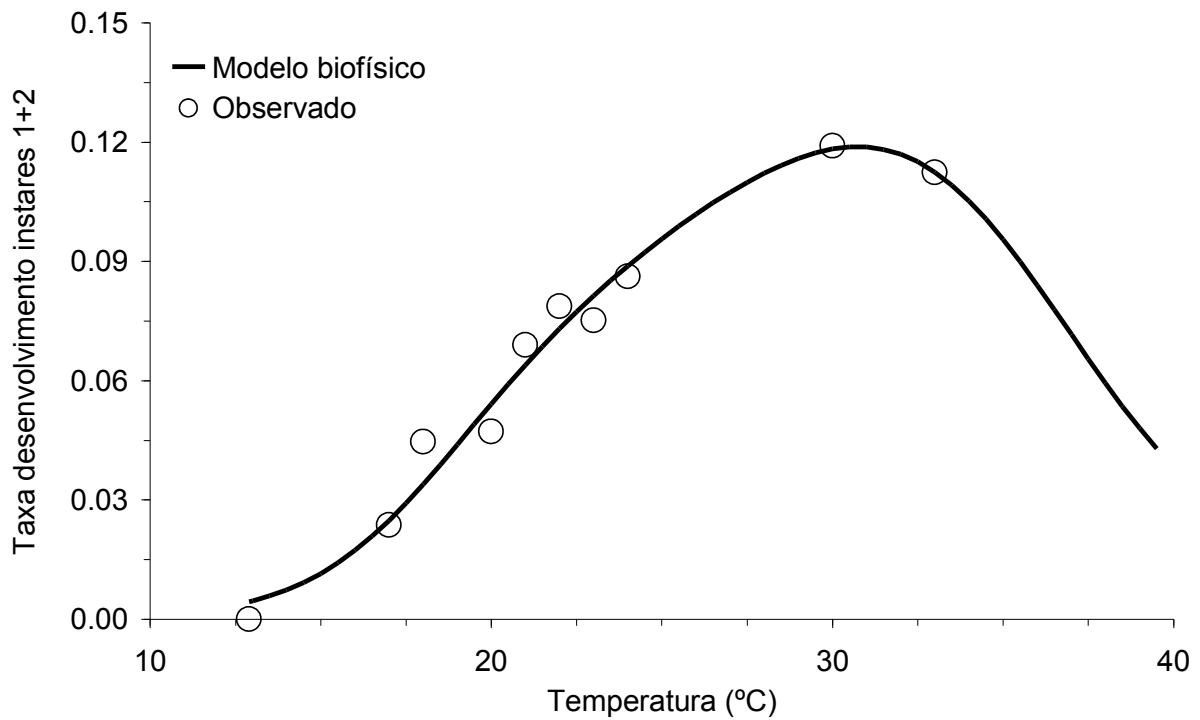


Fig. 4.4 - Evolução da taxa de desenvolvimento dos instares 1 + 2 de *Planococcus citri* (Risso) em função da temperatura. Dados do Quadro 4.4, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 4.5.

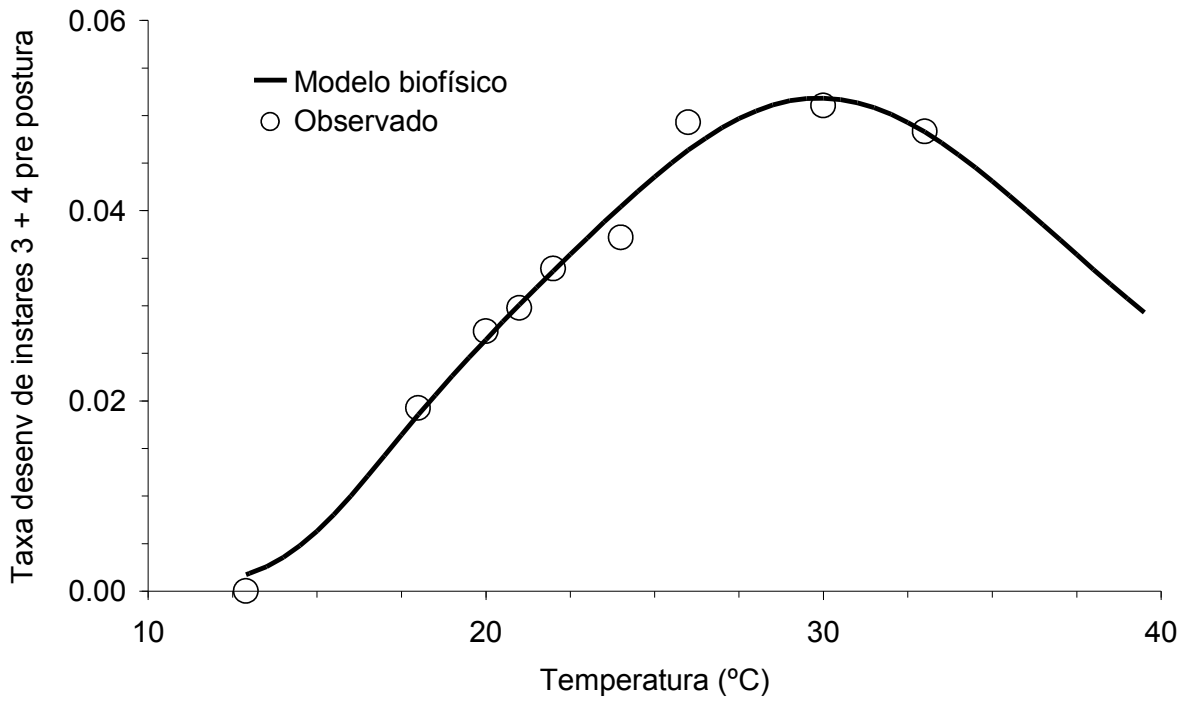


Fig. 4.5 - Evolução da taxa de desenvolvimento dos instares 3 + 4 (pré-postura) de *Planococcus citri* (Risso) em função da temperatura. Dados do Quadro 4.4, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 4.5.

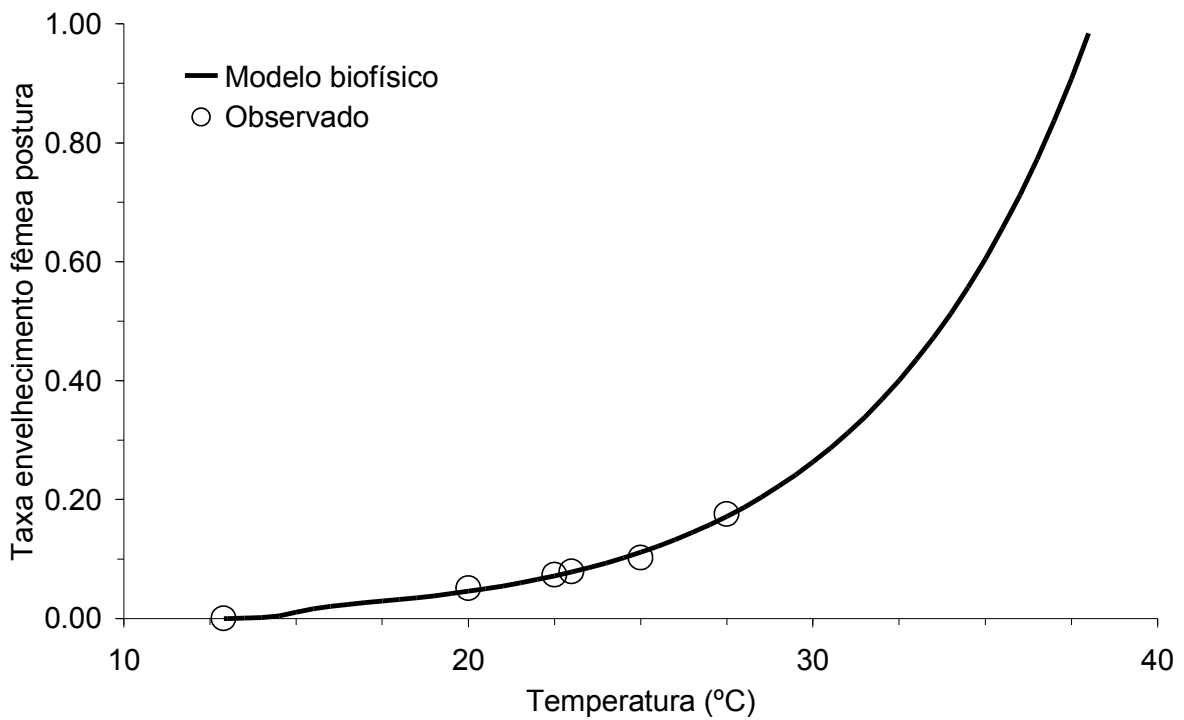


Fig. 4.6 - Evolução da taxa de envelhecimento de fêmeas em postura de *Planococcus citri* (Risso) em função da temperatura. Dados do Quadro 4.4, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 4.5.

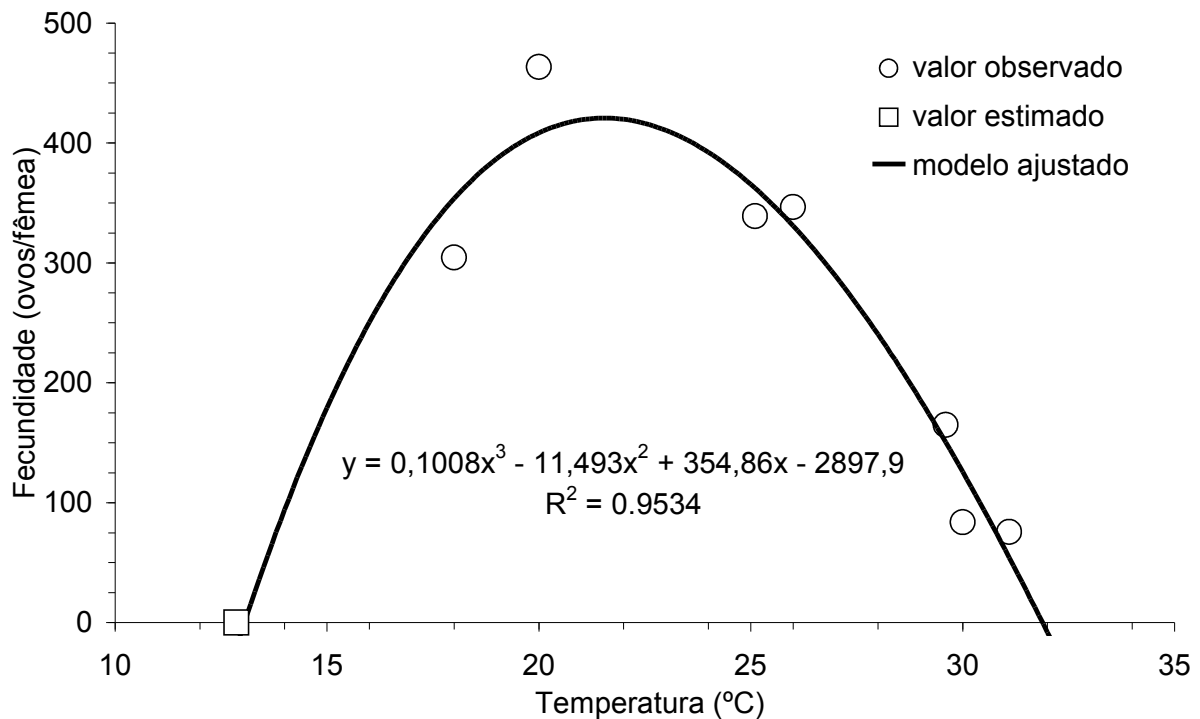


Fig. 4.7 - Modelo polinomial para a fecundidade total das fêmeas de *Planococcus citri* (Risso) dependente da temperatura constante. Dados do Quadro 4.4.

4.3.2 Período de uma geração de *Planococcus citri* (Risso) e período de desenvolvimento de cada instar no campo

A determinação da duração de um estágio de um insecto ou a duração da sucessão de estádios no seu habitat natural é fundamental para a verificação, o estudo de sensibilidade, calibragem e validação de modelos de desenvolvimento. Para simplificação da linguagem, o período de tempo que decorre desde a eclosão do ovo de *P. citri* até à eclosão da próxima geração é considerado como **período de uma geração**.

Através dos estudos desenvolvidos por diversos autores sobre migração sazonal (e.g., Michelakis & Hamid 1995, Franco 1997) e distribuição espacial de cochonilhas ao longo do ano em citrinos (Meyerdirk et al. 1981, Nestel et al. 1995, Franco 1997) é concluído que a dinâmica populacional de *P. citri* está dependente da fenologia do hospedeiro. Assim, pode admitir-se que o período de uma geração pode ser diferente, dependendo do estado fenológico da árvore e do desenvolvimento dos frutos. Com base nesta ideia, os objectivos deste Capítulo foram para condições de campo encontrar diferenças entre os períodos de gerações, dependendo da data de inoculação da planta hospedeira, fornecer informação sobre o período de uma geração de *P. citri* e determinar o período de desenvolvimento de cada instar.

Material e métodos

Período de uma geração no campo. Este estudo foi desenvolvido com base nos dados obtidos por Silva (1994, 2000) e Silva & Carvalho (dados não publ.). Foram estabelecidas infestações artificiais com *P. citri*, entre 1992 e 1996, em pomares de citrinos, localizados nas regiões Centro e Sul de Portugal

(Quinta da Bela Salema, Faro; Quinta da Várzea, Setúbal). Realizaram-se nove ensaios em dois pomares. Seleccionaram-se e isolaram-se em gaiolas rebentos de laranjeira-doce (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck), localizados no quadrante Sul da copa, que apresentassem um fruto apical e número semelhante de folhas. As gaiolas eram compostas por uma estrutura cilíndrica de arame (0,6 m de comprimento, 0,2 m de diâmetro), cobertas com um saco de tecido nylon com fecho de 0,3 m para permitir observações da colónia de *P. citri*. Antes de se realizar a infestação artificial com fêmeas fecundadas de *P. citri*, foram realizadas observações cuidadosas nos rebentos para evitar contaminação com indivíduos nativos de *P. citri*, outros insectos ou ácaros. Estabeleceram-se um a cinco níveis de infestação nos frutos com, duas, quatro, oito e 16 fêmeas fecundadas de *P. citri*. As populações de *P. citri* no interior das gaiolas foram observadas, semanalmente ou quinzenalmente, com uma lupa de bolso. O dispositivo experimental foi completamente casualizado no pomar com 10 a 11 repetições por cada nível de infestação. Foi realizado teste *t* após a análise de modelo linear generalizado com variáveis qualitativas, para comparar a velocidade de desenvolvimento de acordo com os níveis iniciais de infestação, para cada uma das experiências. Para cada ano, foram testadas diferenças entre períodos de geração para pomares diferentes. Para o mesmo pomar, foram testadas diferenças entre períodos de geração para datas diferentes de infestação. As hipóteses testadas foram as seguintes:

H_0 : Não existem diferenças entre períodos de geração dependentes do nível de infestação inicial, data de infestação ou pomar;

H_1 : Existem diferenças entre períodos de geração dependentes do nível de infestação inicial, data de infestação ou pomar, pelo menos entre dois ensaios.

Período de desenvolvimento de cada instar no campo. Em um dos ensaios realizados por Silva (1994, 2000), os dados de quatro níveis de infestação inicial foram agrupados para determinar a sequência e períodos de desenvolvimento de instares no campo. Uma vez que a infestação artificial inicial foi realizada com fêmeas a iniciar a postura e não com indivíduos após a sua eclosão, assumiu-se que a 20 de Julho todos os primeiros instares tinham emergido. Até ao último dia de observação deste ensaio, a 4 de Setembro, nem todas as fêmeas entraram em postura.

Resultados

Os resultados não permitiram o registo de diferenças significativas na velocidade de desenvolvimento entre colónias com diferentes níveis de densidade populacional. Assim, pode aceitar-se que, em condições experimentais, a taxa de desenvolvimento de *P. citri* não depende da densidade da colónia. Este resultado permite agrupar repetições dos diferentes níveis de infestação para análises futuras e testes estatísticos.

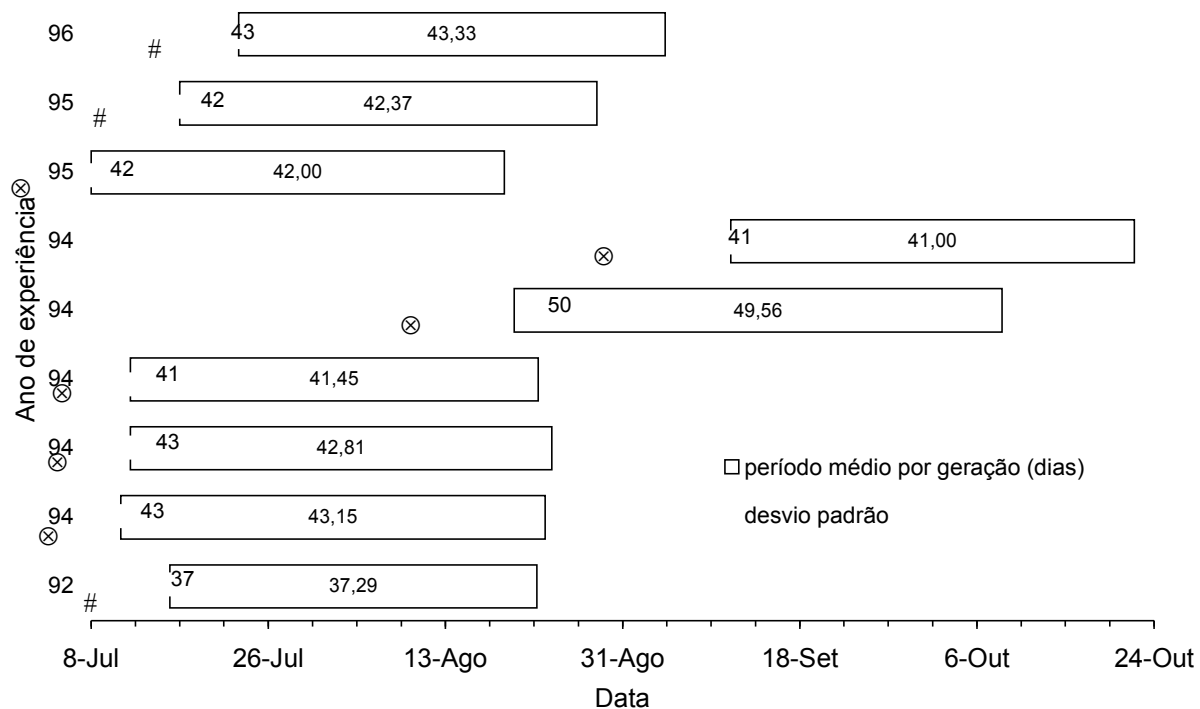


Fig. 4.8 - Duração (dias) de um geração de *Planococcus citri* (Risso) no campo em citrinos, de acordo com a data de infestação e pomar (# Qta Várzea, ⊗ Qta Bela Salema) (Os dados utilizados foram obtidos em Silva (1994, 2000)).

De acordo com a Fig. 4.8, os valores mais frequentes para o período de uma geração variam entre 41 e 44 dias. Foram observadas duas exceções com 37 dias e 49 dias. Os valores observados nestas exceções podem estar relacionados com o tempo entre observações. Provavelmente um período de uma a duas semanas entre observações pode ser longo demais durante o qual, se pode perder pormenores importantes de transformação do estado de maturação dos indivíduos em cada colónia. Os resultados não permitem detectar diferenças entre os diversos períodos de uma geração, independentemente da data de infestação ou local da experiência. Assim, aceita-se o valor médio de 42,5 dias para o período de uma geração de *P. citri* em laranja-doce como referência para os meses Julho a Outubro na região Centro/Sul de Portugal.

De acordo com a Fig. 4.9, se excluírem as fêmeas em postura, pode observar-se que à medida que o desenvolvimento avança, o tempo de cada estágio decresce. Este fenómeno pode dever-se à combinação de dois factores. O primeiro é o longo escalonamento na postura das fêmeas e no desenvolvimento dos indivíduos. O segundo é a redução do número de indivíduos da colónia devido quer a migração quer a morte. Por consequência, observam-se longos períodos com indivíduos jovens e períodos curtos com indivíduos mais velhos. Este resultado, apesar de parecer contraditório com as observações apresentadas em 4.3.1, em que instares 1 + 2 instares de *P. citri* apresentavam período de desenvolvimento mais curto que instares 3 + 4 está relacionado com os métodos experimentais usados. Em laboratório sob temperatura constante, as observações recaem sobre indivíduos, enquanto que no campo, recaem sobre colónias com centenas de indivíduos com sobreposição de gerações, causadas por posturas desfasadas e escalonamento no desenvolvimento. A migração e mortalidade ao longo do tempo parecem compensar os efeitos do escalonamento inicial de postura e de desenvolvimento.

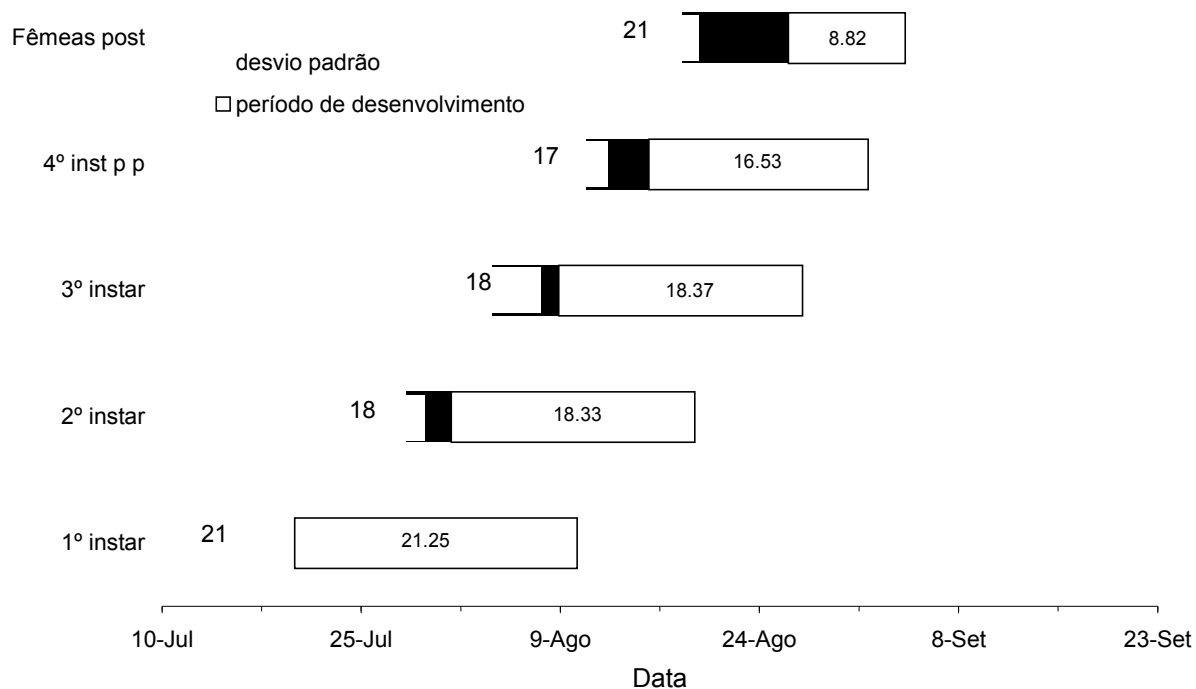


Fig. 4.9 - Períodos de desenvolvimento dos estádios de *Planococcus citri* (Risso) sobre laranjeira doce, para o ano 1996, na Quinta da Várzea, Setúbal (Portugal).

4.3.3 Densidade de colónias de *Planococcus citri* sobre os frutos, ao longo da estação

Conforme foi afirmado previamente, a fenologia das plantas constitui um factor chave na dinâmica cochonilha algodão e na direcção das migrações sazonais (Capítulo 4.2). Deste modo, podemos considerar que a quantidade potencial de cochonilhas existente num fruto no campo estará directamente relacionado com as condições físicas e fisiológicas deste último, tais como: o tamanho do fruto, a sua taxa de crescimento, a sua força de “sink” e a presença de compostos secundários na seiva. Dado que estes factores variam ao longo do tempo, então a capacidade do fruto para alimentar a colónia de cochonilha algodão deveria também mudar durante a época de crescimento, de forma a ser possível determinar algum tipo de relação. Sendo assim, o objectivo deste sub-Capítulo é estabelecer as tendências da população de cochonilha algodão presente nos frutos desde o vingamento até à colheita.

Material e métodos

De forma a comparar o nível de infestação da cochonilha algodão observado em cada fruto foi necessário reduzi-lo a uma mesma unidade. O princípio subjacente à metodologia desta uniformização, considera que a quantidade de alimento e espaço necessário a um indivíduo é proporcional ao seu tamanho e o tamanho é proporcional ao estágio de desenvolvimento. Baseado no trabalho de Gray (1954) e nos conceitos referidos por Pedigo et al. (1986), Franco (1997) apresentou a noção de “coeficiente de equivalência” entre cochonilhas em fases diferentes de desenvolvimento. Sabendo que a determinação da quantidade de alimento necessário ao crescimento de cada indivíduo

é muito difícil, Franco (1997) usou os valores de Gray (1954) para o aumento do peso médio de cada instar e calculou o coeficiente de equivalência, por instar, de acordo com a fórmula (4.2).

$$\text{coeficiente de equivalência} = \frac{\text{Aumento de peso no instar } i}{\text{Aumento de peso do 4º instar}} \quad (4.2)$$

Com $1 \leq i \leq 4$

Com base no conceito de coeficiente de equivalência apresentado por Franco (1997) e no conceito de estrago equivalente apresentado por Pedigo et al. (1986), é proposto o conceito de “insecto equivalente”. O princípio subjacente a este conceito considera que a capacidade de sustentação do meio pode ser expressa simultaneamente em função do número de indivíduos e respectiva estrutura etária (4.3).

$$\text{insecto equivalente} = \sum_{i=1}^n c_i \times x_i \quad (4.3)$$

c_i – coeficiente de equivalência do instar i

x_i – número de indivíduos no instar i

n – instar final do insecto onde a competição por alimento e espaço pode ocorrer

Quadro 4.6 – Coeficientes de equivalencia para *Planococcus citri* (Risso), determinados por Franco (1997) a partir dos dados apresentados por Gray (1954)

Instar/estádio	Aumento de peso (µg)	Fracção do aumento de peso por instar	Coeficiente de equivalencia
1	17,1	0,0043	0,0046
2	48,4	0,0121	0,0129
3	180,0	0,0451	0,0481
Adulto	3750,0	0,9385	1,0000
Total	3995,5	1,0000	

Por uma questão de especificidade de nomenclatura neste Capítulo, o termo “insecto equivalente” será designado como “cochonilha equivalente”.

Desta forma foi, delineado para as regiões Centro e Sul de Portugal Continental (Figs. 4.10 a 4.15) um programa de amostragem de populações de *P. citri* sobre frutos de *C. sinensis* ao longo do ano. A determinação da densidade da colónia de cochonilha algodão teve o seu início com a colheita ao acaso de frutos infestados. A população presente em cada fruto foi examinada através de microscópio estereoscópico, tendo sido contado o número de indivíduos de acordo com o seu instar de desenvolvimento (1º,2º,3º instares, fêmeas prepostura 4º instar e fêmeas postura 4º instar). Durante 4 anos (1994 - 1997) foram efectuadas no total 45 colheitas em nove pomares diferentes em Portugal. O número de frutos amostrados por pomar e data variaram entre sete e 39. Este estudo foi desenvolvido tendo como base as informações de Silva (2000) e Silva & Carvalho (dados não public.).

O número de cochonilha equivalente por colónia (por fruto) foi determinado usando coeficientes de equivalência propostos por Franco (1997), de acordo com a fórmula (4.3) e apresentado nas Figs. 4.10 a 4.12. Nas mesmas Figs. apresenta-se para comparação a composição original da colónia dividido em instar 1 + 2 e instar 3 + 4. Não se incluíram as fêmeas em postura porque não se considerou que estes indivíduos se alimentam e portanto não contribuem para a competição pelo alimento com cochonilhas da mesma espécie.

Para Israel, foram amostrados para os anos de 1993 e 1994 10 frutos por pomar e por data, tendo sido contados todos os indivíduos presentes por fruto, sem se fazer distinção entre instares. As variedades cujos frutos foram observados são de toranjeira (*C. x paradisi*) e 'Sweetie' (*Citrus grandis* Osbeck x *C. x paradisi*). Os resultados são apresentados nas Figs. 4.15 a 4.19. Os dados de Israel foram gentilmente cedidos pelo Professor Zvi Mendel, tendo sido parte publicados em Mendel et al. (1999).

Resultados

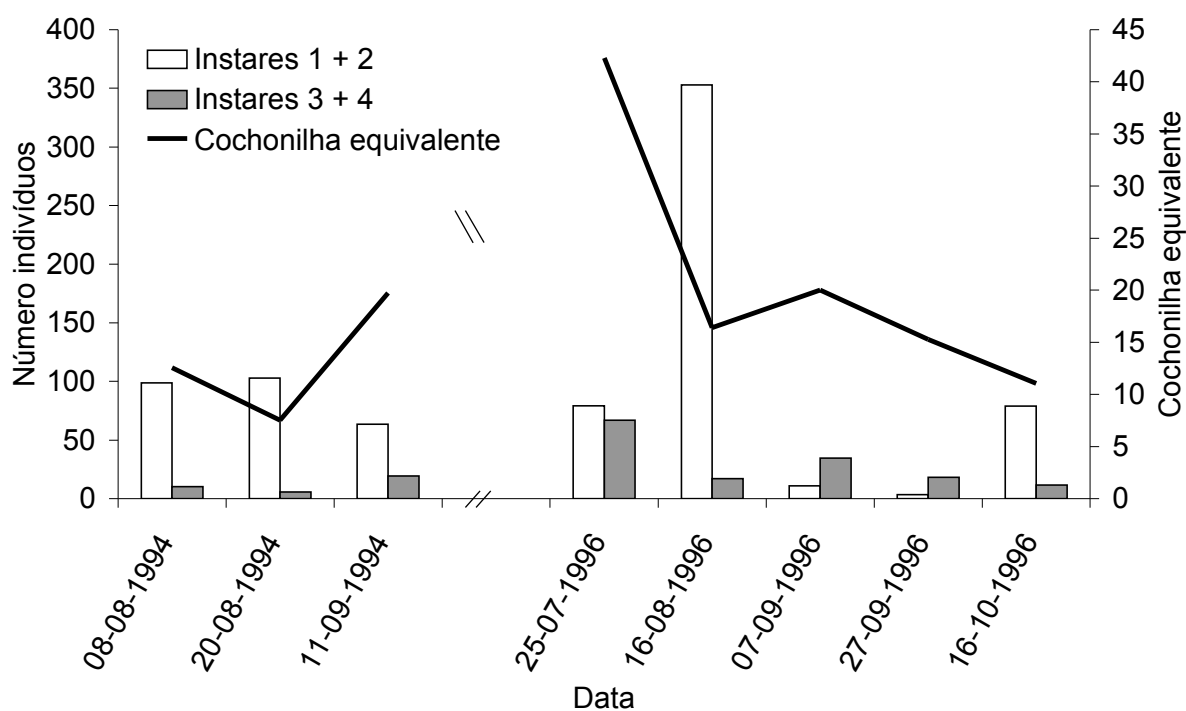


Fig. 4.10 - Evolução para os anos 1994 e 1996 da população de *Planococcus citri* (Risso) no pomar da Bela Salema (Faro) em número de indivíduos por instares e por cochonilha equivalente.

Para o ano de 1996, nos pomares onde as observações começaram em Junho - Julho, pode ser vista uma tendência para uma diminuição no número de cochonilha equivalente entre Julho e Agosto para os pomares Estreitinha (Santiago do Cacém), Quinta do Neto (Faro) e Estação Experimental de Tavira (Figs. 4.12, 4.13 e 4.14). Para valores inferiores a cinco cochonilhas equivalente este fenómeno não foi verificado, como no Barrocal (Messines) e na Pereirinha (Moncarapacho) (Fig. 4.15). As populações de *P. citri* nestes dois locais foram sempre muito baixas e rapidamente desapareceram do pomar. Nos pomares Patação e Qta. Bela Salema (Faro), depois da diminuição do número de indivíduos no período Julho - Agosto, os níveis da população aumentaram no mês de Setembro, para

os anos considerados (Figs. 4.10 e 4.14). Em Pêro Moniz, os resultados não fornecem informação relevante sobre a evolução de populações de *P. citri* porque foram feitas apenas duas observações em Setembro e Outubro (Fig. 4.15). No Cacém apenas se fez uma observação em Setembro. Apresentaram-se estes dois últimos locais como contribuição de números médios de cochonilha equivalente. O maior nível médio de cochonilha equivalente observado foi no pomar do Patacão (Fig. 4.11) em 27 de Setembro de 1996 com 44.8 indivíduos por fruto. O fruto que continha o nível mais alto de infestação foi observado no pomar da Bela Salema (em 1996) com um valor de 161,8 cochonilha equivalente. A infestação média dos frutos foi de 8,565 cochonilha equivalente num total de 701 observações.

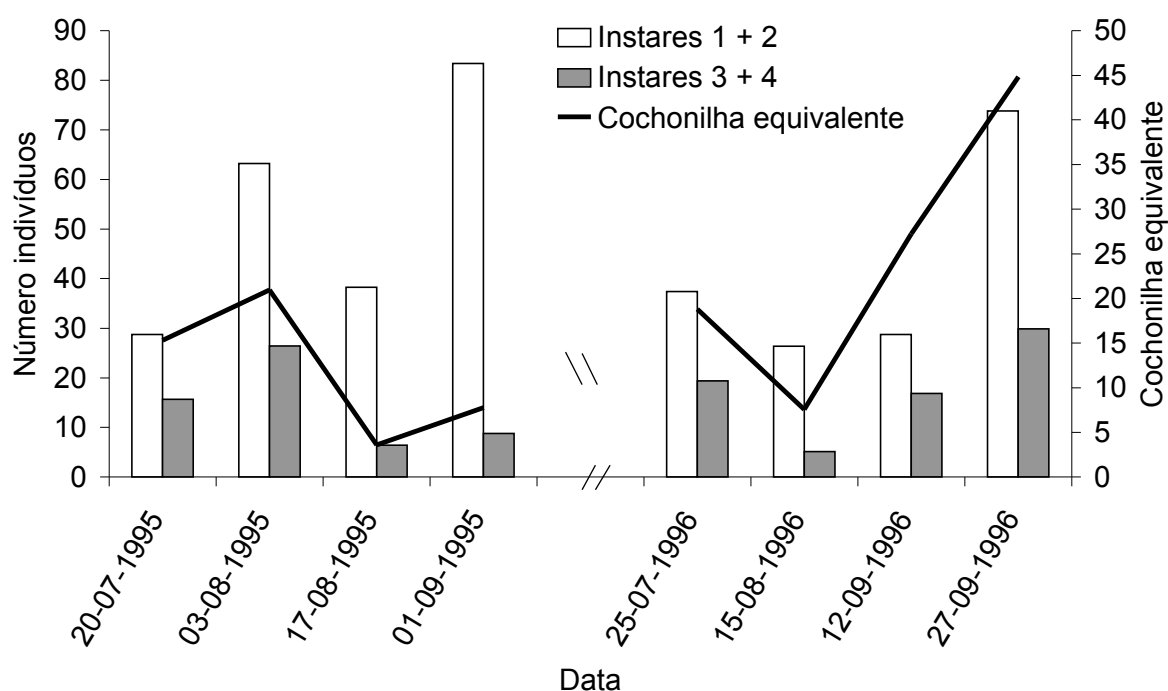


Fig. 4.11 - Evolução para os anos 1995 e 1996 da população de *Planococcus citri* (Risso) no pomar do Patacão (Faro) em número de indivíduos por instares e por cochonilha equivalente.

Para comparação com a evolução das populações de *P. citri* em Portugal, apresentam-se as Figs. 4.16 a 4.19 com a evolução de populações desta espécie em alguns locais em Israel. A falta de dados para a composição por instares da população não permitiu o cálculo da cochonilha equivalente. No entanto, ainda é possível verificar-se que a população de *P. citri* aumenta de uma forma geral até Julho, decrescendo de seguida em Agosto. Nalguns locais, as populações de *P. citri* tornam a aumentar de Agosto para Setembro. Tal comportamento das populações de *P. citri* em Israel é semelhante ao comportamento observado em Portugal.

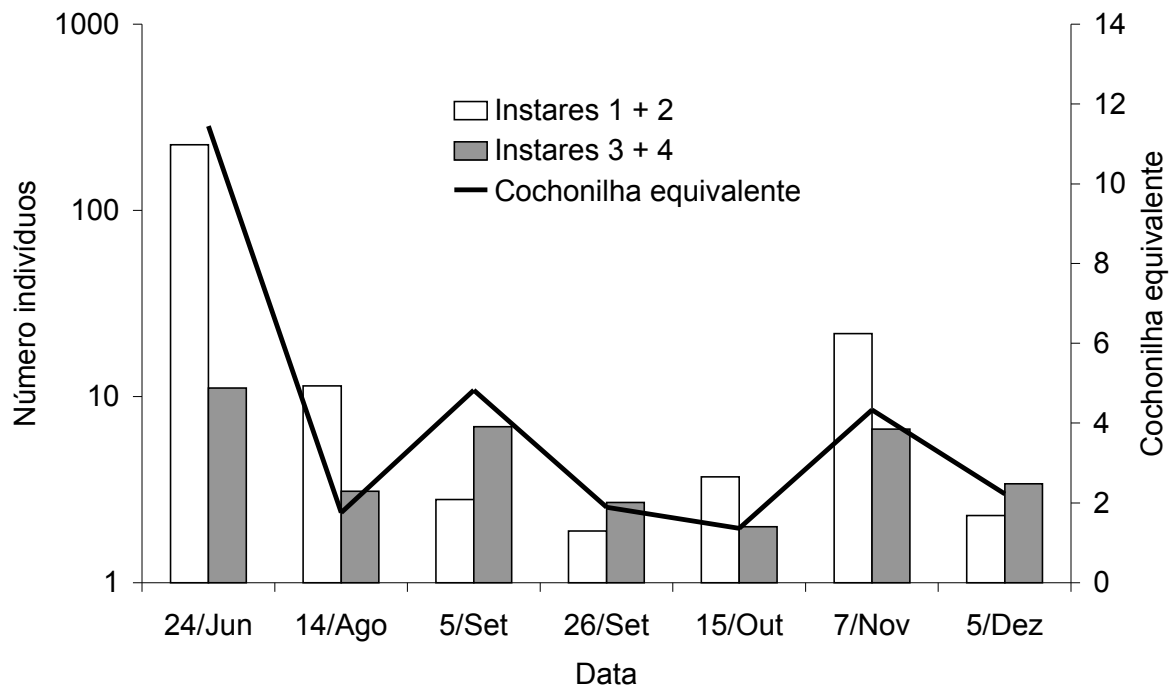


Fig. 4.12 - Evolução para o ano 1996 da população de *Planococcus citri* (Risso) no pomar da Estreitinha (Santiago do Cacém) em número de indivíduos por instares e por cochonilha equivalente. Escala logarítmica para o eixo y1. Valores corrigidos para (instares 1 + 2) + 1

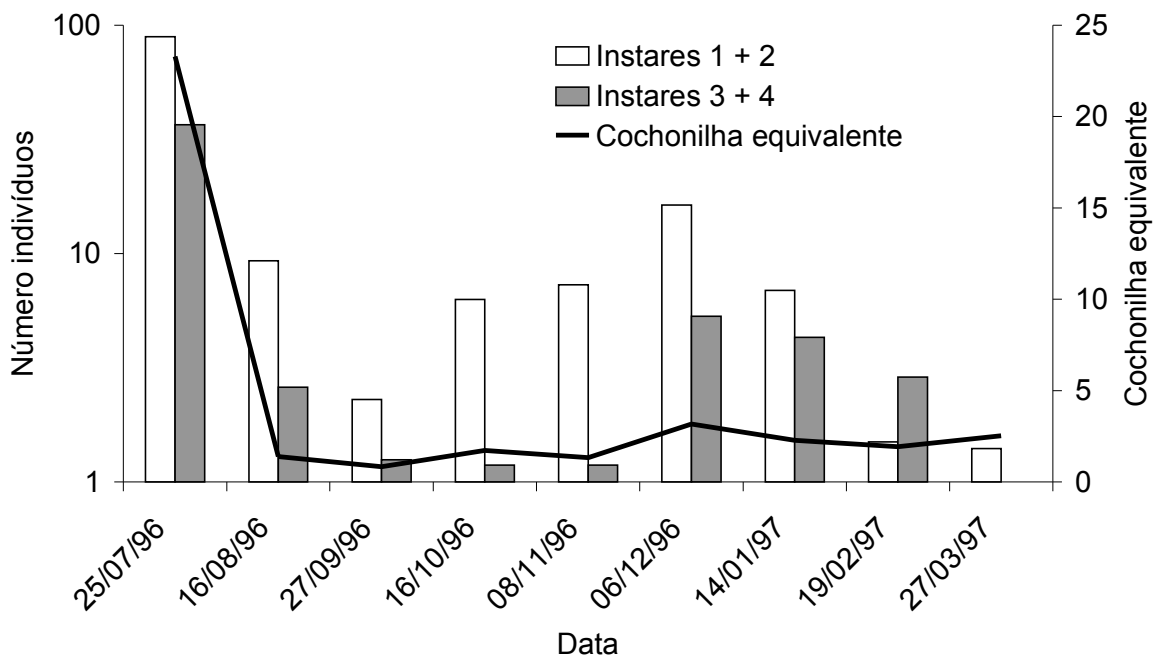


Fig. 4.13 - Evolução para o ano 1996 da população de *Planococcus citri* (Risso) no pomar da Quinta do Neto (Faro) em número de indivíduos por instar e por cochonilha equivalente. Escala logarítmica para o eixo y1. Valores corrigidos para (instares 1 + 2) + 1.

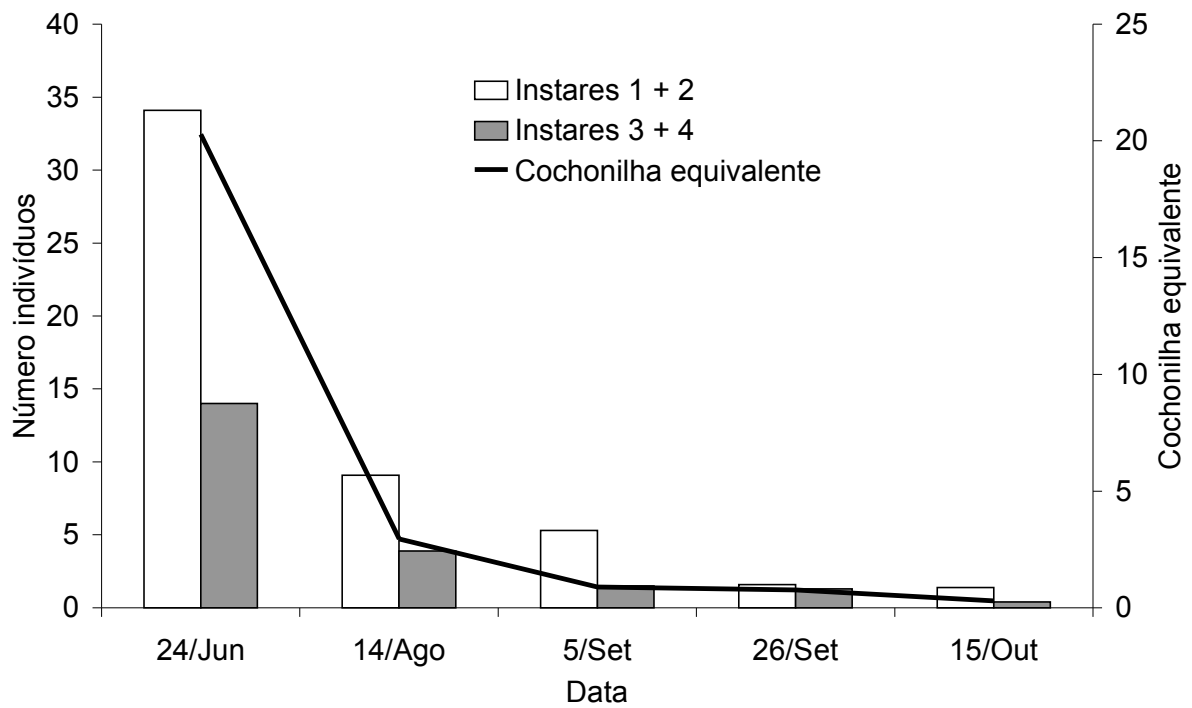


Fig. 4.14 - Evolução para o ano 1996 da população de *Planococcus citri* (Risso) na Estação Experimental de Tavira (Tavira) em número de indivíduos por instar e por cochonilha equivalente.

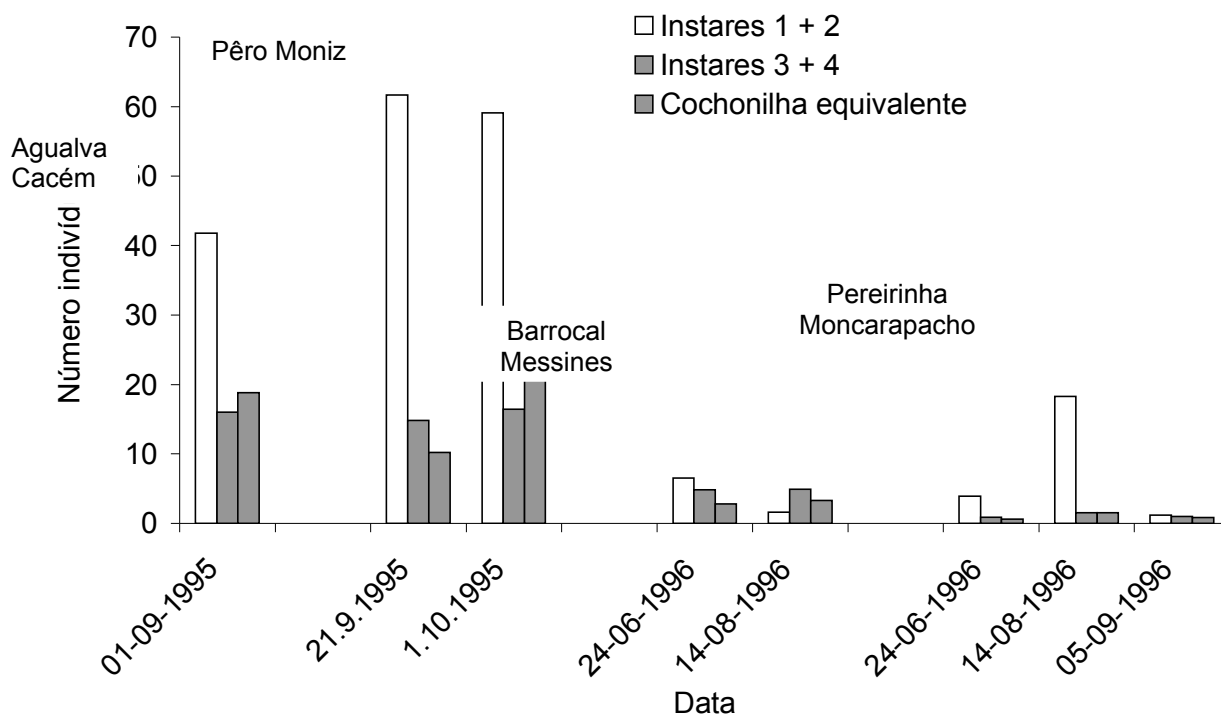


Fig. 4.15 - Evolução da população de *Planococcus citri* (Risso) para os anos 1995 e 1996, para os locais acima assinalados, em número de indivíduos por instares e por cochonilha equivalente.

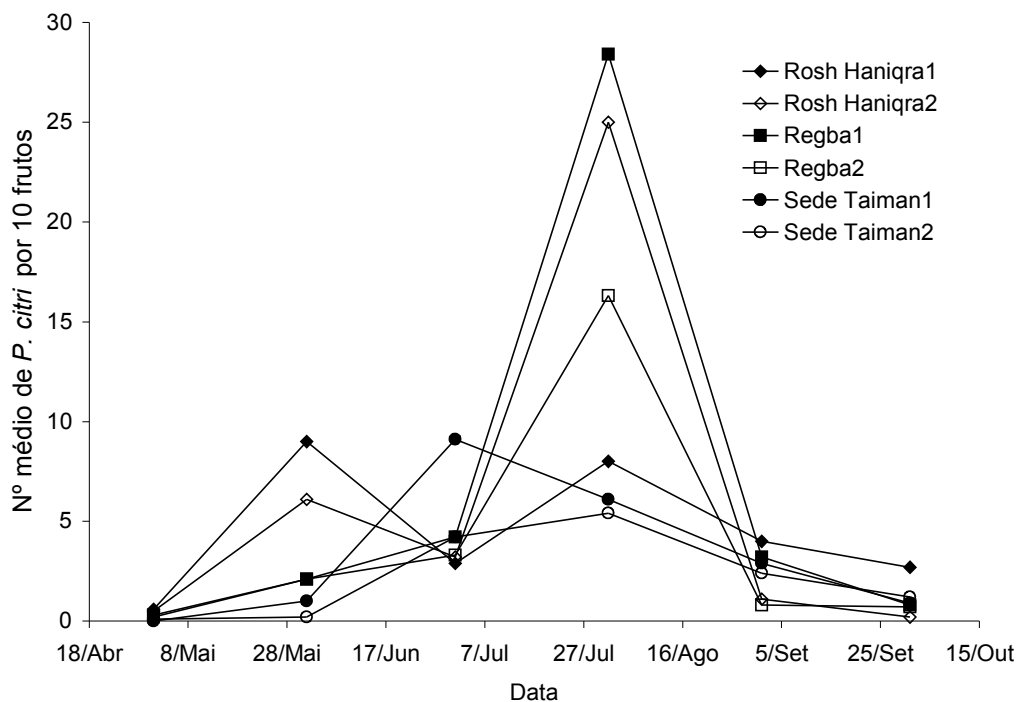


Fig. 4.16 - Evolução do número médio de *Planococcus citri* (Risso) por amostras de 10 frutos em pomares de citrinos em Israel na região da Galileia Ocidental no ano de 1993.

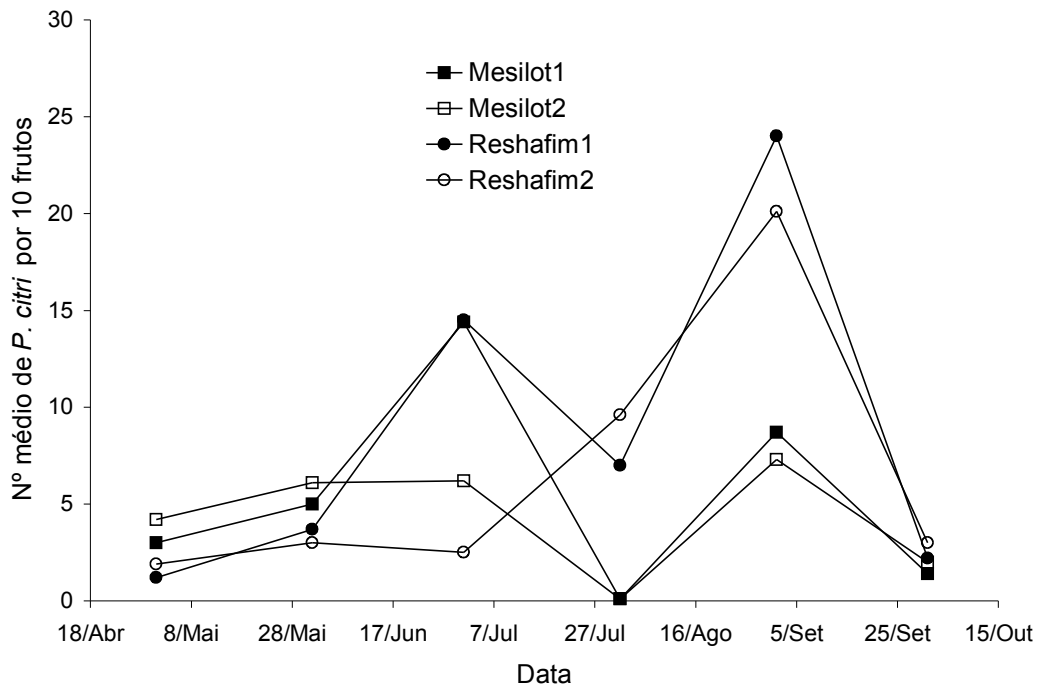


Fig 4.17 - Evolução do número médio de *Planococcus citri* (Risso) por amostras de 10 frutos em pomares de citrinos em Israel na região do Vale do Jordão no ano de 1993.

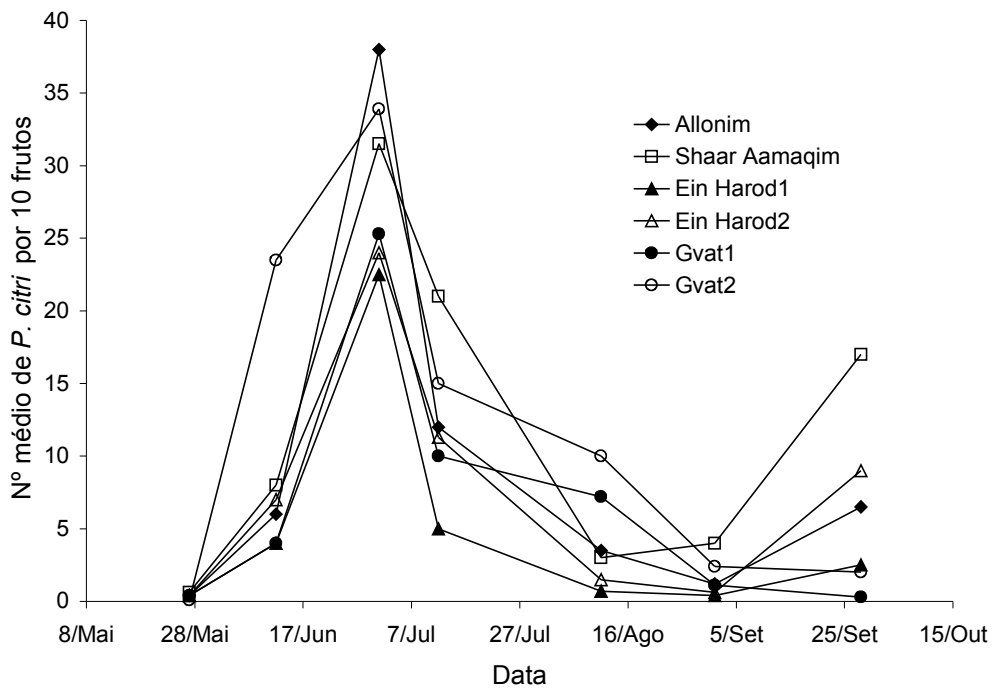


Fig. 4.18 - Evolução do número médio de *Planococcus citri* (Risso) por amostras de 10 frutos em pomares de citrinos em Israel na região do Vale Izrael no ano de 1993.

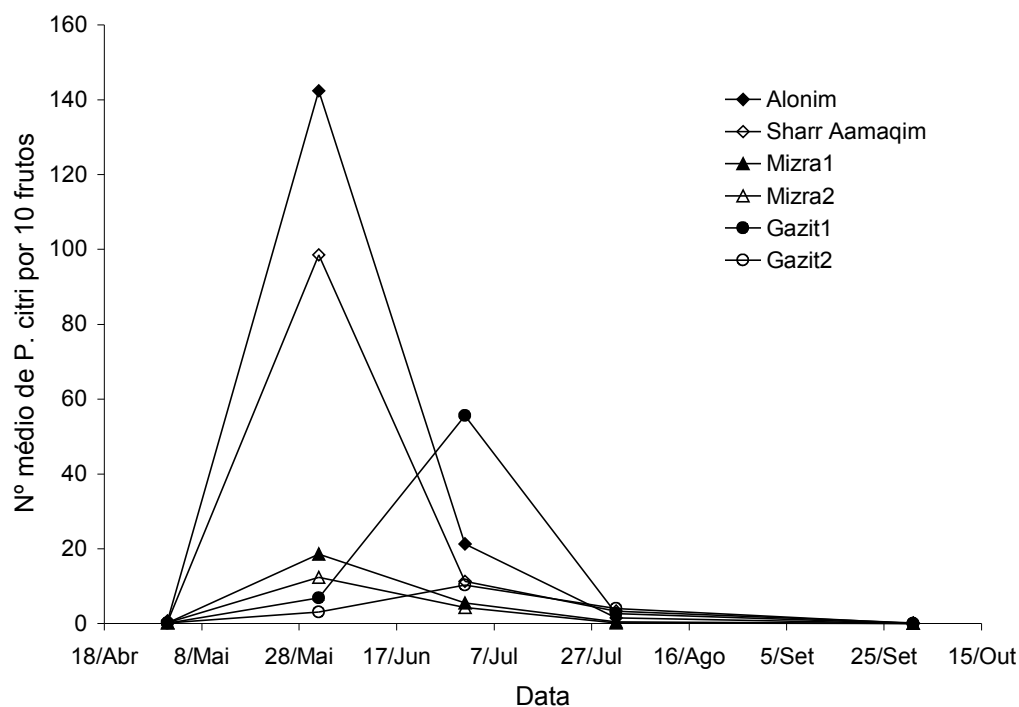


Fig. 4.19 - Evolução do número médio de *Planococcus citri* (Risso) por amostras de 10 frutos em pomares de citrinos em Israel na região do Vale Izrael no ano de 1994.

De uma forma geral, a evolução do número de *P. citri* por fruto em Israel (Figs. 4.16 a 4.19) é semelhante ao número homólogo observado em Portugal (Figs. 4.10 a 4.15). Na maior parte dos locais existe um máximo de indivíduos por fruto no período Junho - Julho, seguido por um decréscimo (Figs 4.17 a 4.19). Contudo noutros locais o máximo de população ocorre no mês de Agosto (Fig 4.16) ou existe um segundo máximo no mês de Setembro (Fig 4.17 e 4.18). Quando comparado com os resultados para Portugal (Figs 4.10 a 4.15), e de uma forma geral, o número de indivíduos por fruto é menos elevado.

4.3.4 Taxa de redução instantânea relativa do número de indivíduos numa população de *Planococcus citri* (Risso)

Observações de campo e de laboratório de colónias de cochonilha algodão isoladas e não perturbadas durante uma geração mostraram uma contínua redução da densidade da população instalada. As causas desta redução podem estar relacionadas com mortalidade, migração de machos para puparem e migração de fêmeas para postura. Em colónias isoladas, acima de uma determinada densidade populacional, pode-se admitir que competição mais intensa entre indivíduos pode causar mortalidade mais elevada. Neste caso, prevê-se que as colónias de maior densidade populacional terão uma taxa de redução instantânea relativa dos seus indivíduos mais alta. Os objectivos deste Capítulo são, em primeiro lugar, verificar se existem diferenças estatísticas significativas na taxa de redução instantânea relativa da população de cochonilha algodão em colónias de diversas densidades, com ausência de imigração. Em segundo lugar, pretende-se interpretar matematicamente o comportamento observado na redução da densidade populacional dentro de uma colónia de *P. citri*.

Material e métodos

Foi definido um delineamento experimental semelhante ao descrito em 4.3.2 durante o período de Junho – Setembro de 1996. Foram estabelecidos quatro níveis de infestação (2, 4, 8 e 16 fêmeas em início de postura) com onze repetições cada. A população dentro de cada manga foi contada, distinguindo 1º, 2º, 3º instar e fêmeas adultas, uma vez por semana ou uma vez em duas semanas. Os machos adultos e pupas não foram considerados. Dado que o número inicial de ovos postos por cada fêmea cochonilha algodão não foi contado, adoptou-se o valor para a fecundidade de cochonilha algodão de 288 ovos apresentado por Tingle (1985) para estimativa da população inicial de *P. citri* para cada colónia. Foram testadas as seguintes hipóteses:

H₀: Não existem diferenças nas taxas de redução instantânea relativa da população de cochonilha algodão, dependendo do nível de infestação inicial;

H₁: Pelo menos entre duas modalidades, existem diferenças nas taxas de redução instantânea relativa da população cochonilha algodão, dependendo do nível inicial de infestação.

A comparação da evolução do número total de indivíduos por repetição foi feita por regressão não linear qualitativa, distinguindo os níveis iniciais de infestação.

Resultados

O modelo exponencial (4.4) ajustou-se à redução do número total de cochonilha algodão alojadas no conjunto fruto/ramo para todas as modalidades ($R^2 = 0,996$; $F = 7408,67$, g.l. = 8, 237). Ainda mais, a análise estatística mostrou um melhor ajustamento quando a taxa de redução instantânea relativa da população de cochonilha algodão instalada foi estabelecida como sendo a mesma para os diferentes níveis de infestação (Fig. 4.20).

$$N_t = N_f + N_i e^{-dt} \quad (4.4)$$

N_t - número total de cochonilha algodão no momento da observação t

N_f - número total de cochonilha algodão no fim da geração

N_i - número total de cochonilha algodão em $t = 0$ (neste estudo a população em $t = 0$ resulta de $N_i + N_f$)

e - número Nepper

d - taxa de redução instantânea relativa da população de cochonilha algodão instalada. É expressa em número de indivíduos que deixa o sistema por fêmea durante um período infinitesimal de tempo.

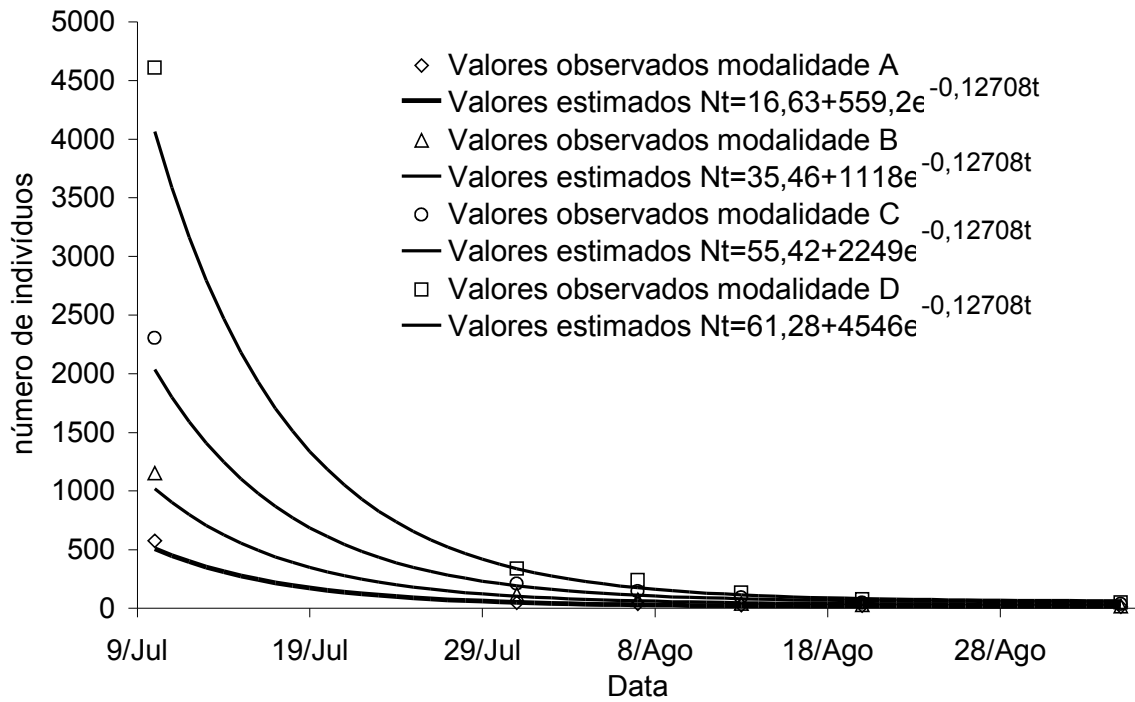


Fig. 4.20 - Evolução do número de indivíduos em populações de *Planococcus citri* (Risso) por ramo com fruto de laranja doce de acordo com modalidade de infestação com fêmeas no início da postura: A - 2, B - 4, C - 8, D - 16.

Este resultado não permite a rejeição das hipóteses nulas. Portanto, deve ser admitido que em condições experimentais a redução instantânea da população é independente da densidade populacional. Por outras palavras, um aumento do número de indivíduos por fruto não parece ter contribuído para um aumento da competição por alimento entre estes mesmos indivíduos. O valor de referência para o coeficiente de redução diária de cochonilha algodão em citrinos durante o período de uma geração na ausência de reprodução e ou imigração é de 0,88.

Tonkyn (1986) apresentou alguns estudos teóricos que podem explicar a aparente falta de competição que a cochonilha algodão mostrou neste estudo. Este autor sugeriu que até um determinado nível, a alimentação de homópteros sobre o floema, pode causar na planta uma reacção direccionada para compensar a quantidade de seiva extraída. Esta compensação pode ser conseguida ao aumentar o fluxo de floema na direcção do local onde os insectos se estão a alimentar. Portanto, a cochonilha algodão actuará como uma força de sucção, tirando vantagem da concentração de indivíduos.

Coloca-se então a questão, qual o mecanismo inerente a populações de *P. citri* que contribui para a redução do número de indivíduos por colónia de uma forma tão uniforme para todos os níveis de infestação (Fig. 4.20). Se se assumir que as observações terminaram no momento em que não existiam mais indivíduos, então N_f (4.4) passa a ter o valor de zero e a nosso modelo de regressão fica muito semelhante à equação de Malthus para crescimento exponencial de populações (4.5).

$$N_t = N_i e^{-ct} \quad (4.5)$$

No entanto na equação (4.5) a constante c no expoente que multiplica pelo factor t é precedida por um sinal negativo, enquanto na equação de Malthus, tal constante negativa não existe (3.16). O parâmetro r do modelo exponencial (3.16) poderá ser interpretado como a diferença entre o nascimento (reprodução) e a taxa de mortalidade (Sharov 1996) (3.17). Então, a equação (4.5) pode ser escrita como (4.6)

$$N_t = N_0 e^{(b-m)t} \quad (4.6)$$

No caso do ensaio acima descrito, não existiram nascimentos ($b=0$) e r toma então um valor negativo (4.7)

$$r = b - m - mi - ma \quad (4.7)$$

Em que b e m já se sabe o significado, mi representa emigração e ma representa a taxa de transformação dos segundos instares em machos. Reescrevendo (4.7), obtém-se (4.8)

$$-c = -m - mi - ma \quad (4.8)$$

Ou seja, o valor $-c$ resulta da soma de todos os factores que contribuem para uma diminuição de indivíduos na colónia.

4.3.5 Nível de infestação dos frutos por *Planococcus citri* (Risso) dependente da densidade da colónia

Apesar de *P. citri* poder apresentar um comportamento orientado para se agrupar, à medida que aumenta a densidade de indivíduos no interior de cada colónia, haverá uma tendência para dispersarem e para ocuparem novos locais potenciais de fixação para evitarem excesso de competição. Nestas condições, poderá ser estabelecida uma relação matemática entre a densidade média por colónia e a proporção de potenciais locais de fixação colonizados (Wilson & Room 1983) (Capítulo 3.4.3). Franco (1997), após o cálculo dos parâmetros a e b da lei da potência de Taylor, aplicou-os ao modelo de Wilson & Room (1983) e mostrou a relação entre a infestação média de *P. citri* por fruto e a proporção de frutos infestados nos pomares de citrinos em Portugal e Israel.

O objectivo deste Capítulo é validar o ajustamento do modelo de Wilson & Room (1983) para estimativa da proporção de frutos infestados no pomar em função da densidade média da cochonilha algodão por fruto, para dados obtidos em Portugal e Israel, utilizando os parâmetros a e b da lei da potencia de Taylor obtidos por Franco (1997) e por Nestel et al. (1995)

Material e métodos

Foi usado o modelo de Wilson & Room (1983) (3.12) com os parâmetros a e b da lei da potencia de Taylor obtidos por Franco (1997) e por Nestel et al. (1995) para prever os níveis de infestação dos frutos pela cochonilha algodão nos pomares de citrinos, dependendo do número médio de cochonilhas por fruto. Os resultados do modelo foram testados utilizando a estatística χ^2 de Pearson para verificar a qualidade do ajustamento (Bhattacharya & Johnson 1977) a dados observados em pomares de Portugal e Israel. Foram testadas as seguintes hipóteses:

H_0 : Não há diferenças significativas entre os valores estimados pelo modelo adoptado para prever o nível de infestação de frutos com cochonilha algodão dependendo do número médio de indivíduos por colónia e os valores observados no campo;

H_1 : Há diferenças significativas entre os valores estimados pelo modelo adoptado para prever o nível de infestação de frutos com cochonilha algodão dependendo do número médio de indivíduos por colónia e os valores observados no campo;

Os dados de campo utilizados na validação para Portugal foram recolhidos por Carvalho (1994), Silva (2000) e Silva & Carvalho (dados não publicados) em sete pomares diferentes e em quatro anos distintos. Os dados homólogos para Israel (Mendel, dados não publicados) foram recolhidos em 42 pomares distintos, durante dois anos. Efectuaram-se na totalidade 53 recolhas de dados para Portugal e 42 para Israel. Para verificar a infestação por cochonilha algodão em Portugal, foram observadas no campo amostras compostas por 200 ou por 300 frutos cada, e contou-se o número total de cochonilhas existentes. Para verificar a infestação por cochonilha algodão em Israel, foram observadas no campo amostras compostas por 10 frutos cada, e contou-se o número total de cochonilhas existente. As árvores de citrinos foram seleccionadas aleatoriamente como unidades primárias de amostragem e foram também seleccionados aleatoriamente 10 frutos por árvore como unidades secundárias de amostragem. Nas observações utilizou-se uma lupa de bolso (10 x).

O nível de infestação do pomar foi calculado de acordo com a seguinte fórmula (4.9):

$$\text{proporção de frutos infestados} = \frac{\text{número de frutos com P. citri}}{\text{número total de frutos amostrados}} \quad (4.9)$$

O número médio de cochonilhas algodão por fruto foi calculado em conformidade com a seguinte fórmula (4.10):

$$\text{Média P. citri por fruto} = \frac{\sum \text{número de P. citri por fruto}}{\text{numero total de frutos amostrados}} \quad (4.10)$$

Resultados e discussão

De acordo com as Figs. 4.21 e 4.22, os valores observados e os valores esperados da proporção de frutos infestados no pomar mostraram a mesma tendência. Em Portugal, os valores observados são mais baixos que os valores esperados, especialmente para o número de cochonilhas algodão por fruto acima de 25 indivíduos. No Quadro 4.7 apresenta-se um resumo da análise estatística para ajustamento do modelo de Wilson & Room aos conjuntos de dados de campo.

Quadro 4.7 - Resumo teste de Pearson (χ^2) para ajustamento do modelo de Wilson & Room (1983) a conjuntos de dados observados (densidade média de colónias de *Planococcus citri* (Risso) por frutos e número de frutos infestados no pomar) em pomares em Portugal e em Israel.

Origem dados	Origem parâmetros	Resultado teste	Graus de	Valor rejeição H_0
--------------	-------------------	-----------------	----------	----------------------

	<i>a e b</i>	Pearson	Liberdade	(χ^2) $P \leq 0,05$
Portugal	Franco (1997) a=4,2 b=1,71	5,72	52	$\geq 69,83$
	Nestel et al. (1995) a=0,51 b=1,61	14,23	52	$\geq 69,83$
Israel	Franco (1997) a=4,2 b=1,71	3,55	41	$\geq 56,94$
	Nestel et al. (1995) a=0,51 b=1,61	3,68	41	$\geq 56,94$

Os resultados do Quadro 4.7 não permitem a rejeição a hipótese nula e mostram que o modelo de Wilson & Room (1983) se ajusta bem aos dados de campo tanto em Portugal como em Israel. Verificar que, este último modelo, tanto se ajusta bem aos dados com os parâmetros *a* e *b* da lei da potência de Taylor determinados por Franco (1997) como pelos mesmos parâmetros determinados por Nestel et al. (1995). De salientar que, no conjunto de dados para Portugal, se o número médio de cochonilha algodão presente por fruto for superior a 25 indivíduos, todos os valores observados são inferiores aos valores esperados (Figs. 4.21 e 4.22)

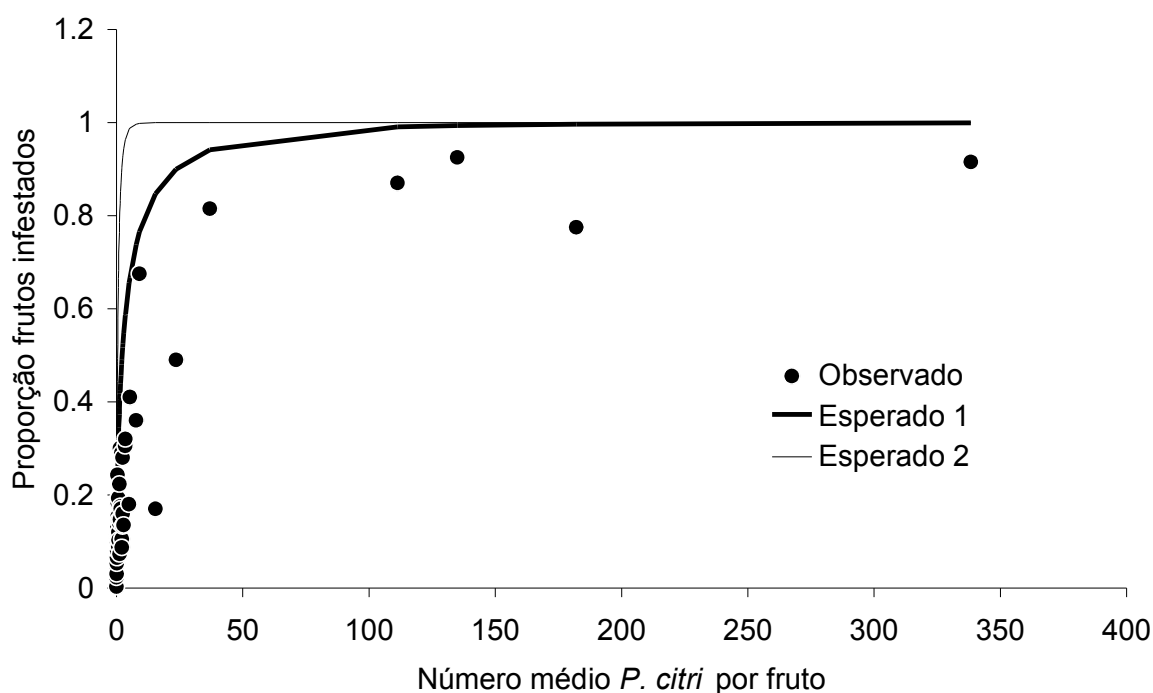


Fig. 4.21 - Evolução da proporção de frutos infestados nos pomares de citrinos em Portugal, dependendo do número médio de *Planococcus citri* (Risso) por fruto. Valores esperados de acordo com o modelo de Wilson & Room (1983), ajustados com os parâmetros *a* e *b* do Quadro 4.7. Esperado 1 valores Portugal, Esperado 2 valores Israel.

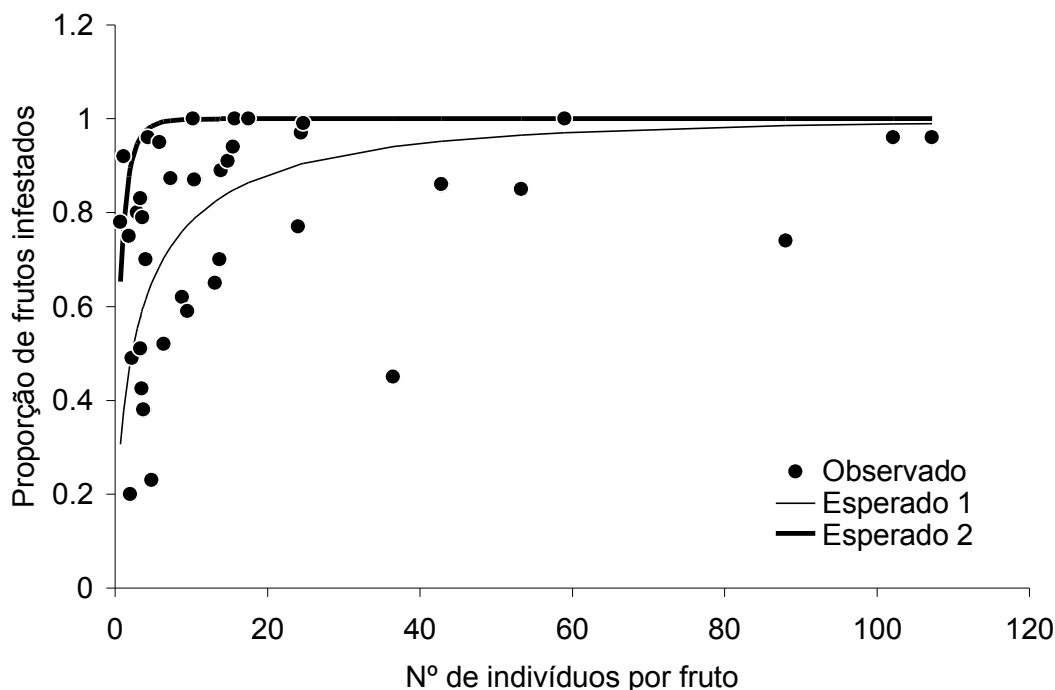


Fig. 4.22 - Evolução da proporção de frutos infestados nos pomares de citrinos em Israel, dependendo do número médio de *Planococcus citri* (Risso) por fruto. Valores esperados de acordo com o modelo de Wilson & Room (1983), ajustados com os parâmetros a e b do Quadro 4.7. Esperado 1 valores Portugal, Esperado 2 valores Israel.

4.3.6 Padrão de infestação de *Planococcus citri* (Risso)

No Capítulo anterior verificou-se que, à medida que o número médio de indivíduos aumenta por fruto (ou seja, a densidade da colónia aumenta), o número de frutos infestados também aumenta. Coloca-se então a questão, como estão distribuídas essas colónias, em função do número de indivíduos por colónia? Também a chave para um melhor entendimento da dinâmica de campo de uma espécie assenta no conhecimento de padrões de distribuição de população e a intensidade de ocupação do meio ambiente disponível. Este conceito é especialmente verdade quando as espécies em estudo são economicamente importantes. (ver Capítulo 3.4.1).

Os três padrões básicos de distribuição de população podem ser identificados de acordo com distribuições estatísticas discretas (ver Capítulo 3.4.1), principalmente porque em estudos de padrões de distribuição de população de animais, os investigadores trabalham com números discretos tais como número de indivíduos, ovos, posturas, etc. (Sharov 1996). No entanto, quando os números disponíveis são contínuos, tais como energia ou biomassa, podem ser usadas distribuições contínuas (Sharov 1996). Por conseguinte, neste Capítulo, o objectivo é descrever classes de intensidade de infestação de cochonilha algodão de acordo com uma distribuição estatística e apontar padrões de distribuição populacional em frutos infestados.

Material e métodos

Foi usado um delineamento experimental semelhante ao descrito em 4.3.3. Foram recolhidas 50 amostras ao longo de quatro anos (1994-1997) em 12 pomares diferentes (Portugal). O número de recolhas de frutos por pomar e por estação variaram entre uma e nove. O número de frutos recolhidos

por pomar e por data variou entre sete e 40. A informação obtida para o número de cochonilha equivalente foi organizada em histogramas, por local e data, de acordo com classes de intensidade de infestação por fruto. A amplitude de cada classe foi estabelecida de forma a obter seis classes iguais para cada observação. Excepcionalmente, um menor número de classes foi estabelecido. Depois de elaborar os histogramas foi verificado que a distribuição gama era a mais adequada para mostrar os resultados. Por conseguinte, a distribuição gama foi ajustada aos dados com o GENSTAT 5 (Payne et al. 1994) (4.5).

$$f(x) = \frac{b^k \cdot x^{(k-1)} \cdot e^{-bx}}{\Gamma(k)} \quad (4.11)$$

x - variável

$f(x)$ - Função de distribuição Gama

b, k - Constante que determina a forma da curva

$\Gamma(k)$ - Função gama incompleta = $(k-1)!$ Se k for inteiro e positivo

O ajustamento entre o histograma e a distribuição gama e os dados foi feito com a estatística de Pearson's χ^2 (Battacharyya & Jonhson 1977). As seguintes hipóteses foram testadas:

H_0 : Não existem diferenças significativas entre os padrões observados e previstos dos frutos infestados por cochonilha algodão e classificados de acordo com a intensidade da infestação, utilizando a distribuição gama;

H_1 : Existem diferenças significativas entre os padrões observados e previstos dos frutos infestados por cochonilha algodão e classificados de acordo com a intensidade da infestação, utilizando a distribuição gama.

Resultados

Os resultados do Quadro 4.8 mostram que, em cerca de 50 observações, apenas em 13 casos ($\alpha \geq 0,95$) se constatou um padrão de intensidade de infestação do fruto próxima do resultado da distribuição gama. (Fig. 4.23).

Quadro 4.8 - Estudo de ajustamento de histogramas, que descrevem o nível de infestação dos frutos por cochonilha algodão pela distribuição gama

Probabilidade calculada χ^2 (α)	Número de observações
$\alpha < 0,95$	37
$0,95 \leq \alpha \leq 0,975$	7
$\alpha > 0,975$	6

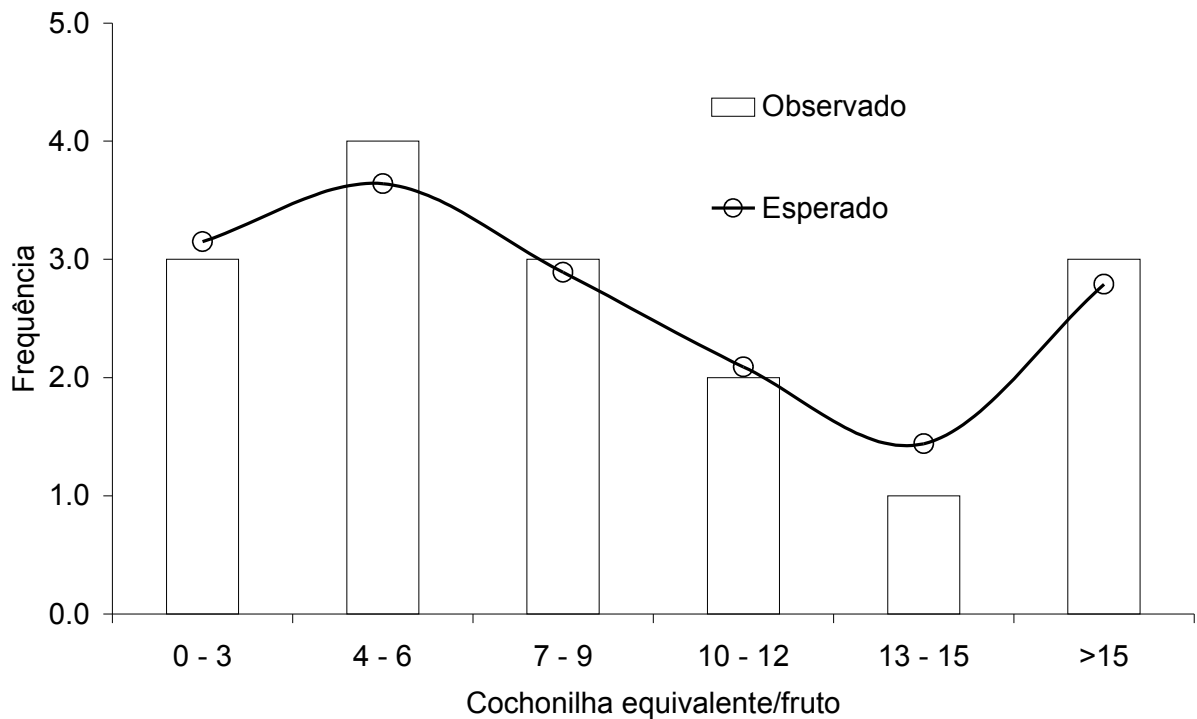


Fig. 4.23 - Ajustamento da distribuição gama a um histograma de frequência do número de frutos por *Planococcus citri* (Risso) classificados de acordo com a densidade de infestação por cochonilha algodão equivalente.

Os resultados com 37 observações com baixos índices de ajustamento ($\alpha < 0,95$) podem ter sido causados pelo pequeno número de repetições em cada amostra. No entanto, mesmo com pequenas recolhas de dados é possível nalguns casos detectar em histogramas uma forma semelhante à distribuição gama. Porém, a frequência de cada classe é fortemente afectada pela concentração de dados, condicionando a possibilidade de um bom ajustamento à distribuição estatística. Apesar da plasticidade da distribuição gama, a distribuição de frequências da densidade de *P. citri* no campo ainda não é bem explicada. Uma maior amostra de frutos poderia colmatar a falta de ajustamento observado neste estudo.

4.3.7 Inimigos naturais

P. citri é uma espécie conhecida por ter um vasto leque de inimigos naturais à escala mundial (Blumberg et al. 1997, Franco et al. 2000). Entre estes inimigos naturais, foram identificados fungos entomopatogénicos, parasitóides, ácaros e insectos predadores (Franco 1997, Franco et al. 2000). Com frequência, algumas espécies foram introduzidas em novas áreas geográficas, quer como luta biológica clássica, quer como tratamento biológico contra a cochonilha algodão (e.g., Reddy et al. 1992 Tranfaglia et al. 1992, Mendel et al. 1999).

Em Portugal, no passado, também se verificou a introdução de insectos exóticos no contexto de estratégias para a luta biológica de *P. citri*, numa tentativa de colmatar a deficiente limitação exercida pelos inimigos naturais existentes (Anexo 5). Um exemplo clássico foi o *C. montrouzieri* proveniente de Valência (Espanha) (Amaro 1994b), em 1929, para luta biológica clássica, ou o parasitóide *L. dactylopii* em 1991 vindo de criação artificial em massa em Itália, destinando-se a tratamento biológico (Tranfaglia et al. 1992, Amaro 1994a, 1994b, Franco et al. 1994, Carvalho 1994).

Apesar do conjunto de inimigos naturais, não só nativos como também exóticos numa dada região, a luta biológica contra a cochonilha dos citrinos em campo aberto constitui ainda um desafio (Blumberg et al. 1997, Mendel et al. 1999, Franco et al. 2004). Na realidade, as observações de campo mostram que as populações de *P. citri* aumentam ao ponto de causarem prejuízos, apesar da presença de auxiliares (Mendel et al. 1999). Não é pois completa e profundamente conhecida a relação entre os níveis das populações de cochonilha algodão e as populações dos seus inimigos naturais. Neste contexto, o objectivo deste trabalho é mostrar os resultados de um estudo sobre a relação entre os níveis da população da cochonilha algodão no campo e os níveis da população dos seus inimigos naturais.

Material e Métodos

Recolha de dados

Entre Julho de 1996 e Março de 1997, 16 frutos foram objecto de amostragem em cada três semanas em seis pomares da região Sul de Portugal. Os pomares e datas seleccionados já foram referidos no Capítulo 4.33, Figs. 4.10 a 4.15. Cada fruto foi mantido à temperatura ambiente dentro de um frasco de plástico (8 cm de diâmetro, 20 cm de altura), coberto com um pedaço de tecido. No espaço de 24 h as cochonilhas algodão encontradas nos frutos foram contadas através de um microscópio estereoscópico, diferenciando os indivíduos de cochonilhas algodão, de acordo com o seu instar de desenvolvimento. Todos os outros insectos foram retirados independentemente do seu estado de desenvolvimento. Os auxiliares foram contados e registados em conformidade com as categorias sistemáticas. De modo a retirar parasitóides que pudessem surgir, cada fruto foi observado diariamente. Entre todos os parasitóides, apenas *L. dactylopii* foi largado em tratamento biológico, duas vezes nos meses de Maio e Junho.

Tratamento estatístico

De modo a estudar a relação entre os níveis das populações da cochonilha algodão e dos seus inimigos naturais, tomaram-se em consideração as seguintes hipóteses:

H₀: Não existe qualquer tipo de relação entre os níveis populacionais da cochonilha algodão e os dos seus inimigos naturais;

H₁: Existe, pelo menos, uma relação aproximada entre os níveis populacionais da cochonilha algodão e os dos seus inimigos naturais.

Observaram-se o número total de cochonilhas por instar e de auxiliares em cada amostra. Foi calculado o valor de cochonilha equivalente, para cada fruto, usando o método descrito no Capítulo 4.3.3. Os coeficientes de correlação entre o número de cochonilhas algodão e o número médio de auxiliares foram definidos de acordo com Sokal & Rolf (1987), recorrendo ao software Microsoft Excel. Devido à falta de repetições, ao nível de local ou data, todas os resultados foram reunidos, de forma a simplificar a análise de dados. Considerou-se que as exigências ambientais para a actividade, desenvolvimento e reprodução dos auxiliares são as mesmas que para as cochonilhas algodão. Em

consequência, qualquer mudança ambiental deveria afectar não só as populações de cochonilhas algodão mas também as dos auxiliares, no mesmo sentido e com intensidade similar. Consideraram-se os seguintes grupos de auxiliares: coccinelídeos, *L. abnormis*, *L. dactylopii*, e *A. pseudococci*. Quaisquer outras espécies de inimigos naturais não entram nesta análise devido à sua presença ser ocasional. Usou-se o conceito de cochonilha equivalente para o cálculo do coeficiente de correlação para os coccinelídeos. Para os parasitóides utilizaram-se número de indivíduos. *L. abnormis* e *A. pseudococci* foram considerados em conjunto para permitir avaliar a actividade de *L. dactylopii* em separado. Considerou-se igualmente que os coccinelídeos se alimentam aleatoriamente das suas presas, independentemente do estado de desenvolvimento, e que as presas atacadas e consumidas podem ser reduzidas cochonilha equivalente.

Resultados e discussão

Tal como ilustrado no Quadro 4.9 para todos os grupos de auxiliares considerados existe correlação positiva entre a densidade populacional na colónia e o número de inimigos naturais presentes. Tal significa que, à medida que a população de cochonilha algodão aumenta, a probabilidade de encontrar auxiliares também aumenta (Figs. 4.24 a 4.26). No entanto, esta correlação não pode ser descrita através de qualquer tipo de modelo, visto que resulta sempre em maus ajustamentos gerados por elevada variância.

A correlação do número *L. dactylopii* com o número de *P citri* por colónia é mais elevada provavelmente por terem sido realizadas largadas artificiais do parasitóide no início da estação de crescimento dos frutos, e não resultante da evolução natural das populações daqueles insectos.

Quadro 4.9 – Coeficientes de correlação (r) entre a densidade da colónia de cochonilha algodão e a frequência da ocorrência de auxiliares

Grupo de auxiliares	Valor r	Valor t	Graus de liberdade	Valor probabilístico
Parasitóides	0,230623	5,27	494	< 0,001
<i>Leptomastix dactylopii</i> Howard	0,570736	11,42	272	< 0,001
Coccinelídeos	0,167732	3,78	494	< 0,001

Para algumas observações verificou-se por vezes que para densidades muito elevadas da cochonilha não correspondem a densidades elevadas de inimigos naturais. Por outro lado, também existe uma densidade elevada de auxiliares sem a correspondente elevada densidade de cochonilha. Estes resultados podem estar relacionados com o momento de observação que não captou a evolução diária do número de insectos das diferentes espécies presentes no pomar e também qual a presença de auxiliares em campos circundantes do pomar e respectivos movimentos de migração.

4.4 Conclusões

O algoritmo modificado de Fletcher-Powell pode ser usado para ajustamento de dados ao modelo A2.12, o qual descreve a taxa ou proporção de desenvolvimento da cochonilha algodão em

função da temperatura. A taxa mais rápida de desenvolvimento para todos os estados foi calculada para 30°C de temperatura. A fecundidade máxima foi calculada para fêmeas mantidas a cerca de 21°C.

Durante o período do ano compreendido entre Julho e Outubro, sob condições do Centro e Sul de Portugal, pode-se adoptar 42,5 dias como um valor de referência para o desenvolvimento de uma geração de cochonilha algodão. Não foi encontrado qualquer efeito da densidade populacional sobre a taxa de desenvolvimento de uma geração.

Os dados da evolução da densidade da cochonilha equivalente por fruto em Portugal mostram, na maioria dos casos, uma redução a partir de Julho. O mesmo com algumas excepções acontece para o número absoluto de cochonilhas algodão por fruto. Também em Israel existe uma redução do número de cochonilhas por fruto a partir de Junho – Julho. Nalguns casos, pode existir um máximo de população em Setembro. Em termos absolutos o número de indivíduos por colónia em Portugal foi superior ao número observado em Israel.

Estudos mostraram que a taxa de redução instantânea (sem reprodução) da população de cochonilha algodão no campo não está dependente da densidade e é constante ao longo do tempo. Efectivamente, verificou-se que essa taxa foi constante para o período correspondente a uma geração. A redução da população de cochonilha algodão durante uma geração segue o modelo exponencial.

O modelo de Wilson & Room (1983), utilizado com os parâmetros a e b da lei da potencia de Taylor determinados por Franco (1997) para Portugal e por Nestel et al. (1995) para Israel, pode ser considerado válido para estimar os níveis de infestação da cochonilha algodão nos pomares de citrinos nos dois países, com base na respectiva densidade média por fruto.

Os histogramas sugerem o ajustamento da distribuição gama ao padrão da infestação do fruto, considerando a cochonilha equivalente. No entanto, os resultados obtidos não permitem aceitar de forma clara o ajustamento dos padrões de infestação de campo à distribuição gama.

Observou-se uma correlação positiva entre a densidade de cochonilha algodão e a densidade das populações de inimigos naturais.

5 *Leptomastix dactylopii* Howard biologia e comportamento no campo - revisão bibliográfica e estudo matemático

5.1 Introdução

L. dactylopii é um Encyrtidae (Hymenoptera) de origem tropical (Noyes & Hayat 1994), utilizado à escala mundial em programas de luta biológica como parasitóide de *P. citri*. A perspectiva de um parasitóide específico para a utilização em luta biológica de *P. citri* e a facilidade de criação em massa facilitou o estudo de muitos aspectos da biologia e ecologia deste encirtídeo (e. g., Carvalho 1994, Tingle 1985, Mugalu 1988). Chong & Oetting (2007) demonstraram a especificidade de *L. dactylopii* para *P. citri* em testes de preferência entre vários hospedeiros pseudococcídeos. Também, estudos efectuados em regiões temperadas, apontam para a ausência de sobrevivência deste parasitóide durante o Inverno (ou em densidades muito baixas) no exterior (Zinna 1960a, Longo & Benfatto 1982, Ortu & Prota 1984, Longo 1986, Ortu 1986, Garrido & del Busto 1988, Battaglia et al. 1992, 1994, Barbagallo et al. 1994, Carvalho 1994, Mendel et al. 1999, Raciti et al. 2001). Por conseguinte, *L. dactylopii* tem muitas vantagens para estudos que incluem a técnica de largada e recaptura. A combinação destes aspectos coloca a espécie *L. dactylopii* como um modelo de eleição para utilização em programas de simulação de interacção hospedeiro/parasitóide e inclusão em SimCitri.

Os objectivos e a estrutura deste Capítulo foram estabelecidos de forma semelhante ao Capítulo 4, tendo por base a utilização dos seus resultados para fins de simulação. Assim, os assuntos aqui desenvolvidos visam a apresentação de informação sobre os principais aspectos da biologia e utilização em luta biológica de *L. dactylopii*, informação quantitativa sobre taxa de desenvolvimento, taxa de envelhecimento, fecundidade e taxa de difusão em pomares de citrinos.

5.2 *Leptomastix dactylopii* Howard - revisão de conhecimentos

5.2.1 Morfologia e reprodução

Sendo *L. dactylopii* um himenóptero, segue um desenvolvimento holometabólico e passa pelos estados de ovo, larva, pupa e adulto. A larva passa por quatro instares (Zinna 1960b). Todos os estados imaturos são endoparasitas solitários primários de fêmeas de terceiro e quarto instares de *P. citri* (Lloyd 1958, Zinna 1960b, Viggiani 1977). As cochonilhas de pequena dimensão (primeiros e segundos instares) podem ser considerados imunes ao parasitismo. Fêmeas em postura podem-se considerar quase imunes ao parasitismo (Zinna 1960b, Jong & van Alphen 1989). A espécie *L. dactylopii* apresenta ambos os sexos. A proporção entre sexos é aproximadamente 1:1. A reprodução é arrenótoca, isto é, os ovos fertilizados dão origem a fêmeas e os ovos não fertilizados dão origem a machos. Os machos e as fêmeas podem acasalar poucos minutos após a emergência do adulto. A postura pode ocorrer alguns minutos após o acasalamento (Zinna 1960b). A fêmea mantém a mesma fecundidade aproximadamente constante ao longo da sua vida adulta (Carvalho 1994).

5.2.2 Influência da luz e temperatura na actividade

A actividade de *L. dactylopii* pode ser influenciada por um conjunto de factores bióticos e abióticos. Neste Capítulo far-se-á especial referência à temperatura e luz. A temperatura é um factor fundamental na actividade e sobrevivência de *L. dactylopii*. Para temperaturas acima de 30°C, ou abaixo de 20°C, a mortalidade de pupas aumenta (Battaglia et al. 1992). Também Battaglia et al. (1996) verificaram que pupas mantidas a uma temperatura constante de 15°C, durante 30 dias, deram origem a adultos estéreis e de longevidade curta. Esta observação reforça as observações feitas no Capítulo 5.1 de que *L. dactylopii* não poderá sobreviver durante o Inverno em climas temperados.

Estudos de laboratório mostraram que *L. dactylopii* poderá efectuar postura a 18°C (ver Quadro 5.3), em condições de laboratório. Porém, Dout (1952) refere que o parasitóide, apenas a temperaturas superiores a 21°C poderá desenvolver uma actividade parasitária eficiente para fins de luta biológica. Esta afirmação concorda com as observações de Copland & Varley (1987) que apontam um intervalo de temperatura entre 22°C e 30°C como valores óptimos para a actividade de *L. dactylopii* enquanto parasitóide. Estes autores também referem que em apenas algumas horas à temperatura óptima, uma fêmea poderá colocar todos os ovos gerados num dia. Por exemplo, em ciclos diários, à temperatura óptima, uma fêmea *L. dactylopii* colocará tantos ovos em cinco horas como em doze horas.

De acordo com os resultados obtidos por Tingle (1985) e Mugalu (1988) em condições de laboratório, a luz tem um efeito positivo na actividade e movimento de *L. dactylopii*. Mugalu (1988) mostrou uma relação directa entre a intensidade da luz e a actividade parasítica do encirítídeo.

5.2.3 Ciclo biológico

Como *L. dactylopii* não sobrevive ao Inverno nas condições mediterrâneas (Mendel et al. 1999), qualquer informação sobre o número de gerações durante um ano tem um valor relativo, porque aquele número irá depender da data de largada. Porém, Zinna (1960a) aponta para seis gerações completas e a sétima incompleta desde o princípio de Junho até ao final de Outubro na ilha de Procida em Itália.

5.2.4 Utilização em luta biológica

L. dactylopii é uma espécie que tem sido utilizada à escala mundial em estratégias de luta biológica e protecção integrada contra *P. citri* nas mais variadas culturas e ambientes. As largadas de campo do parasitóide podem distinguir-se entre tratamento biológico (Barbagallo et al. 1981, Longo & Benfatto 1982, Kirshnamoorthy & Singh 1987, Spicciarelli et al. 1994, Mendel et al. 1999, Villalba et al. 2006) e luta biológica clássica (Viggiani 1975, Mineo & Viggiani 1978, Carrero 1979, Barbagallo et al. 1981). Os tratamentos biológicos poderão ser conjugados com largadas de outras espécies de entomófagos ou o uso de outros meios de luta (Doutt 1952, Viggiani 1975b, Luppino 1979, Kole et al. 1985, Longo 1986, Summy et al. 1986, Smith et al., 1988, Villalba et al. 2006).

L. dactylopii tem sido usado em climas tropicais, subtropicais (Kerrich 1954, Prakasan & Bhat 1985, Reddy et al. 1988, 1992, Smith et al. 1988, Ackonor 2002), temperados (Barbagallo et al. 1981, Krishnamoorthy & Singh 1987, Garrido & del. Busto 1988, Smith et al. 1988, Mendel et al. 1999,

Carvalho 1994) e em culturas protegidas (Copland 1983, Kole et al. 1985, Hennekam et al. 1987, Tingle & Copland 1988, Kole & Hennekam 1990, Ronse 1990).

L. dactylopii tem sido usado em diversas culturas, tal como *Citrus* spp. (Barbagallo et al. 1981, Krishnamoorthy & Singh 1987, Garrido & del Busto 1988, Smith et al. 1988, Mendel et al. 1999, Franco et al. 2004, Villalba et al. 2006), videira (*Vitis vinifera* L.) (Whitehead 1960, Mineo & Viggiani 1976a), anona (*Anona reticulata* L.) (Smith et al. 1988), café (Prakasan & Bath 1985, Reddy et al. 1992), cacau (Kerrich 1954) e ornamentais (Hennekam et al. 1987, Tingle & Copland 1988, Kole & Hennekam 1990).

O número total de parasitóides largados por unidade de área em citrinos varia entre 30 indivíduos (Barbagallo et al. 1981) e 112 indivíduos árvore por ano (Mineo & Viggiani 1976). Em termos de área, as largadas em Portugal e Israel variam entre 2500 indivíduos/ha e 13000 indivíduos/ha por ano, podendo essas largadas ser escalonadas no tempo (Carvalho 1994, Mendel et al. 1999). A largada poderá ser em luta biológica clássica (Mendel et al. 1999, Carvalho et al. 1997) ou em tratamento biológico (Krambais & Kontzonis 1980, Longo & Benfatto 1982, Krishnamoorthy & Singh 1987, Carvalho et al. 1997).

Resultados de tratamento biológico com Leptomastix dactylopii Howard

Nas Figs. 5.1 a 5.11 apresentam-se resultados de largadas em tratamento biológico de *L. dactylopii* contra *P. citri*, entre os anos 1993 e 1997 em Israel e para o ano 1996 em Portugal. Os dados para Israel foram gentilmente cedidos pelo Professor Zvi Mendel, tendo sido parte publicados em Mendel et al. (1999).

Em 1993, entre Maio e Julho, foram largados na província de Emeq Izrael em 11 pomares de citrinos *L. dactylopii* numa concentração de 5000 parasitóides/ha. Nove pomares a distância média de 1,5 km dos locais onde foi largado *L. dactylopii* foram observados como testemunha. Para se acompanhar a actividade parasitária de *L. dactylopii* foram colhidos ao longo do ano 10 frutos infestados por *P. citri*. Os frutos foram levados para o laboratório e a emergência de adultos de *L. dactylopii* registada. Os resultados (Fig. 5.1) mostram que o número de cochonilha algodão dos citrinos por fruto foi quase sempre superior nos pomares onde *L. dactylopii* foi largado, do que nos pomares usados com testemunha. A percentagem de parasitismo de *L. dactylopii* sobre *P. citri* (Fig 5.2) embora tenha subido ao longo do ano, foi sempre muito baixa, com o valor mais alto à volta de 0,16 % no início de Outubro.

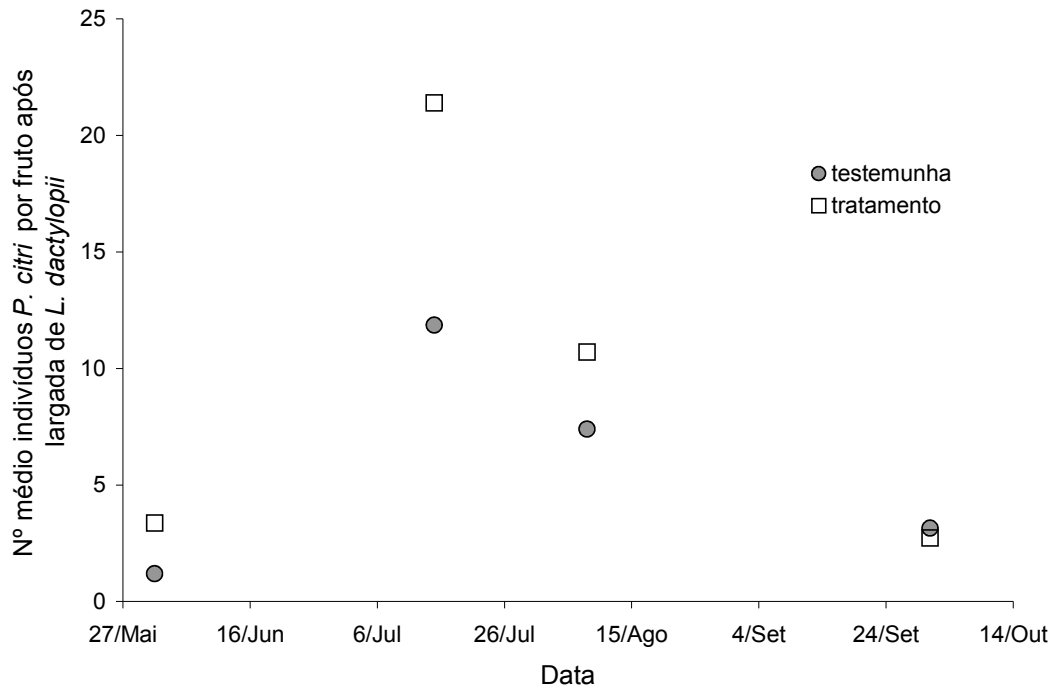


Fig. 5.1 - Número médio de indivíduos *Planococcus citri* (Risso) por fruto após a largada de *Leptomastix dactylopii* Howard em 1993 na província Emeq Izrael Israel. Amostras de 10 frutos por local por observação. Largada (tratamento) de *L. dactylopii* em 11 pomares numa concentração de 5000 parasitóides/ha.

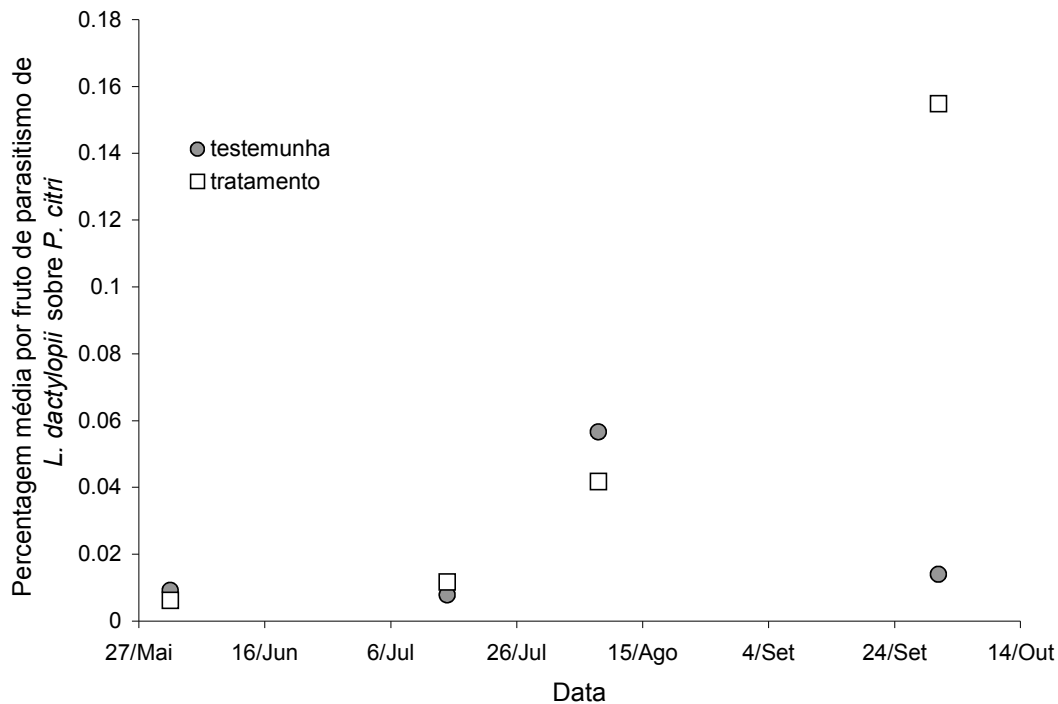


Fig. 5.2 - Percentagem média por fruto de parasitismo de *Leptomastix dactylopii* Howard sobre *Planococcus citri* (Risso) em 1993 na província Emeq Izrael, Israel. Amostras de 10 frutos por local por observação. Largada (tratamento) de *L. dactylopii* em 11 pomares numa concentração de 5000 parasitóides/ha.

Em 1994, foi delineado um ensaio para comparar o impacto de limitação natural, coadjuvada pela presença de *L. dactylopii*, sobre populações de *P. citri* em duas modalidades. Numa modalidade taparam-se com uma rede de 50 "mesh" grupos de 6 árvores e a outra modalidade correspondeu ao restante pomar. Pomares onde *L. dactylopii* foi largado foram comparados com pomares testemunha,

pomares estes, também com grupos de árvores cobertos por rede. Efectuaram-se largadas de *L. dactylopii* em 3 pomares na quantidade de 5000 parasitóides por ha a 6 de Junho e compararam-se estes pomares com 3 testemunhas.

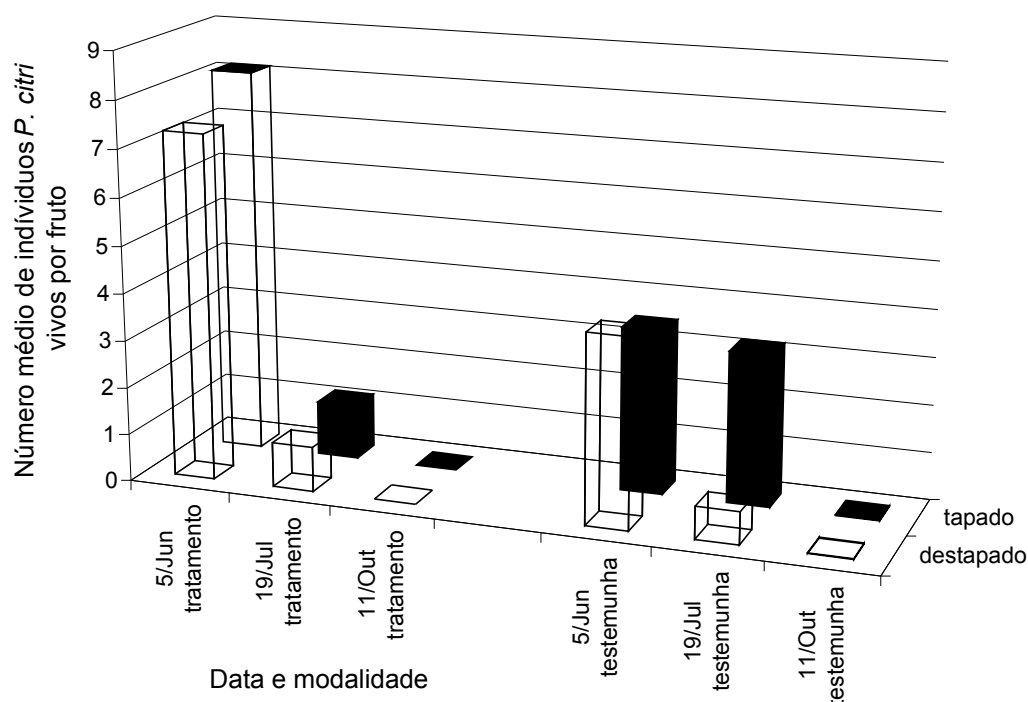


Fig. 5.3 – Comparação da actividade de insectos auxiliares em grupos de árvores tapadas com rede (tapado) com a actividade de insectos auxiliares + *Leptomastix dactylopii* Howard no restante pomar sobre populações de *Planococcus citri* (Risso). Dados de 1994 da província de Emeq Izrael, Israel, largada de 5000 parasitóides/ha a 6 de Junho. Leituras médias de 10 frutos amostrados por modalidade com 3 repetições para cada modalidade.

Pela Fig. 5.3 verifica-se que as populações de *P. citri* foram mais elevadas na primeira observação, no dia anterior à largada de *L. dactylopii*. O número médio de indivíduos *P. citri* observados por fruto foi sensivelmente igual para todas as datas e modalidades, excepto para a testemunha a 19 de Julho em que o número médio de indivíduos por fruto nas árvores tapadas foi superior ao das árvores destapadas. A 11 de Outubro, as populações observadas de *P. citri* em todas as modalidades foram quase inexistentes.

Na Fig. 5.4 pode-se verificar que no dia anterior à largada de *L. dactylopii* a percentagem média de parasitismo de *P. citri* encontrava-se próximo de zero. Após a largada daqueles parasitóides, a 19 de Julho na modalidade destapada, o parasitismo de populações de *P. citri* foi ligeiramente superior à modalidade tapada, tanto no tratamento, como na testemunha. A 11 de Outubro, o parasitismo de populações de *P. citri* na testemunha, modalidade tapado, foi o mais elevado aproximando-se de 0,7%.

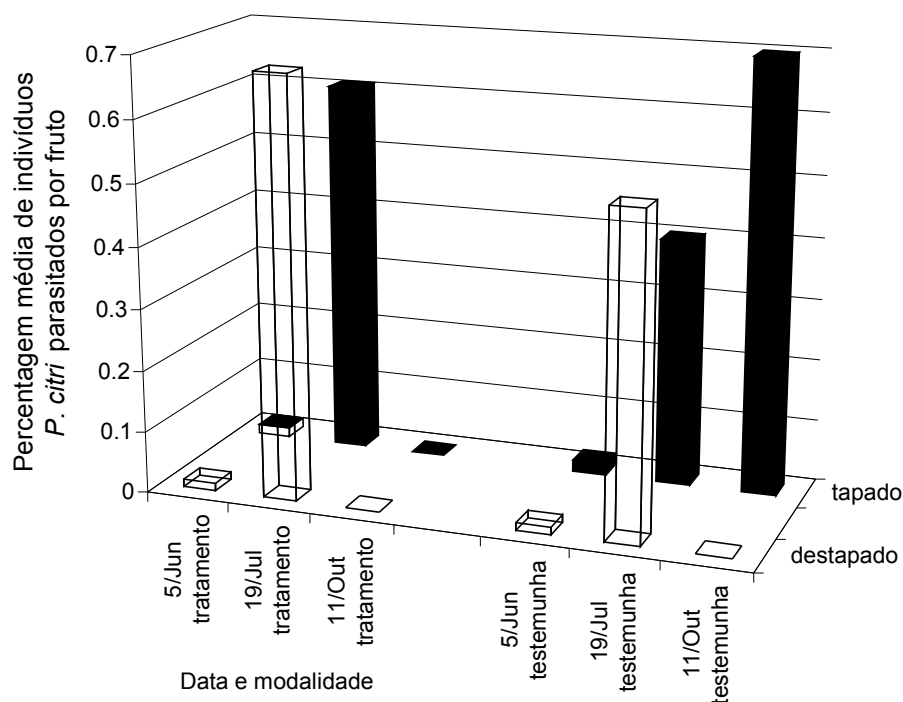


Fig. 5.4 - Comparação da actividade de insectos auxiliares em grupos de árvores tapadas com rede (tapado) com a actividade de insectos auxiliares + *Leptomastix dactylopii* Howard no restante pomar sobre populações de *Planococcus citri* (Risso). Dados de 1994 da província de Emeq Izrael, Israel, largada de 5000 parasitóides/ha a 6 de Junho. Leituras médias de 10 frutos amostrados por modalidade com 3 repetições para cada modalidade.

Após observação dos resultados para os anos de 1993 e 1994 com baixo parasitismo de *L. dactylopii* sobre populações de *P. citri* em Israel, Mendel (comunicação pessoal) efectuou largadas daquele parasitóide em Abril, num momento sincronizado com a floração dos citrinos em que as populações de *P. citri* são baixas e começam a migrar para locais "sink" da planta (Franco 1997). Considera-se que nesta altura do ano, *L. dactylopii* será mais efectivo na luta contra *P. citri* porque um parasitismo elevado desta cochonilha quando as suas populações são baixas poderá reduzir a população de populações daquela espécie mais tarde na estação de crescimento dos frutos. Na Fig. 5.5 apresentam-se os resultados.

Pela Fig. 5.5 pode-se verificar que a percentagem de parasitismo de *P. citri* à colheita dos frutos é ligeiramente superior no tratamento do que na testemunha. Este parasitismo é composto pela actividade dos parasitóides locais *A. pseudococci* e *L. abnormis* e por *L. dactylopii*. De forma inversa, a infestação de frutos e o número de *P. citri* vivo observados, foram mais baixos no tratamento do que na testemunha.

Em 1996 Mendel et al. (1999) utilizaram *A. pseudococci* no tratamento biológico de *P. citri* e compararam a eficácia daquele parasitóide com *L. dactylopii*. Nas Figs. 5.6 e 5.7 mostram-se os resultados do parasitismo de combinações em quantidades diferentes de *A. pseudococci* e *L. dactylopii* sobre populações de *P. citri* em Israel. A actividade destes auxiliares foi acompanhada através de batatas armadilha (compostas por batatas abrolhadas no escuro, infestadas com uma população elevada de *P. citri*). Estas armadilhas foram expostas por um período de 4 semanas em cada campo experimental, um e dois meses após a largada de *L. dactylopii* e *A. pseudococci*.

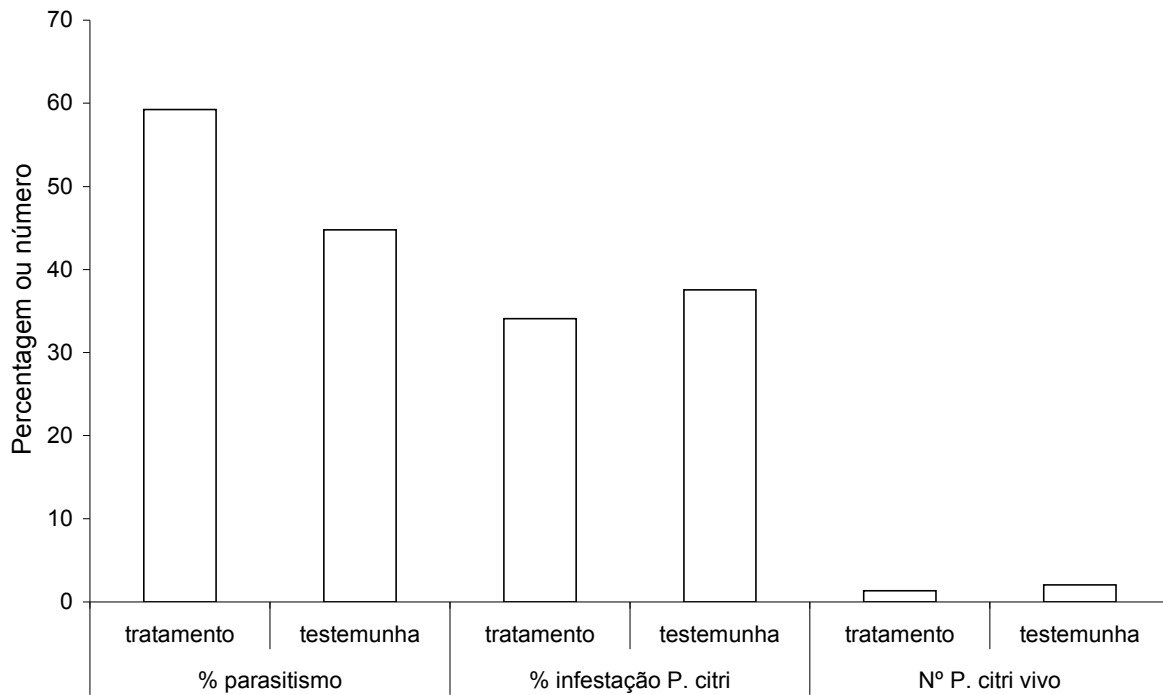


Fig. 5.5- Largada em Abril de 5000 *Leptomastix dactylopi*/ha. Verificação à colheita de frutos. Dados 1995 Israel em Emeq Izrael. Tratamento 12 pomares, testemunha 22 pomares. A percentagem de parasitismo inclui também o parasitismo natural.

Pelas Figs. 5.6 e 5.7 pode-se verificar que, nos pomares em tratamento biológico, as populações de *A. pseudococci* foram sempre superiores às populações da mesma espécie nos pomares testemunha, em que apenas se contabilizaram as populações naturais daquele parasitóide. Em largadas conjuntas de *A. pseudococci* e *L. dactylopii*, não foi evidente qual o parasitóide dominante 1 mês após a largada. Em metade dos casos o primeiro parasitóide foi dominante, na outra metade, o segundo parasitóide foi dominante. As populações naturais de *A. pseudococci* foram quase inexistentes. Interessante verificar que em ambas as largadas em duas doses de 5000 *L. dactylopii*, não emergiram quaisquer parasitóides desta espécie em batatas armadilha. Dois meses após o tratamento biológico (Fig. 5.7), as populações de *A. pseudococci* subiram de uma forma geral em relação à observação anterior (Fig 5.6), incluindo as populações naturais deste parasitóide. De uma forma geral, as populações de *A. pseudococci* foram superiores as populações de *L. dactylopii* 2 meses após a largada.

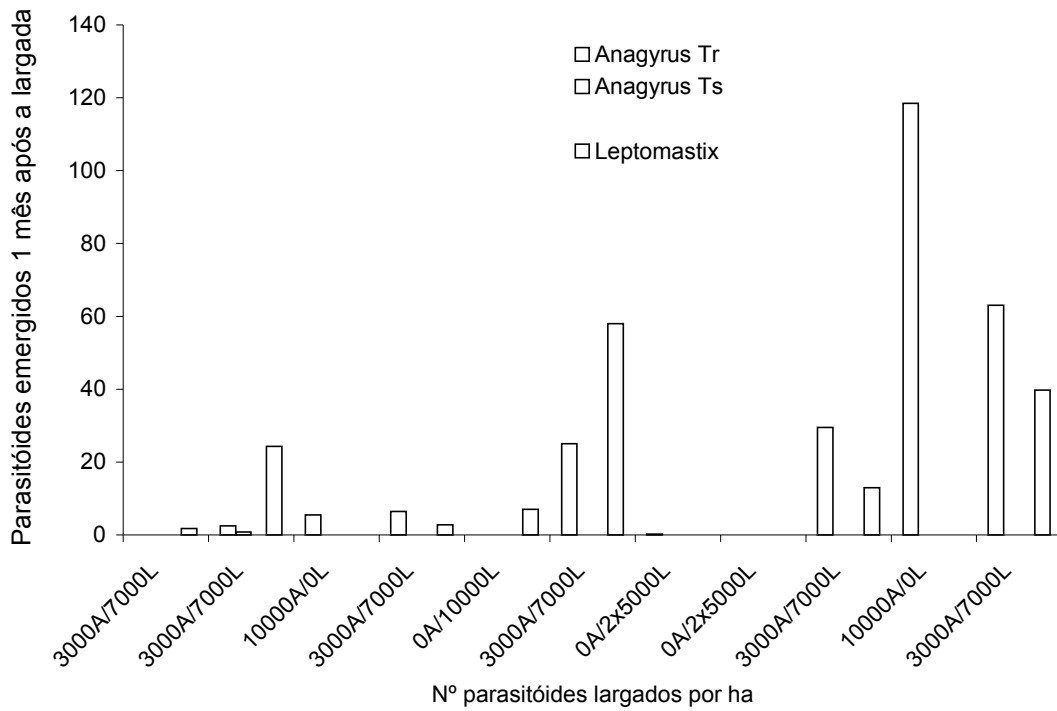


Fig 5.6 - Número médio de *Anagyrus pseudococci* (Girault) (A) e *Leptomastix dactylopii* Howard (L) emergidos de batatas armadilha 1 mês após a largada daqueles parasitoides no campo. Dados 1996, Emeq Izrael, Israel. Tr - tratamento, Ts - testemunha.

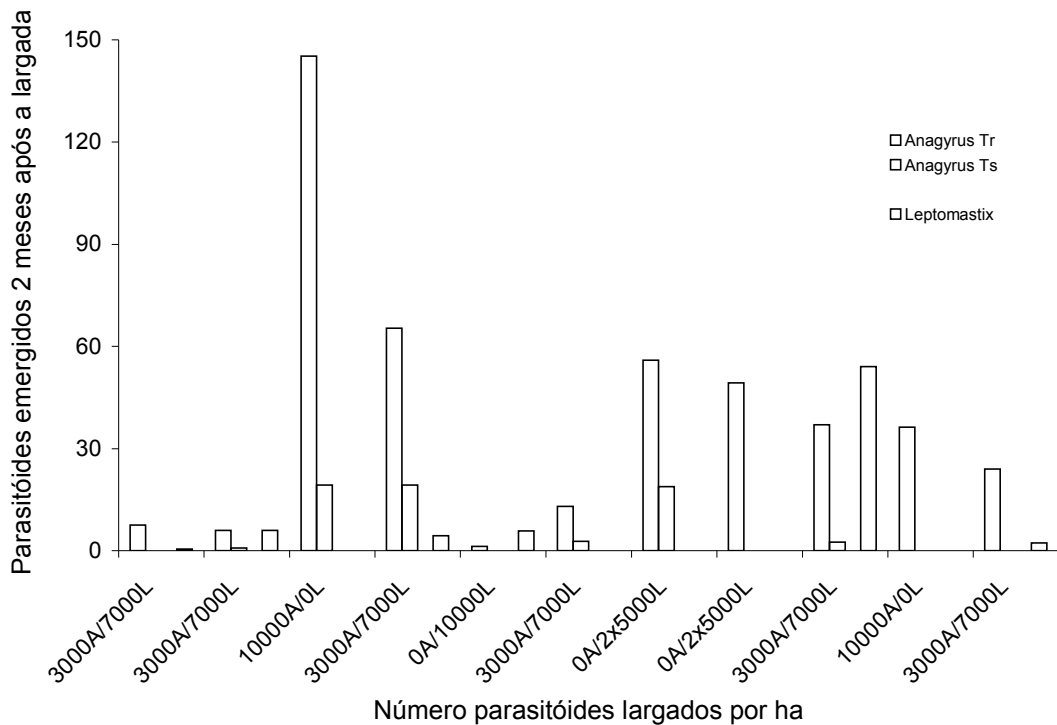


Fig 5.7 - Número médio de *Anagyrus pseudococci* (Girault) (A) e *Leptomastix dactylopii* Howard (L) emergidos de batatas armadilha 2 meses após a largada daqueles parasitoides no campo. Dados 1996, Emeq Izrael, Israel. Tr - tratamento, Ts - testemunha.

No início de Junho de 1996, efectuou-se tratamento biológico com *L. dactylopii* em quatro pomares no Sul de Portugal Continental (Figs. 5.8 a 5.11), numa dose de 5000 indivíduos/ha. Usando

a mesma metodologia e frutos referidos nos Capítulos 4.33 e 4.37, contaram-se para cada data, local e fruto o número de *L. dactylopii* emergidos.

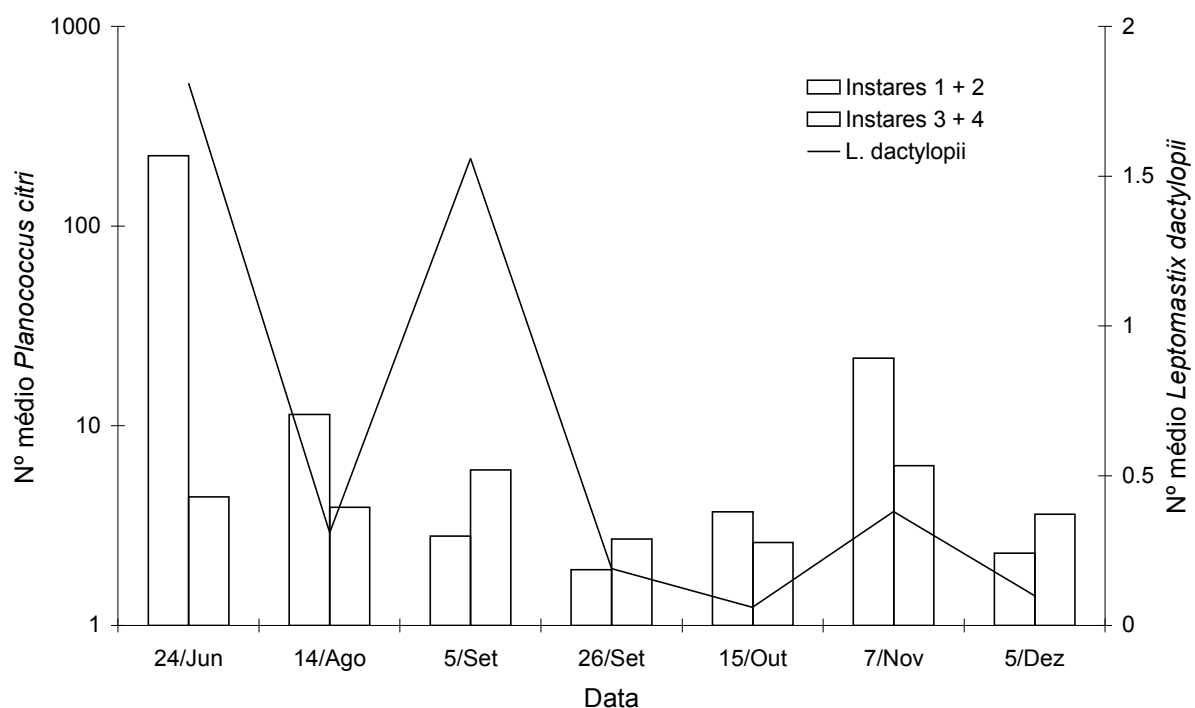


Fig. 5.8 - Evolução do número médio de *Planococcus citri* (Risso) e *Leptomastix dactylopii* Howard para amostras de 16 frutos após tratamento com este parasitóide (5000 indivíduos) no início de Junho num pomar em Portugal, Estreitinha, Santiago do Cacém, 1996.

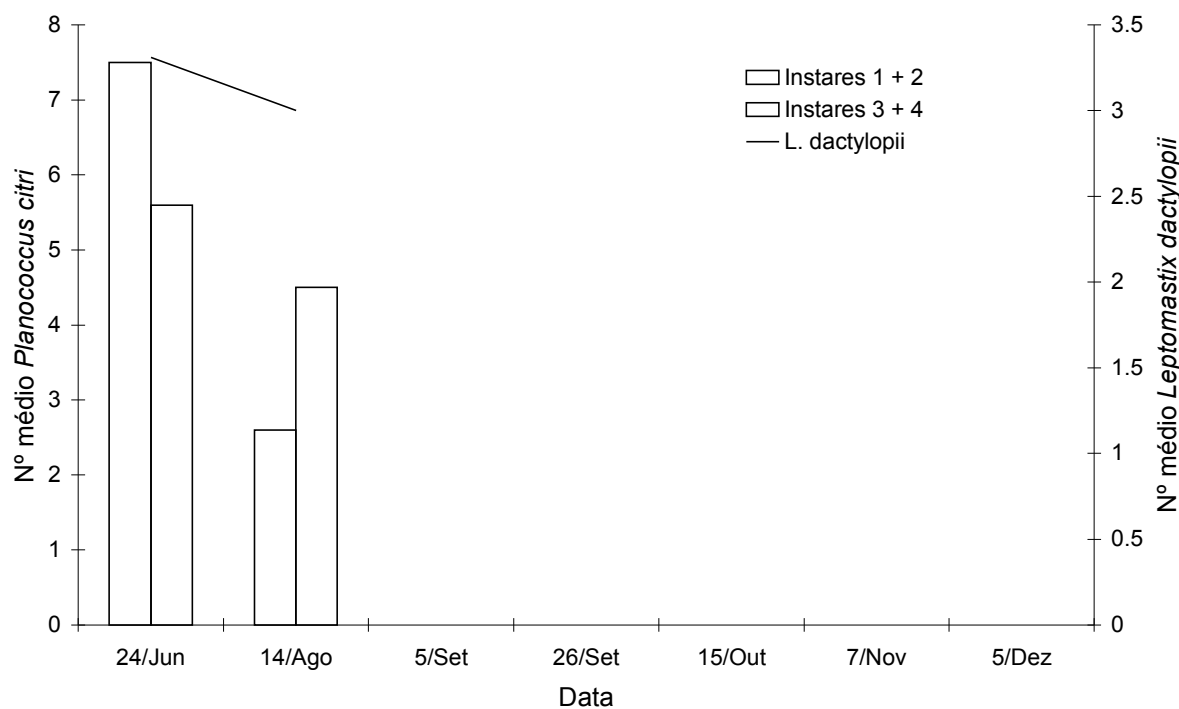


Fig. 5.9 - Evolução do número médio de *Planococcus citri* (Risso) e *Leptomastix dactylopii* Howard para amostras de 16 frutos após tratamento com este parasitóide (5000 indivíduos) no início de Junho num pomar em Portugal, Barrocal, Messines, 1996.

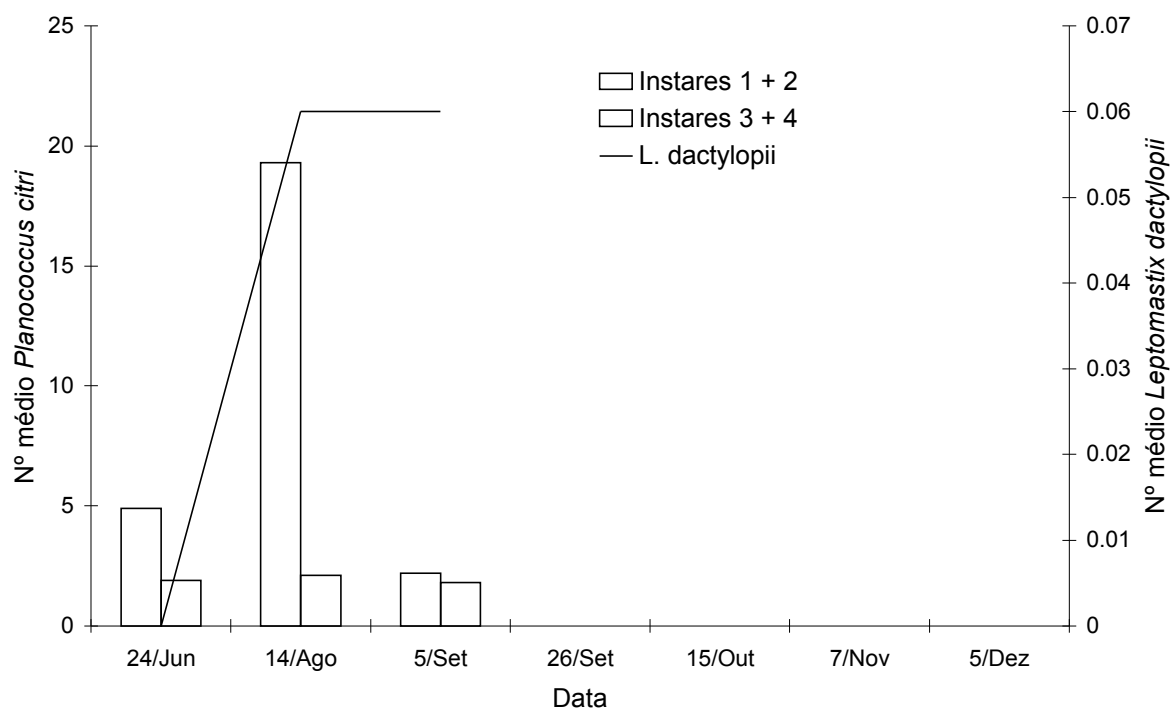


Fig 5.10 - Evolução do número médio de *Planococcus citri* (Risso) e *Leptomastix dactylopii* Howard para mostras de 16 frutos após tratamento com este parasitóide no início de Junho (5000 indivíduos) num pomar em Portugal, Pereirinha, Moncarapacho, 1996.

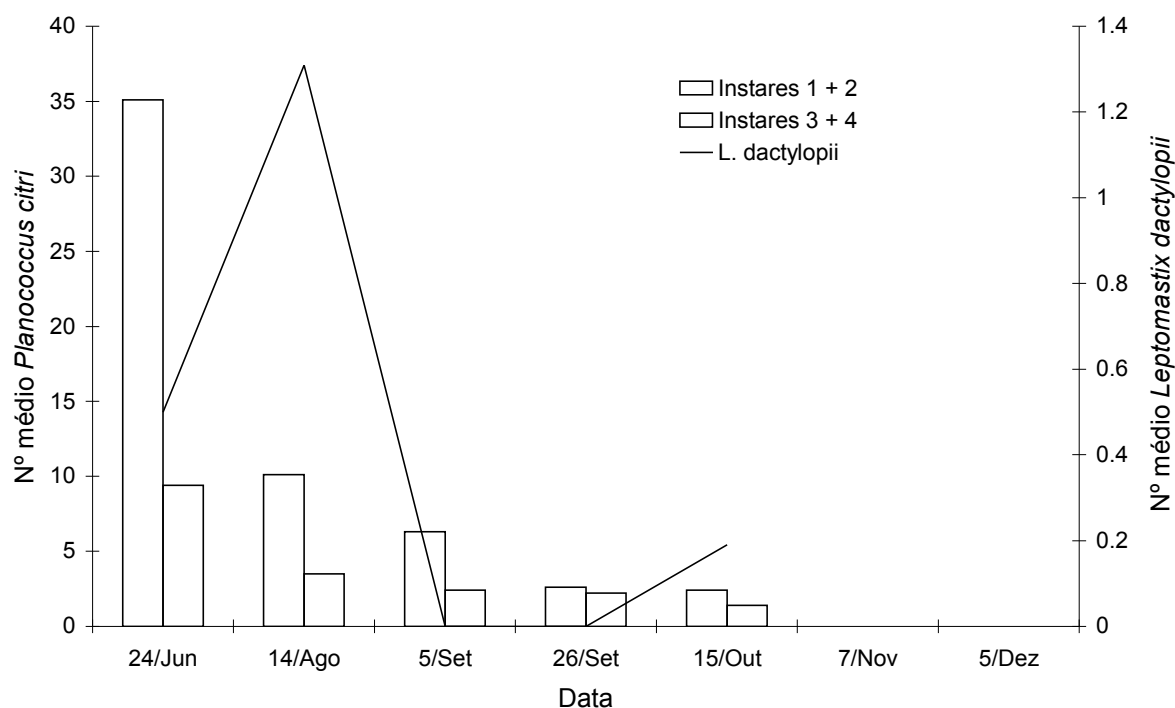


Fig 5.11 - Evolução do número médio de *Planococcus citri* (Risso) e *Leptomastix dactylopii* Howard para mostras de 16 frutos após tratamento com este parasitóide (5000 indivíduos) no início de Junho num pomar em Portugal, Estação Experimental de Tavira, Tavira em 1996.

Pela análise das Figs 5.8 a 5.11 pode-se verificar que em todas os locais o número de terceiros e quartos instares de *P. citri* não passaram os 10 indivíduos. Nas Figs. 5.9 e 5.10 as populações de *P. citri* foram relativamente baixas durante todo o ano e que a partir de uma determinada altura as

populações de *P. citri* desapareceram do pomar. Se na Fig. 5.9 (Barrocal) o número de *L. dactylopii* emergidos está na mesma ordem de grandeza como o número dos seus hospedeiros no terceiro e quarto instares, já na Fig 5.10 (Pereirinha) o número de *L. dactylopii* emergidos é muito inferior ao número de hospedeiros observados. Estes resultados são pois contraditórios. Se no pomar Barrocal em Messines (Fig. 5.9) *L. dactylopii* poderá ter contribuído em muito para a limitação da população de *P. citri*, o mesmo não se poderá dizer sobre o pomar na Pereirinha em Moncarapacho (Fig. 5.10). Em ambas as Figs. 5.8 e 5.11 o número de *L. dactylopii* emergidos oscilaram ao longo do ano tanto para o pomar da Estreitinha em Santiago do Cacém como para a Estação Experimental de Tavira mas este número manteve-se sempre abaixo do número potencial de hospedeiros.

5.3 Estudos matemáticos sobre *Leptomastix dactylopii* Howard

5.3.1 Taxa diária de desenvolvimento, longevidade da fêmea e fecundidade dependentes da temperatura

O efeito da temperatura sobre o desenvolvimento e longevidade de *L. dactylopii* foi estudado por diversos autores (para referências ver o Quadro 5.1). Tingle & Copland (1988) estudaram o efeito de temperaturas variáveis sobre o desenvolvimento do ovo e larva do parasitóide. Estes autores mostraram que temperatura variável (aplicando regimes diferentes de variação de temperatura) não teve influência sobre o desenvolvimento do parasitóide, quando comparado com temperaturas constantes equivalentes. Os resultados também permitiram localizar experimentalmente os limites superior e inferior para o zero de desenvolvimento, aliás, resultado concordante com o valor teórico obtido.

Os dados de fecundidade de *L. dactylopii* em função da temperatura está limitado a um conjunto de dados não uniformes, obtidos em diversas condições (para referências ver Quadro 5.3). Neste caso, não se poderá fazer o cálculo da fecundidade em função da temperatura, pelo que, ter-se-á que se optar por um valor constante para a fecundidade do parasitóide. Esta solução de usar uma constante em lugar de uma variável como elemento de construção de uma simulação, foi referida por Jørgensen (1988).

Material e métodos

Utilizou-se o modelo mecanicista de Sharpe & DeMichele (1977) (A2.12) transformado por Schoolfield et al. (1981) para fazer a previsão de desenvolvimento (de ovo a adulto) de *L. dactylopii* em função da temperatura. A estimativa de coeficientes foi realizada com GENSTAT 5 (Payne et al. 1994), aplicando o algoritmo modificado de Fletcher-Powell que trabalha por diferenças numéricas. Os valores iniciais foram estabelecidos tomando como referência os valores apresentados em Sharpe & DeMichele (1977) e Schoolfield et al. (1981).

Os dados originais foram seleccionados da bibliografia, como períodos de desenvolvimento de *L. dactylopii* a diferentes temperaturas constantes. A transformação destes dados em taxas foi obtida de acordo com a fórmula (4.1).

Retirando parâmetros do modelo (A2.12), este pode ser restrito à porção inferior, intermédia ou superior da curva de taxa de desenvolvimento (Wagner et al. 1984, ver Capítulo 3.2.3). Esta capacidade do modelo permite o ajustamento dos dados a uma equação com quatro parâmetros para prever a taxa de envelhecimento para fêmeas em postura. Também se considerou que a taxa de envelhecimento de fêmeas em postura aumenta de forma semelhante a uma exponencial com o aumento de temperaturas. Para se atingir este objectivo, retirou-se o último termo do denominador, uma vez que se admite que não existe redução na taxa de envelhecimento por efeito de temperaturas elevadas.

No caso do cálculo da curva de taxa de desenvolvimento determinaram-se todos os seis parâmetros da equação (A2.12).

Recolheram-se os valores de fecundidade de *L. dactylopii* da bibliografia e determinou-se pela mediana o valor constante para a fecundidade do parasitóide.

Resultados

Os valores do Quadro 5.1 mostram uma tendência para o decréscimo do período de desenvolvimento de *L. dactylopii* com o aumento de temperatura até 35°C. Após este valor, o período de desenvolvimento aumenta outra vez. Em relação à longevidade, registou-se redução contínua dos seus valores com o aumento da temperatura.

Quadro 5.1 - Período (dias) de desenvolvimento e de longevidade de *Leptomastix dactylopii* Howard em função da temperatura (* valor estimado)

Temperatura (°C)	Desenvolvimento	Longevidade	Referência
10		126,83	Battaglia et al. (1992)
13,15	Zero de desenvolvimento*		Tingle & Copland (1988)
15	181,82*		Tingle (1985)
		28,84	Battaglia et al. (1992)
17,5	45,3		Tingle (1985)
20	33,3		Tingle (1985)
		23,58	Battaglia et al. (1992)
24	18,5		Tingle (1985)
25	17,25		Battaglia et al. (1996)
		22,67	Battaglia et al. (1992)
26	15,3		Tingle (1985)
		18,9	Carvalho (1994)
28			Parera (1990)
30	12,5	8,21	Battaglia et al. (1992)
35	12,3		Tingle (1985)
		5,20	Battaglia et al. (1992)
40	19,23*		Tingle & Copland (1988)

Foi encontrada convergência para todos os parâmetros nas duas curvas ajustadas, taxa de desenvolvimento e taxa de envelhecimento (Quadro 5.2). Os valores de F em ambos os casos são elevados ($p < 0,05$) mostrando uma boa selecção dos modelos ajustados. O valor de R^2 para a taxa de desenvolvimento é elevado, mostrando um bom ajustamento dos dados ao modelo. O valor de R^2 para

a taxa de envelhecimento não é tão elevado como o valor obtido no caso anterior, mas ainda é aceitável para a descrição de um processo biológico. Os valores calculados para cada parâmetro estão dentro ou próximo dos valores apresentados por Sharpe & DeMichele (1977), Schoolfield et al. (1981) e Wagner et al. (1984) para organismos poiquilotérmicos.

Tal como previsto, a evolução da taxa de desenvolvimento de *L. dactylopii* de acordo com a temperatura tem a forma de uma curva típica, como descrito por Wagner et al. (1984) (ver Capítulo 3.2.3). De acordo com o modelo ajustado, *L. dactylopii* é uma espécie que atinge a taxa de desenvolvimento mais rápida para a temperatura 33°C (Fig. 5.12).

Quadro 5.2 - Cálculo dos valores dos parâmetros da equação (A2.12), com GENSTAT 5, usando o algoritmo modificado de Fletcher -Powell para a taxa de desenvolvimento e de envelhecimento de *Leptomastix dactylopii* Howard, em função da temperatura.

Desenvolvimento	Amplitude temperatura (°C)	Parâmetro	Valores iniciais	Valores determinados	R ²	Valor F
ovo - adulto	13,15 - 40	□(25°C)	--	0,06367	0,986	308,09
		ΔH_A^\ddagger	9000	11457		
		□H _L	-32000	-71961		
		$T_{1/2L}$	279	290,91		
		□H _H	64000	54986		
		$T_{1/2H}$	300	310,40		
Envelhecimento	10 - 35	□(25°C)	--	0,05984	0,914	41,95
		ΔH_A^\ddagger	8000	20778		
		□H _L	-40000	-230024		
		$T_{1/2L}$	280	281,7		

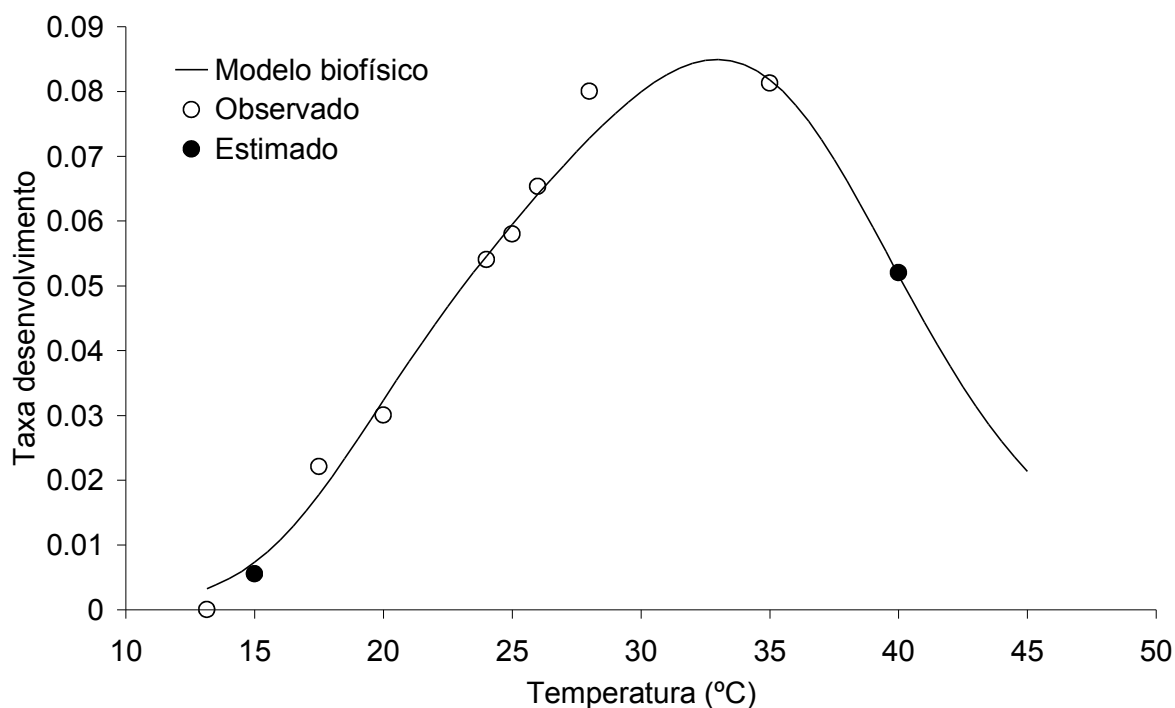


Fig. 5.12 - Evolução de taxa de desenvolvimento de *Leptomastix dactylopii* Howard em função da temperatura. Dados do Quadro 5.1, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 5.2.

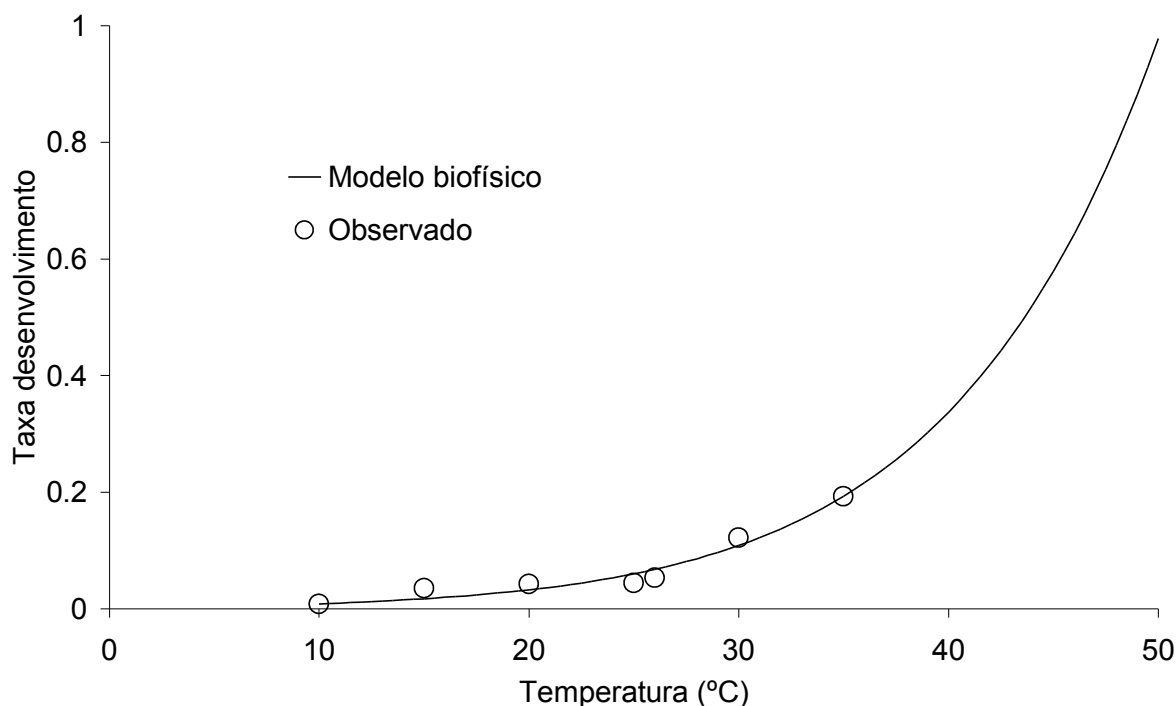


Fig. 5.13 - Evolução de taxa de envelhecimento de *Leptomastix dactylopii* Howard em função da temperatura. Dados do Quadro 5.1, ajustados ao modelo de Sharpe & deMichele (1977) (A2.12) com os parâmetros do Quadro 5.2.

A longevidade (ou a taxa de envelhecimento aumenta) de *L. dactylopii* decresce continuamente com a temperatura, de forma exponencial (Fig. 5.13). Este resultado é partilhado por outros autores (Clemente 1950, Zinna 1960b, Garrido & del Busto 1988, Battaglia et al. 1992), mas não é confirmado por Tingle & Copland (1989) que afirmam que a temperatura em que a longevidade é mais longa é para 26°C.

Quadro 5.3 - Fecundidade efectiva (número de descendentes emergidos) de *Leptomastix dactylopii* Howard.

Fecundidade	Temperatura (°C)	Condições adicionais	Referência
60 - 80	28	65% H. R. fêmeas em grupo	Zinna (1960 b)
80 - 100	28	65% H.R. fêmeas isoladas	
0,67	18	5 horas postura	Tingle & Copland (1989)
1,53	22	5 horas postura	
4,27	24	5 horas postura	
3,7	26	5 horas postura	
6,2	30	5 horas postura	
2,6	34	5 horas postura	
67,7	26		Battaglia et al. (1996)

46,0	25	
62,9	25	Fêmea adulta até à idade de 1 semana sem efectuar postura
58,9	25	Pupas até à idade de 1 semana colocadas a 15°C

Poderá ser observado no Quadro 5.3 que os dados disponíveis para a fecundidade total em função da temperatura de *L. dactylopii* são limitados e heterogéneos.

Com o objectivo de se calcular a fecundidade de *L. dactylopii*, apenas se utilizaram dados de Zinna (1960b) e de Battaglia et al. (1996), uma vez que estes autores incluíram nas suas observações a fecundidade total. A mediana dá um valor de 65,3 descendentes por fêmea, mas por uma questão de simplificação, o valor 65 descendentes por fêmea será adoptado.

5.3.2 Difusão e impacto da difusão na densidade populacional

Como referido no Capítulo 3.6, difusão é o movimento de populações aparentemente sem objectivo, sem direcção e que parece ser completamente aleatório (Pielou 1977, Holmes et al. 1994, Sharov 1996). É nesta perspectiva que se irão estudar os movimentos de *L. dactylopii*.

As observações de campo durante largadas de *L. dactylopii* adultos em pomares de citrinos, mostraram que esta espécie tem capacidade imediata para se deslocar, quer por locomoção, quer por voo. Carvalho (1994) quantificou esta capacidade montando uma rede de armadilhas num pomar de citrinos. Os resultados permitiram verificar que fêmeas se conseguiram deslocar no mínimo 36 m durante um dia. Este resultado irá permitir o cálculo da taxa de difusão de *L. dactylopii* em pomares de citrinos. A partir do cálculo da taxa de difusão, propor-se-á o conceito de área de expansão e verificar-se-á qual a influencia da difusão nas densidades populacionais do parasitóide.

Os estudos que se seguem obedecem a algumas simplificações. O movimento de *L. dactylopii* será exclusivamente composto por difusão e não existirá qualquer deriva. Portanto, após os parasitóides serem largados num único ponto, o seu movimento não será influenciado por factores externos que afectem direcção e extensão das deslocações. Nestas circunstâncias, a difusão efectuar-se-á de acordo com uma forma circular, assumindo o movimento aleatório dos parasitóides e que todos os indivíduos têm a mesma capacidade de deslocação. Quando *L. dactylopii* se difunde por uma área de acordo com uma taxa específica, como estimado pelo modelo (3.27), assume-se que a densidade do insecto naquela área é homogénea. Esta suposição é contrária à teoria mostrada no modelo (3.27), o qual prevê que a densidade do insecto decresce com o aumento da distância do ponto de largada (Pielou 1977, Sharov 1996, Turchin 1998).

Material e métodos

A taxa de difusão de *L. dactylopii* foi calculada de acordo com as formulas (3.28) e (3.29). Os valores de M_i e r foram obtidos por Carvalho (1994) e Battaglia et al. (1996), respectivamente. Assumindo que o raio do círculo ocupado pelos insectos em difusão é proporcional ao tempo, a área total de expansão de *L. dactylopii* após a largada, será calculado de acordo com a fórmula (3)

$$AE_t = \pi (t \cdot V)^2 \quad (5.1)$$

AE_t - área de expansão no tempo t

O uso da área de expansão permitirá o cálculo da evolução da densidade de *L. dactylopii* em função do tempo. Para o cálculo desta evolução assume-se que as condições ambientais são estáveis, favoráveis à difusão, sem qualquer tipo de limitações para o deslocamento ou reprodução e a população de *L. dactylopii* efectuar-se-á de acordo com a taxa intrínseca de crescimento da população. Com base nestas simplificações, utilizar-se-ão os modelos (3.16), (3.19) e (5.1) para se estimar a evolução da densidade da população após a largada e ao longo do tempo, usando respectivamente o crescimento exponencial ou logístico sob difusão constante.

$$DEG_t = \frac{N_0 e^{rt}}{AE_t} \quad (5.2)$$

DEG_t - densidade de uma população em crescimento exponencial após o tempo t

N_0 - Número inicial de organismos introduzidos

$$DLG_t = \frac{N_0 K \cdot AE_t}{N_0 + (K \cdot AE_t - N_0) e^{-r_0 t}} \quad (5.3)$$

DLG_t - Densidade de uma população em crescimento logístico após o tempo t

K - capacidade de sustentação do meio

Em que $K \cdot AE_t$ refere-se ao número absoluto de cochonilhas na AE_t . Simplificando (5.3) vem (5.4)

$$DLG_t = \frac{N_0 K}{N_0 + (K \cdot AE_t - N_0) e^{-r_0 t}} \quad (5.4)$$

Resultados

Usando os valores de $M(t) = 18,86 \text{ m.day}^{-1}$ para fêmeas de *L. dactylopii* (Carvalho 1994) e o valor de r de $0,128 \text{ individuos.dia}^{-1}$ (Battaglia et al. 1996), o cálculo dos valores D e V são respectivamente $226,45 \text{ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ e $10,77 \text{ m.dia}^{-1}$.

De acordo com o estudo matemático das expressões (5.2) e (5.4) realizado no Anexo 6 e com a Fig. 5.14 pode verificar-se que a evolução da densidade de *L. dactylopii* após a sua introdução segue um comportamento semelhante aos modelos exponenciais e logísticos. No entanto, o período em que a densidade da população se mantém baixa é relativamente prolongado. A diferença existente entre as expressões (5.2) e (5.4) é o facto que no primeiro modelo o aumento de densidade de organismos tende para infinito, o que é irrealista em qualquer biótopo terrestre. Por conseguinte, o modelo (5.4)

será usado neste trabalho para fins de análise do output da simulação. Pode também verificar-se na Fig. 5.14 que no período inicial de largada de organismos, as densidades populacionais do parasitóide poderão cair para níveis muito baixos, aspecto que poderá ser factor limitante para uma luta biológica eficaz contra *P. citri*. Esta causa poderá estar na origem de insucessos verificados na luta biológica de *L. dactylopii* contra *P. citri*, em especial porque o período em que a densidade populacional do parasitóide é baixa poderá ser prolongado. Uma solução para este problema poderá ser a largada de uma quantidade muito grande de parasitóides, ou em alternativa, fazer largadas sucessivas.

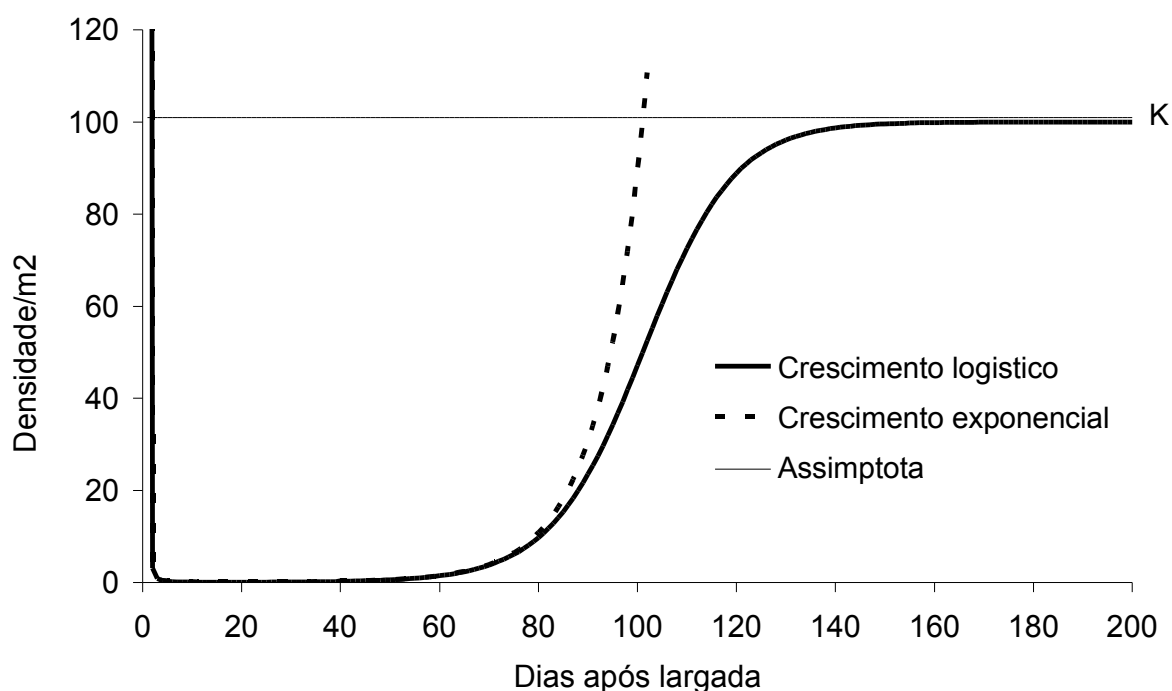


Fig. 5.14 - Evolução da densidade de *Leptomatix dactylopii* de acordo com as equações (5.2) e (5.4) considerando a população inicial $N_0 = 1000$ parasitoides, $K = 100$ cochonilhas/ m^2 , $M_t = 18,86$ m.dia⁻¹ e $r = 0,128$ indivíduos/dia.

5.4 Conclusões

De acordo com os testes de tratamento biológico de *L. dactylopii* contra *P. citri* em pomares de citrinos anteriormente referidos, pode-se concluir que a eficácia daquele parasitóide foi aleatória, muitas vezes com valores próximos de zero e poucas vezes taxas de parasitismo superiores a 50%. Em testes de comparação de tratamento biológico de *L. dactylopii* com *A. pseudococci* (Fig. 5.6 e 5.7) este último parasitóide foi mais eficaz na luta contra *P. citri*. Este tipo de resultados foi também observado por Villalba et al. (2006) em pomares de citrinos em que não encontraram qualquer diferença nas populações de *P. citri* entre pomares onde se efectuou tratamento biológico com *L. dactylopii* em relação à testemunha. Pelo contrário, outros autores referem a utilização com sucesso de *L. dactylopii* contra *P. citri* em culturas várias. Mani & Krishnamoorthy (2000) na Índia, referem uma boa eficácia de parasitismo de *L. dactylopii* contra a cochonilha algodão dos citrinos em pomares de romãs. Raciti et al. (2001) referem também para a Sicília, a contribuição importante de tratamento biológico com *L. dactylopii* na limitação de populações de *P. citri* em pomares de laranja doce.

Tal como consta no Capítulo 4, o algoritmo modificado de Fletcher-Powell poderá ser usado no ajustamento de dados ao modelo mecanístico (A2.12). A taxa de desenvolvimento mais rápida de ovo a adulto para *L. dactylopii* foi atingida para a temperatura 32-33°C.

A fecundidade foi tomada como constante para toda a amplitude de temperatura de actividade, fecundidade esta estabelecida para 65 descendentes adultos por fêmea.

Populações de *L. dactylopii* em contínua difusão terão tendência para invadir a área com uma taxa de difusão de 10,77 m.dia⁻¹, mas a densidade populacional manter-se-á residual nas fases iniciais, as quais poderão ser prolongadas.

6 SimCitri - Modelo de simulação de flutuação de populações de *Planococcus citri* (Risso) em citrinos

6.1 Introdução

SimCitri é uma simulação para computador que foi desenvolvido com base num conjunto de pressupostos e variáveis força, discutidos nos Capítulos anteriores, considerados como os mais importantes para descrever o sistema Ambiente - *P. citri* - *L. dactylopii*. Na actual versão, SimCitri inclui apenas a relação entre aquelas duas espécies e uma interpretação muito simplista do ambiente. Aspectos como a fenologia dos citrinos e a interacção de *P. citri* com as demais espécies coexistentes no pomar não foram considerados. O ambiente em SimCitri reduz-se aos factores temperatura, fotoperíodo e inimigos naturais de *P. citri*. Entre estes factores, a variável força temperatura é a mais importante porque determina o ritmo a que as transformações em SimCitri ocorrem.

Este Capítulo será dividido em cinco partes, incluindo descrição geral, desenvolvimento de SimCitri, algoritmos, análise de sensibilidade e verificação de SimCitri, discussão.

6.2 Descrição geral

SimCitri - Modelo de simulação de flutuação de populações de *Planococcus citri* (Risso) em citrinos é uma simulação para computador que tem como objectivo principal interpretar e descrever a flutuação de populações de *P. citri* ao longo da estação de produção de frutos em citrinos. Esta simulação caracteriza o sistema ciclo de vida, estruturas populacionais e padrões de distribuição espacial da cochonilha algodão quando influenciado pela actividade parasítica do encirtídeo *L. dactylopii*. O fluxograma de SimCitri está representado na Fig 6.1.

A porção base do programa SimCitri funciona numa estrutura repetitiva de um conjunto de instruções até ao momento que uma determinada condição é obtida. No decurso de cada repetição, os valores das variáveis de estado são alterados. As variáveis de estado são transformadas por intermédio de equações e/ou algoritmos, os quais foram adaptados para cálculo horário. Pormenorizando, qualquer resultado de equação que transforme valores medidos em dias é de seguida dividido por 24 para reduzir aquele valor a horas. No caso da equação utilizar variáveis auxiliares, estas são igualmente convertidas a intensidades por hora, tal como representado por (6.1).

$$x(h) = \frac{y(\text{dias})}{24} \quad (6.1)$$

Para resumir SimCitri de forma mais intuitiva, optou-se pela simbologia de Forrester (1961) para representar a simulação num diagrama relacional (Fig 6.2).

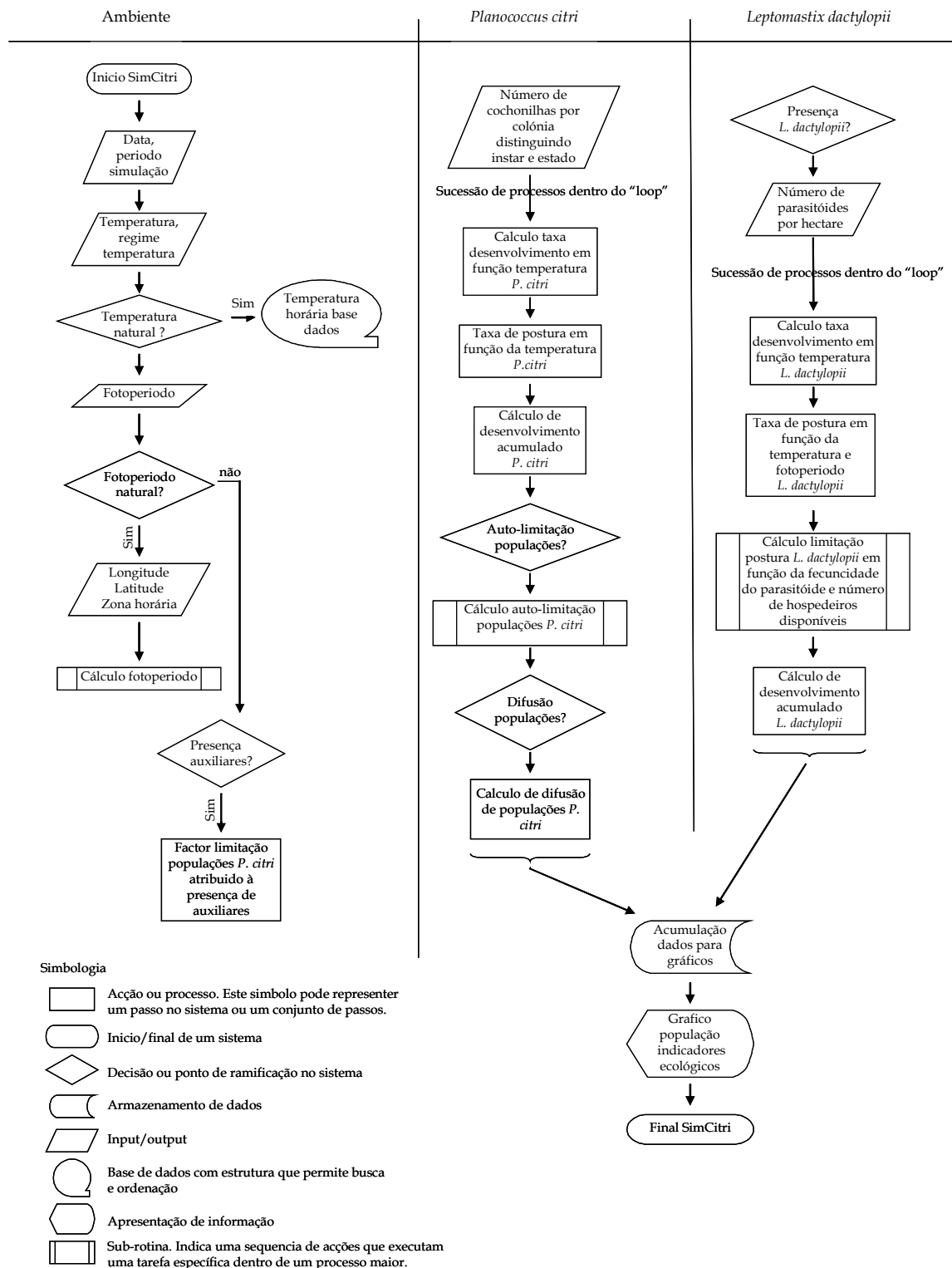


Fig. 6.1 - Fluxograma da simulação SimCitri.

Pelas Fig. 6.1 e 6.2 pode-se verificar que o sistema apresentado em SimCitri é composto por dois subsistemas. O subsistema principal inclui o ciclo de vida e os padrões de distribuição de *P. citri*. Este subsistema poderá trabalhar de uma forma completamente autônoma, simulando as tendências populacionais de *P. citri* durante um período determinado pelo utilizador. O outro subsistema representa o ciclo de vida de *L. dactylopii* e respectiva difusão. A interação entre os dois subsistemas é feita pela representação matemática de parasitismo. Os demais inimigos naturais estão agregados

característica importante em populações de pragas no campo porque torna mais difícil a aplicação de estratégias de protecção de plantas.

Pela Fig 6.1, pode-se verificar que os inputs de SimCitri são a temperatura, regime de temperatura (temperatura constante, temperatura de uma base de dados, ou temperatura com máxima e mínima e variação sinusoidal), período de simulação ou datas de início e finalização da simulação, número de parasitóides adultos largados, número de cochonilhas por colónia categorizados de acordo com os estádios atrás pré-definidos, período fixo iluminado por dia, ou em alternativa, a latitude, a longitude, a zona horária do local para cálculo do período diário natural iluminado, capacidade de sustentação do meio para a cochonilha algodão e presença ou não de inimigos naturais.

O output é visto a partir de um gráfico e por dois quadros. Para o gráfico os resultados dividem-se em número de parasitóides adultos, número de *P. citri* de acordo com os estádios pré-definidos, número total de cochonilha algodão, percentagem de frutos infestados, taxa de parasitismo de *P. citri* por *L. dactylopii* e índices ecológicos para *P. citri* de padrões de ocupação do ambiente. Os dois quadros mostram os mesmos resultados, diferem apenas no tipo de software sendo os dados de um dos quadros guardados em formato de base de dados, dados estes usados para construir os gráficos. O segundo quadro mostra os dados em formato HTML e é automaticamente guardado no ficheiro SimCitri e poderá ser consultado posteriormente.

A programação foi feita na linguagem MICROSOFT VISUAL BASIC 6.0. O programa é composto por um menu de input de dados (Fig 6.3) necessários para correr o programa. Com a função "Active period" introduz-se o período de tempo para correr a simulação. Neste caso existem duas opções, ou se coloca um período fixo em dias de simulação ou um período de acordo com datas de início e final da simulação. O período de actividade por datas tem a vantagem de permitir, numa fase posterior, o cálculo do fotoperíodo natural. A próxima função é a do regime de temperatura em "Temperature conditions".

Os valores de temperatura (em °C) podem ser colocados como constante, máxima e mínima com uma variação sinusoidal ao longo de 24 horas ou a partir de uma base de dados. A possibilidade de SimCitri ler a temperatura a partir de uma base de dados, implica o uso do software Access, em que a primeira coluna é preenchida pelo número de horas certas e a segunda pela leitura da temperatura ambiente nessas mesmas horas. O número de horas varia entre 1 e *n* (sempre um múltiplo de 24), sendo as mesmas acumuladas cada vez que é efectuada a leitura, de acordo com o seguinte exemplo (Quadro 6.1)

Quadro 6.1 - Exemplo da forma de introdução das horas e temperatura em base de dados Access para correr em SimCitri (apresentam-se os dados em linhas por uma questão de arrumação, mas na base de dados, cada campo deverá ser colocado em colunas).

Hora	1	2	3	...	23	24	25	26	...
Temperatura	18	17,6	17,2	...	22	21	20	20,5	...

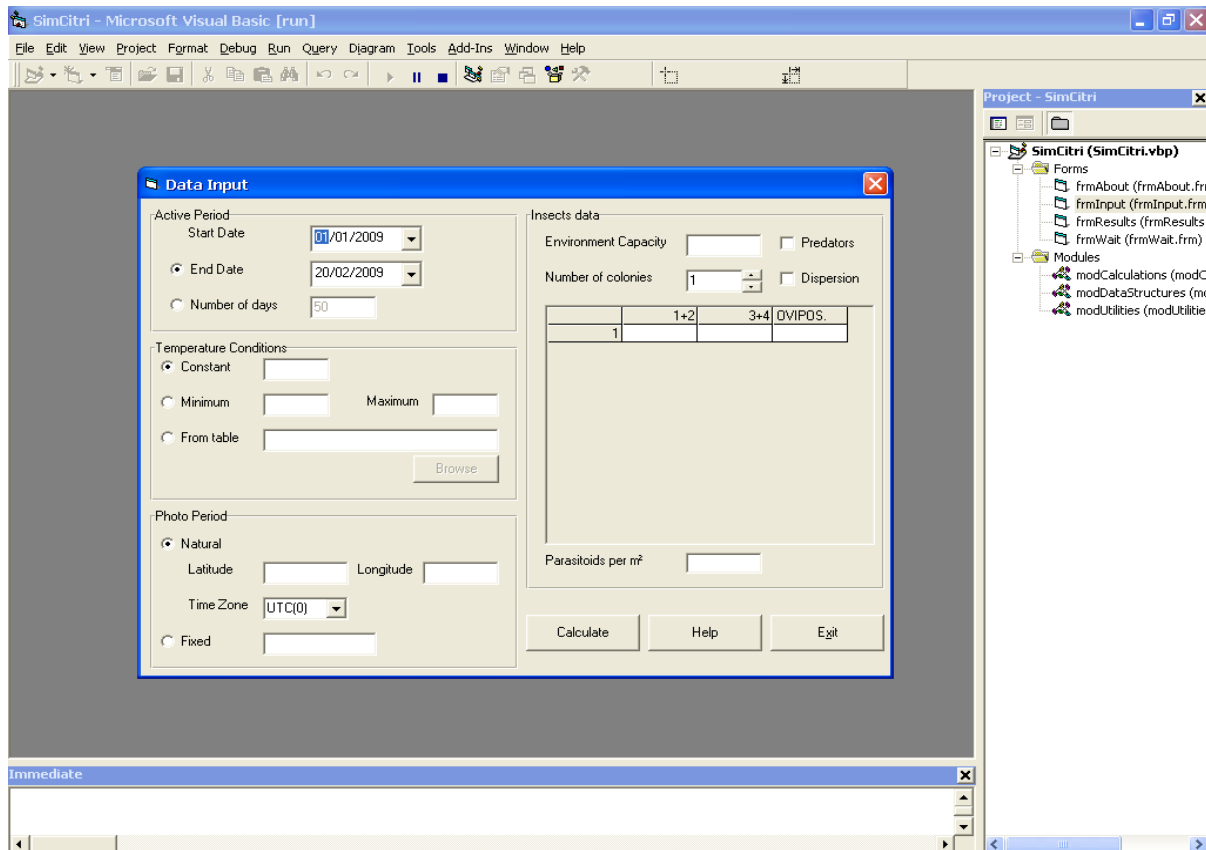


Fig 6.3 - Menu de input de dados para a simulação SimCitri.

A função “Photo period” permite colocar o fotoperíodo natural, calculado em função da data, longitude e latitude do local ou como fotoperíodo fixo, definido pelo utilizador. É importante referir que os valores de latitude e longitude deveram ser introduzidos na forma decimal de graus. Também, o fotoperíodo fixo não poderá exceder as 24 horas. Na função “Insects” introduzem-se todos os dados relativos aos insectos, nomeadamente a capacidade de sustentação do meio para *P. citri*, presença ou ausência de inimigos naturais, número de colónias de *P. citri* e respectiva composição, e número de parasitóides largados por metro quadrado. De acordo com o Capítulo 4, as populações de *P. citri* podem atingir densidades de 161,8 cochonilha equivalente por fruto. Desta forma, aconselha-se a utilização de valores limite máximos desta ordem de grandeza na realização de simulações mais realistas. Em conjunto com a capacidade de sustentação do meio existe a opção de inclusão da acção da limitação natural, representado por “Predators”. Não se quantificou a influência das populações de inimigos naturais sobre as populações de *P. citri*, mas considera-se que os predadores reduzem a capacidade de sustentação para as populações daquela cochonilha. No Capítulo 4.3.7 demonstrou-se a relação positiva entre o aumento de população de *P. citri* e de auxiliares. No espaço “Number of colonies” escreve-se ou selecciona-se o número de colónias cujos dados da sua composição se pretende introduzir na simulação. Uma vez introduzido o número de colónias, aparecerá um quadro vazio, o qual será preenchido com o número de indivíduos de *P. citri* por estado de desenvolvimento e por colónia. Cada colónia está representada por linhas e os estados de desenvolvimento por colunas. No espaço “Parasites per m²” coloca-se o número de *L. dactylopii* largados por metro quadrado.

Uma vez introduzidos os dados, pode então correr-se a simulação. Esta operação faz-se pressionando o comando “Calculate”

O menu dos resultados inclui os comandos “View Graph”, “View Table” e “View HTML”. Pressionando o comando “View Graph” mostra os resultados da simulação apresentados em gráfico, sendo a variável independente o tempo e as variáveis dependentes o número de indivíduos de cochonilha algodão em média por frutos nos diferentes estádios, média total, taxa de infestação de frutos, taxa de parasitismo de *P. citri* por *L. dactylopii*, número de parasitóides, e índices que retratam padrões de ocupação do espaço da cochonilha algodão. Qualquer destes resultados poderá ser apresentado como opção, assinalando os valores que se pretendem ver em gráfico e pressionando o comando “Show Graph”. Os comandos “View Table” ou “View HTML” mostram os resultados numéricos.

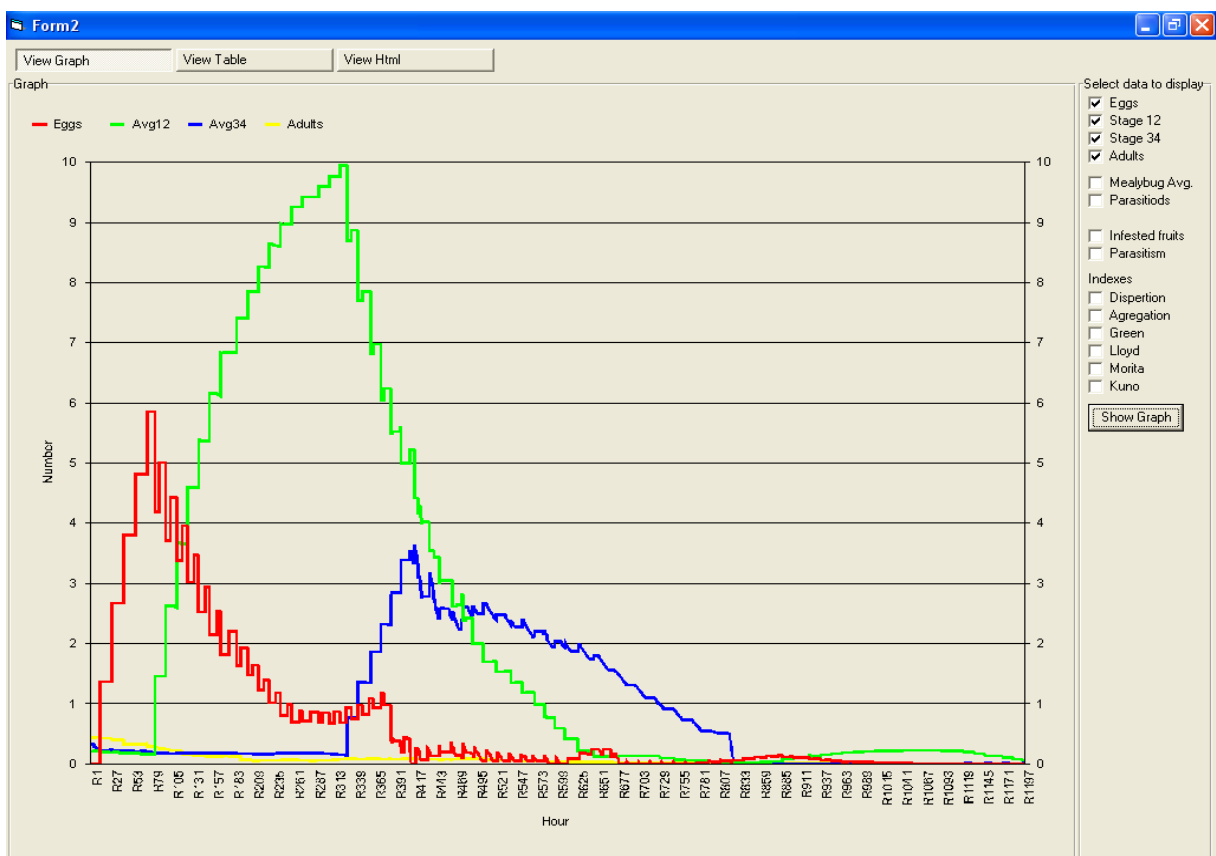


Fig. 6.4 - Exemplo de output de SimCitri em forma de gráfico representando o desenvolvimento de *Planococcus citri* (Risso) dividido pelos estádios ovo, instares 1 +2, instares 3+4 prépostura, instar 4 em postura.

Form2

View Graph View Table View Html

hourID	temperature	MB_AvgEggs	MB_Avg12	MB_Avg34	3_AvgAdults	P_Adult	InfestedFruits	MealybugAverage	Parasitism	DispersionIndex	AgregationIndex	GreenIndex	LloydIndex	Monte
0	25	0	0.1980198	0.28712872	0.39603961	2	100	0.88118815	0	0	0	0	0	0
1	25	0	0.21505377	0.31182796	0.43010753	2	92	0.95698929	0	0	0	0	0	0
2	25	0	0.21505377	0.31182796	0.43010753	2	92	0.95698929	0	0	0	0	0	0
3	25	0	0.20430107	0.3172043	0.43010753	2	92	0.95161289	0	0	0	0	0	0
4	25	0	0.20430107	0.3172043	0.43010753	2	92	0.95161289	0	0	0	0	0	0
5	25	0	0.20430107	0.3172043	0.43010753	2	92	0.95161289	0	0	0	0	0	0
6	25	0	0.20430107	0.29532692	0.43010753	2	92	0.92973554	7.491081E-3	0	0	0	0	0
7	25	0	0.20430107	0.27954677	0.43010753	1.4693878	92	0.91395539	8.075734E-3	0	0	0	0	0
8	25	0	0.20430107	0.26765192	0.43010753	1.125	92	0.90206051	6.271631E-3	0	0	0	0	0
9	25	0	0.20430107	0.24945243	0.43919054	0.88888896	92	0.89294404	8.613484E-3	0	0	0	0	0
10	25	0	0.20430107	0.24215615	0.43919054	0.71999997	92	0.88564777	2.049513E-3	0	0	0	0	0
11	25	0	0.20430107	0.23618832	0.43919054	0.59504133	92	0.87967992	2.701503E-3	0	0	0	0	0
12	25	0	0.20430107	0.23121871	0.43919054	0.5	92	0.87471032	3.072383E-3	0	0	0	0	0
13	25	0	0.19354838	0.23235797	0.43919054	0.42603549	92	0.86509681	9.714765E-3	0	0	0	0	0
14	25	1.3614079	0.19354838	0.22872925	0.41768515	0.36734694	92	0.83996278	7.196086E-3	0	0	0	0	0
15	25	1.3614079	0.19354838	0.22558744	0.41768515	0.31999999	92	0.83682096	5.128894E-3	0	0	0	0	0
16	25	1.3614079	0.19354838	0.22284107	0.41768515	0.28125	92	0.83407462	3.411817E-3	0	0	0	0	0
17	25	1.3614079	0.19354838	0.22042015	0.41768515	0.24913494	92	0.83165371	1.970303E-3	0	0	0	0	0
18	25	1.3614079	0.19354838	0.21801135	0.41768515	0.24913494	92	0.82924485	2.042883E-3	0	0	0	0	0
19	25	1.3614079	0.19354838	0.21801135	0.41768515	0.24913494	92	0.82924485	0	0	0	0	0	0
20	25	1.3614079	0.19354838	0.21801135	0.41768515	0.24913494	92	0.82924485	0	0	0	0	0	0
21	25	1.3614079	0.19354838	0.21801135	0.41768515	0.24913494	92	0.82924485	0	0	0	0	0	0
22	25	1.3614079	0.19354838	0.21801135	0.41768515	0.24913494	92	0.82924485	0	0	0	0	0	0
23	25	1.3614079	0.19354838	0.21801135	0.41768515	0.24913494	92	0.82924485	0	0	0	0	0	0
24	25	1.3614079	0.19354838	0.21801135	0.41768515	0.24913494	92	0.82924485	0	0	0	0	0	0
25	25	1.3614079	0.19354838	0.21801135	0.41768515	0.24913494	92	0.82924485	0	0	0	0	0	0
26	25	1.3614079	0.1827957	0.2233877	0.41768515	0.24913494	92	0.82386857	0	0	0	0	0	0
27	25	1.3614079	0.1827957	0.2233877	0.41768515	0.24913494	92	0.82386857	0	0	0	0	0	0
28	25	1.3614079	0.1827957	0.2233877	0.41768515	0.24913494	92	0.82386857	0	0	0	0	0	0
29	25	2.6660635	0.18478261	0.22581582	0.38961652	0.24913494	91	0.80021495	0	0	0	0	0	0
30	25	2.6660635	0.18478261	0.22336996	0.38961652	0.24913494	91	0.79776907	2.108544E-3	0	0	0	0	0
31	25	2.6660635	0.18478261	0.22108999	0.38961652	0.23332098	91	0.79548913	1.412733E-3	0	0	0	0	0
32	25	2.6660635	0.18478261	0.21895976	0.38961652	0.21896628	91	0.79335892	0.774932E-3	0	0	0	0	0
33	25	2.6660635	0.18478261	0.21696512	0.38961652	0.20589665	91	0.79136425	0.188896E-3	0	0	0	0	0
34	25	2.6660635	0.18478261	0.21509361	0.38961652	0.1939632	91	0.78949273	6.491969E-4	0	0	0	0	0
35	25	2.6660635	0.18478261	0.21333425	0.38961652	0.18303791	91	0.78773338	1.510918E-4	0	0	0	0	0
36	25	2.6660635	0.18478261	0.21167733	0.38961652	0.17301038	91	0.78607643	6.904335E-4	0	0	0	0	0
37	25	2.6660635	0.18478261	0.21011142	0.38961652	0.16378483	91	0.78451335	2.635711E-4	0	0	0	0	0
38	25	2.6660635	0.18478261	0.20863719	0.38961652	0.15527801	91	0.78303635	8.672922E-4	0	0	0	0	0
39	25	2.6660635	0.17391305	0.21265045	0.38961652	0.14741713	91	0.77618003	3.558296E-4	0	0	0	0	0
40	25	2.6660635	0.17391305	0.21130307	0.38961652	0.1401384	91	0.77482261	1.019126E-4	0	0	0	0	0

Fig. 6.5 - Exemplo de output de SimCitri em forma de base de dados representando o desenvolvimento de *Planococcus citri* (Risso) dividido pelos estádios ovo, instares 1+2, instares 3+4 prépostura, instar 4 em postura.

Form2

View Graph View Table View Html

Results location: C:\Documents and Settings\User\My Documents\Doutoramento\SimCitri3\results.html

Hour	Temperature	MB Eggs Average	MB 12 Average	MB 34 Average	MB Adult Average	Parazites Adults	Infested Fruits	Mealybug Avg.	Parasitism	Dispersion Ind.	Agregation Ind.	Green In
0	25	0	.1980198	.2871287	.3960396	2	100	.8811882	0	0	0	0
1	25	0	.2150538	.311828	.4301075	2	92	.9569893	0	0	0	0
2	25	0	.2150538	.311828	.4301075	2	92	.9569893	0	0	0	0
3	25	0	.2043011	.3172043	.4301075	2	92	.9516129	0	0	0	0
4	25	0	.2043011	.3172043	.4301075	2	92	.9516129	0	0	0	0
5	25	0	.2043011	.3172043	.4301075	2	92	.9516129	0	0	0	0
6	25	0	.2043011	.2953269	.4301075	2	92	.9297355	7.491081E-03	0	0	0
7	25	0	.2043011	.2795468	.4301075	1.469388	92	.9139554	5.807573E-03	0	0	0
8	25	0	.2043011	.2676519	.4301075	1.125	92	.9020605	4.627163E-03	0	0	0
9	25	0	.2043011	.2494524	.4391905	.888889	92	.892944	3.861348E-03	0	0	0
10	25	0	.2043011	.2421561	.4391905	.72	92	.8856478	3.204951E-03	0	0	0
11	25	0	.2043011	.2361883	.4391905	.5950413	92	.8796799	2.701503E-03	0	0	0
12	25	0	.2043011	.2312187	.4391905	.5	92	.8747103	2.307238E-03	0	0	0
13	25	0	.1935484	.2323579	.4391905	.4260355	92	.8650968	1.971476E-03	0	0	0
14	25	1.361408	.1935484	.2287292	.4176852	.3673469	92	.8399628	1.719609E-03	0	0	0
15	25	1.361408	.1935484	.2255874	.4176852	.32	92	.836821	1.512889E-03	0	0	0

Fig. 6.6 - Exemplo de output de SimCitri em forma de HTML representando o desenvolvimento de *Planococcus citri* (Risso) dividido pelos estádios ovo, instares 1+2, instares 3+4 prépostura, instar 4 em postura.

6.3 O desenvolvimento de SimCitri

Um conjunto de regras e simplificações baseadas nos assuntos versados nos Capítulos 2 a 5 foram adoptados para a construção de SimCitri. Seguindo o esquema daqueles Capítulos, SimCitri será apresentado e fundamentado.

6.3.1 Definição do Problema

Segundo o esquema para o desenvolvimento de simulações (Fig 2.2, Capítulo 2) apresentado por Jørgensen (1988) inicia-se esta exposição com a Definição do Problema. *Planococcus citri* é uma praga dos citrinos em Portugal, considerada praga-chave. Embora num pomar exista um vasto leque de inimigos naturais, as populações frequentemente entram em dinâmica de pululação e o seu combate é difícil (Franco 1997, Franco et al. 2004). Em acréscimo, a limitação natural só se torna eficiente depois dos estragos terem sido causados (Franco et al. 2004). Os auxiliares não mantêm uma presença alta suficiente para limitar as populações de *P. citri* e, no caso de tratamentos químicos contra a cochonilha algodão, as populações desses inimigos naturais também são reduzidas. Portanto, torna-se imperativo um estudo que englobe um resumo de conhecimentos e que permita avaliar de forma conceptual as tendências populacionais de *P. citri* sobre frutos em crescimento.

6.3.2 Delimitação do tempo, do espaço e subsistemas do problema

SimCitri é uma simulação que se debruça sobre os crescimentos populacionais de *P. citri* sobre citrinos ao longo da estação de crescimento de frutos, ou seja, aproximadamente de Abril/Maio a Novembro. No caso de limões ou outras variedades com frutificação recorrente, esta simulação pode ser adoptada a outras estações.

SimCitri está construída de forma a dar pormenor à interacção insecto/insecto e simplificar a interacção insecto/planta (ver 6.3.3 Dados). Por esta razão apenas se definiram dois subsistemas, sendo o mais importante o ciclo de vida do *P. citri* e o segundo o ciclo de vida de *L. dactylopii*

6.3.3 Dados

Os dados utilizados em SimCitri resumem-se a temperatura e fotoperíodo, *P. citri*, *L. dactylopii*, inimigos naturais, competição e capacidade de sustentação do meio, fecundidade e taxas de desenvolvimento e parasitismo.

Porém, tal como referido no Capítulo 2 e no Anexo 1, um modelo não é mais do que uma representação simplificada da realidade. Uma simulação como SimCitri, construída a partir da conjunção de diversos modelos é igualmente uma simplificação da realidade. Por consequência, este programa também obedece a um número de simplificações a vários níveis, nomeadamente ambiente, a cochonilha algodão enquanto hospedeiro, *L. dactylopii* como parasita e na relação cochonilha algodão/*L. dactylopii*.

Simplificações e pressupostos

Simplificações ao nível do ambiente

Espaço "pomar". O pomar é considerado homogéneo e infinitamente grande. Poderá ser imaginado como um pomar de citrinos de dimensão infinita, cuja topografia não influencia o comportamento e actividade dos organismos representados nesta simulação. As árvores são todas da mesma idade e de variedade favorável para o desenvolvimento de populações de *P. citri*. As práticas culturais também não afectam a biologia dos organismos presentes no pomar.

Factores climáticos. As condições atmosféricas em SimCitri são consideradas muito estáveis, sem precipitação e sem vento. Apenas as variáveis força luz e temperatura oscilam de acordo com um fotoperíodo e um termoperíodo. Na natureza a temperatura varia de uma forma contínua. Porém em SimCitri, a temperatura varia descontinuamente hora a hora por "saltos". Por outras palavras, a temperatura é considerada constante por períodos de uma hora após a qual poderá mudar ou não.

A presença de luz obedece a um horário imposto por um fotoperíodo, mas supõe-se que a sua intensidade seja constante. Em virtude de todos os cálculos em SimCitri ocorrerem hora a hora, também se arredondou o número de horas de luz ou de ausência de luz para a hora certa. Se o número de minutos é igual ou superior a meia hora, arredonda-se para a hora certa seguinte. Por outro lado, se o número de minutos é inferior a meia hora, arredonda-se para a hora certa anterior. Por exemplo, se o Por do Sol ocorre às 18h 35min então considera-se que o Por do Sol ocorre às 19h 00min. Em contrapartida, se o Por do Sol ocorre às 18h 29 min arredonda-se para 18h00min. O mesmo princípio também se aplica ao nascer do sol. O algoritmo utilizado em SimCitri foi obtido em Anónimo (1990) (Anexo 8), incluindo diagrama de fusos horários.

Tingle (1985) mostrou que na ausência de luz a actividade parasítica de *L. dactylopii* é significativamente reduzida. Por conseguinte no período escuro, *L. dactylopii* não se reproduz. Ao contrário do parasitóide, a cochonilha não é afectada por ausência de luz em qualquer das suas actividades de desenvolvimento ou reprodução.

Substrato para P. citri. A cochonilha apenas se alimenta e desenvolve sobre frutos. Em todo o pomar existem frutos de qualidade homogénea, aleatoriamente distribuídos, não são sujeitos a outras pragas e não caem da árvore. A qualidade e quantidade desses frutos são consideradas constantes e homogéneas ao longo de toda a estação de crescimento de *P. citri*. Como consequência, a capacidade de sustentação do meio para *P. citri* será constante ao longo da estação de crescimento dos frutos. Justifica-se esta simplificação em grande parte com base nas observações de Meyerdirk et al. (1981) (Cap. 4.2.2), o qual refere concentração das populações de cochonilha sobre os frutos. Desta forma é possível reduzir a complexidade da simulação.

Capacidade de sustentação do meio O utilizador define qual a capacidade de sustentação do meio em SimCitri. Porém, este valor está confinado entre limites inferior e superior, respectivamente zero e 162,

medido em indivíduos equivalente (Capítulo 4.3.3). Convém referir que a atribuição do valor zero rapidamente conduzirá todas as variáveis de estado ao valor nulo.

Inimigos naturais Segundo um trabalho de revisão efectuado por Franco et al. (2000), existe uma variação qualitativa e quantitativa no elenco de inimigos naturais de *P. citri* de local para local, inclusive em pomares adjacentes. As causas destas variações são múltiplas pelo que neste trabalho se simplifica a acção de inimigos naturais como sendo representados pelos predadores da família Coccinellidae e aos parasitóides *L. abnormis* e *A. pseudococci*. Observações directas em pomares de citrinos mostraram que uma vez presentes larvas de coccinelídeos sobre colónias de *P. citri*, qualquer indivíduo vivo seria devorado. Esta actividade de coccinelídeos é quase sempre acompanhada de parasitismo pelas duas espécies de parasitóides anteriormente referidas.

Tal como mencionado no Capítulo 4.3.7, existe uma relação positiva entre a densidade de *P. citri* e a presença de inimigos naturais. Porém, nenhum modelo de regressão fornece um bom ajustamento que descreva esta relação. Por conseguinte, para se simplificar a acção dos auxiliares em SimCitri, assume-se que estes actuam acima de uma determinada densidade de *P. citri* (90% da capacidade de sustentação do meio), reduzindo a capacidade de sustentação do meio a zero.

Competição com outros fitófagos. Em Portugal continental, existem três espécies, também Pseudococcidae, que podem ocupar o mesmo nicho ecológico de *P. citri*, podendo haver sobreposição de actividades em diversos períodos do ano (Franco 1997, Franco et al. 2000). No entanto, de acordo com trabalhos realizados por estes autores em diversos locais e com observações do autor em pomares de citrinos nos pomares assinalados ao longo deste trabalho, a espécie predominante sobre frutos em crescimento é *P. citri*. Um facto que poderá corroborar esta observação é a cochonilha algodão dos citrinos ser classificada como uma praga chave dos citrinos (Amaro 1994a). Por conseguinte, não se considera que *P. citri* sofra competição, sobre frutos, de outras espécies na simulação SimCitri.

Hospedeiro P. citri. Algumas simplificações sobre a biologia e comportamento de campo de *P. citri* já foram referidas no Capítulo 4. O facto de cada estágio ser dividido em sub estádios, é um artifício para simular a sobreposição de gerações. A proporção entre sexos é considerada 1:1. Como tal, na passagem de instar 1 + 2 para instar 3 + 4, o número de indivíduos é reduzido a metade. A fecundidade da cochonilha algodão é dada pela equação polinomial representada na Fig. (4.7). A taxa de desenvolvimento para cada estágio considerado, é calculada de acordo com a equação de Sharpe & DeMichele (1977) (A 2.12), usando os índices do Quadro 4.5. Considerou-se o valor 12,9°C (Tingle 1985) como o zero de desenvolvimento de *P. citri* em SimCitri. Como o modelo de Sharpe & DeMichele (1977) é mecanicista e poderá calcular a taxa de desenvolvimento para além dos dados experimentais, não foi considerada uma temperatura máxima de desenvolvimento. Não se considerou a mortalidade de *P. citri* que poderá resultar de exposição directa prolongada a altas temperaturas. O desenvolvimento, fecundidade, sobrevivência ou actividade de *P. citri* não são afectadas pelo fotoperíodo ou intensidade luminosa.

Foi considerado que os machos de *P. citri* estão omnipresentes para acasalamento com as fêmeas. Como tal, os machos adultos da cochonilha não são simulados em SimCitri.

O crescimento da colónia é determinado pelo modelo logístico e condicionado pela capacidade de sustentação do meio. Este índice foi calculado de uma forma empírica e não considera qualquer efeito competitivo ou mutualista entre indivíduos da colónia, e, neste caso, alguns processos biológicos ou ecológicos poderão ser sub estimados ou sobre estimados como por exemplo velocidade de crescimento ou sobrevivência.

Alguns estudos da biologia sobre *P. citri* foram realizados sobre os mais diversos substratos e condições de laboratório, com recurso a alimentos distintos (ver Capítulo 4). Para simplificar, a qualidade do alimento no campo, fruto de citrinos, é sempre suposta ser óptima para o desenvolvimento da cochonilha e de características similares aos alimentos utilizados em estudos de laboratório.

Na maioria dos estudos sobre desenvolvimento de *P. citri*, a temperatura foi mantida constante. De acordo com Copland (comunicação pessoal), não é de admitir diferenças significativas na taxa média de desenvolvimento da cochonilha algodão entre temperatura continuamente oscilante e temperatura descontinuamente oscilante em que a temperatura é mantida constante durante o intervalo de uma hora, alterando-se o valor na hora seguinte.

Os números utilizados para representar indivíduos numa colónia são reais. Na natureza é impossível encontrar-se 1,1 ou 3,9 indivíduos mas sob o ponto de vista de um modelo ecológico estes valores tem significado porque a porção decimal do número corresponde por exemplo a uma densidade média ou valores base de partida para crescimento da população na próxima geração. Caso a parte decimal do número fosse removida, o crescimento da população seria subestimado. No entanto, para permitir SimCitri simular a difusão de *P. citri*, não poderá existir menos de um indivíduo na colónia.

SimCitri pode simular a formação de novas colónias utilizando o modelo de Wilson & Room (1983) (Capítulo 4.3.6), até um número máximo de 100. A formação de novas colónias só ocorre se existirem indivíduos que são removidos de colónias pré existentes através da função logística.

Parasitóide L. dactylopii. Algumas simplificações referidas no Capítulo 6.3.2 para *P. citri* serão adaptadas para as simplificações da biologia e ecologia de *L. dactylopii*. Também algumas simplificações sobre a biologia e comportamento de campo do parasitóide já foram referidas no Capítulo 5. O facto de cada estágio ser dividido em sub estádios, é um artifício para simular a sobreposição de gerações. A proporção entre sexos é considerada 1:1. Como tal, na passagem de estado sub imaginal a adulto o número de indivíduos é reduzido a metade. A fecundidade máxima do parasitóide é considerada 65 ovos por fêmea. Considerou-se o valor 13,2°C (Tingle & Copland 1988) como o zero de desenvolvimento de *L. dactylopii* em SimCitri A taxa de desenvolvimento para cada estágio de desenvolvimento é calculada de acordo com a equação de Sharpe & DeMichele (1977) (A2.12), usando os índices do Quadro 5.2. Como o modelo de Sharpe & DeMichele (1977) é mecanicista e poderá calcular a taxa de desenvolvimento para além dos dados experimentais, não foi

considerada uma temperatura máxima de desenvolvimento. Não se considerou a mortalidade de *L. dactylopii* que poderá resultar de exposição prolongada a altas temperaturas. *L. dactylopii* é um parasitóide exclusivo e específico da cochonilha algodão no campo.

Uma vez largado, *L. dactylopii* segue um movimento de difusão sem qualquer tipo de limitação ou obstáculos, excepto da temperatura e fotoperíodo. Considera-se também que o ambiente pomar de citrinos é óptimo para a difusão do parasitóide. Durante a “noite” e para temperaturas abaixo de 21°C os parasitóides adultos não se movem ou fazem postura. A presença dos parasitóides na área de expansão é perfeitamente aleatória.

L. dactylopii não é afectado por competição intra-específica ou inter-específica, não é predado, não tem hiperparasitóides e não sofre doenças. Também não se considera a possibilidade de superparasitismo.

Relação parasitismo P. citri – L. dactylopii Assumiu-se que a busca de *P. citri* por parte do parasitóide é aleatória e que este não tem possibilidade de efectuar uma busca dirigida do hospedeiro.

A postura das fêmeas está condicionada de acordo com o modelo de Rogers (1972) (3.40). Selecionou-se este modelo porque é simples na sua concepção e pormenorizado, contém variáveis que são fáceis de calcular em tempo de simulação e apenas o factor *a* (área de descoberta) não é conhecido. Como se verá no Capítulo 6.5.3 efectuar-se-ão simulações para diferentes valores daquele parâmetro para se verificar a influência da área de descoberta na eficácia de parasitismo.

Quando uma cochonilha é parasitada, é imediatamente considerada morta, apesar de alguns autores referirem que nos dois ou três primeiros dias de parasitismo ainda possam desenvolver uma actividade normal. Também as cochonilhas parasitadas por *L. dactylopii* não sofrem multiparasitismo, hiperparasitismo e não são predadas.

Variáveis

SimCitri necessita de uma quantidade elevada de variáveis para o seu funcionamento. As variáveis envolvidas nesta simulação podem ser classificadas em variáveis força, variáveis de estado, variáveis auxiliares e parâmetros. As variáveis força estão relacionadas com valores introduzidos pelo utilizador, por exemplo temperatura e fotoperíodo. Algumas variáveis estado também são inseridas pelo utilizador, por exemplo o número de parasitóides por m². Existem também variáveis auxiliares as quais são calculadas com base nas variáveis força e permitem a transformação das variáveis de estado. Finalmente, existe um conjunto de parâmetros (ou constantes) que entram em algumas equações (Anexo 9), como por exemplo a área de descoberta de *L. dactylopii* sobre *P. citri*, ou a capacidade de sustentação do meio.

6.4 Representação de insectos em SimCitri

O número de insectos em SimCitri está representado por matrizes de desenvolvimento (Fig. 7.2, Anexo 7). A distribuição dos estados de desenvolvimento de ambas as espécies retratadas nesta simulação obedece a princípios ecológicos e facilita a quantificação das relações entre *P. citri* e *L.*

dactylopii. Assim sendo, *P. citri* encontra-se dividido nos estados de ovo, instares 1 + 2, instares 3 + 4 pré-postura e fêmeas adultas. Cada um destes estádios está representado por matrizes de uma dimensão respectivamente de comprimento 1 x 10, 1 x 60, 1 x 75 e 1 x 13. O parasitóide está dividido em estados imaturos e imagos. Todos os estados imaturos de *L. dactylopii* são passados no interior do corpo do hospedeiro (Carvalho 1994). Os adultos são insectos alados de vida livre e portanto justifica-se a divisão considerada entre imaturos e imagos para SimCitri. Na simulação, tanto os estados imaturos como os imagos de *L. dactylopii* estão representados por uma matriz linha, de dimensão 1 x 135 para os estados imaturos e de dimensão 1 x 6 para os adultos. Quando existe emergência de adultos de parasitóides, o seu número é reduzido a metade porque apenas as fêmeas tem interesse ecológico para o modelo por parasitarem *P. citri*. Os machos de *L. dactylopii* consideram-se omnipresentes e portanto não são factor limitante para a reprodução do parasitóide.

Todo o ciclo de vida de *P. citri* está dividido em quatro matrizes, conforme assinalado anteriormente. Cada conjunto de quatro matrizes forma uma colónia e cada colónia ocupa um fruto. Em SimCitri considerou-se um máximo de 100 colónias como representantes do pomar. Na passagem da matriz instares 1 + 2 para a matriz instares 3+ 4, o número de indivíduos é reduzido a metade porque a seguir ao 2º instar cerca de metade da população transforma-se em machos. Apenas as fêmeas são susceptíveis de parasitismo por *L. dactylopii* e por conseguinte têm interesse para a simulação.

6.5 Algoritmos

SimCitri utiliza diversos algoritmos os quais podem ser divididos em algoritmos não matemáticos e algoritmos matemáticos. Pode estabelecer-se um paralelo entre este último tipo de algoritmos e as equações referidas por Jørgensen 1988) (Fig 2.2). Por consequência, os algoritmos matemáticos serão abordados no Capítulo 6.5.2.

6.5.1 Algoritmos não matemáticos

Este tipo de algoritmos não envolvem cálculos e não fornecem resultados numéricos. Estes algoritmos apenas alteram a condição da simulação, em especial das variáveis de estado, muitas vezes em proporção dos resultados dos algoritmos numéricos.

O algoritmo mais importante é o de desenvolvimento/envelhecimento. Este algoritmo é aplicado da seguinte forma: os valores discretos obtidos no algoritmo de desenvolvimento são somados num contador (ver Capítulo 3 eq. 3.4) e são aplicados à última célula da matriz de desenvolvimento. Quando o valor do contador é igual ou superior a (6.2),

$$\text{Unidade de desenvolvimento} = \frac{1}{\text{número subestádios do instar}} \quad (6.2)$$

O número de indivíduos na última célula passa para a próxima matriz, para a primeira célula, ou o número de insectos “salta” das últimas células de uma matriz para a primeira células na matriz correspondente ao estádio de desenvolvimento seguinte, de acordo com um valor proporcional à

unidade de desenvolvimento (Fig. 6.7). Como consequência obtém-se sobreposição de gerações. Este processo é repetido para todas as células da matriz de desenvolvimento, iniciando-se no sentido da última célula para a primeira. Após o movimento, o valor da célula é transformado em zero. O envelhecimento dos indivíduos é obtido da mesma forma que o desenvolvimento, mas um salto para além da última célula nos indivíduos adultos significa que estes deixam de existir.

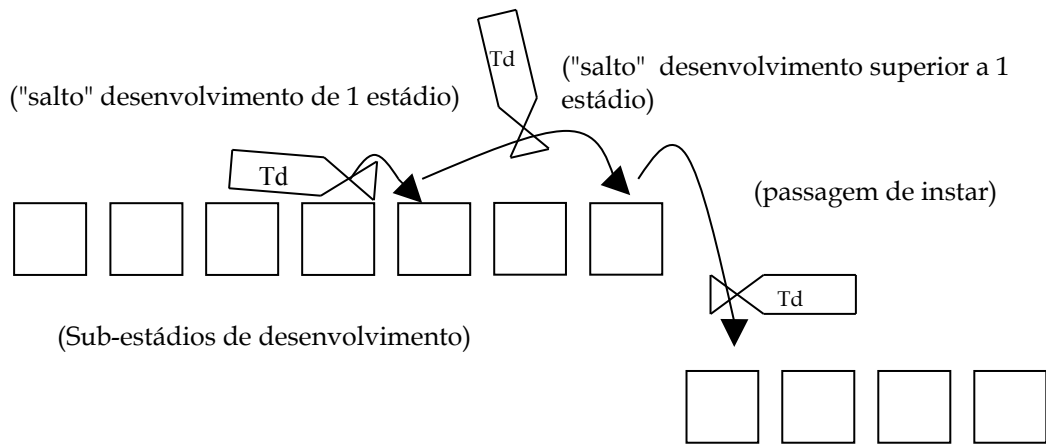


Fig 6.7 – Exemplo de funcionamento do algoritmo de desenvolvimento em SimCitri (Td- Taxa desenvolvimento).

6.5.2 Algoritmos matemáticos

Os algoritmos matemáticos de SimCitri poderão ser distinguidos entre essenciais e derivados. Os algoritmos essenciais são aqueles cuja ausência impede a execução da simulação. Estes algoritmos estão representados pelos modelos de bio-ecologia e comportamento de campo de ambos os insectos *P. citri* e *L. dactylopii* e pelo algoritmo que permite acumular horas de simulação. Estes modelos são (A2.12) modelo para o desenvolvimento e envelhecimento (Capítulo 4.3, Anexo 2), (A2.6) o modelo para a fecundidade potencial (Capítulo 4.3, Anexo 2), modelo de Rogers (1972), (3.40) modelo para parasitismo insecto/insecto (Capítulo 3.7.3), e modelo de Skellam (1951) (3.27) para a difusão de seres vivos (Capítulo 3.6).

Período de simulação. SimCitri é uma simulação que trabalha com base em temperatura ao longo do tempo (3.3). O tempo em SimCitri é medido em saltos correspondente a cada ciclo da programação. A partir do momento que as datas ou período de tempo da simulação são accionados, um contador determina o número de ciclos executados no programa. Para o caso de datas serem introduzidas no programa, o número de dias entre cada data é calculado e só então a simulação se inicia. Por cada ciclo do programa, um contador que soma horas e consequentemente dias é accionado. O contador para o número de dias é representado por (6.3)

$$\text{Número dias} = \frac{\text{número de ciclo}}{24} \quad (6.3)$$

O resto desta divisão é equivalente à hora de cada dia.

Em SimCitri apenas será possível utilizar-se o algoritmo para os horários do Nascer e Por do Sol se datas do ano forem introduzidas. Se um período de tempo for indicado de início, O algoritmo do Nascer e Por do Sol, não funcionará.

Temperatura. Como referido em 6.2, a temperatura poderá ser introduzida sob a forma de temperatura constante, máxima e mínima cuja variação será sinusoidal, ou a partir de uma base de dados. Para obtenção de valores de temperatura para cada "hora" na opção sinusoidal, as seguintes equações foram utilizadas (6.4, 6.5)

$$T_h = Amplitude \times \sin(HoraAngular_h) + T_{min} \quad (6.4)$$

Em que T_h representa a temperatura à hora h que varia entre 1 e 24, *Amplitude* é a diferença entre T_{max} e T_{min} . A *HoraAngular* poderá ser definida como (6.5)

$$HoraAngular_h = \frac{h\pi}{24} \quad (6.5)$$

Distribuição de indivíduos por idade aleatória. Quando o número de indivíduos de ambas as espécies de insectos considerados em SimCitri é distribuídos pelas matrizes, assume-se que a idade de cada indivíduo não é conhecida. Esta suposição é especialmente verdadeira quando as observações de *P. citri* e *L. dactylopii* foram feitas no campo, ou, no laboratório de criação em massa do parasitóide. Desta forma foi necessário criar um sistema aleatório de distribuição de cada indivíduo pelas matrizes de desenvolvimento. A localização de cada indivíduo na matriz linha de dimensões [1, j] será (6.6).

$$\text{Localização na matriz} = \text{número aleatório} \times j \quad (6.6)$$

Sendo $0 \leq \text{número aleatório} \leq 1$. À célula da matriz correspondente ao resultado (6.6) adiciona-se o valor um, ou seja, um indivíduo. Esta operação é repetida tantas vezes, quanto o número total de indivíduos a introduzir na matriz.

Contador de desenvolvimento. Associado às equações de desenvolvimento, foi introduzido um contador para simular o avanço no estado de desenvolvimento de cada insecto. O contador (C) é definido adoptando a equação (3.4) para uma base horária (6.7)

$$C = \frac{1}{24} \sum_{t_0}^{t_M} r_T \quad (6.7)$$

Em que $0 \leq C \leq 1$ representa o desenvolvimento acumulado. Uma vez que C atinge o valor 1 o desenvolvimento para o estágio considerado é alcançado. O valor r representa a taxa diária de desenvolvimento a uma temperatura constante T , de acordo com o modelo (A2.12). Como SimCitri foi construído para executar a simulação em cada hora do sistema cochonilha/parasitóide, r deverá ser dividido por 24, pois os cálculos no Capítulo 4.3 foram feitos numa base diária

Auto limitação logística das populações. As populações de *P. citri* representadas por conjuntos de números em SimCitri estão também sujeitas a um conjunto de manipulações matemáticas que tentam reproduzir a auto limitação do número de indivíduos por colónia. O algoritmo desenvolvido para computador foi baseado na equação (3.21) e adaptado a matrizes de desenvolvimento (6.8).

$$A_{t+1} = A_t e^{\left(r_0 \left(1 - \frac{\text{cochonilha equivalente}}{K} \right) \right)} \quad (6.8)$$

Onde A representa qualquer uma das matrizes linha para *P. citri* para todos os estádios, excepto ovos, t representa o tempo, r_0 representa a taxa intrínseca de crescimento da população e toma o valor 0,24, K representa a capacidade de sustentação do meio (atribuído pelo utilizador na fase de introdução de dados) e cochonilha equivalente é definido por (6.9)

$$\text{cochonilha equivalente} = \text{instares 3 + 4 antepostura} + \frac{\text{instares 1 + 2}}{50} \quad (6.9)$$

De acordo como Capítulo 4.3.3, considerou-se que a cochonilha equivalente para instares 3 + 4 tomariam o valor 1 e os instares 1 + 2 tomariam um valor 50 vezes menos intenso.

A proporção $e^{r_0 \left(1 - \frac{\text{Cochonilha equivalente}}{K} \right)}$ (representado por r na equação 3.21) é calculada hora a hora e individualmente para cada colónia, limitada ao valor máximo um e depois é multiplicada pelo número de indivíduos presentes em cada célula de cada colónia e para os estados de desenvolvimento de ovo, instares 1+2 e instares 3 + 4 pré-postura. No caso da proporção r se encontrar entre o intervalo $0 < r < 1$, alguns indivíduos saem da colónia, indivíduos esses que vão ocupar outras colónias, caso se pretenda observar difusão de populações de *P. citri* em SimCitri.

Auxiliares. A acção de predadores e outros organismos sobre colónias de *P. citri* em SimCitri está integrado no factor "ambiente". O factor ambiente nesta simulação está representado pela função logística, função que inclui a capacidade de sustentação do meio. A acção de "predação" foi incluída na função logística. Então quando existem predadores nas colónias, a proporção (6.6) decresce passando a ser 0.

Dispersão de P. citri. Para simular a dispersão de *P. citri* sobre frutos num pomar de citrinos em SimCitri, utilizou-se o modelo de Wilson & Room (1983) (3.12). O parâmetro m deste modelo representa o número médio de indivíduos de todas as matrizes de desenvolvimento, excluindo ovos, para todas as colónias. Os parâmetros a (4,2) e b (0,7) foram obtidos em Franco (1997). Após a proporção de frutos infestados no pomar ser calculada, esta é multiplicada por 100 para se obter o número de colónias infestadas em função da densidade média de *P. citri*. Lembra-se que se estabeleceu um número máximo de 100 colónias de *P. citri* em SimCitri, considerando este número como suficiente para transmitir exactidão e ser simples suficiente para avaliar o programa. Após a determinação do número de colónias infestadas para determinada densidade média de *P. citri*, o algoritmo verifica qual o número de colónias que contém qualquer estádio de desenvolvimento e compara com o número de colónias que deveriam estar infestadas. Caso o número de colónias infestadas seja superior ao número dado pelo modelo de Wilson & Room (1983), nenhuma operação é

executada. Caso o número de colónias infestadas seja inferior ao número de colónias infestadas dadas pelo modelo, então o número de colónias infestadas é ajustada ao número dado pelo modelo. Como assinalado anteriormente, os indivíduos que saem de uma colónia por intermédio da função logística vão ocupar aleatoriamente outras colónias, colónias já ocupadas por outros indivíduos ou não.

$$N_f = N_p + N_{\text{logística}} \quad (6.10)$$

Em que

N_f - representa o número final de indivíduos por célula por matriz de desenvolvimento

N_p - o número de indivíduos presentes na mesma célula

$N_{\text{logística}}$ - o número de indivíduos que sai da função logística e se vão juntar a N_p

Fecundidade de L. dactylopii. De acordo com a discussão realizada no Capítulo 5.3.1, estabeleceu-se a fecundidade de *L. dactylopii* em 65 ovos. De acordo com Carvalho (1994) o período de postura das fêmeas de *L. dactylopii* coincide com a longevidade do estado adulto ou apenas um pouco mais curto. Considerando que o período de postura da fêmea adulta coincide com o período de vida do estado adulto propõe-se a equação (6.11) que é válida para um período de 1 "hora".

$$\text{Taxa postura}_T = 65 \times \text{taxa envelhecimento}_T \quad (6.11)$$

Em que T representa a temperatura. A equação (6.11) mostra que a taxa de postura está directamente relacionada com a taxa de envelhecimento por cada hora a uma determinada temperatura. Como a taxa de envelhecimento para insectos em SimCitri é calculada numa base "horária" e como o somatório da taxa de envelhecimento nunca será superior a um para todo o período de vida da fêmea *L. dactylopii* na simulação, a postura nunca será superior a 65 ovos. A equação (6.11) traduz-nos apenas que quando a fêmea do parasitóide envelhece mais rápido, põe mais ovos.

Modelo de parasitismo. O modelo de parasitismo adoptado em SimCitri foi o de Rogers (1972). Na adaptação da equação para o programa de simulação, algumas simplificações foram executadas. Os parâmetros H e q (3.40) para o número de hospedeiros (*P. citri*) e proporção de fêmeas de parasitóides, respectivamente, estão representados já nas matrizes de SimCitri. O início do algoritmo começa com o cálculo da proporção de coconilhas sobreviventes com a equação (6.12) derivada de (3.40)

$$O_{H_{t+1}} = e^{\frac{aP_t F_{\max}}{F_{\max} + aH_t}} \quad (6.12)$$

Onde à área de descoberta a foi atribuído o valor indicativo de 0,1, H está representado pelo número de coconilhas representado pela matriz dos instares 3+4 e O representa proporção.

O modelo de Rogers (1972) (equação 3.40, Capítulo 3) obriga ao uso de F_{\max} e de a . F_{\max} diária poderá ser calculada de acordo com a equação (6.13) para uma determinada temperatura,

$$F_{\max d} = \frac{\text{Fecundidade}}{\frac{1}{D(T)}} \quad (6.13)$$

Em que, $F_{\max d}$ representa a fecundidade diária de *L. dactylopii*, dependendo do período de envelhecimento, obtido a partir do inverso da taxa de desenvolvimento $D(T)$. Numa simplificação anterior referiu-se que *L. dactylopii* apenas põe ovos durante o período diurno. Então, para se calcular a fecundidade potencial horária do parasitóide, ($F_{\max h}$), utilizou-se a equação seguinte (6.14)

$$F_{\max h} = \frac{F_{\max d}}{\text{período iluminado (horas)}} \quad (6.14)$$

Para se calcular a influência do parasitismo sobre o número de indivíduos *P. citri* nos instares 3 + 4, cada célula da matriz de desenvolvimento é multiplicada pela proporção (6.12). O número de ovos de parasitóides resultantes do parasitismo é obtido multiplicando (1-0) pelo número de hospedeiros e o número resultante é colocado na primeira célula dos estados imaturos do parasitóide. Por outras palavras, quando parasitismo ocorre, os indivíduos parasitados na matriz instares 3 + 4 são "transformados" em estados imaturos de *L. dactylopii* e esses números são adicionados à primeira célula da matriz dos estados imaturos de *L. dactylopii*.

Difusão de L. dactylopii. Em concordância com o Capítulo 5, SimCitri também considera a redução de densidade do parasitóide *L. dactylopii* à medida que se difunde a partir do ponto de largada. O princípio matematicamente representado em SimCitri considera que as populações no momento h espalhar-se-ão por uma área maior no momento $h+1$ de forma proporcional à velocidade de avanço da frente de difusão. Se a difusão for aleatória, então a área ocupada no terreno será um círculo de raio πr^2 , em que $r = Vh$, em que V é o valor para a velocidade de avanço da frente de difusão = 0,44875 por hora. Então (6.15).

$$W_h = \frac{\pi (0,44875(h-1))^2}{\pi (0,44875h)^2} \quad (6.15)$$

Em que W representa uma proporção de redução da densidade de *L. dactylopii* hora após hora enquanto os parasitóides se espalham pelo pomar. Para se obter o efeito numérico dessa redução, a proporção W deverá ser multiplicada pela matriz dos parasitóides adultos.

Apresentação de resultados. No final de cada "hora" é feito um resumo dos valores nas matrizes e apresentados em gráfico. Os resumos são feitos para cada um dos estados de desenvolvimento, para cada espécie (*P. citri* e *L. dactylopii*), número médio de indivíduos, número de frutos ocupados, taxa de parasitismo, número de parasitóides adultos, e índices ecológicos. O resumo dos valores é feito em termos de médias. As médias são obtidas para *P. citri* somando todos os valores incluídos em cada célula para cada uma das matrizes e depois cada uma destas somas é usada para calcular o número médio de indivíduos por colónia e para determinado instar (6.16).

$$M = \frac{1}{h} \sum_{d=1}^h \sum_{f=1}^n c_f \quad (6.16)$$

Em que M é a média, h o número de colónias infestadas, n o número de células para cada uma das distintas matrizes do estado de desenvolvimento. A média total de cochonilhas entre 1º instar e fêmeas em postura é obtido adicionando as diferentes médias M_i (6.16) para cada uma das 3 matrizes consideradas em SimCitri respectivamente para intares 1 + 2, instares 3 + 4 e fêmeas em postura. Neste caso o índice i corresponde a cada uma das matrizes assinaladas.

Como a espécie *L. dactylopii* está representada apenas por uma matriz para os estados imaturos e uma matriz para os estados adultos, as médias correspondem à soma do número de indivíduos em cada célula respectivamente para cada matriz.

A proporção de parasitismo P é obtido por (6.17)

$$P = \frac{\sum_{f=1}^{134} c_f}{\sum_{j=1}^{59} b_j + \sum_{f=1}^{134} c_f} \quad (6.17)$$

em que f é o número de célula para a matriz dos estados imaturos do parasitóide e j o número de célula para a matriz 3+4.

Para o cálculo dos índices ecológicos foi necessário determinar a variância associada à densidade populacional de cada colónia. Para o cálculo desta estatística foi utilizada a formula (6.18) (Montgomery 1991)

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (6.18)$$

Em que i representa o número de colónia, x o número total de indivíduos na colónia i , \bar{x} o valor médio do número de indivíduos por colónia e n o número de colónias infestadas. A variância apenas é calculada para um mínimo de 15 colónias.

Finalmente alguns indicadores ecológicos de ocupação do ambiente serão apresentados como pontos complementares que puderam ajudar na calibragem e testes de sensibilidade do modelo. Pela sua simplicidade de computação os índices de dispersão, de agregação, de Green, de Lloyd, de Morita e de Kuno foram escolhidos porque se baseiam na média total de indivíduos para todo o conjunto de colónias e respectiva variância. Os índices foram calculados de acordo com as equações apresentadas no Anexo 3.

Após a simulação correr durante uma "hora", todo o processo é reiniciado utilizando os dados já transformados pelos algoritmos. Este ciclo repetir-se-á tantas vezes até se alcançar o final do período total de simulação definido pelo utilizador.

6.6 Análise de sensibilidade e verificação de SimCitri

Nesta parte final do trabalho proceder-se-á à análise de sensibilidade e verificação de SimCitri. Pretende-se, portanto, explorar o potencial de previsão da simulação para aspectos da biologia de *P. citri* e *L. dactylopii* e da relação entre estes dois insectos. Para tal efectuar-se-ão pequenas alterações dos valores dos parâmetros e das variáveis força e analisar-se-ão os resultados. O conjunto das variáveis e parâmetros usados em SimCitri estão descritos no Anexo 9 e todo o código de programação está imprimido no Anexo 10.

6.6.1 Carácter estocástico de SimCitri

Nesta análise pretende-se mostrar o carácter aleatório inicial de SimCitri que advém da distribuição ao acaso dos dados da composição da colónia nas matrizes de desenvolvimento dos insectos. Embora o funcionamento da simulação seja completamente determinista após a distribuição inicial dos dados, os resultados finais serão influenciados. Como exemplo correu-se SimCitri três vezes com os mesmos dados iniciais e por três vezes se obteriam resultados distintos Figs 6.8 a 6.10

Nas Fig 6.8 a 6.10 pode-se verificar que para os mesmos dados iniciais existe um comportamento semelhante de crescimento das populações de *P. citri*, mas qualquer dos três casos representados estão desfasados temporalmente. Da Fig 6.8 para 6.10 as populações de *P. citri* começam o crescimento mais cedo. Se na Fig 6.8 se pode distinguir dois picos completos para cada geração da cochonilha algodão e um último pico incompleto, já nas Fig 6.9 e 6.10 todos os três picos são evidentes sugerindo três gerações completas, estando estas gerações mais avançadas na Fig 6.10. Estes três casos particulares só podem ser obtidos de forma tão clara e distinta porque a população da cochonilha algodão introduzida na simulação foi 1 indivíduo, o qual foi aleatoriamente colocado no início (caso da Fig 6.10), no meio (caso da Fig 6.9) ou final (caso da Fig 6.8) da matriz de desenvolvimento. Em consequência, toda a simulação fica mais atrasada, ou avançada de acordo com os três casos analisados.

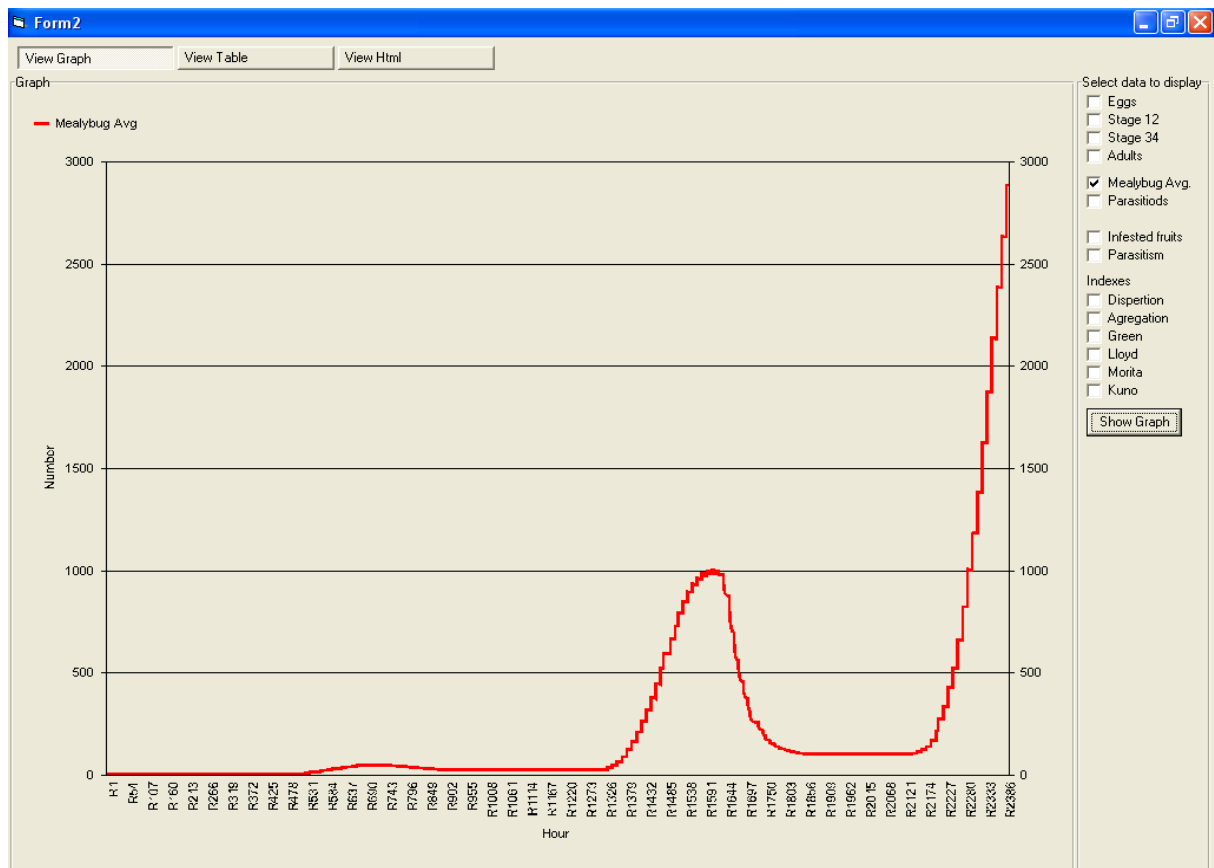


Fig. 6.8 - Resultado simulação para mostrar o carácter aleatório de SimCitri. Dados iniciais: 1 colônia, 1 fêmea no 3º - 4º instar em pré-postura, ausência de difusão, predadores e *Leptomastix dactylopii* Howard, capacidade de sustentação 100 cochonilha equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e duração da simulação 100 dias.

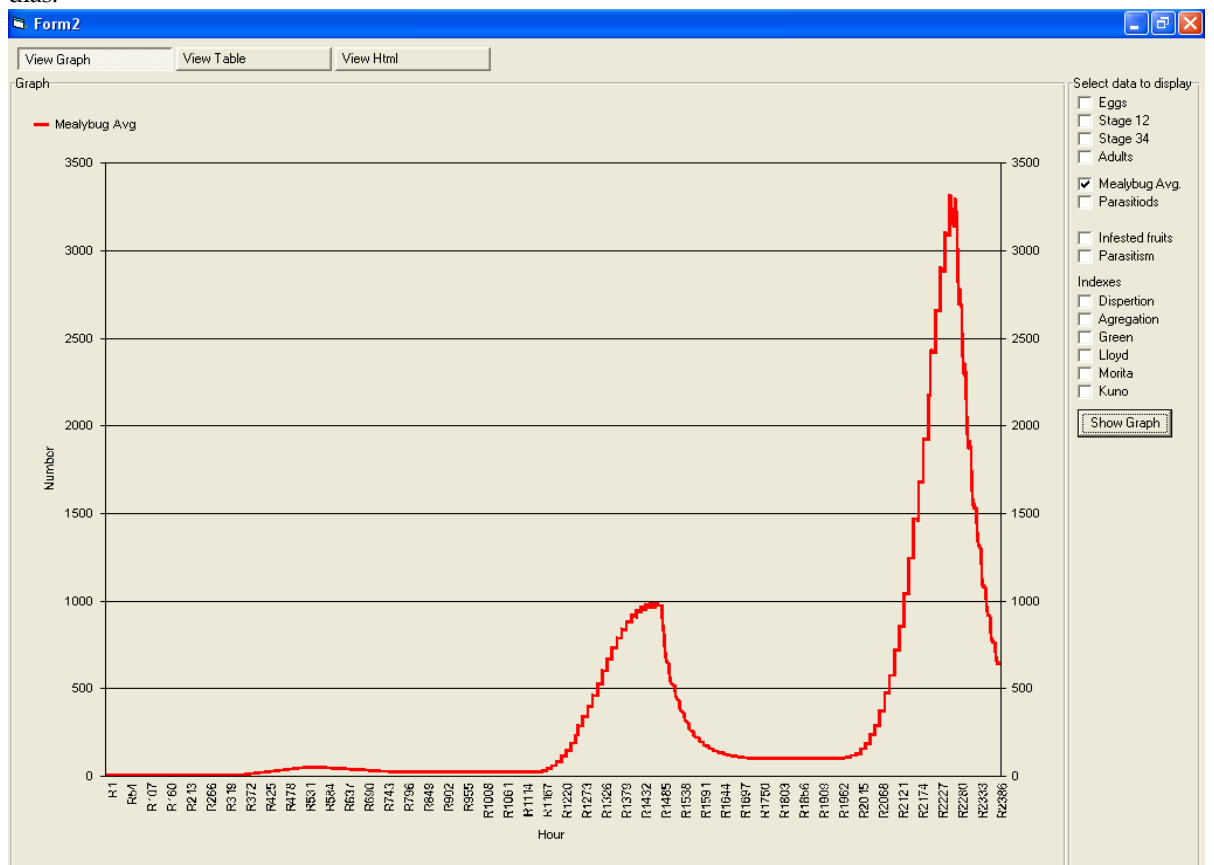


Fig. 6.9 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.8 com objectivo de mostrar o carácter aleatório da fase inicial de distribuição dos dados da simulação.

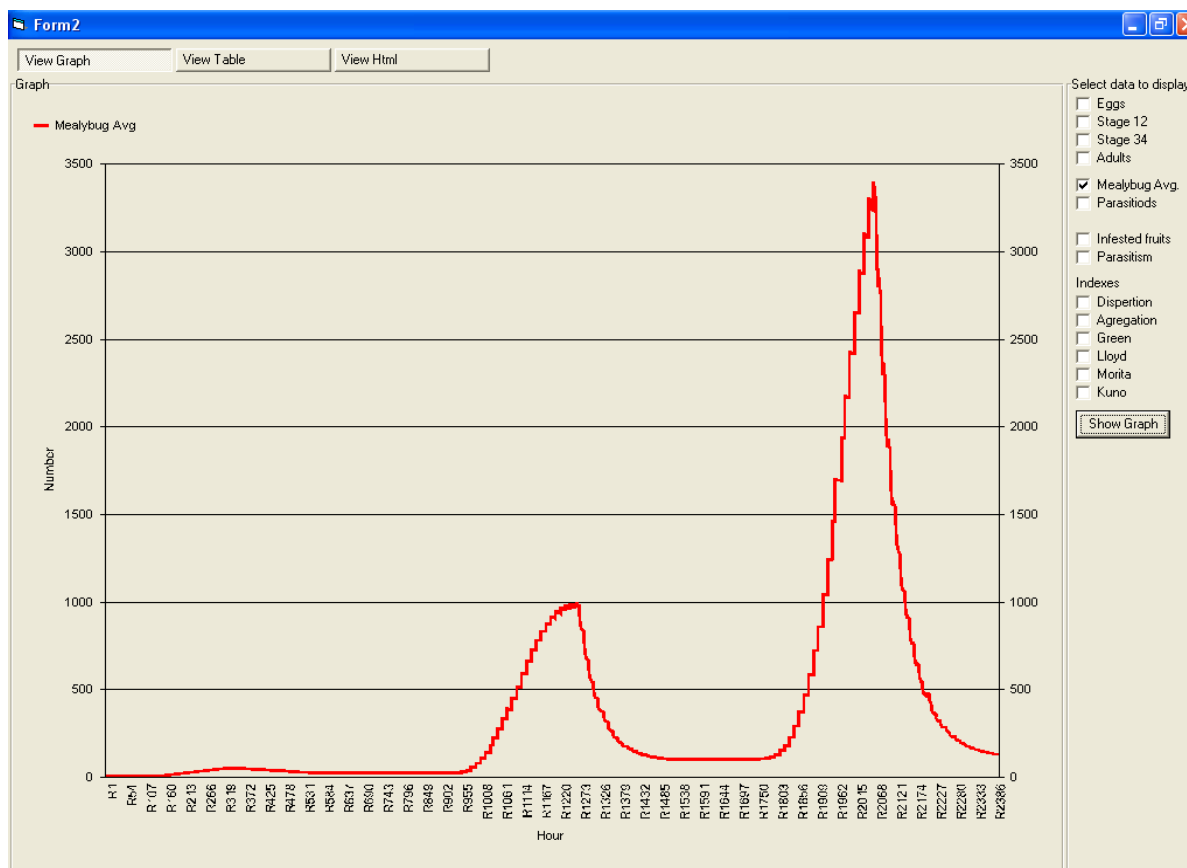


Fig. 6.10 – Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.8 com objectivo de mostrar o carácter aleatório da fase inicial de distribuição dos dados da simulação.

6.6.2 Auto-regulação de populações em SimCitri

Uma das funções mais importantes de SimCitri é a capacidade de auto-regulação de populações de *P. citri* através da função logística. *Leptomastix dactylopii* está apenas limitado pelo número potencial de hospedeiros e pela capacidade de parasitismo calculada de acordo com o modelo de Rogers (1972). Também SimCitri está construído de forma distinta para auto-regulação populacional de simulação com colónias de *P. citri* com dispersão ou sem dispersão. Lembra-se que no primeiro caso os indivíduos que são retirados de uma colónia por acção da função logística são colocados ao acaso numa outra colónia (vazia ou não) até um máximo de 100 colónias na simulação, e no segundo caso, os indivíduos excedentes são simplesmente removidos da colónia.

Nas Figs. 6.11 a 6.13 mostra-se os resultados da simulação com um conjunto de dados cuja composição populacional de *P. citri* é apenas um indivíduo no instar 3 + 4



Fig. 6.11 - Resultado simulação SimCitri para 1 colônia, 1 fêmea no instar 3 + 4, ausência de difusão, predadores, de *Leptomastix dactylopii* Howard. A capacidade de sustentação 1 cochonilha equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e duração da simulação 50 dias.

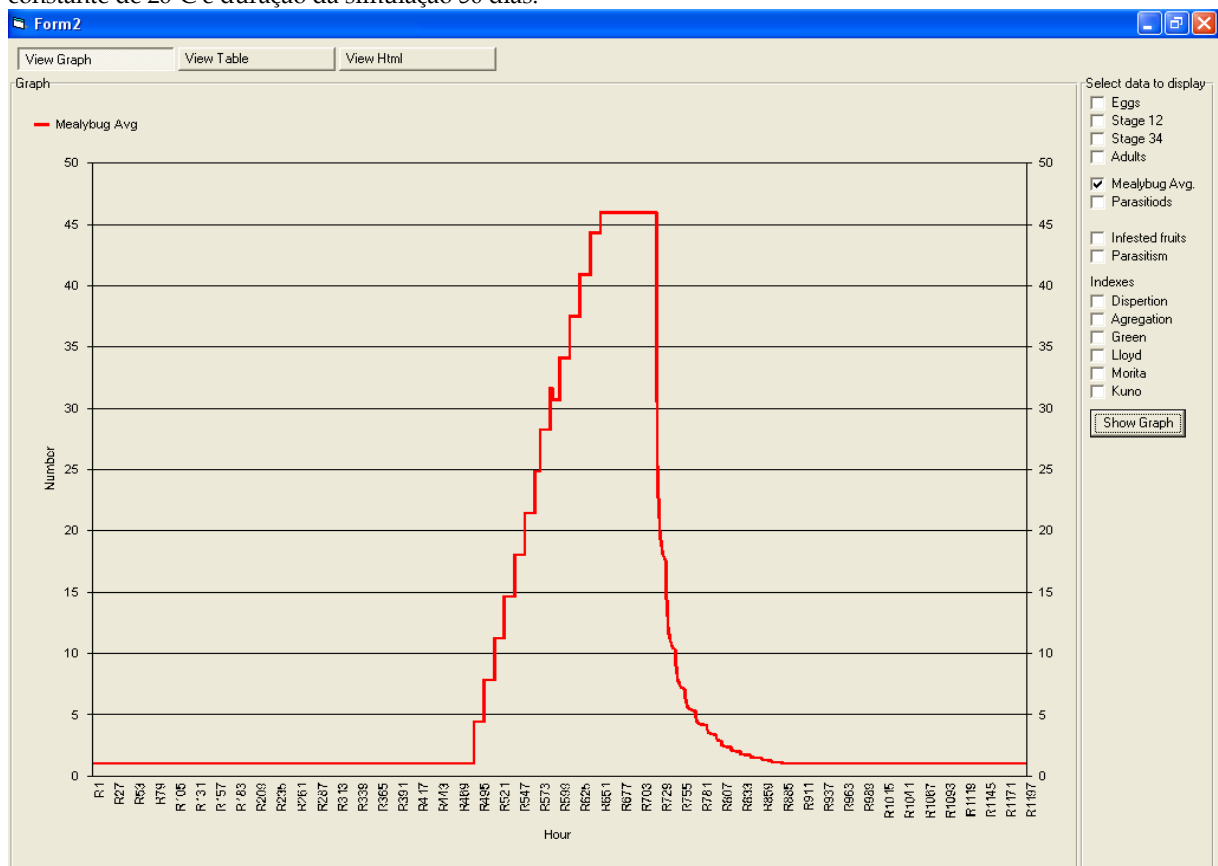


Fig. 6.12 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.11 com objectivo de mostrar a influência do conceito de cochonilha equivalente e da função logística na composição da população de *Planococcus citri* (Risso).

Na Fig. 6.11 a fêmea introduzida no início deu origem a uma geração de indivíduos que chegaram ao estado de desenvolvimento instares 3 + 4. Pode-se observar também na mesma figura o momento em que o indivíduo introduzido passa a fêmea adulta e o momento em que essa fêmea adulta morre. Uma vez no estado adulto a fêmea adulta põe ovos (Fig. 6.13), estes desenvolvem-se para primeiros e segundos instares. No entanto, como as populações estão limitadas pela função logística, cuja capacidade de sustentação do meio é igual a 1 cochonilha equivalente, apenas um indivíduo poderá ocupar a matriz de desenvolvimento. Como tal, embora existam cerca de 46 indivíduos em primeiros e segundos instares, apenas 1 indivíduo poderá ocupar a matriz de instares 3 + 4. Daqui resulta a oscilação observada na Fig. 6.11 para a curva dos indivíduos instares 3 + 4. Esta redução drástica do número de indivíduos na passagem da matriz de desenvolvimento dos instares 1 + 2 para a matriz de desenvolvimento instares 3 + 4 advém do facto da função logística ter a capacidade de sustentação do meio em cochonilha equivalente como defendido no Capítulo 4.3.3 e na equação (6.8).

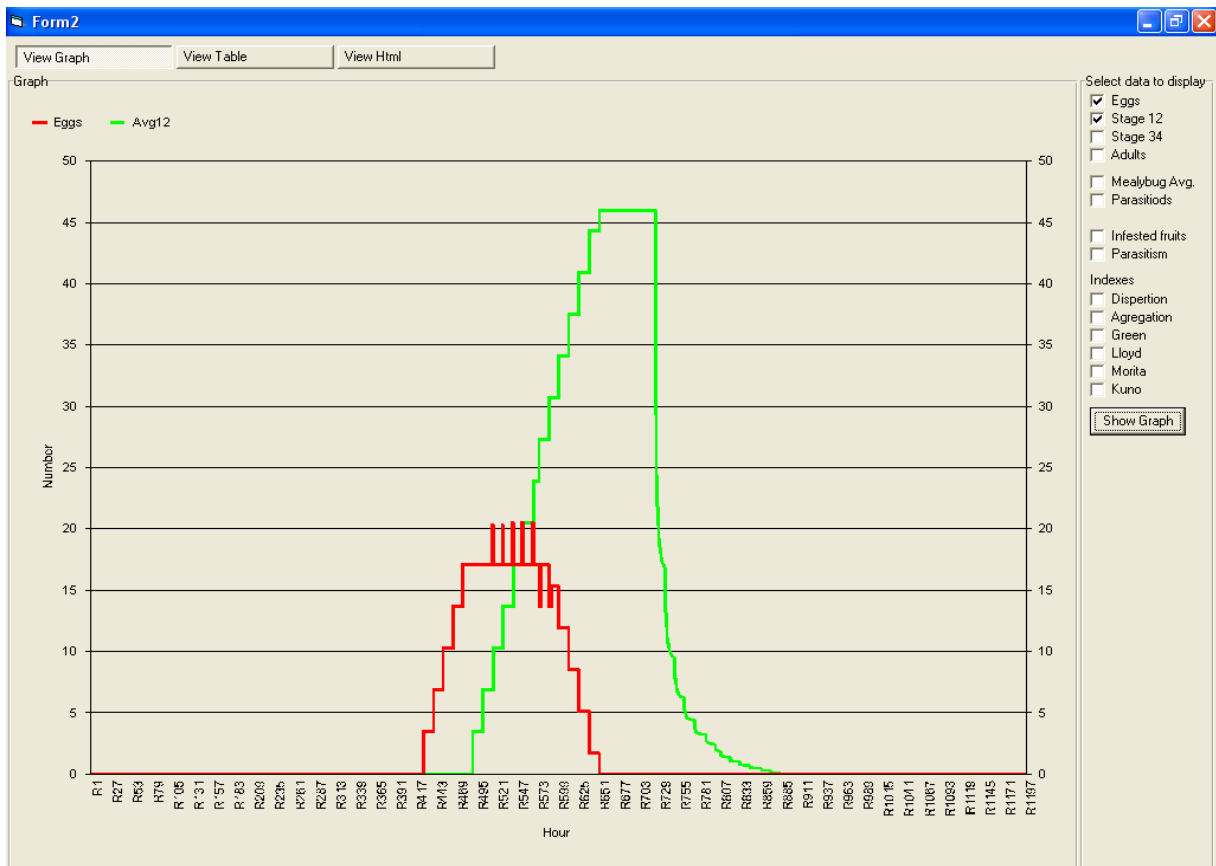


Fig. 6.13 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.11 com objectivo de mostrar a influência do conceito de cochonilha equivalente e da função logística na composição da população de *Planococcus citri* (Risso).

Nas Figs. 6.14 a 6.16 mostra-se o resultado de simulação para as mesmas condições estipuladas que na Fig. 6.11, mas neste caso o valor de capacidade de sustentação do meio foi elevado para 10 cochonilha equivalente por fruto. Uma análise similar às Figs. 6.11 a 6.13 poderá ser feita para estas figuras. A principal diferença reside no facto da capacidade de sustentação do meio ser maior e

portanto os níveis populacionais de *P. citri* crescerem até à capacidade de sustentação do meio estipulada.

Nas Figs 6.17 e 6.18 mostra-se o resultado da simulação em condições similares às mostradas nas Figs 6.11 a 6.16. Algumas alterações foram introduzidas, primeiro, foram consideradas cinco colónias de *P. citri*; segundo, o período de simulação foi de 200 dias; terceiro, no o início da simulação foram considerados 10 indivíduos por estado de desenvolvimento.

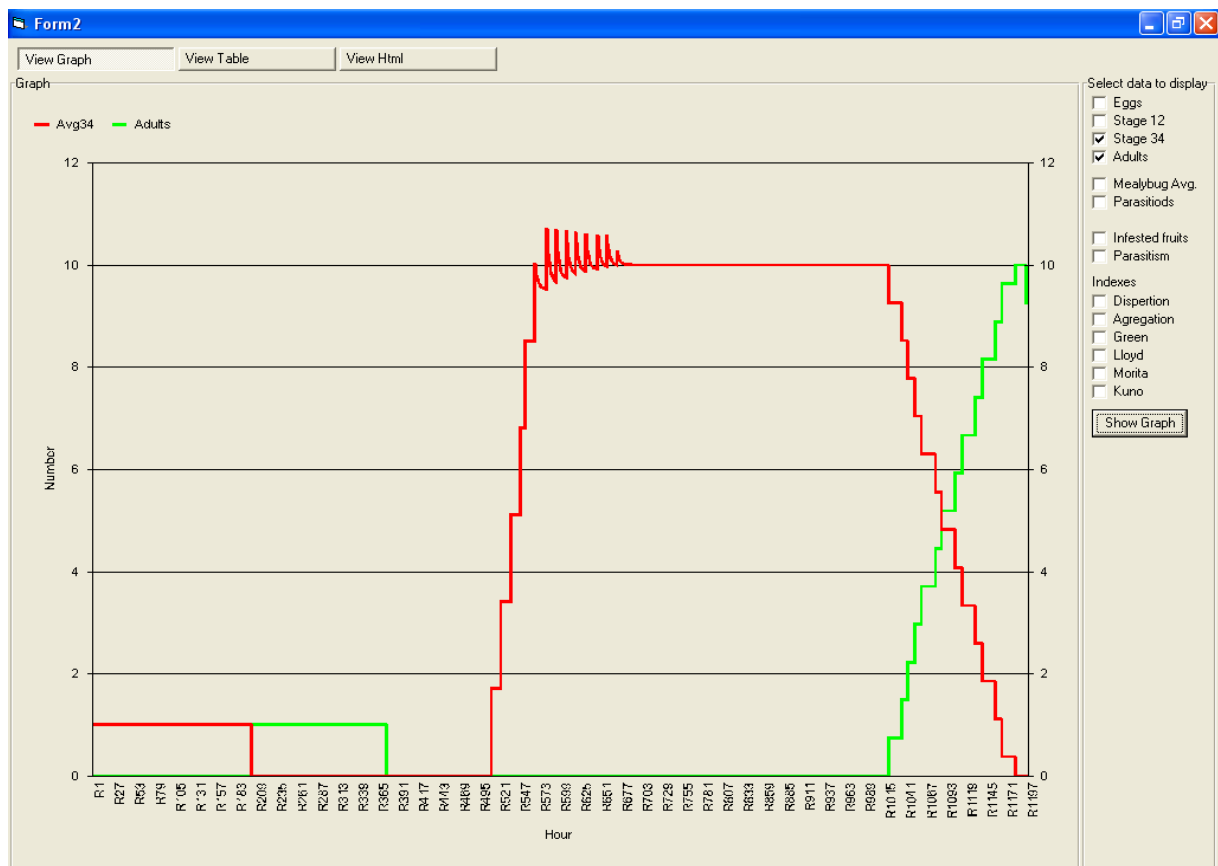


Fig. 6.14 - Resultado simulação SimCitri para 1 colónia, 1 fêmea no instar 3 + 4, ausência de difusão, ausência de predadores, ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard capacidade de sustentação do meio 10 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e duração da simulação 50 dias.

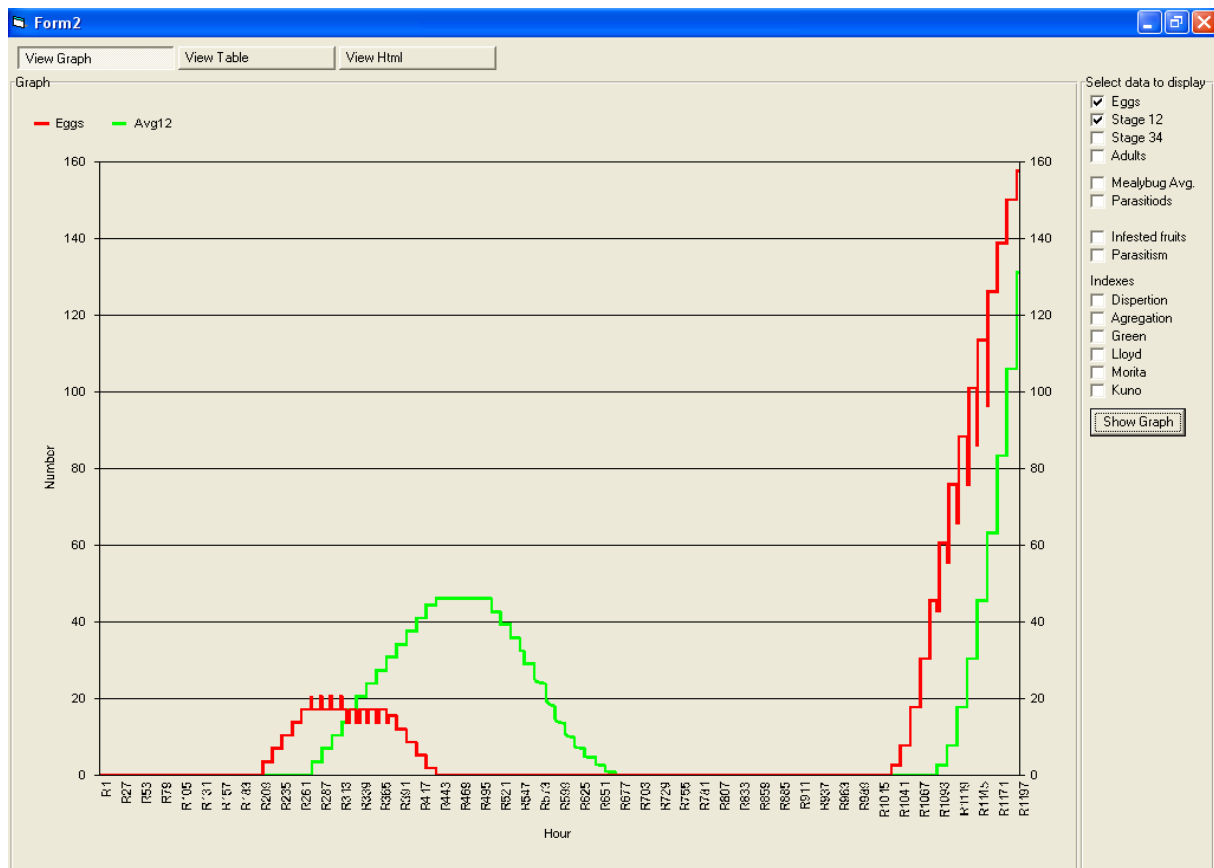


Fig. 6.15 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig. 6.14 com objectivo de mostrar a influência do conceito de cochonilha equivalente e da função logística na composição da população de *Planococcus citri* (Risso).

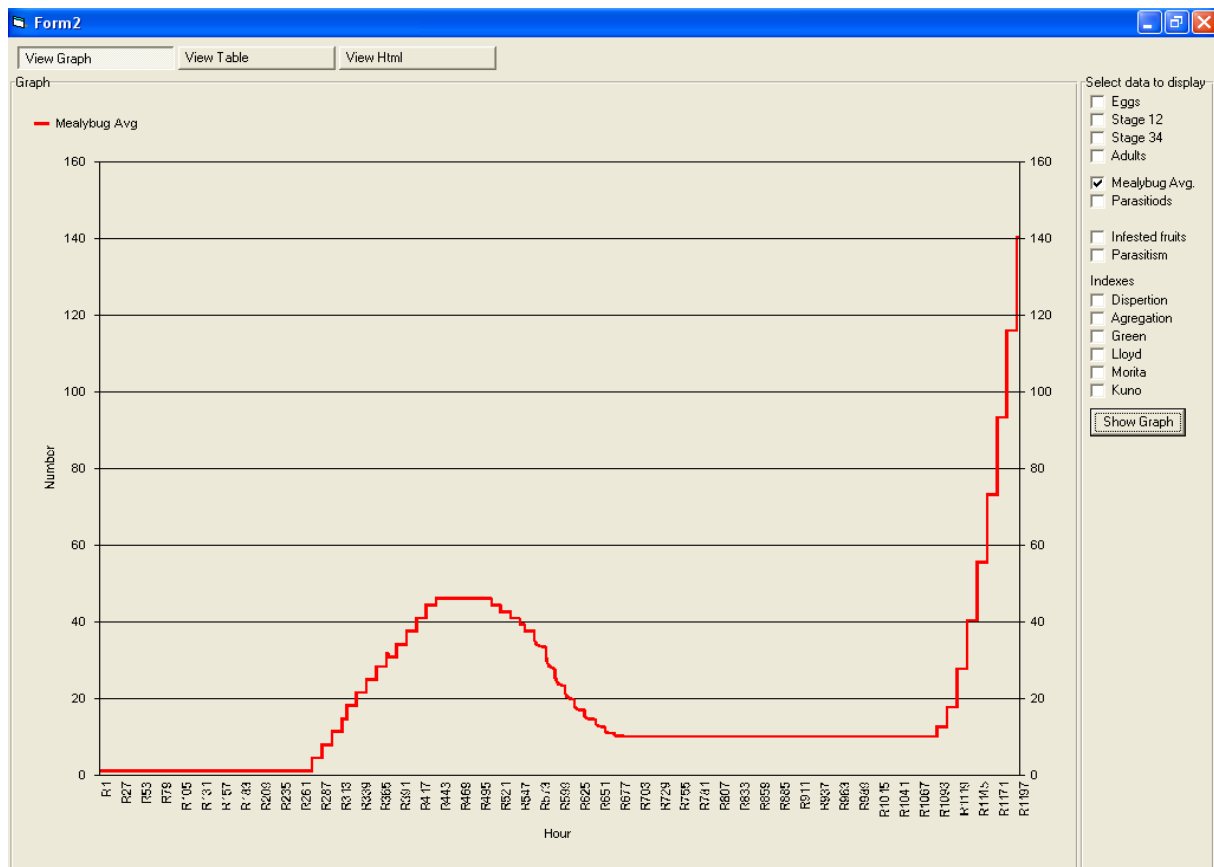


Fig 6.16 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.14 com objectivo de mostrar a influência do conceito de cochonilha equivalente e função logística na composição da população de *Planococcus citri* (Risso).

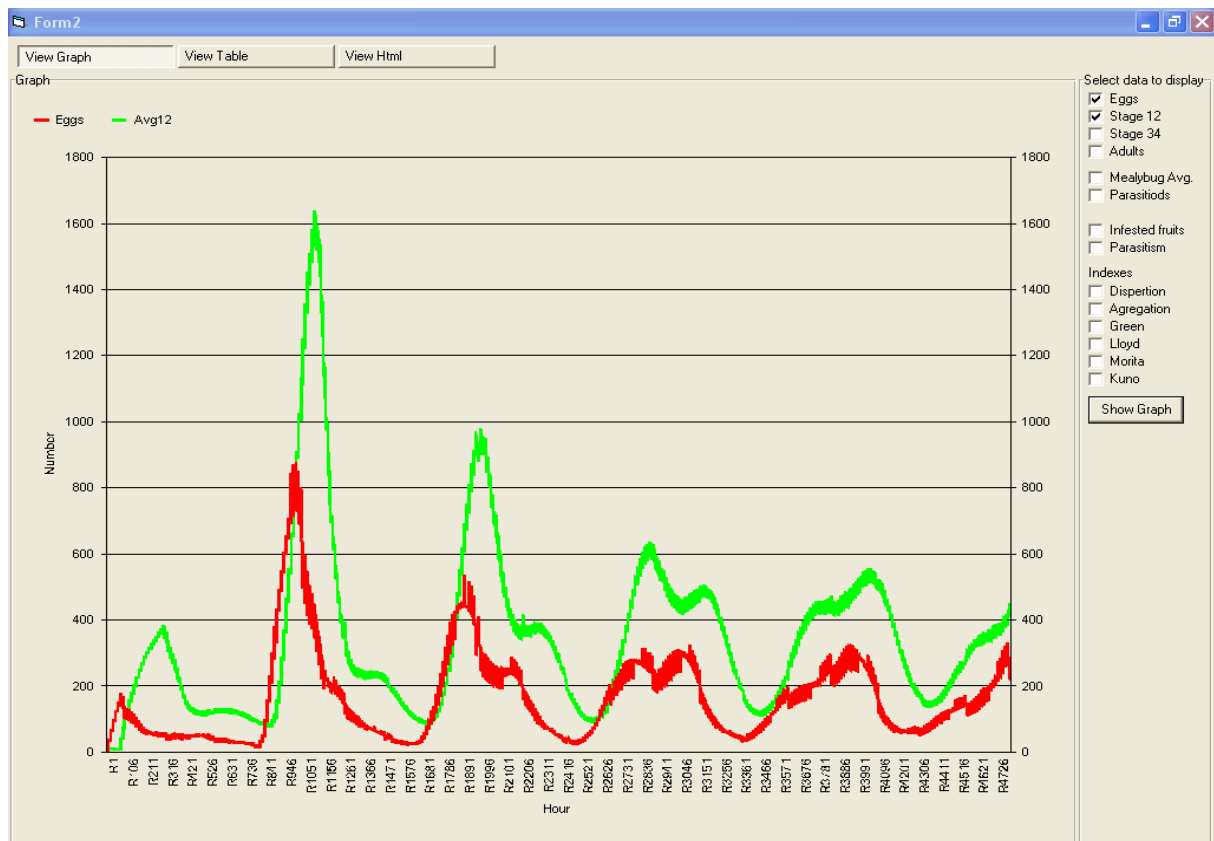


Fig. 6.17 - Resultado de SimCitri para verificação da limitação de populações de *Planococcus citi* (Risso) pela função logística para simulação com 5 colônias, 10 indivíduos em instar 1 + 2, 10 indivíduos no instar 3 + 4, 10 fêmeas adultas, ausência de difusão, ausência de predadores, ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard capacidade de sustentação 100 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e período de 200 dias.

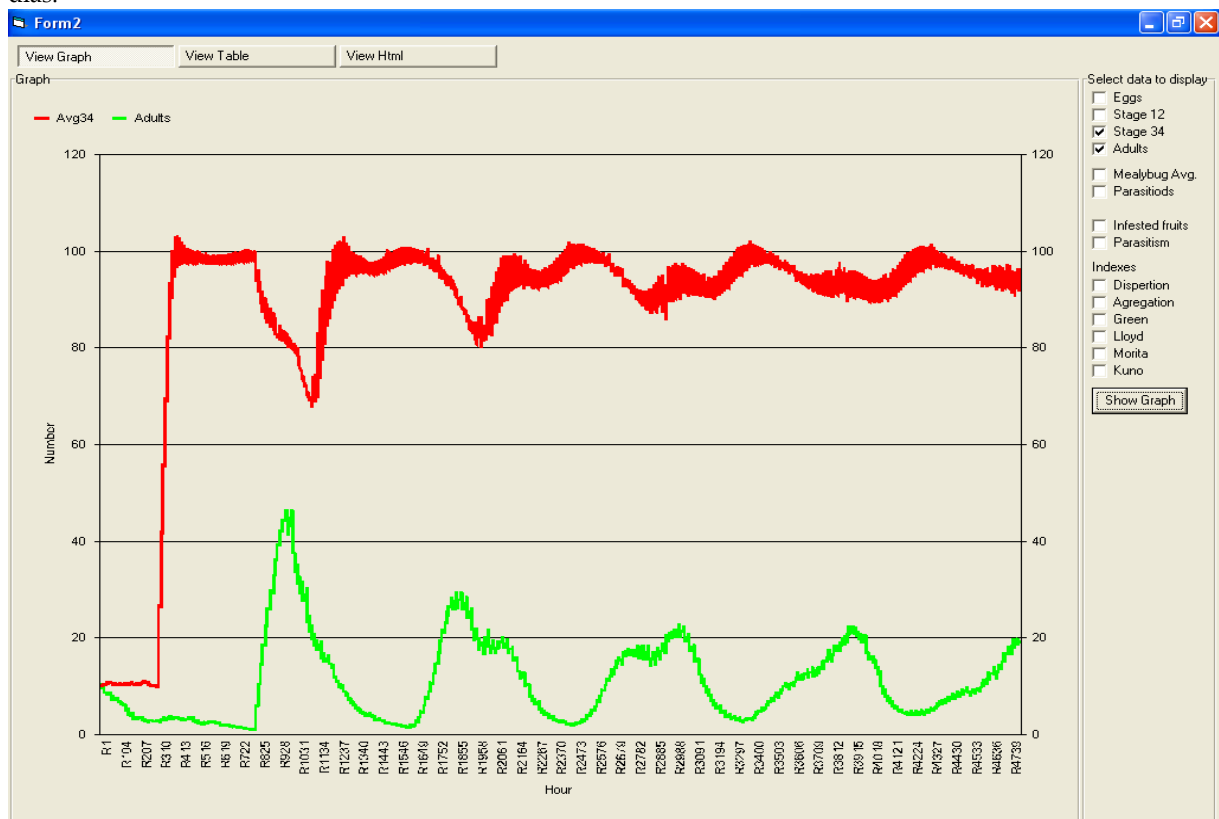


Fig. 6.18 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.17 com objectivo de mostrar a influência da função logística na limitação da população de *Planococcus citi* (Risso).

O período de simulação é relativamente longo e a população inicial é mais elevada do que nas simulações anteriores. Apesar de existirem oscilações com amplitude elevada para todos os estados de desenvolvimento da cochonilha, existem também oscilações horárias da população correspondentes igualmente à limitação de *P. citri* pela função logística. O topo de cada oscilação com maior amplitude pode ser interpretado como uma geração de *P. citri*. Pode-se considerar que para o período de 200 dias SimCitri calculou cinco gerações da cochonilha algodão, o que, para a temperatura considerada, obtém-se a duração média por geração para cerca de 40 dias. Este resultado vai ao encontro dos resultados experimentais obtidos no Capítulo 4.3.2. Verificar ainda pela Fig 6.18 que os instares três e quatro em pré-postura são os principais contribuidores na equação logística para a saturação da capacidade de sustentação do meio. Pelo contrário, de acordo com a Fig 6.17 as oscilações no número de indivíduos no primeiro e segundo instares é muito maior porque pouco contribuem para a saturação da capacidade de sustentação do meio.

Nas Figs 6.19 e 6.20 mostra-se o resultado de SimCitri para verificação da influência da função logística numa simulação semelhante à apresentada nas Figs 6.17 e 6.18, apenas neste caso se considerou a dispersão de *P. citri*. Por observação das Figs. 6.19 e 6.20 pode-se verificar que o número médio de indivíduos em qualquer dos estádios de desenvolvimento excede em muito e de forma irreal a capacidade de sustentação do meio estabelecido em 100 cochonilha equivalente. O modo como a simulação está construída para a fase de dispersão de *P. citri*, os indivíduos que saem de uma colónia por acção da função logística são colocados de forma aleatória noutra colónia. Como o número de frutos é limitado (neste caso 100 unidades), a partir de uma determinada fase, mesmo que a função logística retire os indivíduos em excesso de uma colónia, estes são colocados ao acaso noutra colónia e juntam-se aos indivíduos que lá estão presentes. A partir desta fase, a quantidade de indivíduos numa colónia aumenta porque no modelo não existe mais local para formar novas colónias. Podemos então extrapolar para o pomar como dinâmica de pululação gradiente apresentada por Franco (1997). O número de frutos no pomar é finito e as populações de *P. citri* preferem concentrar-se sobre frutos, no entanto no pomar também existem folhas e ramos onde a cochonilha algodão se pode estabelecer para alimentar e a pressão sobre os frutos diminui. Ao contrário da simulação na ausência de dispersão, apenas se observa o que se passa ao nível da colónia e quando o número de indivíduos passam a capacidade de sustentação do meio são simplesmente eliminados e por isso, não existe mecanismo de pululação. Apesar destes resultados terem origem na forma como SimCitri está construído para a difusão de *P. citri*, podem dar uma pista para investigação dos mecanismos de pululação de populações de *P. citri*. Será que a pululação de populações de *P. citri* estará dependente não só da capacidade de sustentação do meio mas também do comportamento de difusão de *P. citri*? Será que populações em densidades elevadas de *P. citri* conseguem extrair mais recursos do meio do que populações em concentrações baixas? Parte da resposta para esta última questão pode ser apontada pelos resultados obtidos no Capítulo 4.3.4 em que infestações iniciais mais elevadas correspondem a populações finais mais elevadas.

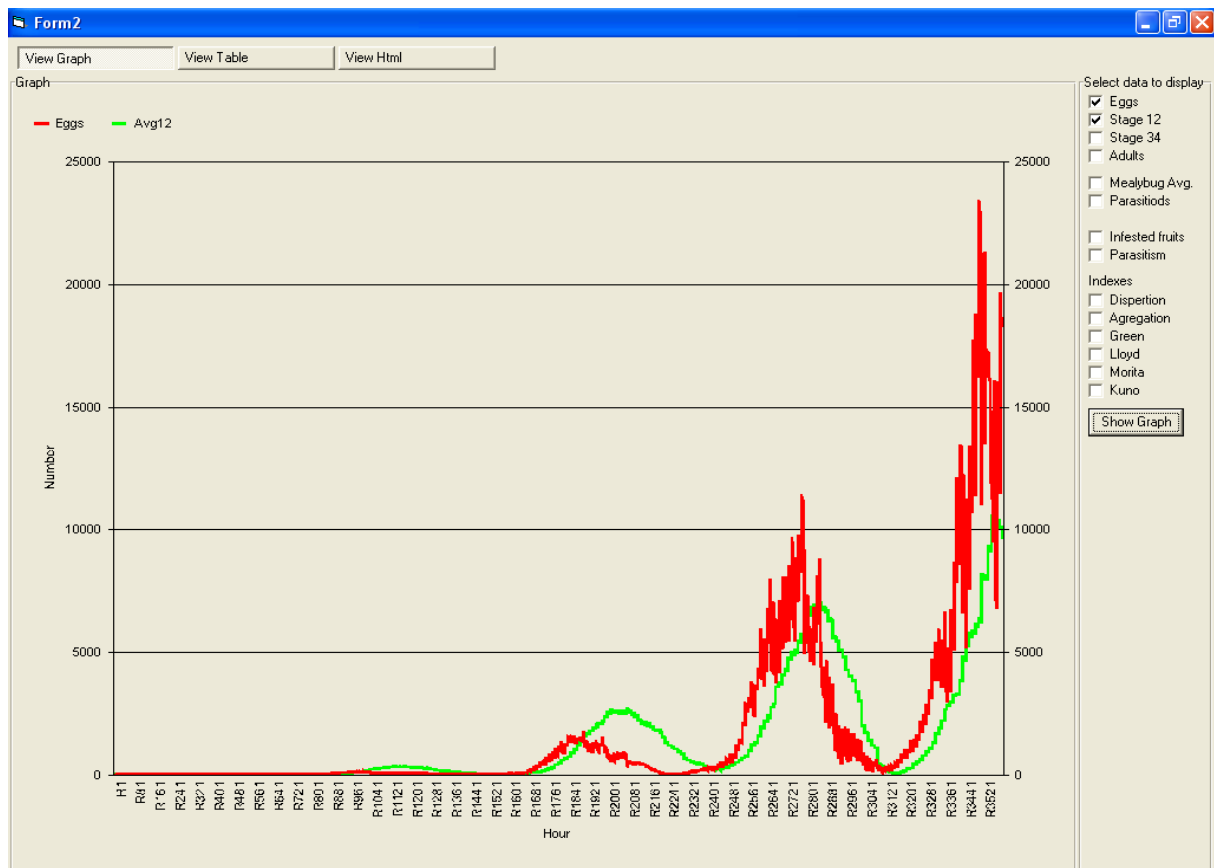


Fig. 6.19 - Resultado de SimCitri para verificação da limitação de populações pela função logística para simulação com 5 colônias, 10 indivíduos em instar 1 + 2, 10 indivíduos no instar 3 + 4, 10 fêmeas adultas, difusão de indivíduos para outras colônias, ausência de predadores, ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard capacidade de sustentação 100 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura constante de 26°C e período de 200 dias.

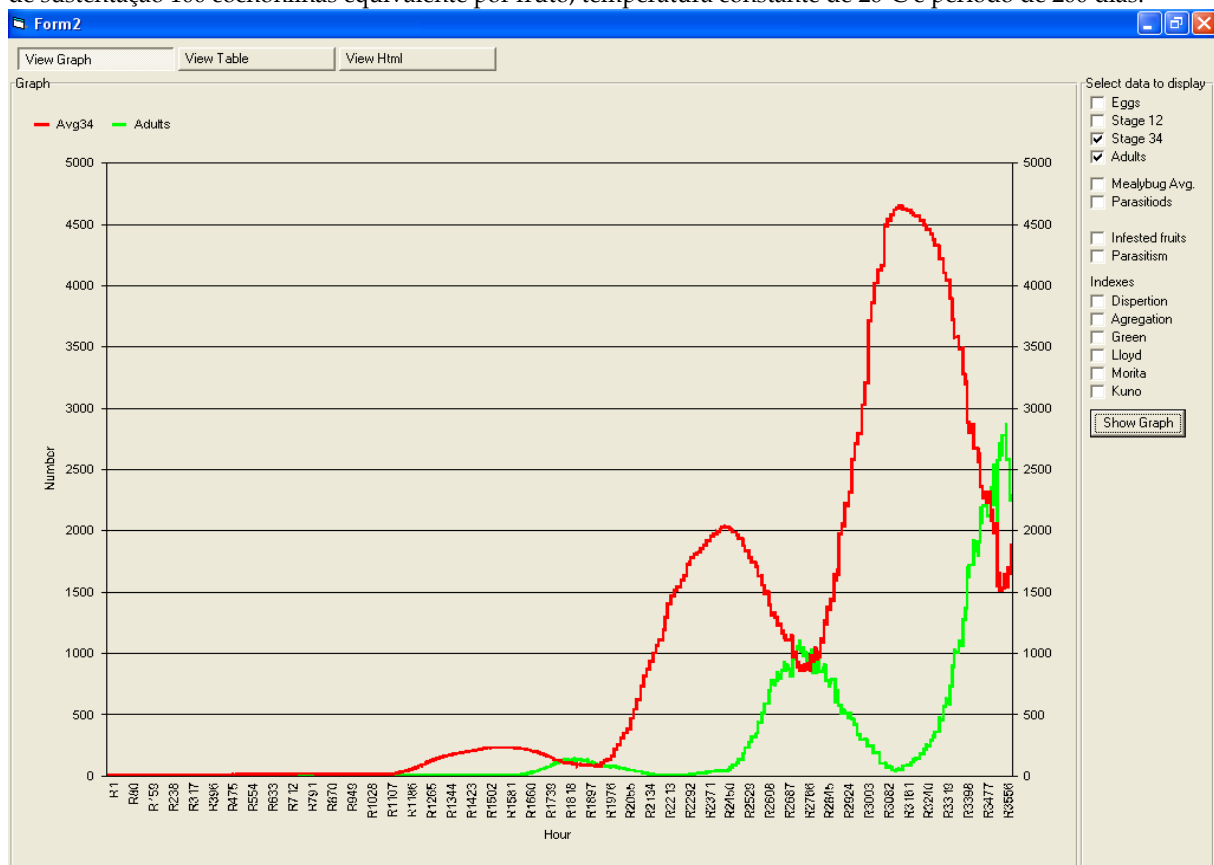


Fig. 6.20 - Resultado de SimCitri nas mesmas condições da Fig 6.19 com objectivo de mostrar a influência da função logística na limitação de uma população *Planococcus citri* (Risso) em dispersão.

Por fim verificar-se-á a influência da função logística durante uma geração, cuja população inicial é constituída por número elevado de indivíduos, numa tentativa de simulação das experiências de campo realizadas no Capítulo 4.3.4.

Pode-se verificar pela Fig 6.21 que a população decresce de uma forma exponencial, fenómeno observado em experiências de campo (Capítulo 4.3.4, Fig. 4.20). Esta redução tem duas componentes sendo a mais evidente na passagem de segundo para terceiro instar metade dos indivíduos são eliminados porque são considerados machos e não têm interesse ecológico para SimCitri. A segunda componente da redução do número de indivíduos na colónia resulta da passagem de indivíduos no segundo instar a terceiro instar e o impacto de indivíduos neste último instar na capacidade de sustentação do meio. Assim sendo, um pequeno acréscimo no número de instares 3 + 4 corresponde à eliminação pela logística de grande número de indivíduos. No caso de haver dispersão, os indivíduos que saem da colónia original vão ocupar novas colónias e então a densidade média geral desce linearmente. (Fig. 6.22).

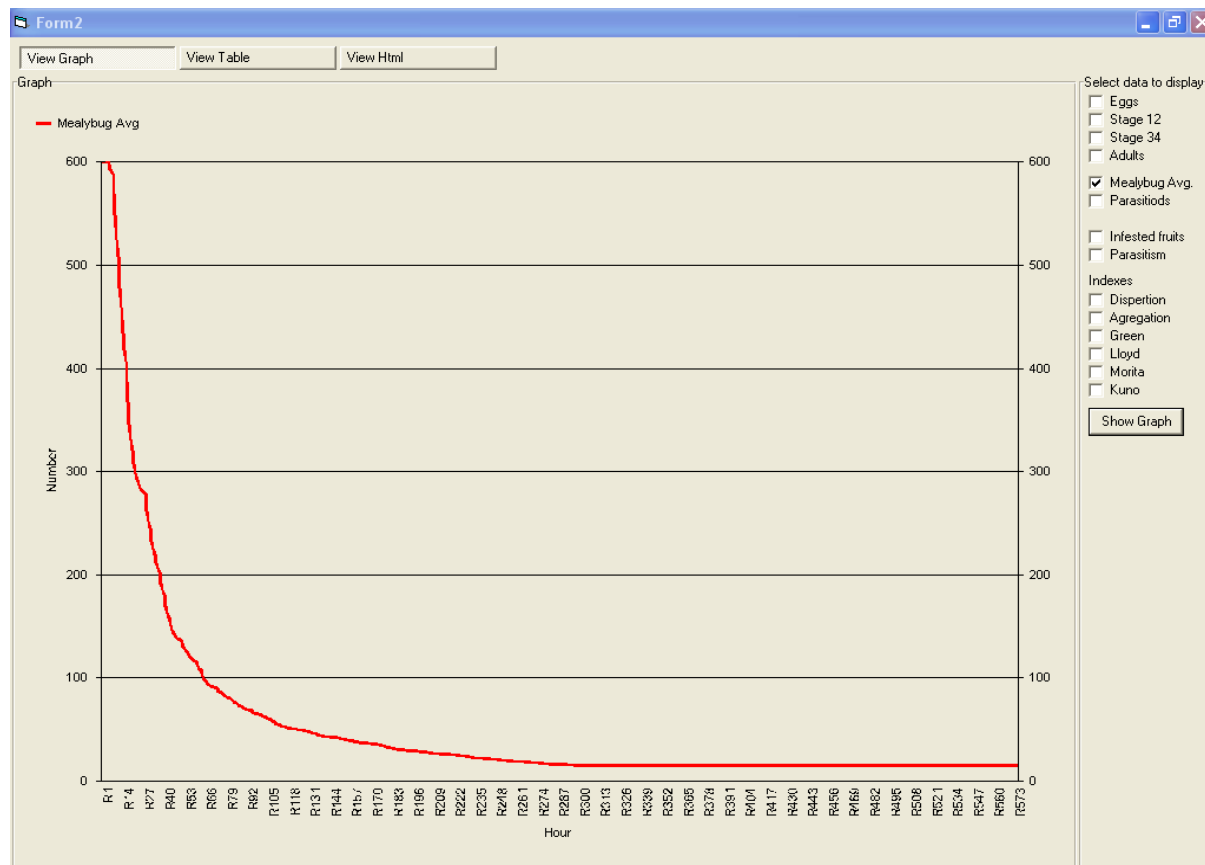


Fig. 6.21 - Resultado de SimCitri para verificação da limitação do número de indivíduos durante uma geração de *Planococcus citri* (Risso) pela função logística com 1 colónia, 600 indivíduos em instar 1 + 2, ausência de difusão de indivíduos para outras colónias, ausência de predadores, ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard capacidade de sustentação 15 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura sinusoidal de 16°C - 28°C e período de 24 dias.

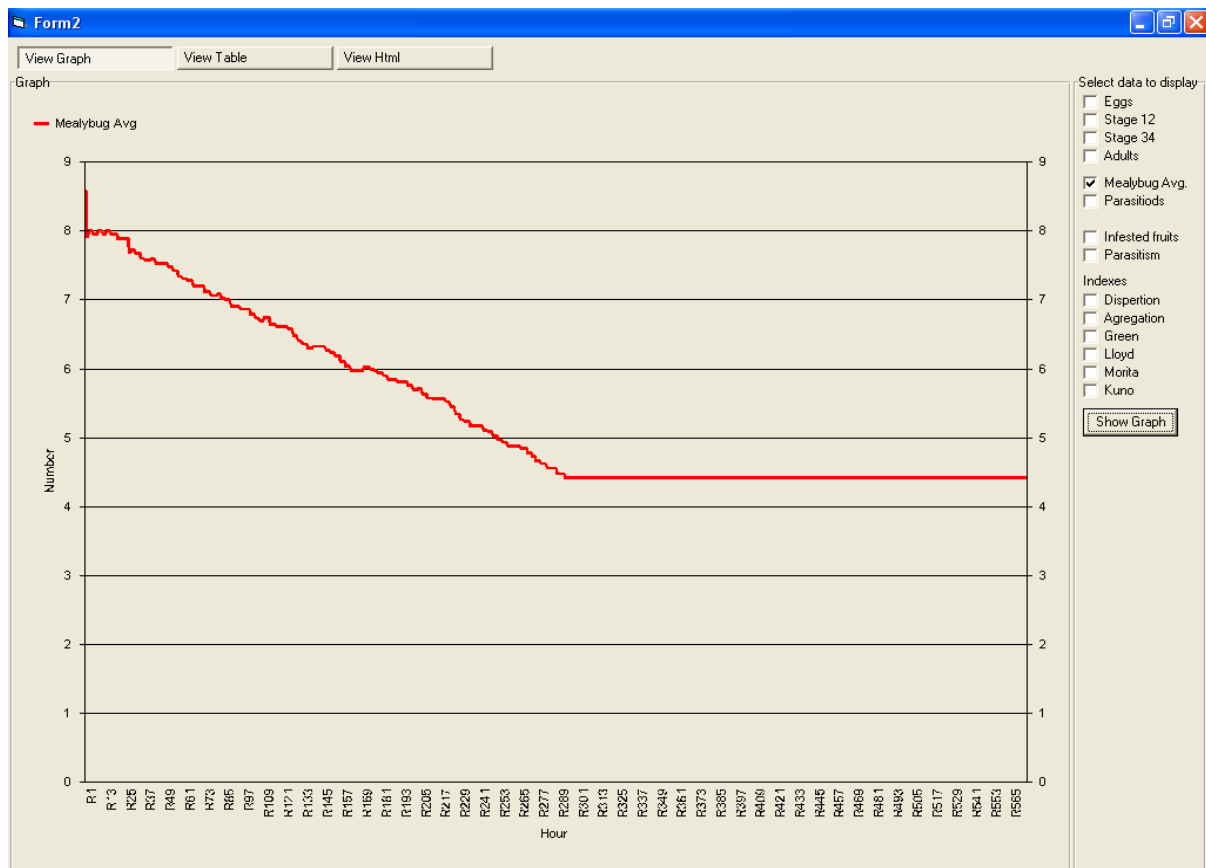


Fig. 6.22 - Resultado de SimCitri para verificação da limitação do número de indivíduos durante uma geração de *Planococcus citri* (Risso) pela função logística com 1 colônia, 600 indivíduos em instar 1 + 2, difusão de indivíduos para outras colônias, ausência de predadores, ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard, capacidade de sustentação 15 cochonilhas equivalente por fruto, temperatura sinusoidal de 16-28°C e período de 24 dias.

6.6.3 Período de uma geração e duração de um estágio

O objectivo deste Capítulo é comparar o período de uma geração e a duração de determinados estádios de *P. citri* obtidos a partir de dados experimentais (Capítulo 4.3.2, Fig. 4.8 e Fig. 4.9) com os resultados de simulação de SimCitri. Os valores de input para a temperatura foram obtidos em estações meteorológicas próximas dos pomares onde decorreram os ensaios. Nos pressupostos de SimCitri, a cochonilha algodão não é influenciada pelo variável força luz, apenas as variáveis força temperatura e capacidade de sustentação do meio desempenham papel determinante no crescimento das populações de *P. citri*. O factor capacidade de sustentação do meio pode ser arbitrário porque não influencia o ritmo de crescimento de insectos individuais. Resta então obter o valor da temperatura horária para o período experimental. Os dados de temperaturas diárias para os períodos experimentais correspondentes às Figs. 4.8 e 4.9 respectivamente para os pomares da Bela Salema (período de uma geração) e Quinta da Várzea (duração de cada estágio) foram registados na forma de temperatura máxima e mínima. A partir destas temperaturas foram calculadas as temperaturas horárias para cada dia, através das equações (6.4) e (6.5). Estes cálculos foram repetidos para 51 dias com início no dia em que as experiências de campo foram estabelecidas (11 de Junho de 1994 para o pomar da Bela Salema). Cálculos homólogos foram efectuados para o pomar da Quinta da Várzea para o período 10 de Julho - 4 Setembro de 1996. Os resultados foram posteriormente colocados em base de dados e usados em SimCitri como variável força temperatura. Os resultados da

simulação apresentam-se na Fig. 6.23. Para o início da simulação colocaram-se dois ovos na primeira célula da matriz de ovos (Fig. 6.2). Estes dois ovos desenvolvem-se simultaneamente até à fase de instares 1 + 2 e na passagem a instares 3 + 4 estes dois indivíduos são reduzidos a um único indivíduo e finalmente este indivíduo passa a fêmea adulta. Devido ao facto destas transformações serem qualitativas em SimCitri, é muito fácil acompanhá-las na Fig. 6.23. Observação do conjunto de dados de output da simulação permite-nos indicar com precisão o momento em que a cochonilha passa de estado e instar.

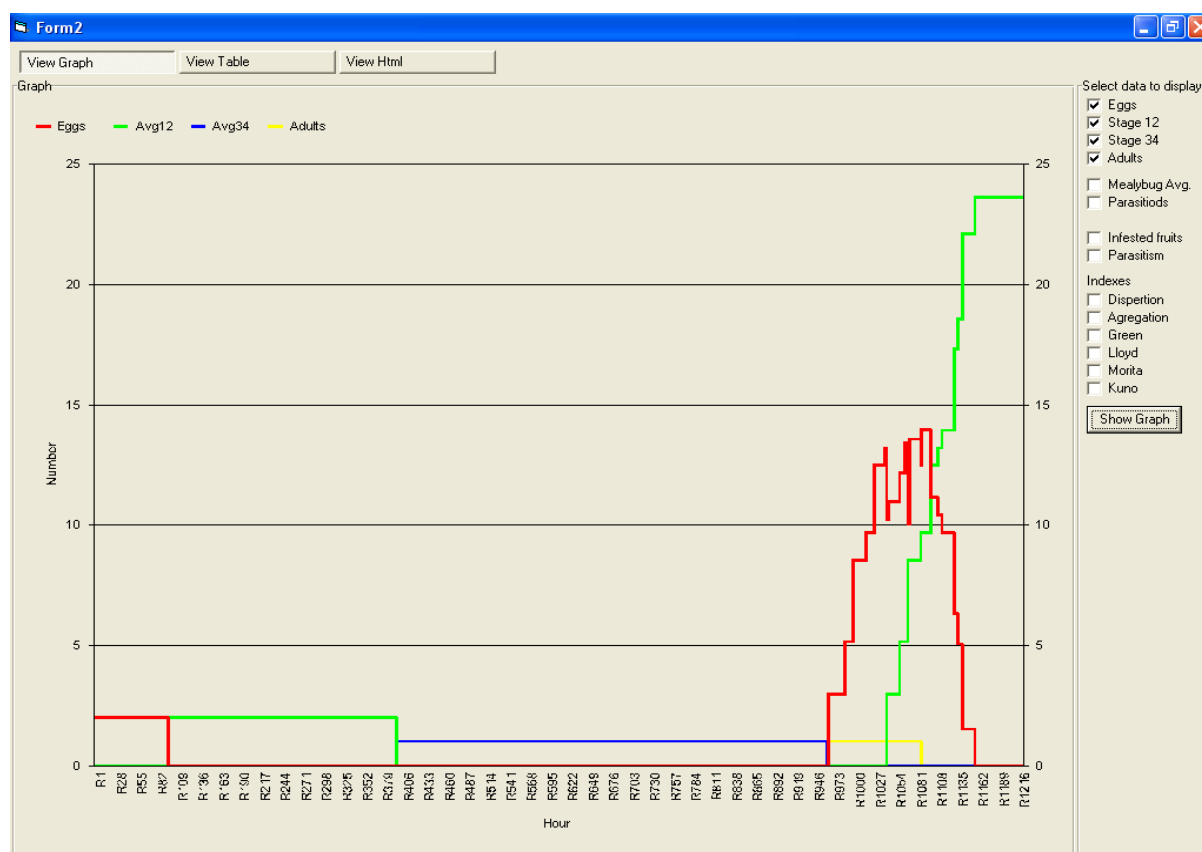


Fig. 6.23 - Resultado de SimCitri para verificação do período de uma geração de *Planococcus citri* (Risso). Simulação para 51 dias com temperatura horária calculada a partir dos valores de temperatura máxima e mínima observadas no campo, capacidade de sustentação do meio de 30 cochonilha equivalente, 1 colónia com 2 ovos no início da simulação, 12 horas de luz, ausência de dispersão, ausência de predadores e ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard.

Neste caso, o período de tempo entre o momento zero em que são introduzidos dois ovos na simulação, em que esses ovos se desenvolvem até fêmea adulta e esta fêmea faz a postura dos primeiros ovos, é de 967 horas, o que corresponde a 40,3 dias. Comparando este resultado com os resultados da Fig. 4.8 para o pomar da Quinta da Bela Salema, infestações de 1994 no início de Julho, pode-se afirmar que foram obtidos valores da mesma ordem de grandeza (40,3 dias para a simulação, comparativamente a 41,45 dias, 42,81 dias e 43,15 dias observados em ensaios de campo). Este resultado indica-nos, com alguma proximidade, a previsão correcta para o período de desenvolvimento de um indivíduo. Como tal, pode-se afirmar que os pressupostos e modelos matemáticos usados para o cálculo do desenvolvimento de uma geração de *P. citri* estão correctos.

Análise similar à anterior poderá ser feita para a duração de cada instar considerado através de comparação dos resultados da Fig. 6.24 com a Fig. 4.9.

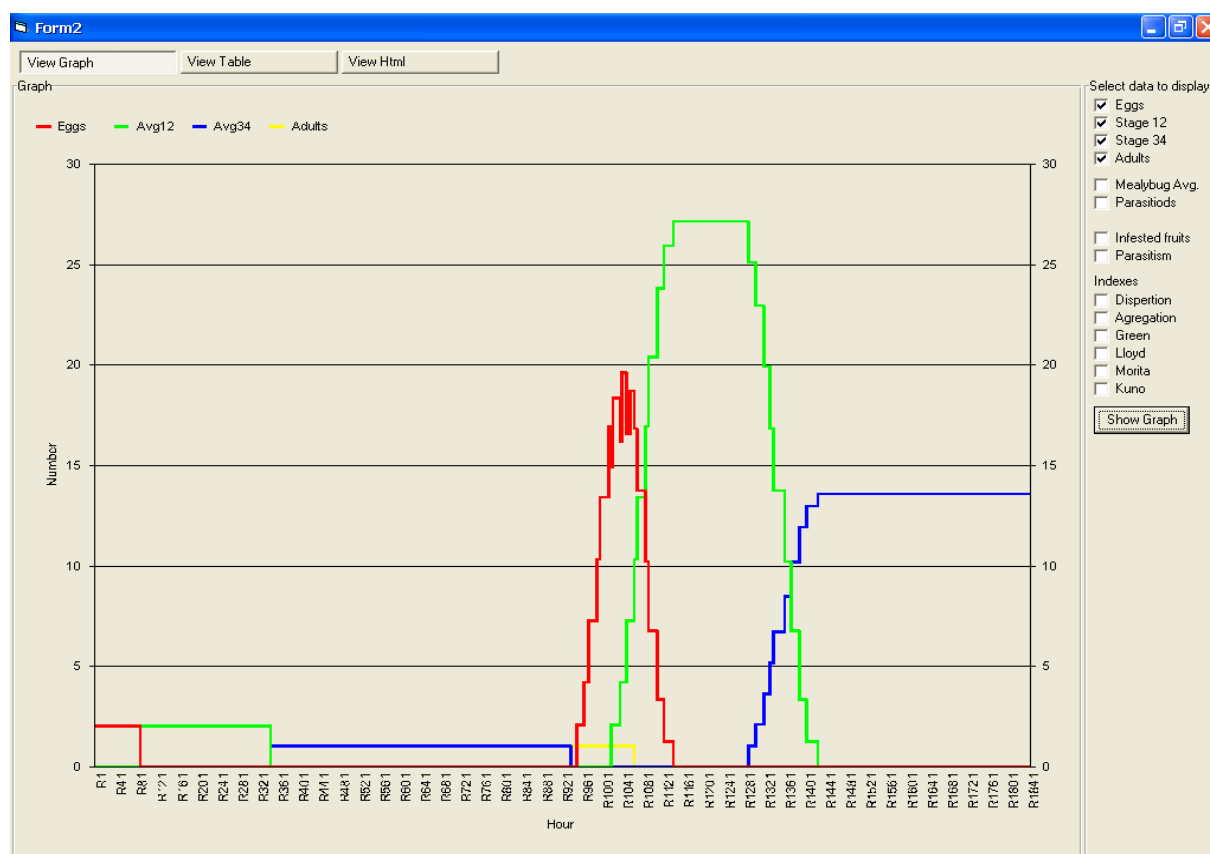


Fig. 6.24 - Resultado de SimCitri para verificação do período de desenvolvimento de cada estágio de *Planococcus citri* (Risso). Simulação para 77 dias com temperatura horária calculada a partir dos valores de temperatura máxima e mínima observadas no campo, capacidade de sustentação do meio de 30 cochonilha equivalente, 1 colônia com 2 ovos no início da simulação, 12 horas de luz, ausência de dispersão, ausência de predadores e ausência de *Leptomastix dactylopii* Howard.

Os resultados da Fig. 6.24 permitem verificar que a simulação de SimCitri para o desenvolvimento de *P. citri* para os mesmos valores de temperatura observados no campo para a Quinta da Várzea em 1996 que o estágio de ovo até ao final de segundo instar ficou completo em 14,5 dias (348 horas), e o estágio de ovo a terceiro e quarto instar pré-postura ficou completo após 39,2 dias (940 horas). No campo, e de acordo com a Fig. 4.9 o desenvolvimento de *P. citri* demorou de ovo até ao final de segundo instar 36 dias e de ovo a final de fêmea em pré-postura demorou 47 dias. A diferença maior entre o output de SimCitri e as observações de campo na determinação no campo verifica-se para a período ovo – final segundo instar.

Pode então verificar-se que se para o período de uma geração de *P. citri*, SimCitri prevê com alguma aproximação, para a duração de cada instar ou estágio esta previsão não é tão exacta. Estes resultados podem ser devidos à impossibilidade de acompanhamento mais rigoroso do desenvolvimento dos instares no campo; por impossibilidade de observação das exuvias para confirmar a passagem de instar; porque nos dados da Fig. 4.9 a duração de cada instar teve-se em consideração valores médios, enquanto que o período de uma geração teve-se em consideração a primeira observação em que se encontraram as primeiras fêmeas em postura. Também foi referido no

Capítulo 2.4 que o sucesso da reprodução de um processo natural de um modelo (neste caso simulação) baseado em observações de insectos em condições de laboratório, é muitas vezes afectado pela inevitável modificação do desempenho biológico do insecto sob condições artificiais quando comparado com condições naturais (Battisti & Cescatti 1994). Pensa-se que no caso dos modelos de desenvolvimento usados em SimCitri também se incorporaram as diferenças apontadas por Battisti & Cescatti (1994), neste caso, taxas de desenvolvimento optimizadas para cada temperatura.

6.6.4 Parasitismo de *Leptomastix dactylopii* Howard

Neste Capítulo proceder-se-á à análise de sensibilidade de SimCitri para a relação de parasitismo entre *L. dactylopii* e *P. citri*. Para tal, efectuar-se-ão simulações em que se varia a intensidade de variáveis força, variáveis auxiliares e parâmetros como fotoperíodo, temperatura, dose de parasitóides, presença ou ausência de dispersão da cochonilha algodão, presença ou ausência de predadores e área de descoberta de *L. dactylopii*.

Sensibilidade à luz

Para verificação da influência do fotoperíodo no output de parasitismo de SimCitri, apresentam-se para comparação os dois conjuntos de Figs. 6.25 a 6.27 e Figs. 6.28 a 6.30. Estes dois conjuntos são homólogos, sendo apenas diferenciados pelo fotoperíodo iluminado de 6 horas e 18 horas respectivamente. Comparando as Figs. 6.26 e 6.28 pode-se observar que para uma mesma população inicial de *P. citri*, no caso da primeira Fig. o número de hospedeiros susceptíveis a *L. dactylopii* nos terceiro e quarto instares decresce, aumenta consideravelmente e depois novamente decresce, mantendo-se a um nível populacional baixo que não sobe acima de quatro indivíduos por colónia. Na segunda figura, o número de indivíduos por colónia mantém-se sensivelmente constante à volta de 10 sobe depois repentinamente, decresce de seguida para valores próximos de zero indivíduos por colónia e torna novamente a crescer até cerca de 13 indivíduos por colónia, momento em que a simulação parou. Estes resultados sugerem que num ambiente mais iluminado, pelo menos para um período de 30 dias *L. dactylopii* é menos eficaz no parasitismo do seu hospedeiro. Comparando também as Figs 6.26 e 6.29 podemos observar que num ambiente menos iluminado, o número de parasitóides adultos *L. dactylopii* chegou a 16 indivíduos por metro quadrado, enquanto que no caso oposto o número de indivíduos apenas chegou a pouco menos de 5 indivíduos por metro quadrado. Verificar ainda para ambas as Figs. que após a largada inicial dos parasitóides existe um decréscimo inicial do número de indivíduos até valores muito baixos próximo de zero, tal como previsto no modelo teórico representado na Fig. 5.14 e equações (5.2) e (5.4). Finalmente nas Figs. 6.27 e 6.30 podemos verificar em primeiro lugar que o output do parasitismo não é contínuo. Este comportamento deve-se ao facto do parasitismo apenas ocorrer durante o período iluminado. Por essa mesma razão na Fig. 6.27 os períodos de parasitismo são mais curtos do que na Fig. 6.30.

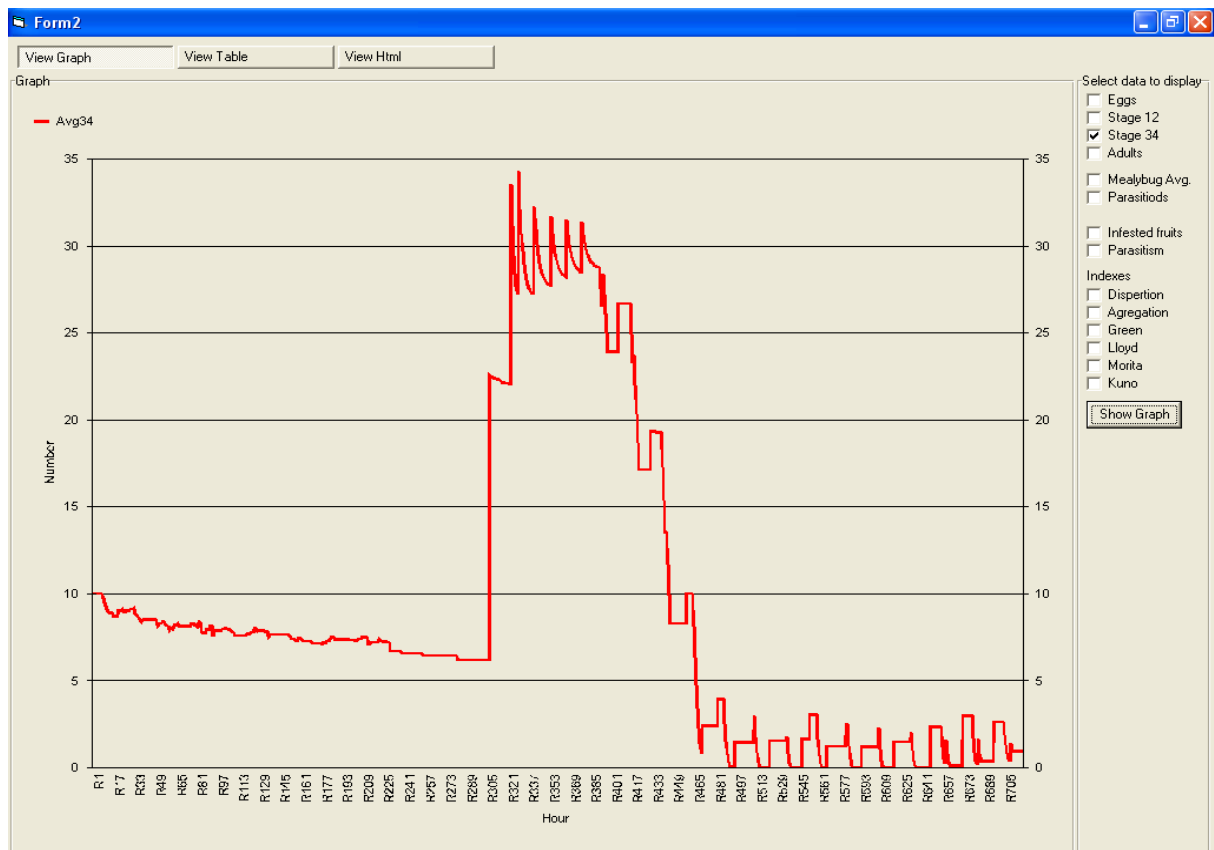


Fig 6.25 – Resultado de simulação de SimCitri para o número de indivíduos em instares 3 + 4 para verificação da influencia do fotoperíodo sobre o parasitismo de *Leptomastix dactylopii* Howard sobre *Planococcus citri* (Risso). Fotoperíodo 6L:18E, temperatura constante de 26°C, 5 colônias de *P. citri* cada uma com 10 indivíduos em cada estágio, ausência de predadores, migração de populações de *P. citri*, 30 dias de simulação, 2 parasitóides m².

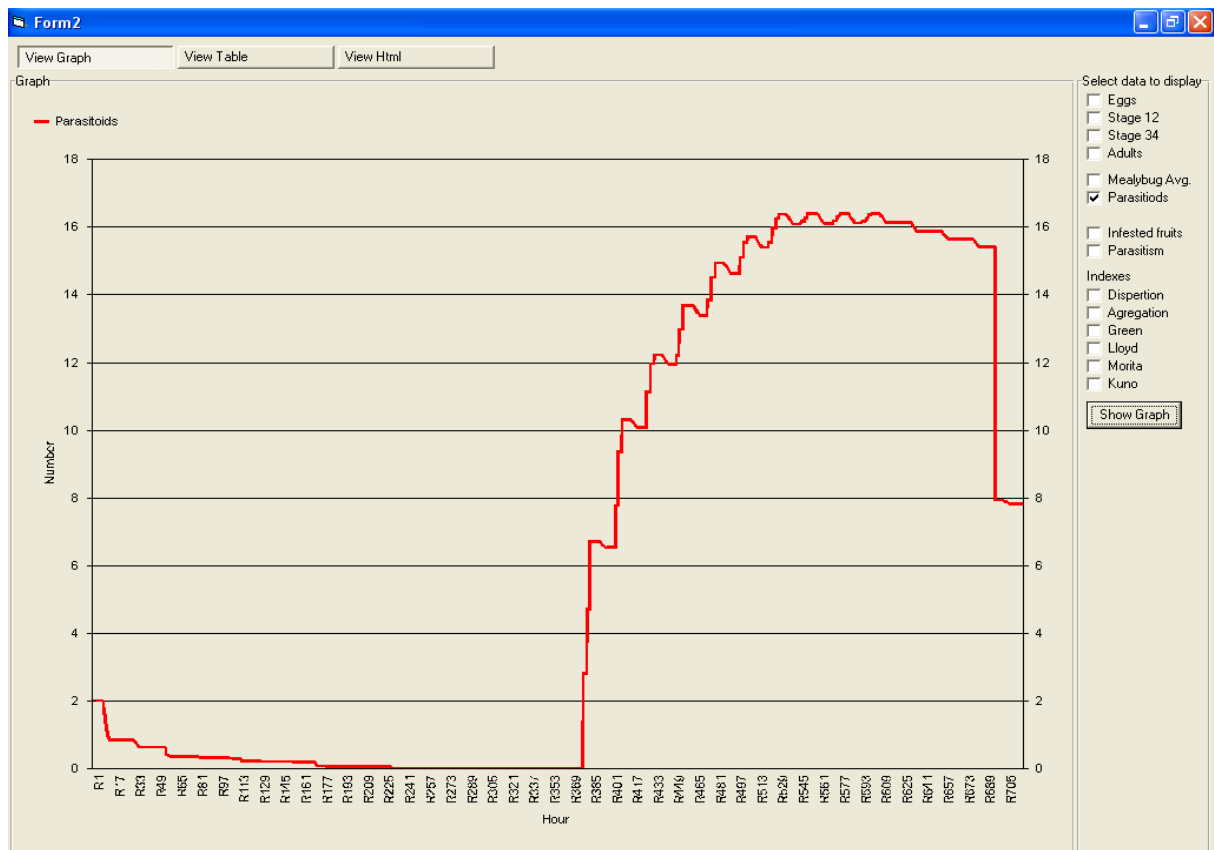


Fig. 6.26 – Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides adultos, nas mesmas condições que na Fig. 6.25.

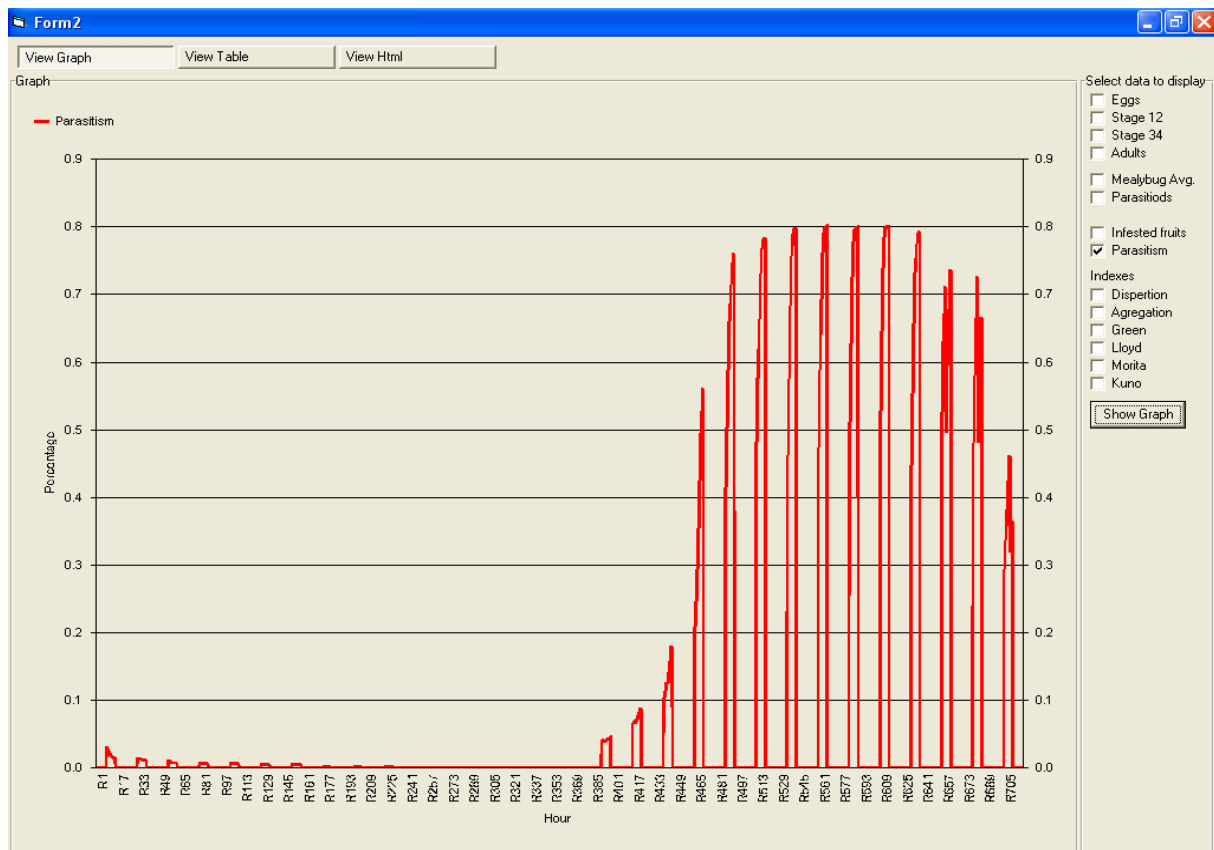


Fig. 6.27 - Resultado de simulação de SimCitri para percentagem de parasitismo, nas mesmas condições que na Fig. 6.25.

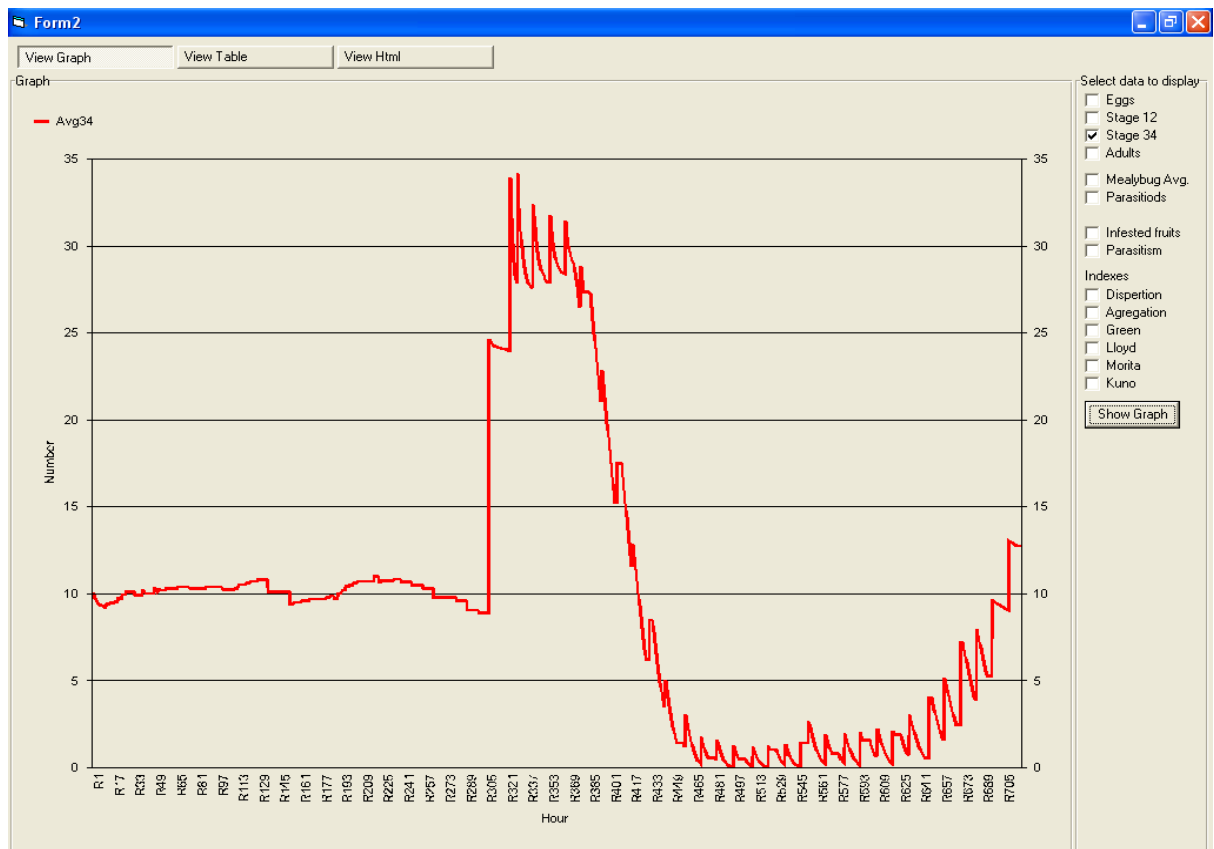


Fig 6.28 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de indivíduos em instares 3 + 4 nas mesmas condições que na Fig. 6.25, excepto fotoperíodo 18L:6E.

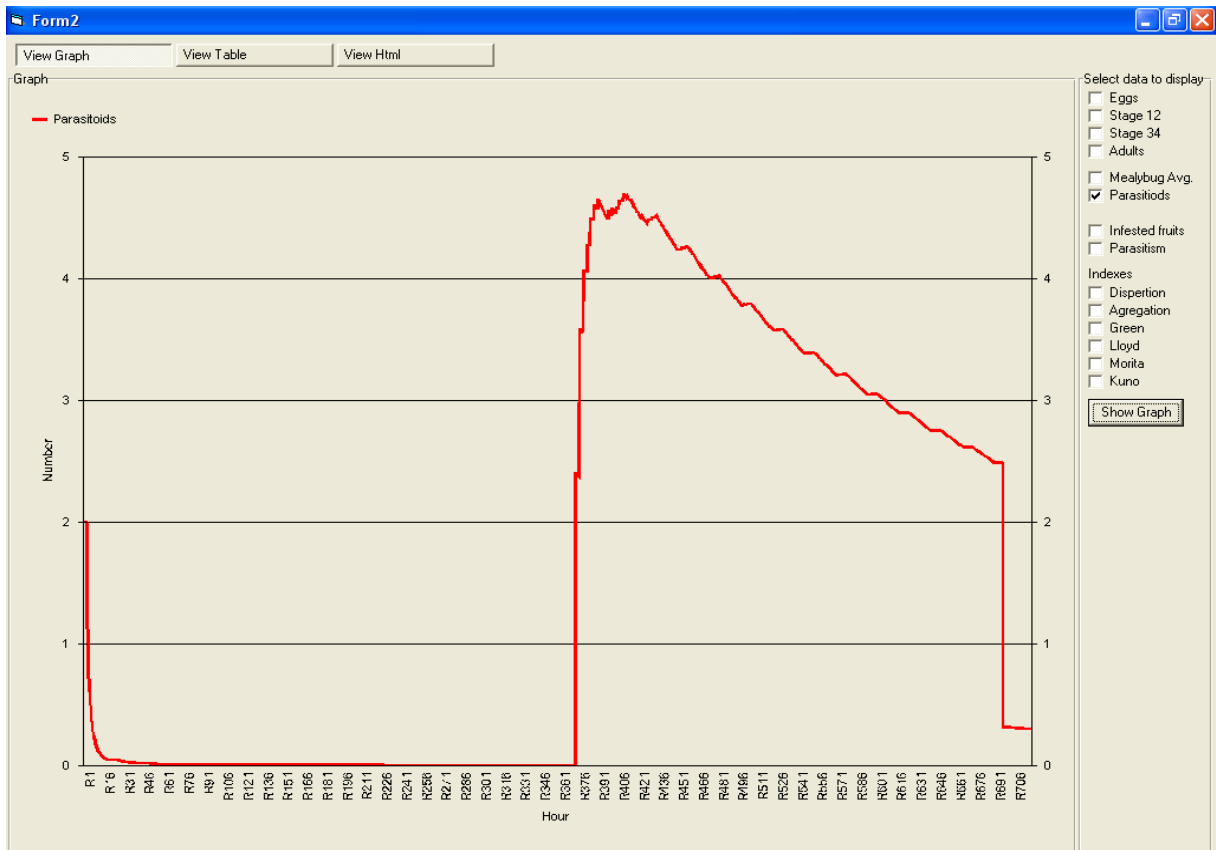


Fig. 6.29 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides adultos, nas mesmas condições que na Fig. 6.28.

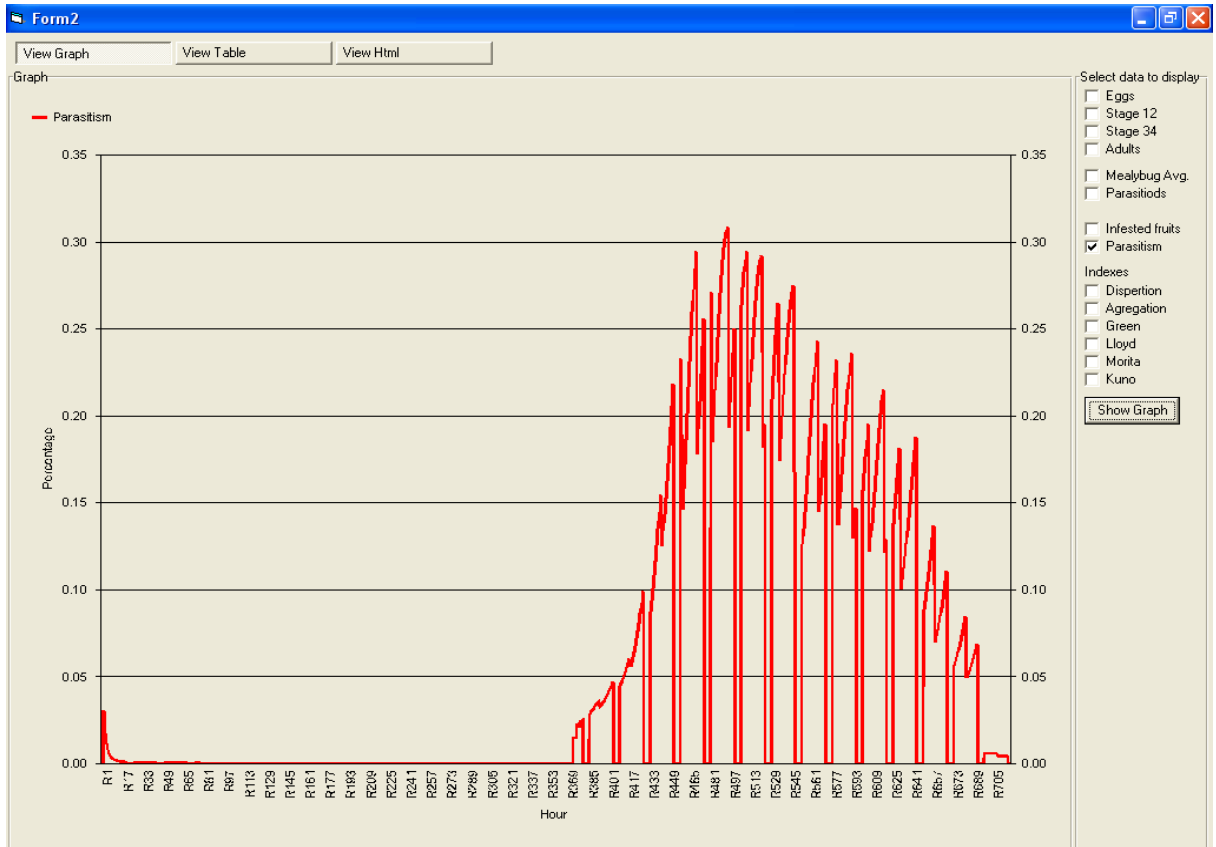


Fig. 6.30 - Resultado de simulação de SimCitri para percentagem de parasitismo, nas mesmas condições que na Fig. 6.28.

Após observação destes resultados, podemos afirmar que no caso de um período iluminado mais longo o parasitismo é mais baixo porque os parasitóides têm mais tempo para se difundir no terreno, existindo uma densidade mais baixa de *L. dactylopii* por m². Por outras palavras a área total de difusão dos parasitóides é maior mas o seu impacto nas populações do hospedeiro é menor. No caso de um período iluminado mais curto a área total de difusão dos parasitóides é menor, mas o parasitismo sobre o hospedeiro é maior. Interessante ainda verificar como um período mais longo de luz proporciona um período mais longo de postura, mas a desvantagem da diluição da população é maior do que o benefício de mais horas de luz para postura.

Influência da dispersão de *P. citri* sobre o parasitismo por *L. dactylopii*

As Figs. 6.31 a 6.34 têm por objectivo mostrar a influência da dispersão de *P. citri* sobre a actividade parasítica de *L. dactylopii*. Comparando as Figs. 6.31 a 6.33 com as Figs. homologas 6.25 a 6.27 podemos verificar que os dois conjuntos são muito semelhantes entre si. Este resultado sugere que o facto das populações de *P. citri* se encontrarem em dispersão não influencia o parasitismo por *L. dactylopii*. Verificar também na Fig. 6.34 que a infestação de frutos por *P. citri* aumenta até próximo de 90% e depois decresce até 85% valor a que se manteve constante até ao final da simulação. Para o período da simulação, o parasitóide *L. dactylopii* não foi capaz de reduzir o número de frutos infestados.

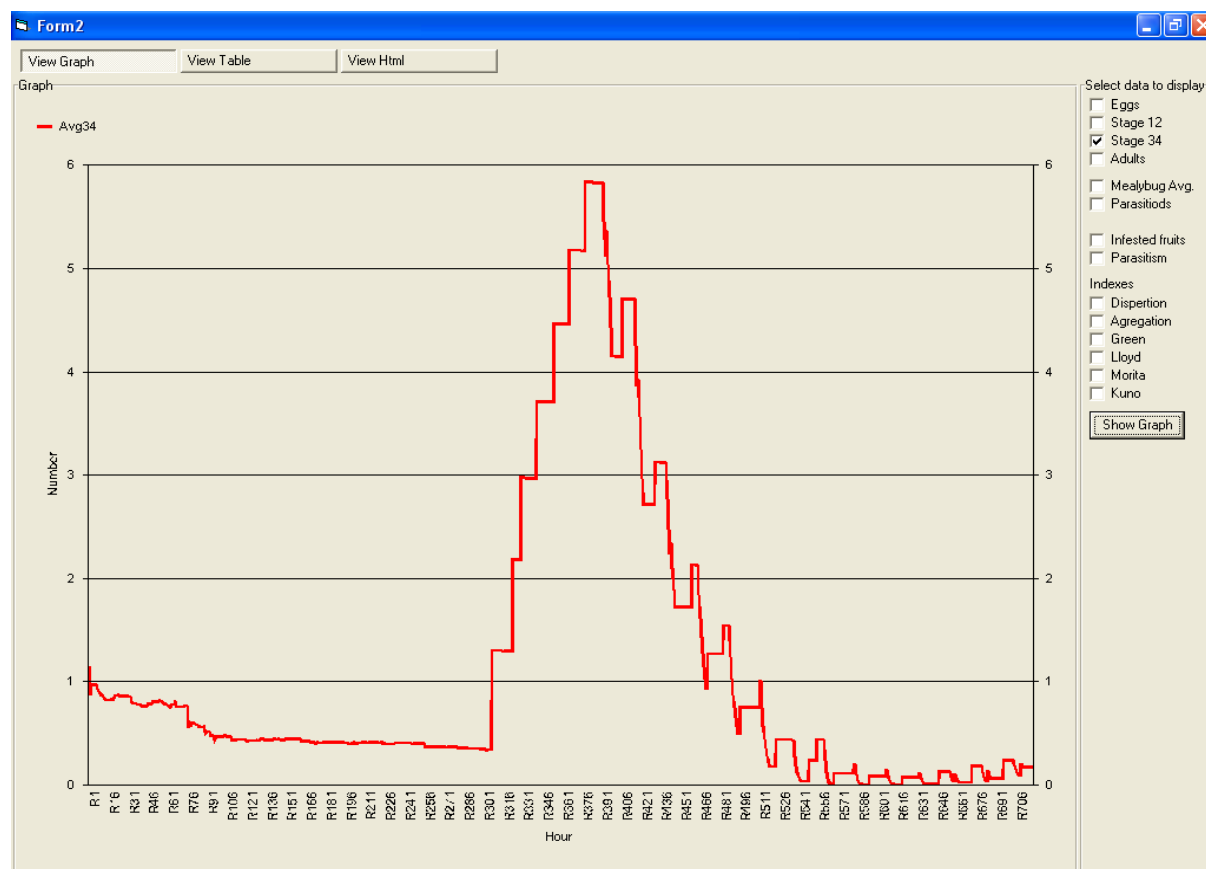


Fig. 6.31 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de indivíduos em instares 3 + 4 para verificação da influência da dispersão de *Planococcus citri* (Risso) sobre o parasitismo por *Leptomastix dactylopii* Howard. Fotoperíodo 6L:18E, temperatura constante de 26 °C, 5 colónias de *P. citri* cada uma com 10 indivíduos em cada estadio, ausência de predadores, migração de populações de *P. citri*, 30 dias de simulação, 2 parasitóides/m².

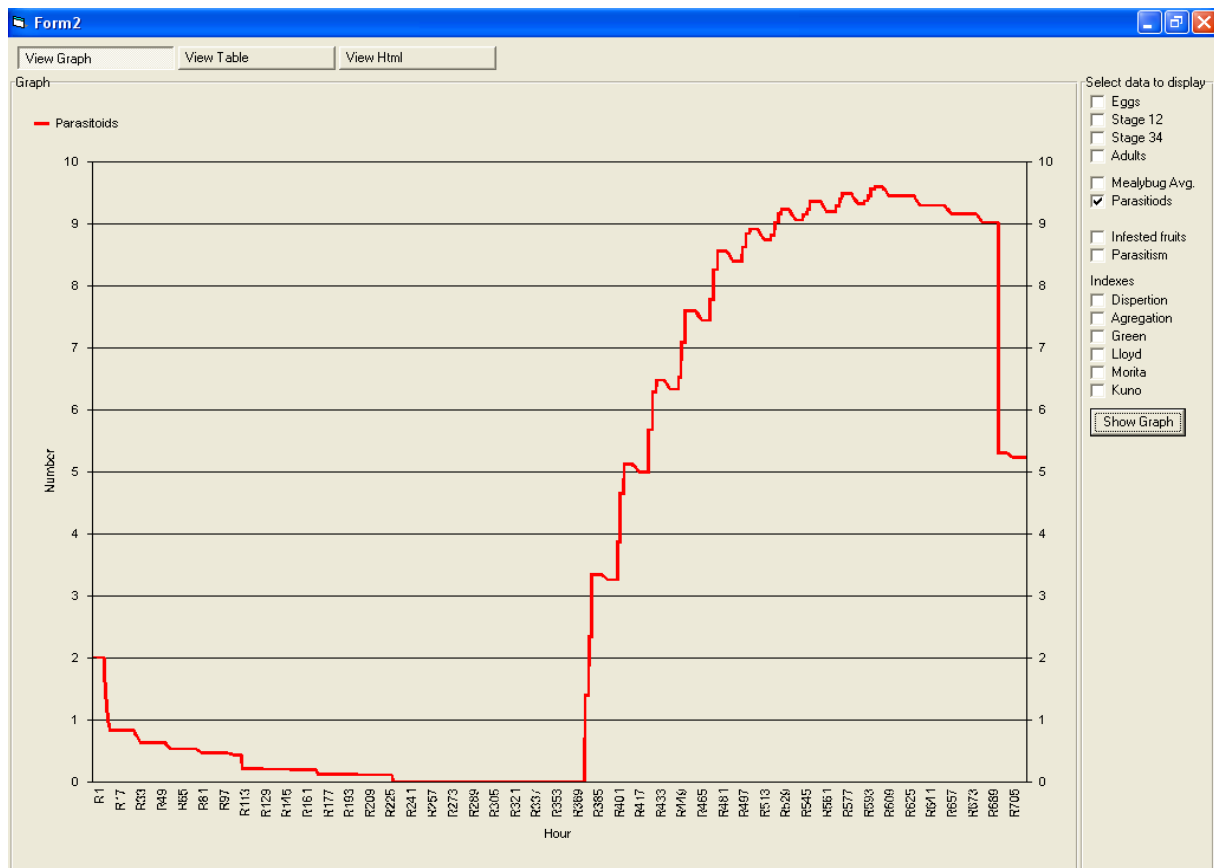


Fig. 6.32 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides adultos, nas mesmas condições que na Fig. 6.31.

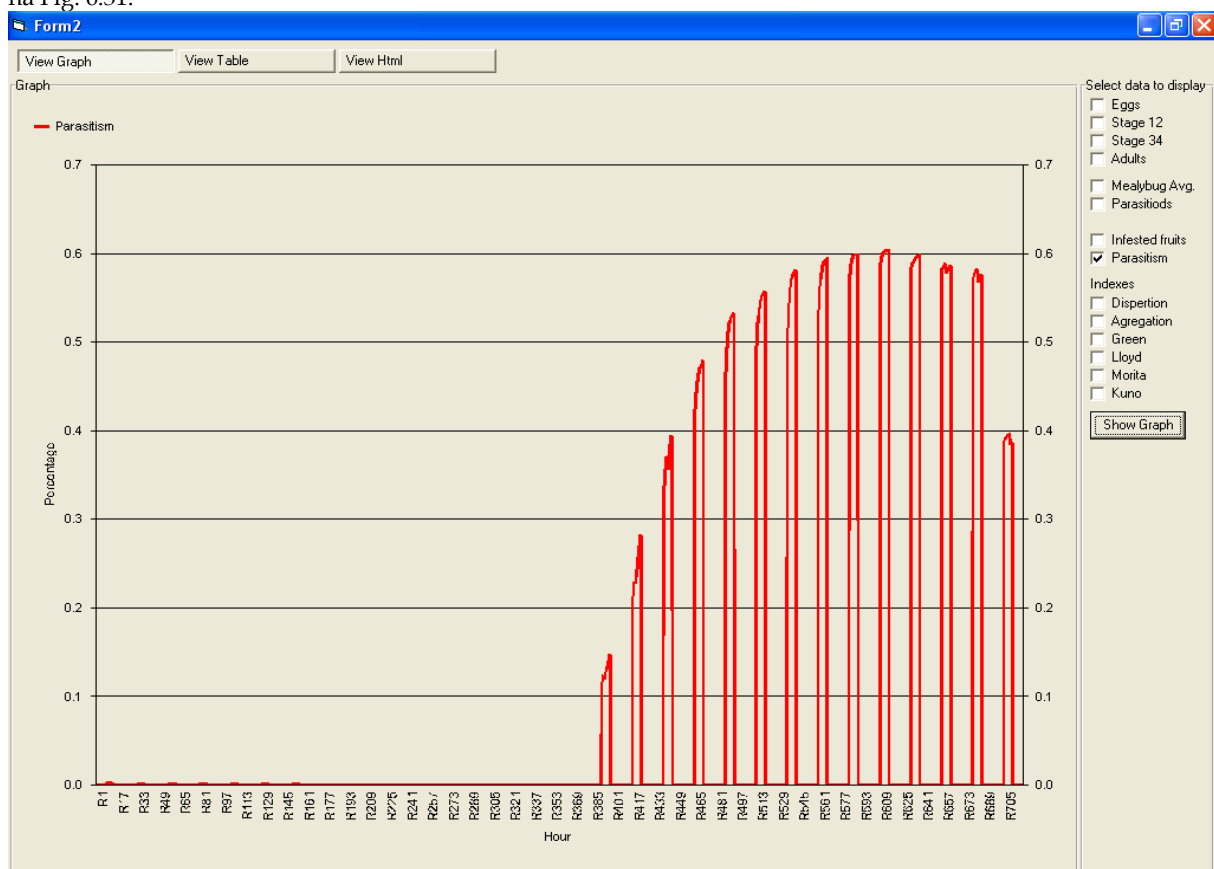


Fig. 6.33 - Resultado de simulação de SimCitri para percentagem de parasitismo, nas mesmas condições que na Fig. 6.31.

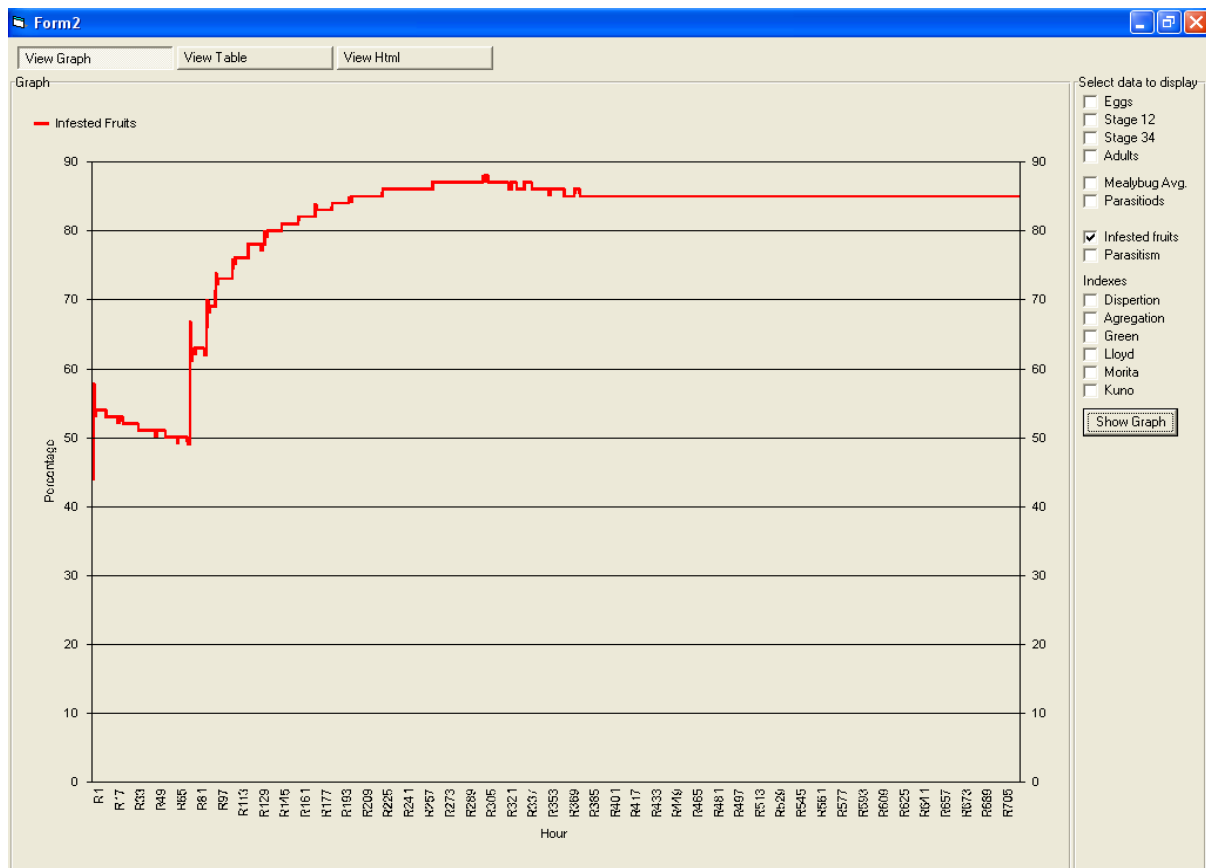


Fig. 6.34 – Resultado de simulação de SimCitri para percentagem de frutos infestados por *Planococcus citri* (Risso), nas mesmas condições que na Fig. 6.31.

Influência de predadores

Nas Figs. 6.35 a 6.38 mostra-se o resultado de SimCitri para avaliar o impacto da actividade de predadores sobre as populações de *P. citri* e *L. dactylopii*. Comparando as Figs. 6.35 a 6.38 com as Figs. homólogas 6.31 a 6.33 podemos verificar que os dois conjuntos diferem entre si. Comparando a Fig. 6.31 com a Fig. 6.35, a densidade de cochonilha algodão no instar 3 + 4 difere nos dois casos. Enquanto que na Fig. 6.31 o número de indivíduos por fruto sobe e desce, no caso da Fig 6.35, os indivíduos no mesmo estado de desenvolvimento mantêm-se até cerca metade do período da simulação na mesma densidade próxima do valor zero, após o que crescem até valores médios próximo de 40 indivíduos por fruto.

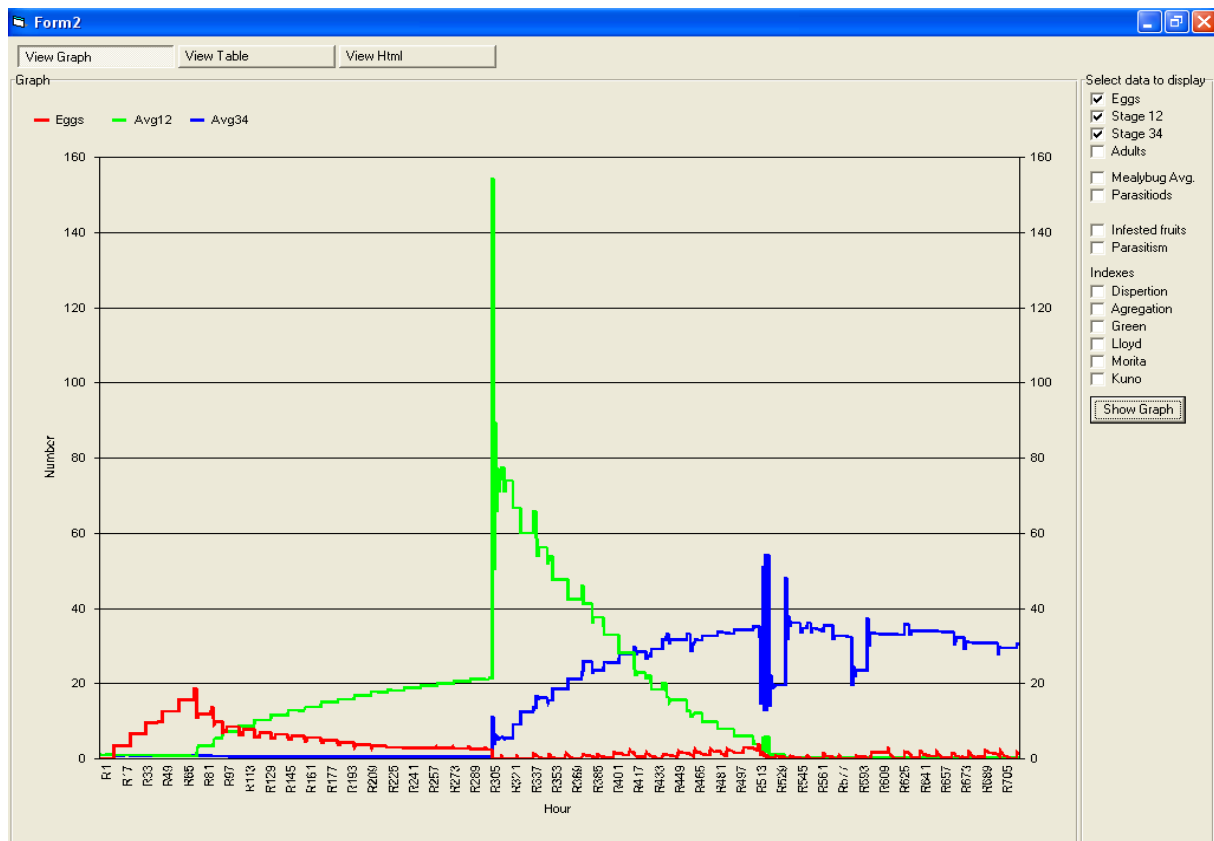


Fig 6.35 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de ovos e indivíduos em instares 1 + 2 e 3 + 4 para verificação da influência de predadores sobre as populações de *Planococcus citri* (Risso) e *Leptomastix dactylopii* Howard e a relação de parasitismo entre estas espécies. Fotoperíodo 6L:18E, temperatura constante de 26 °C, 5 colônias de *P. citri* cada uma com 10 indivíduos em cada estágio, presença de predadores, migração de populações de *P. citri*, 30 dias de simulação, 2 parasitoides/m².

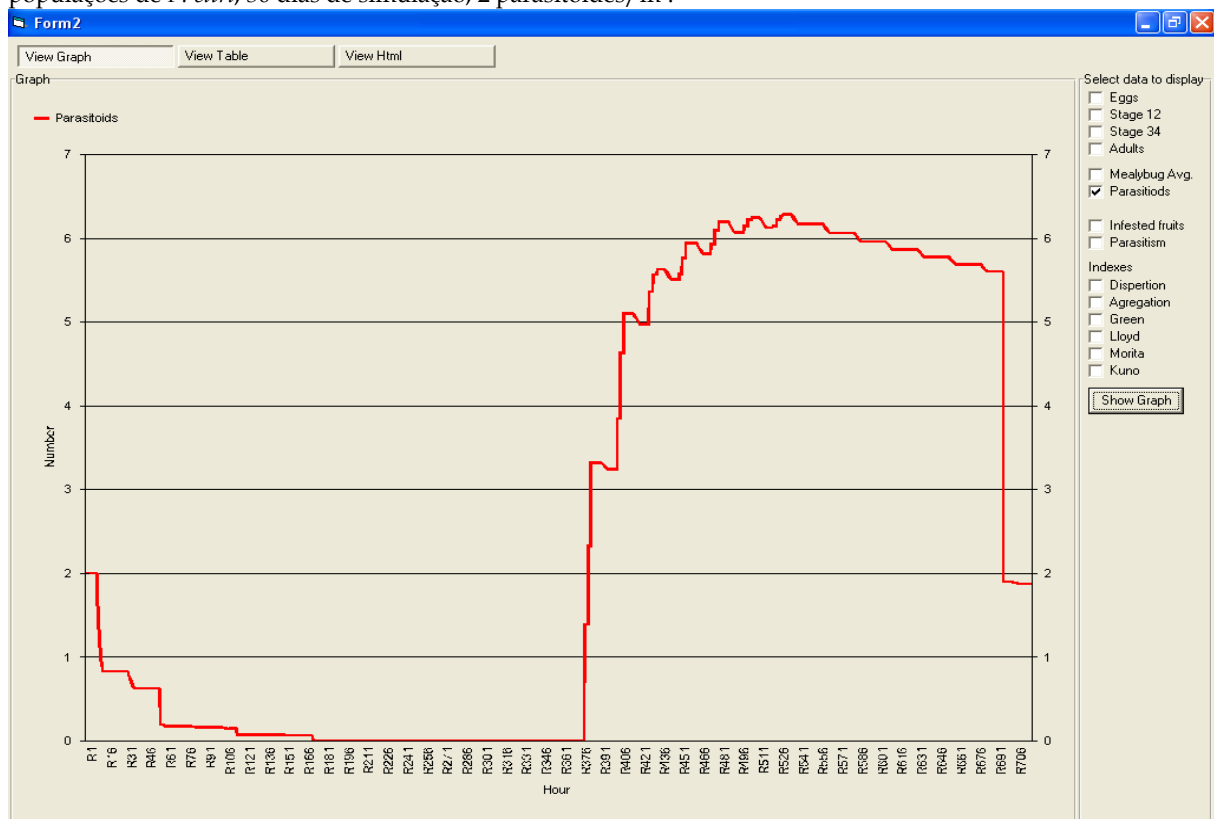


Fig. 6.36 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitoides nas mesmas condições que na Fig. 6.35.

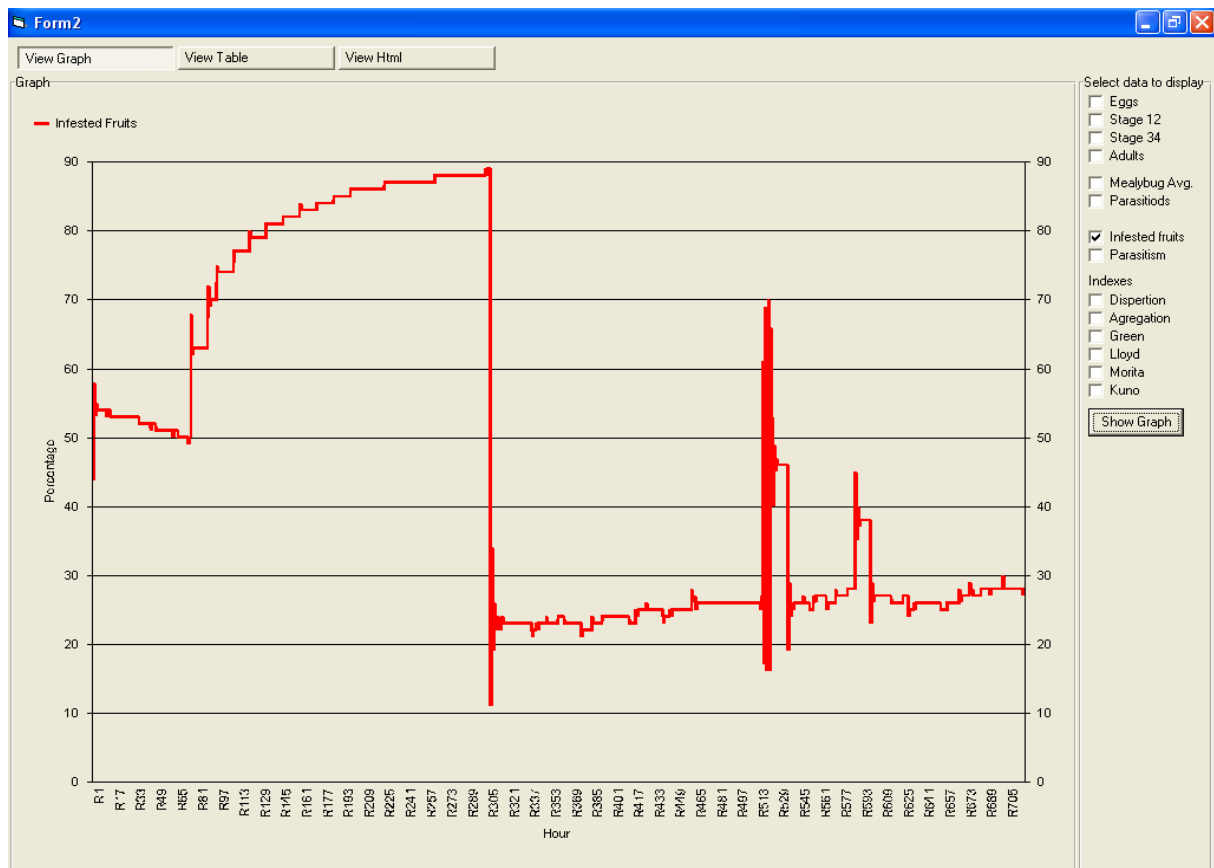


Fig. 6.37 - Resultado de simulação de SimCitri para frutos infestados por *Planococcus citri* (Risso) nas mesmas condições que na Fig. 6.35.

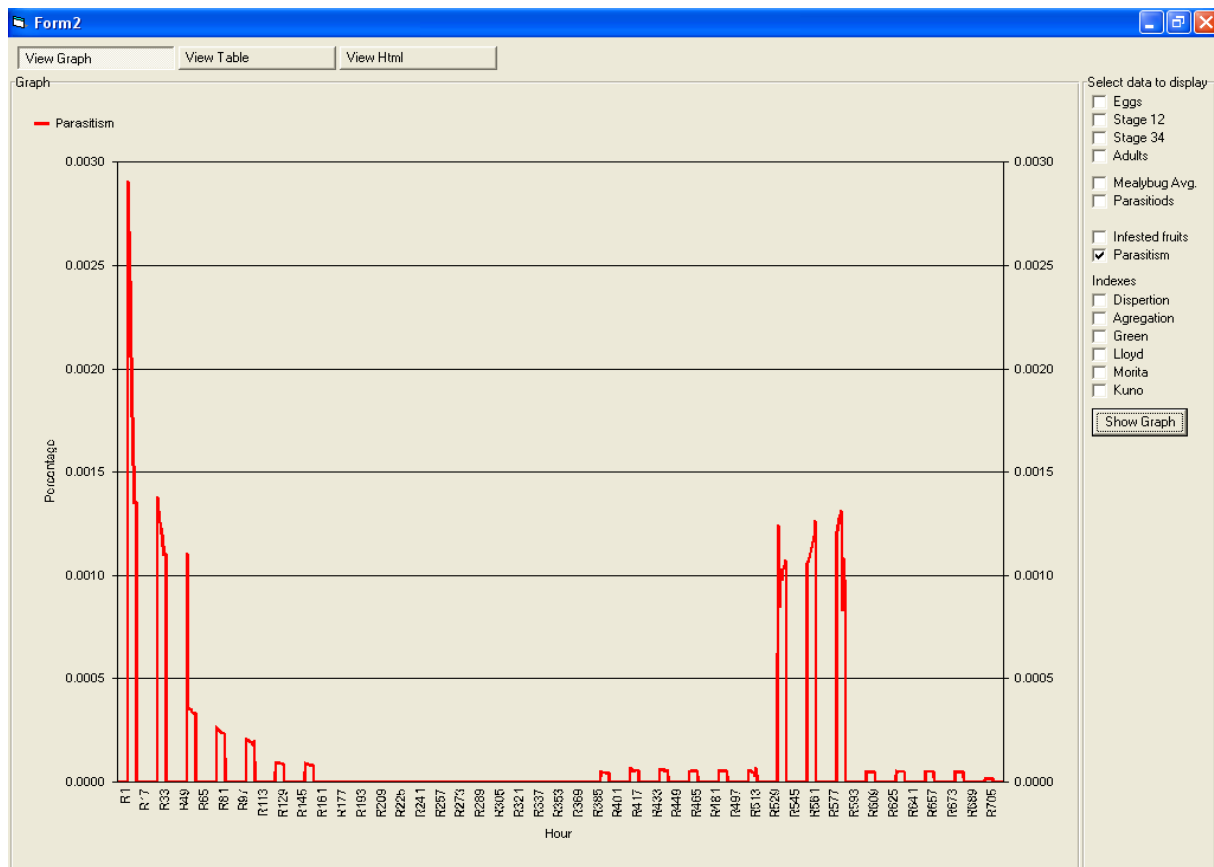


Fig 6.38 - Resultado de simulação de SimCitri para o parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.35.

As Figs 6.32 e 6.36 são semelhantes entre si no entanto, no segundo caso o número de parasitóides cresce até 7 indivíduos por metro quadrado enquanto que no primeiro caso esta densidade sobe até 10. Esta diferença deve-se ao facto dos predadores consumirem potenciais hospedeiros de *L. dactylopii*. Verificar ainda que os parasitóides não conseguem reduzir o nível de infestação dos frutos a curto prazo porque embora todos os indivíduos susceptíveis possam estar parasitados, ainda existem na colónia indivíduos noutros instares imunes ao parasitismo. Quando se colocam predadores o output da simulação altera-se porque os predadores atacam e alimentam-se de indivíduos em todos os estádios de desenvolvimento e então o número de frutos infestados baixa drasticamente (Comparar Figs 6.34 e 6.37 sem e com predadores). Como tal, o parasitóide só pode limitar as populações de *P. citri* quando parasitar todos os indivíduos nos 3 + 4 instares e impedir que as ninfas se desenvolvam a fêmeas adultas e consequentemente evitar a postura de ovos. De notar também que existe uma diferença muito grande entre as Figs 6.33 e 6.38 enquanto que no primeiro caso o parasitismo atinge 0,6 %, no segundo caso o parasitismo não passa de 0,003%, ou seja, 200 vezes menos intenso. Também, na Fig. 6.33 o parasitismo começa a ser mais elevado a partir de meio do período de simulação enquanto que na Fig. 6.38 o parasitismo é mais intenso no início após a largada, momento em que os parasitóides estão mais concentrados.

Influência da temperatura no parasitismo

A variável força temperatura determina os ritmos de desenvolvimento e reprodução de ambas as espécies de insectos (*P. citri* e *L. dactylopii*). No entanto a influência da temperatura nos ritmos de parasitismo é desconhecida. Como tal, nas Figs 6.39 a 6.44 mostra-se o resultado de SimCitri para três temperaturas constantes com o objectivo de mostrar diferenças no nível de parasitismo.

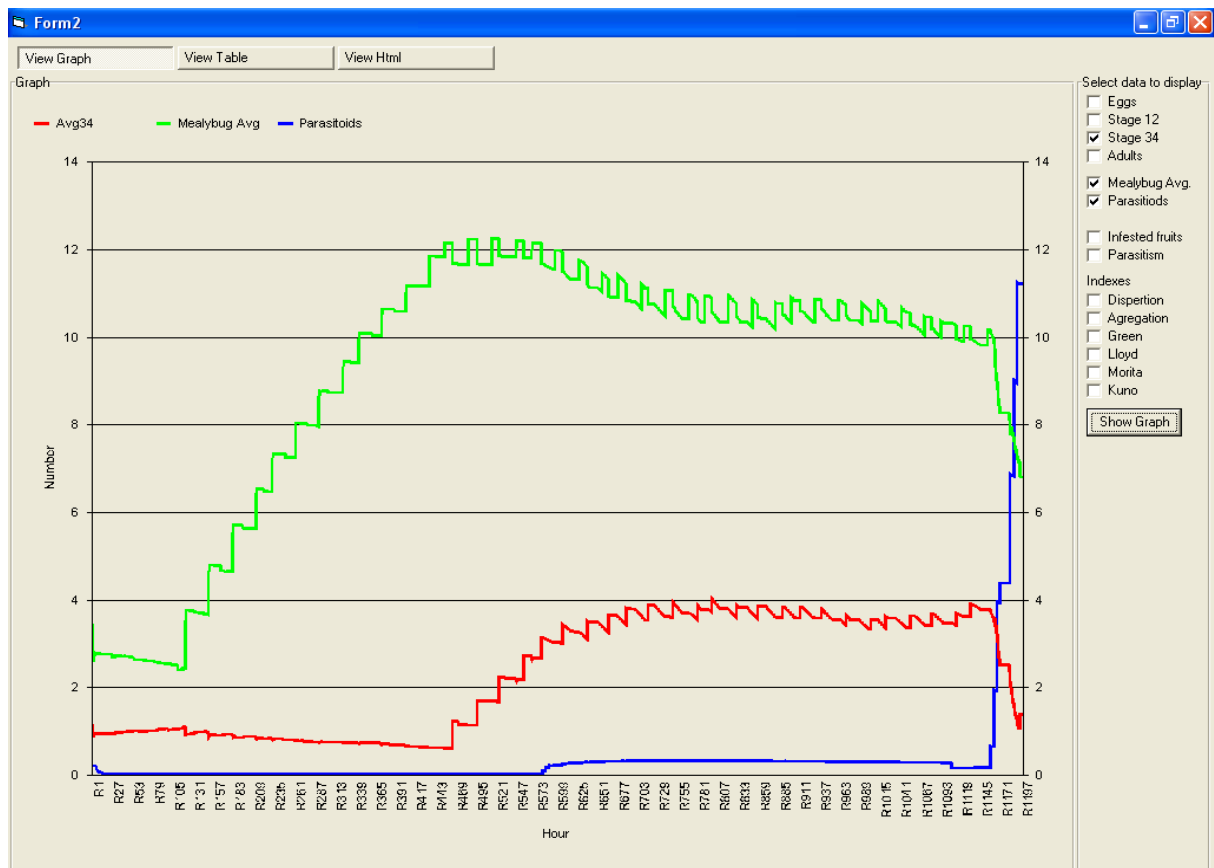


Fig. 6.39 – Resultado de simulação de SimCitri para verificação da influência da temperatura no número médio de cochonilhas por fruto, número médio de cochonilhas no instar 3 + 4 pré-postura por fruto e de *Leptomastix dactylopii* Howard por m^2 , para um período de 50 dias, temperatura constante de $21,5^{\circ}C$, capacidade de sustentação do meio de 30 indivíduos por fruto, fotoperíodo com 12 horas de luz, população inicial de *P. citri* em cinco colónias com 10 indivíduos para cada estágio desenvolvimento, dispersão da cochonilha e largada de 0,2 parasitóides/ m^2 .

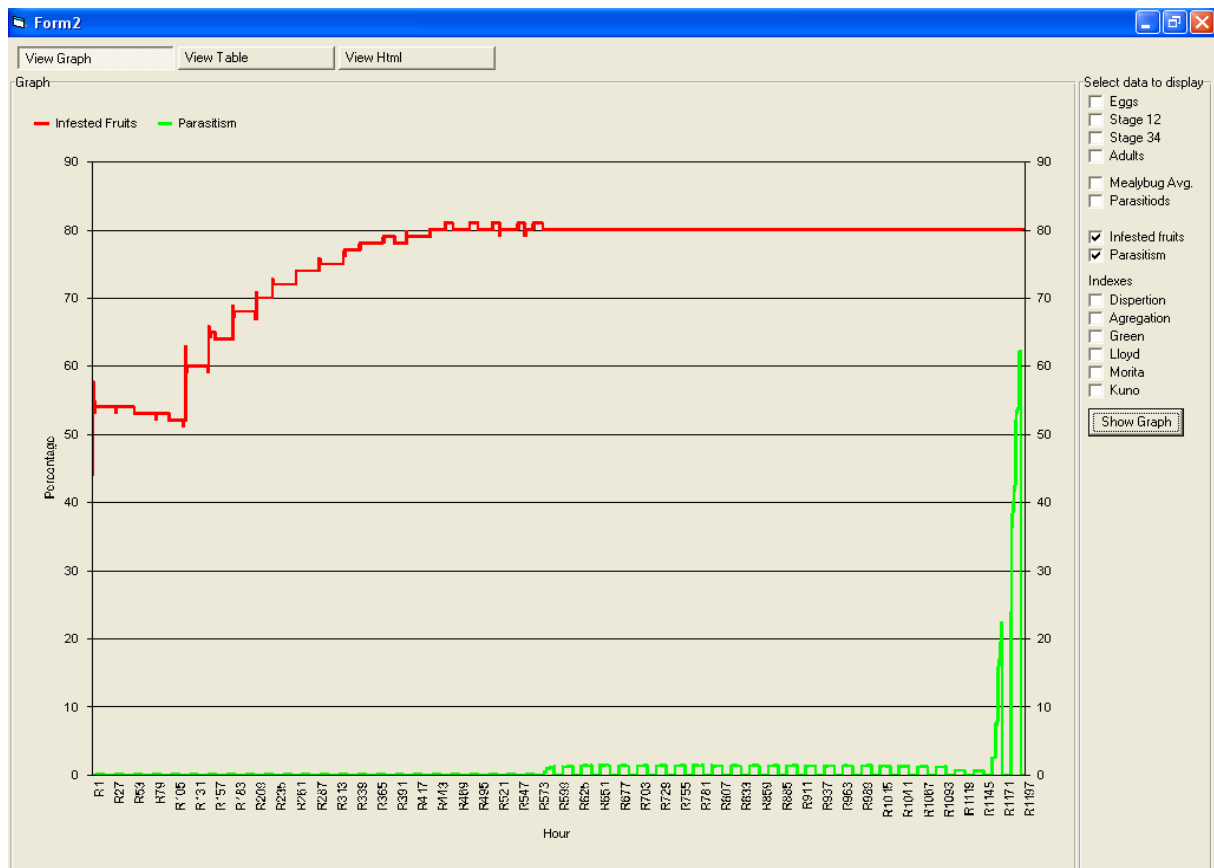


Fig. 6.40 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.39.

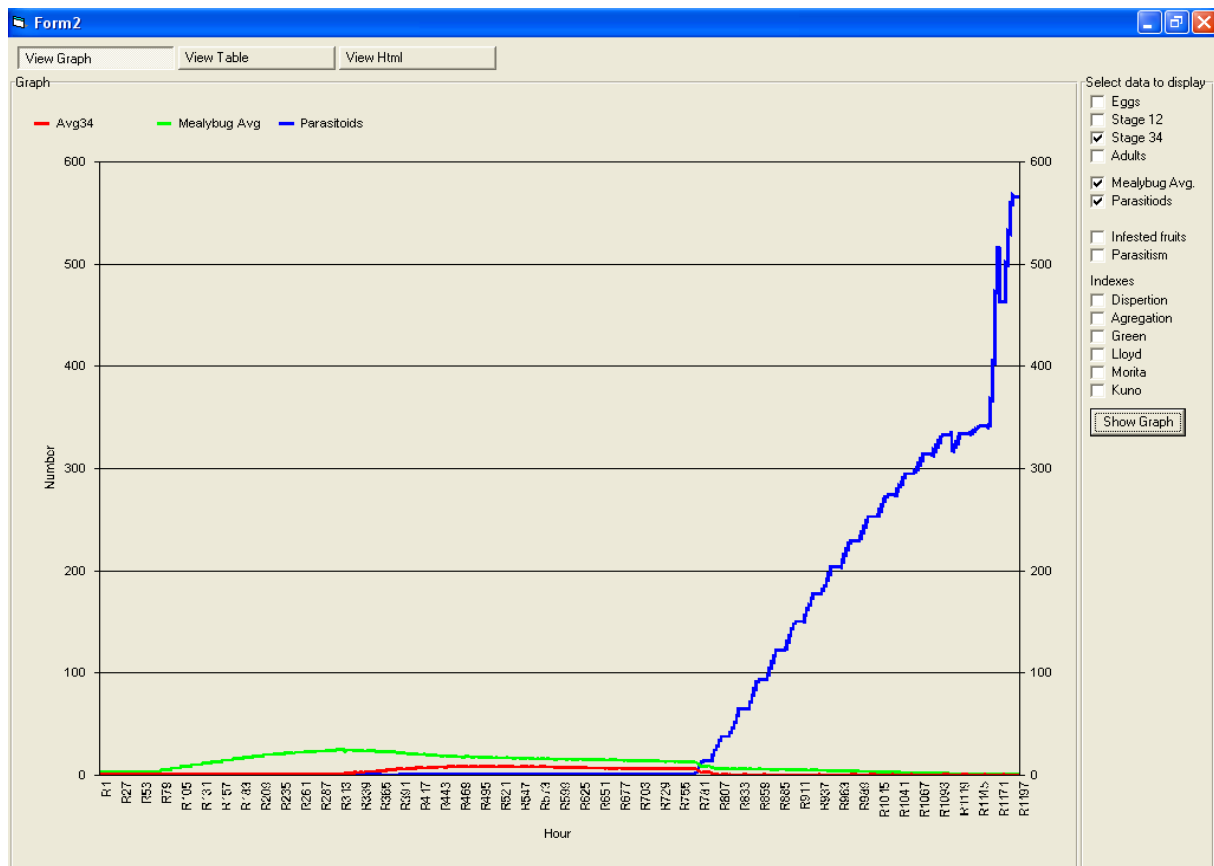


Fig. 6.41 - Resultado de simulação de SimCitri nas mesmas condições que na Fig. 6.39 mas temperatura constante de 25,5°C.

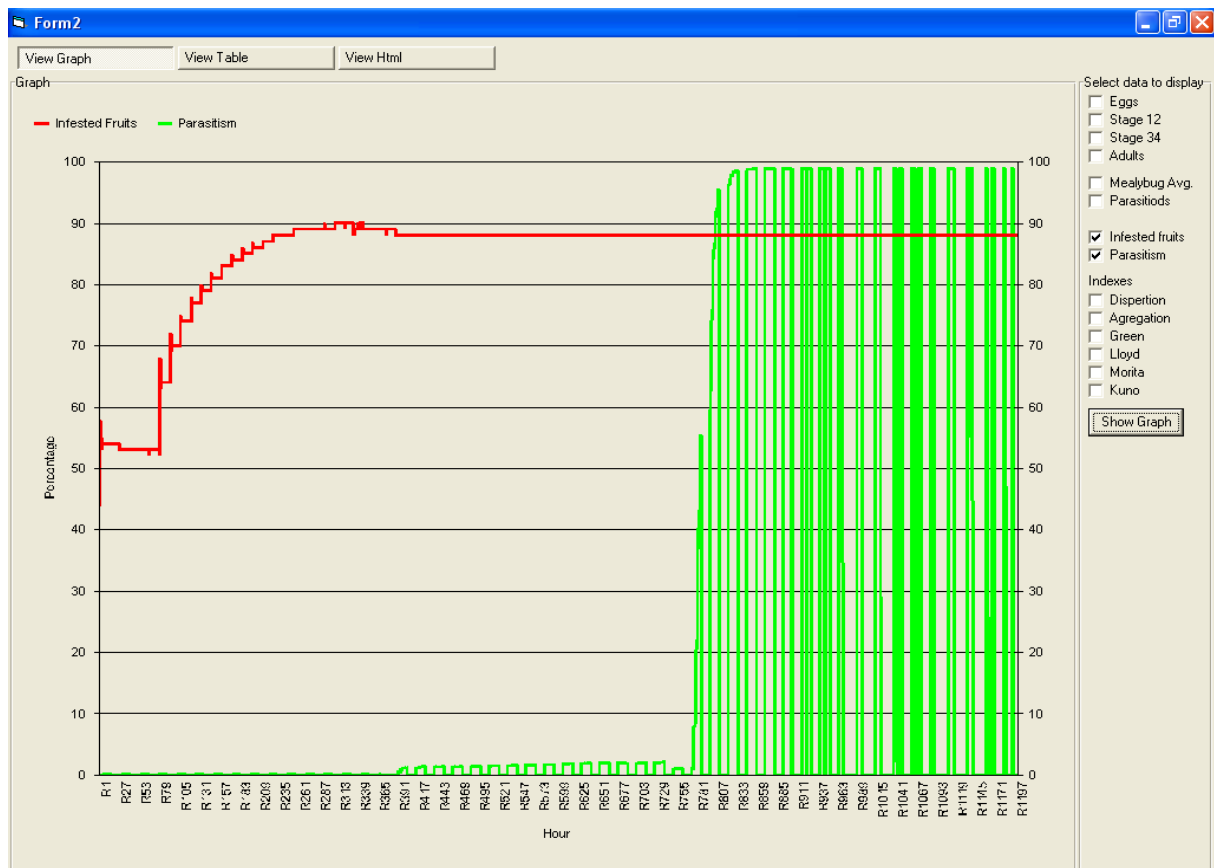


Fig. 6.42 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.39 mas temperatura constante de 25,5°C.

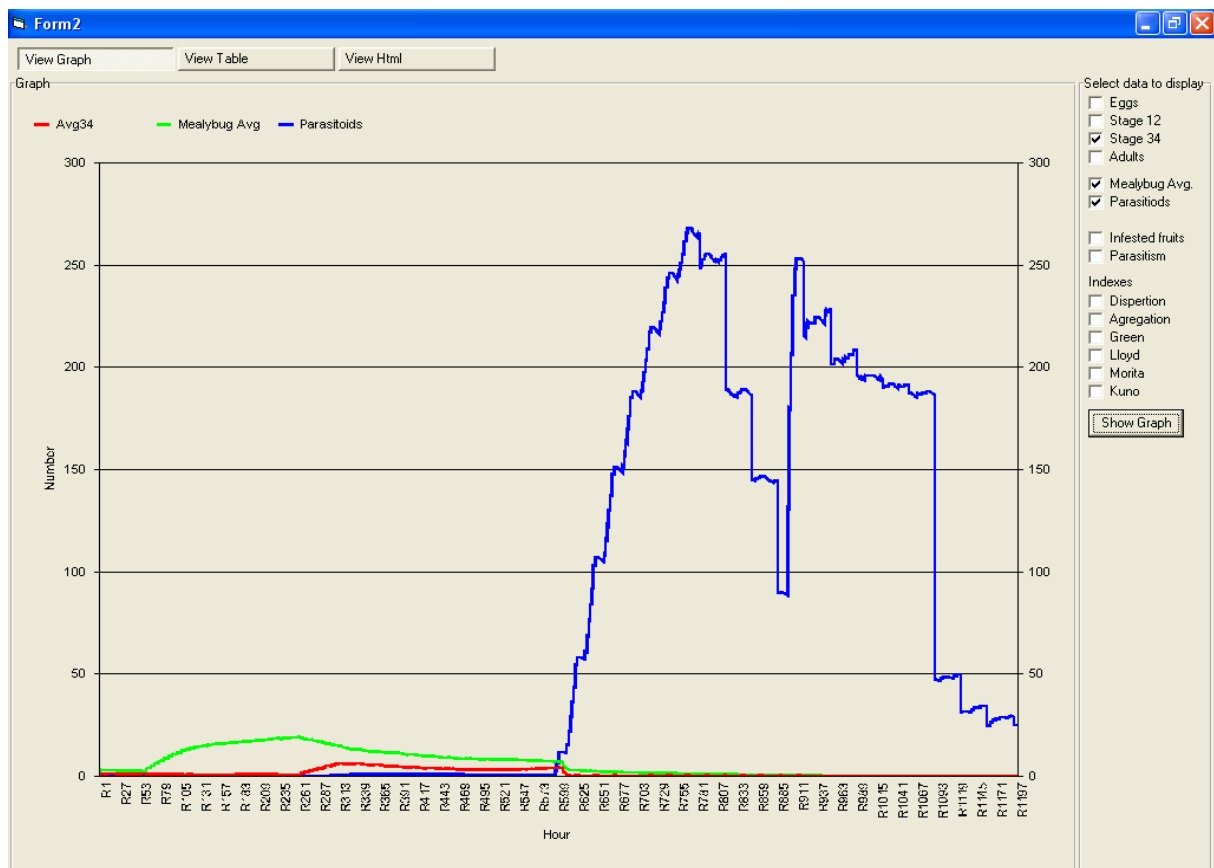


Fig 6.43 - Resultado de simulação de SimCitri nas mesmas condições que na Fig. 6.39 mas temperatura constante de 30,5 °C.

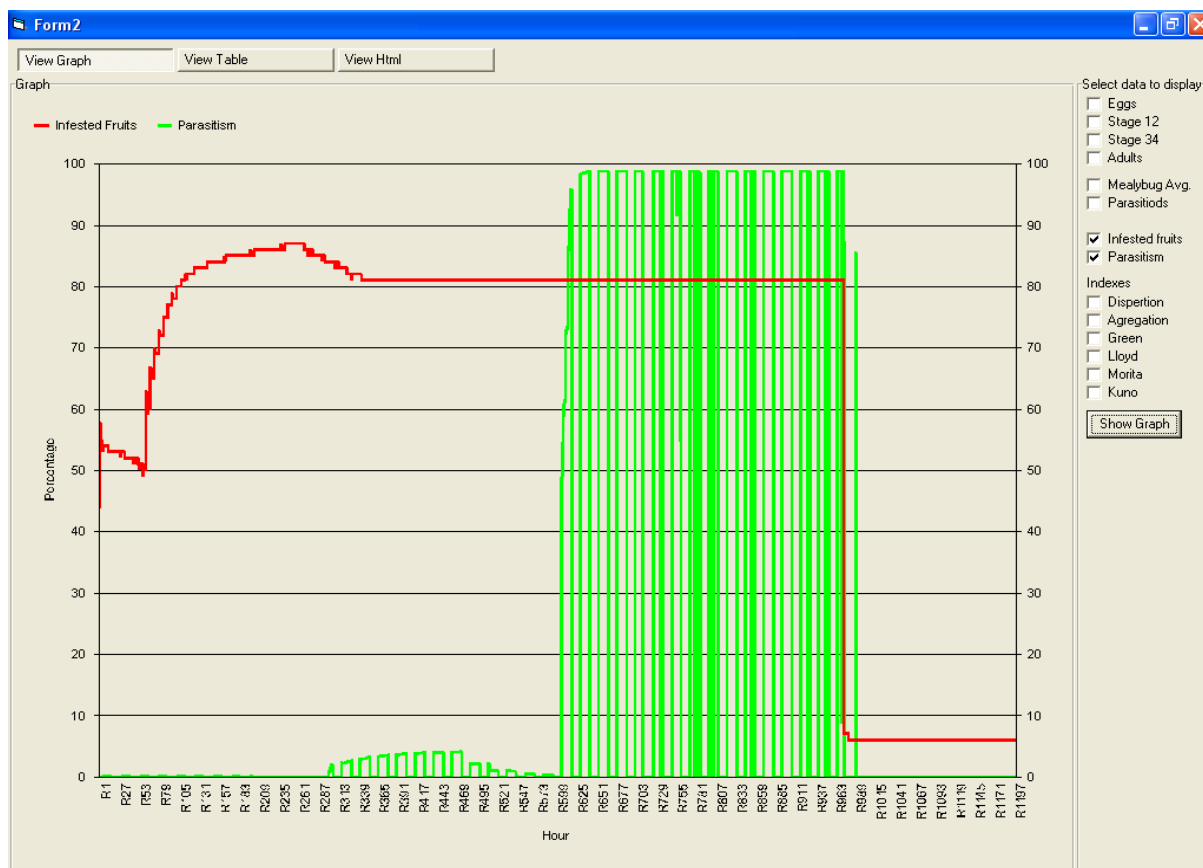


Fig 6.44 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.39 mas temperatura constante de 30,5°C.

No conjunto das seis Figs. 6.39 - 6.44 existem três conjuntos homólogos para as temperaturas respectivas de 21,5 °C, 25,5°C e 30,5°C. Após observação destes três conjuntos de Figs., pode-se afirmar que à medida que a temperatura de simulação aumenta, o parasitóide *L. dactylopii* é mais eficiente no parasitismo.

Influência da área de descoberta no parasitismo

No presente trabalho o parâmetro “área de descoberta” para as fêmeas de *L. dactylopii* não é conhecido. O actual valor de 0,1 tem como objectivo orientar na pesquisa da ordem de grandeza daquele parâmetro. Para tal, nas Figs. 6.45 a 6. 57 mostra-se o resultado de output de SimCitri em que se verifica a influência do valor da área de descoberta no parasitismo de *L. dactylopii* sobre *P. citri*.

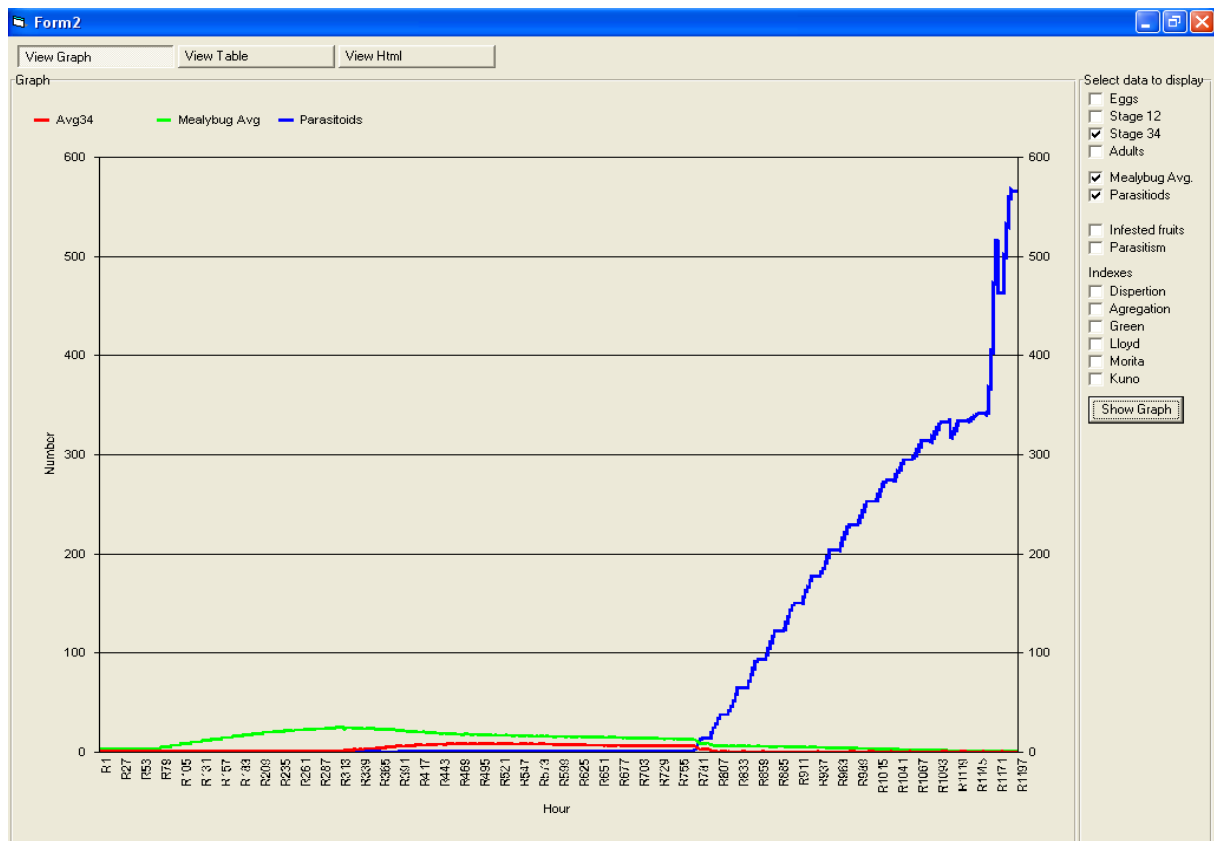


Fig 6.45 - Resultado de simulação de SimCitri para verificação do valor da influência da área de descoberta (0,1) no número médio de cochonilhas por fruto, número médio de cochonilhas no instar 3 + 4 por fruto e de *Leptomastix dactylopii* Howard por m^2 , para um período de 50 dias, temperatura constante de $25,5^{\circ}C$, capacidade de sustentação do meio de 30 indivíduos por fruto, fotoperíodo com 12 horas de luz, população inicial de *P. citri* em cinco colônias com 10 indivíduos para cada estágio desenvolvimento, dispersão da cochonilha e largada de $0,2$ parasitóides/ m^2 .

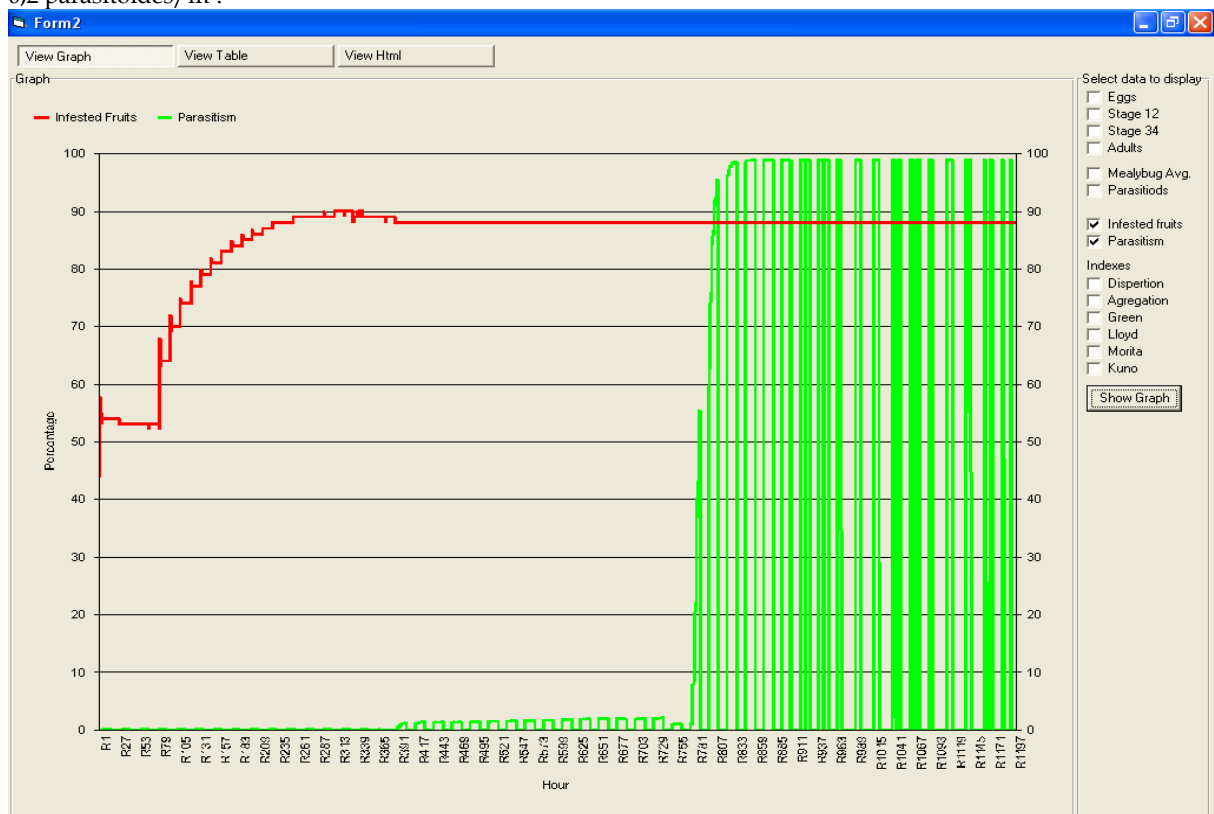


Fig 6.46 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.45.

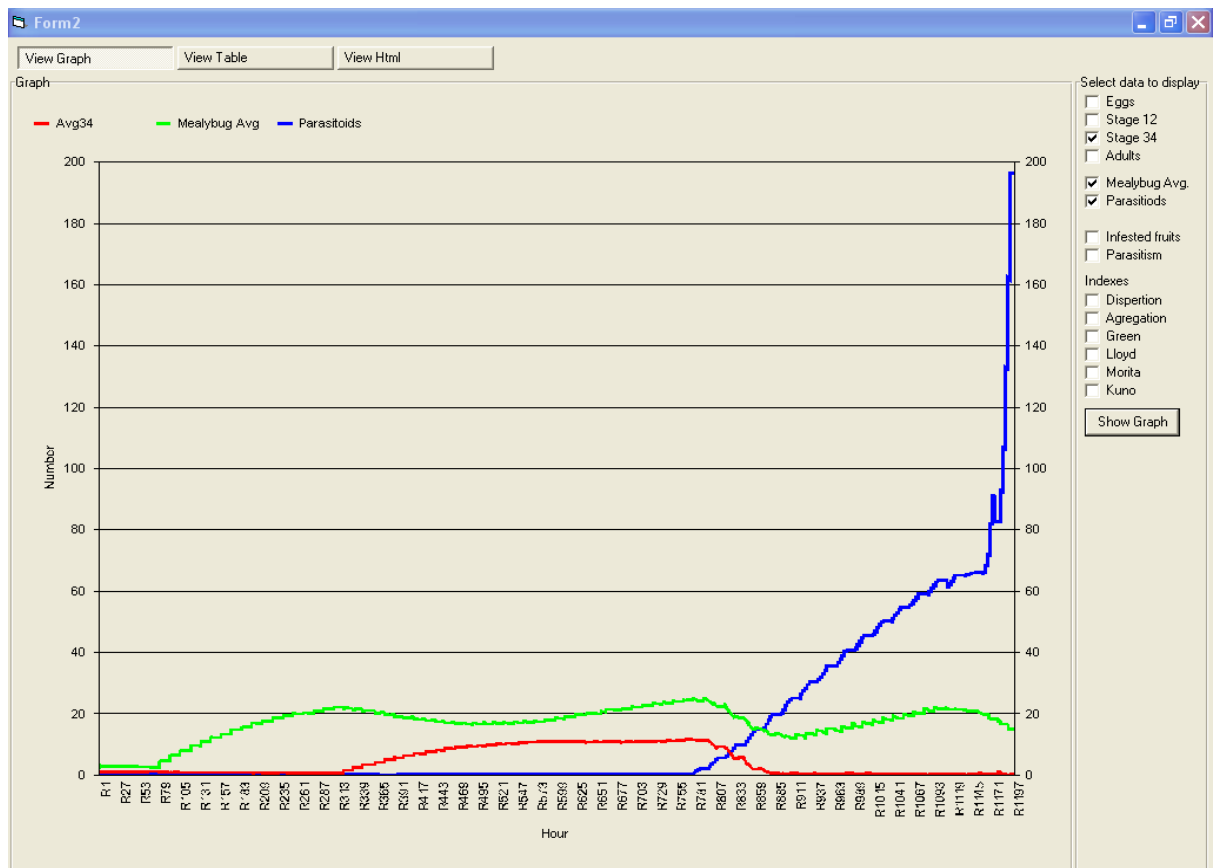


Fig. 6.47 - Resultado de simulação de SimCitri nas mesmas condições que na Fig. 6.45 mas área de descoberta de 0,01.

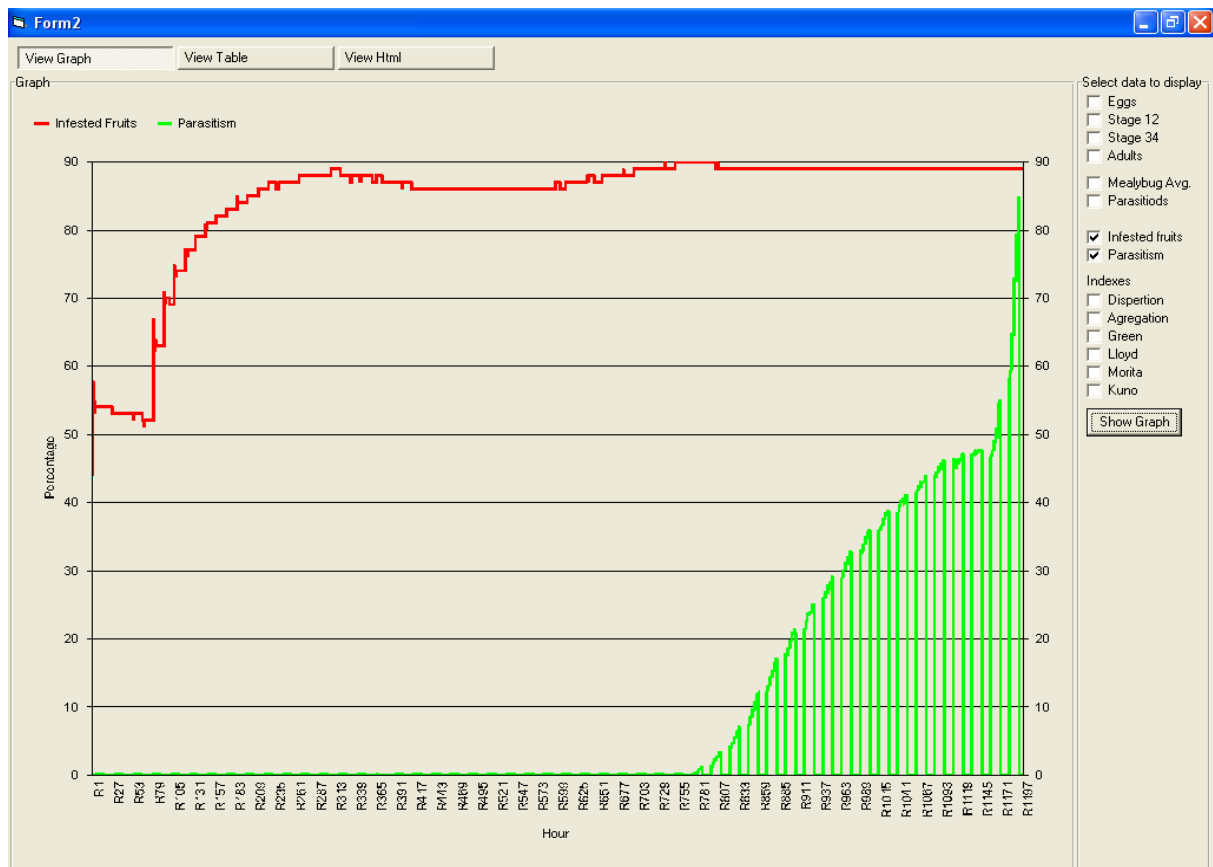


Fig. 6.48 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.45 mas área de descoberta de 0,01.

A mudança da área de descoberta de *L. dactylopii* de 0,1 para 0,01 claramente modificou a capacidade de reprodução das populações do parasitóide. Podemos verificar que o output de SimCitri para uma área de descoberta de 0,1 (Figs. 6.45 e 6.46) resulta num número mais elevado de parasitóides por m², bem como parasitismo mais elevado. Apesar dos valores para o número de parasitóides por m² não ser real para o final da simulação, pela Fig. 6.45 o número de *L. dactylopii* é três vezes superior ao valor obtido na Fig. 6.47 em que a área de descoberta para a primeira Fig. é dez vezes superior do que na segunda Fig. Pode-se verificar também que um crescimento de dez vezes da área de descoberta não corresponde a um aumento de dez vezes no parasitismo.

Influência da dose de L. dactylopii no parasitismo de P. citri

Uma questão que se coloca em tratamento biológico é sem dúvida qual a dose óptima de auxiliares a largar para manter as populações de uma praga abaixo do nível económico de ataque. Esta questão toma particular relevância quando os custos de produção do auxiliar são elevados. Simulações podem ajudar neste caso a estimar os benefícios do aumento da dose de auxiliar na limitação da praga. Neste caso, pretende-se avaliar qual o benefício de aumentar a dose de *L. dactylopii* dez vezes na limitação de populações de *P. citri*. Para tal correu-se SimCitri nas mesmas condições mas a dose de parasitóides usada na primeira simulação (Figs 6.49 a 6.51) é dez vezes inferior à segunda simulação (Figs 6.52 a 6.54). A primeira diferença pode ser observada entre as Figs 6.49 e 6.52. Na Fig. 6.49 o número de cochonilhas por fruto no instar 3 + 4 manteve-se entre os 5 e 10 indivíduos por colónia durante algum tempo, enquanto que na Fig. 6.52 o número de cochonilhas no mesmo estado de desenvolvimento não passa dos 5 indivíduos por colónia. Comparando as Figs. 6.51 e 6.54 pode-se verificar que em ambos os casos o parasitismo de *P. citri* atinge os 100% a partir das 760 horas de simulação. A diferença entre as duas ultimas figuras reside no facto de no primeiro caso o parasitismo ser residual desde o início da simulação, ao contrário do segundo caso em que o parasitismo começa a subir a partir das 380 horas de simulação alcançando valores próximos dos 20%. Comparando o número de parasitóides emergidos, na Fig. 6.51 o número de indivíduos começou a subir a partir de 760 horas de simulação e alcançou os 550 indivíduos por m². No caso da Fig. 6.54, o número de parasitóides começa a subir também a partir das 760 horas de simulação atinge um máximo de cerca de 425 indivíduos/m² e depois o número de insectos começa a diminuir, seguido de um pequeno aumento e novamente diminuição. Embora o número de indivíduos por m² no output seja irreal, é interessante verificar que para uma menor dose de largada do parasitóide a densidade de indivíduos no final da simulação é superior ao exemplo em que se largaram mais parasitóides. Este resultado tem origem no facto de um maior número de parasitóides à largada exercer mais pressão de parasitismo sobre *P. citri* e logo desde o início da simulação manter o número de hospedeiros mais baixo. Como apenas pode emergir um parasitóide por hospedeiro, a justificação está estabelecida. É também interessante verificar que apesar da segunda simulação correr para uma dose de parasitóides 10 vezes superior à primeira simulação, o número de frutos infestados manteve-se semelhante ao longo de todo o tempo considerado em cerca de 85% (Figs 6.50 e 6.53). Também em ambos os casos, o

parasitismo de terceiro e quarto instares sobe para valores próximos de 100% exactamente no mesmo momento. Se tivermos em consideração estes dois últimos resultados, é possível afirmar-se que nos dois exemplos anteriores para o nível de infestação de frutos semelhante e para o momento em que o parasitismo se torna mais eficiente, uma dose mais elevada de largada de parasitóides não trás necessariamente resultados mais rápidos ou mais intenso de eliminação de *P. citri*.

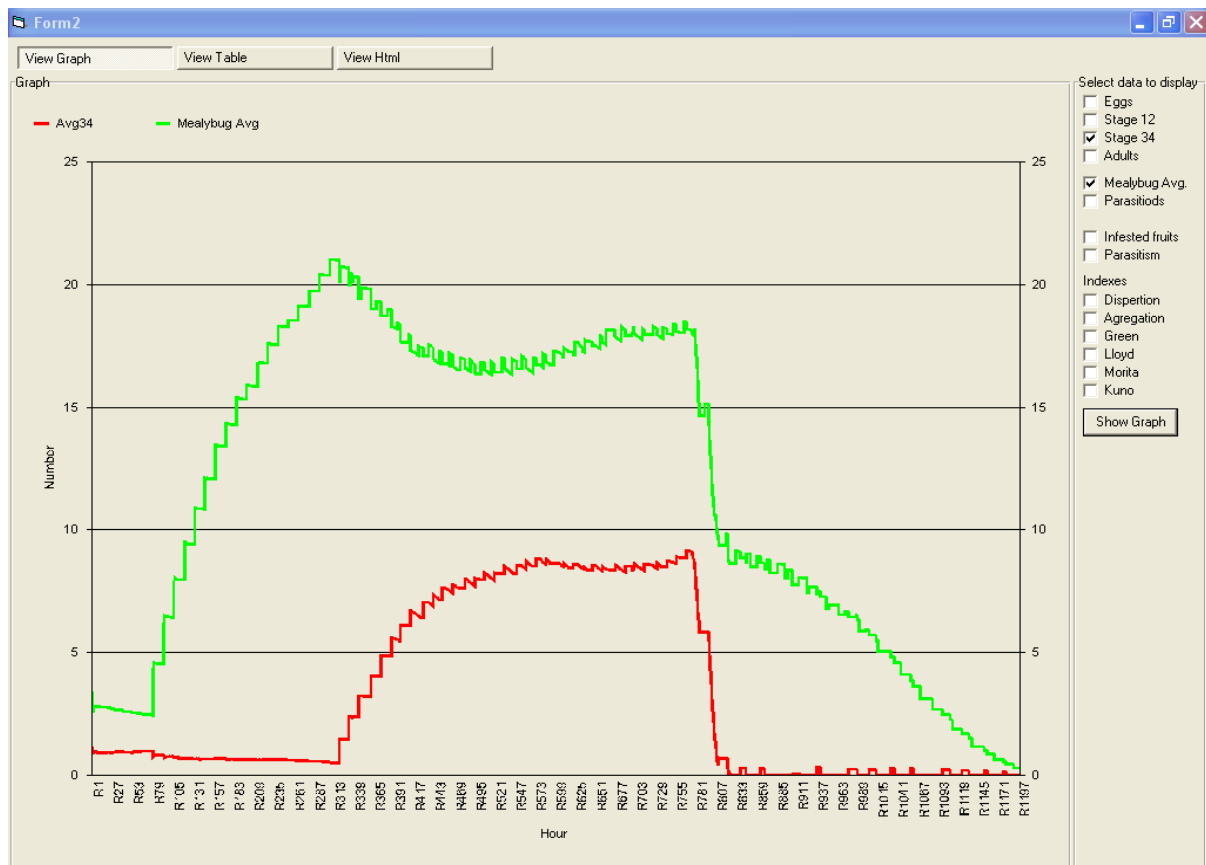


Fig 6.49 - Resultado de simulação de SimCitri para verificação da dose de *Leptomastix dactylopii* Howard no número médio de *Planococcus citri* (Risso) por fruto e número médio de cochonilhas no instar 3 + 4 pré-postura por fruto, para um período de 50 dias, temperatura constante de 25, 5 °C, capacidade de sustentação do meio de 30 indivíduos por fruto, fotoperíodo com 12 horas de luz, população inicial de *P. citri* em cinco colónias com 10 indivíduos para cada estado de desenvolvimento, dispersão da cochonilha, largada de 0,1 parasitóides m², ausência de predadores.

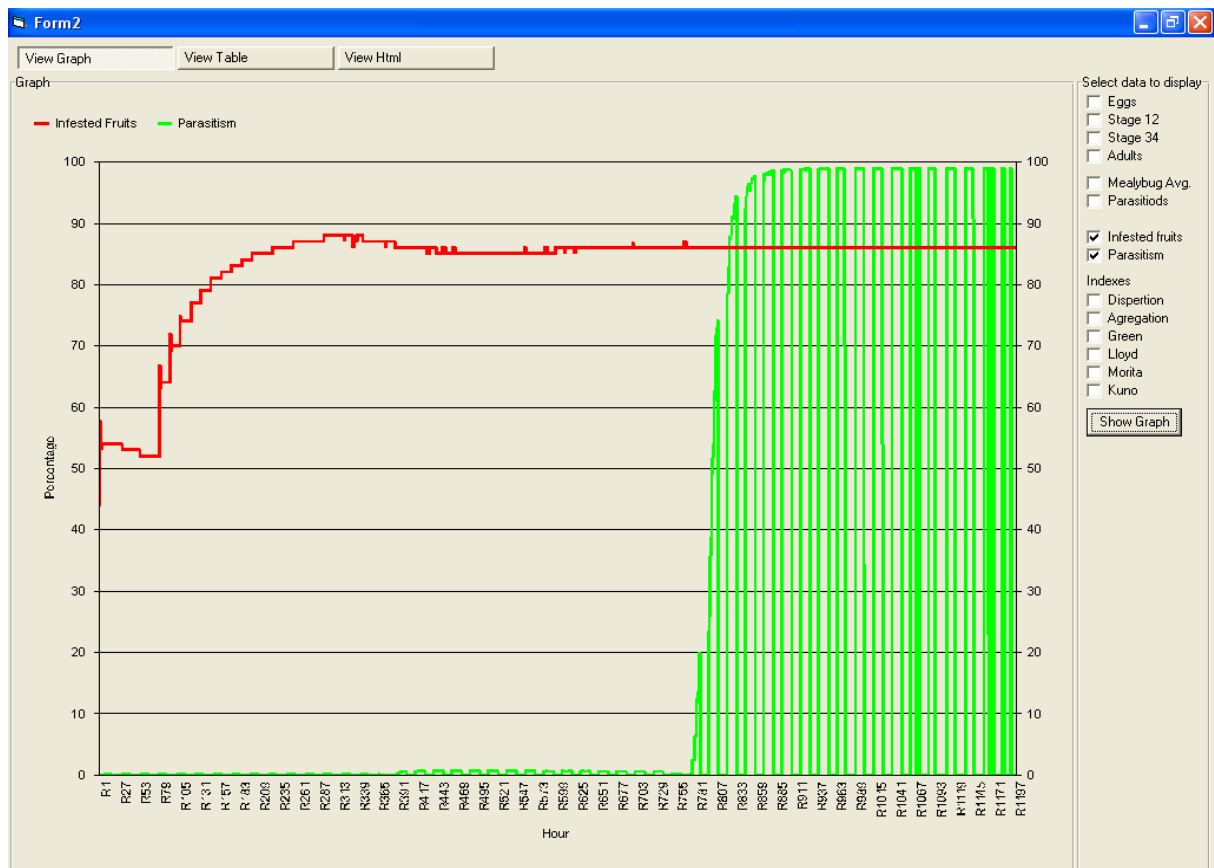


Fig 6.50 – Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.49.

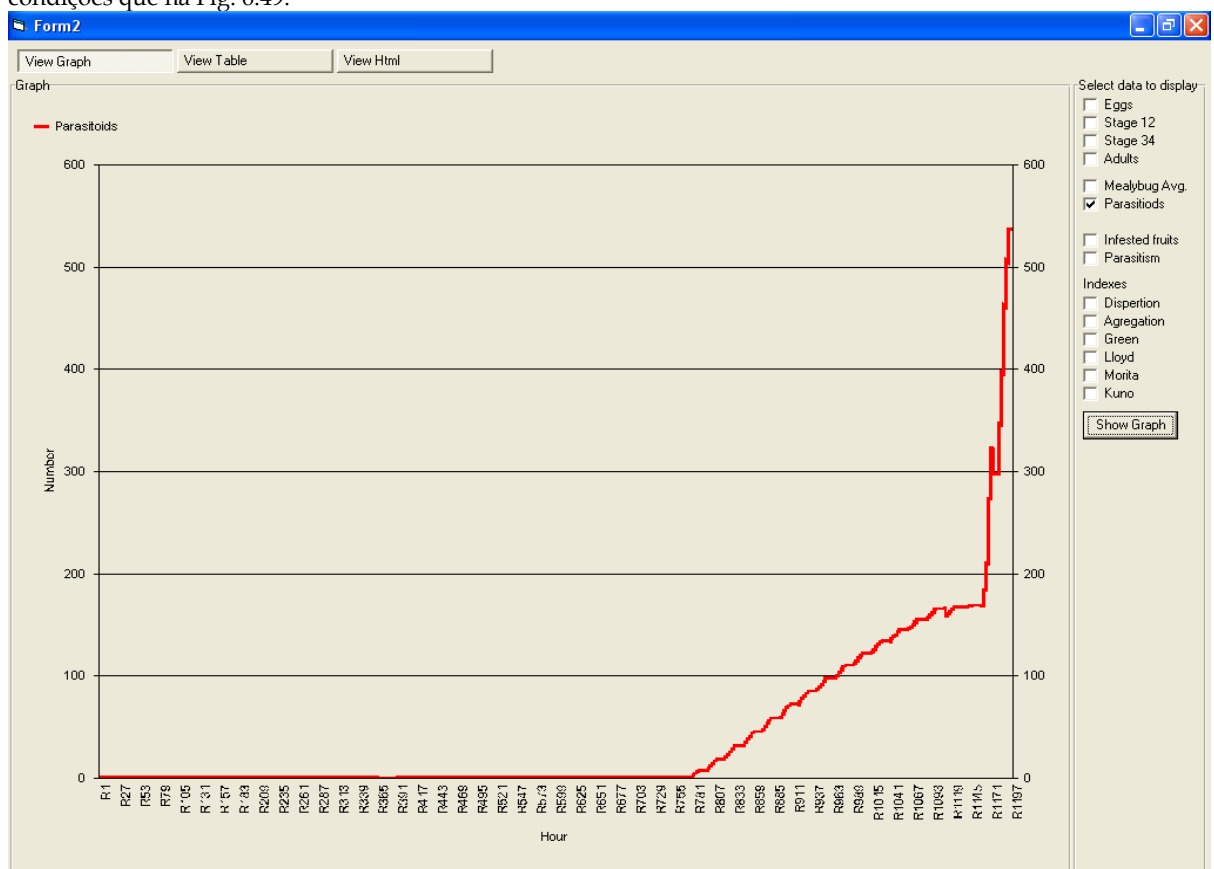


Fig 6.51 - Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides nas mesmas condições que na Fig. 6.49.

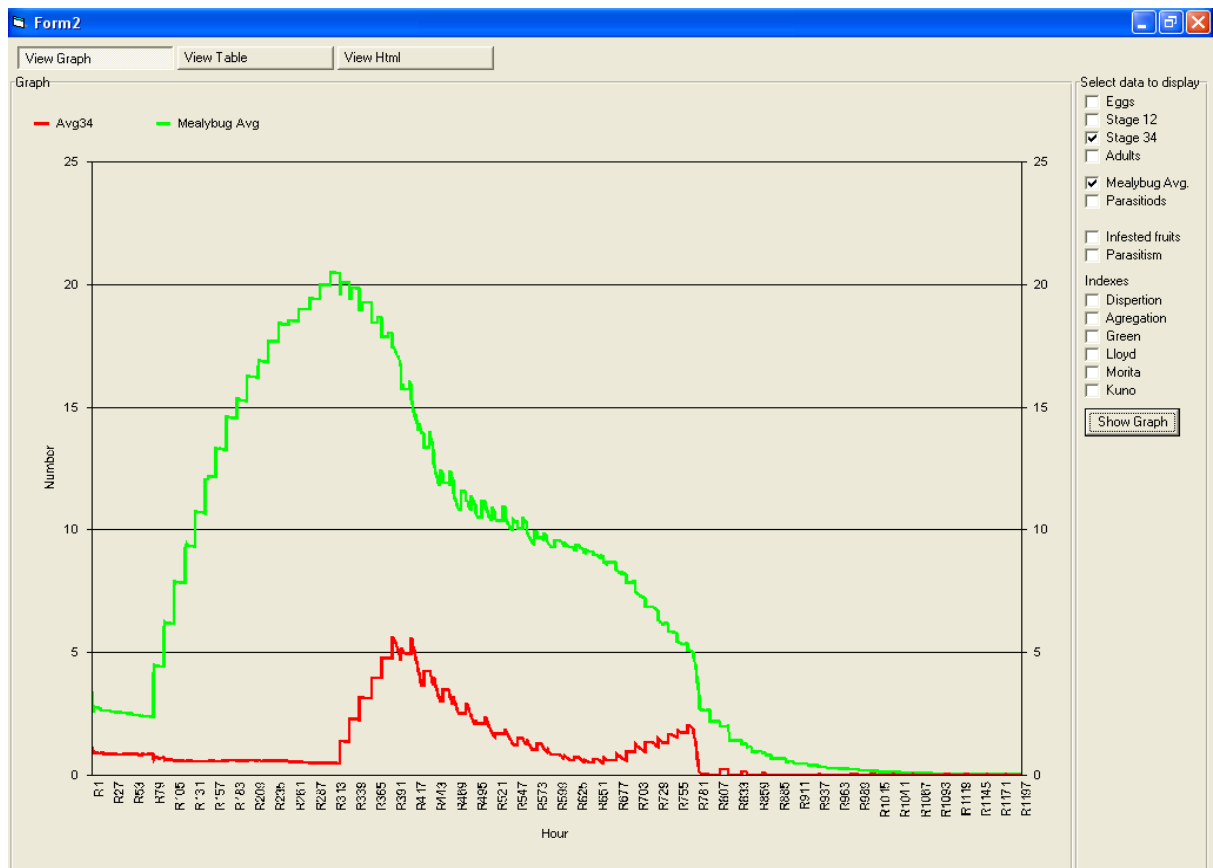


Fig 6.52 - Resultado de simulação de SimCitri nas mesmas condições que na Fig. 6.49 mas foram largados 1 parasitóide/m².

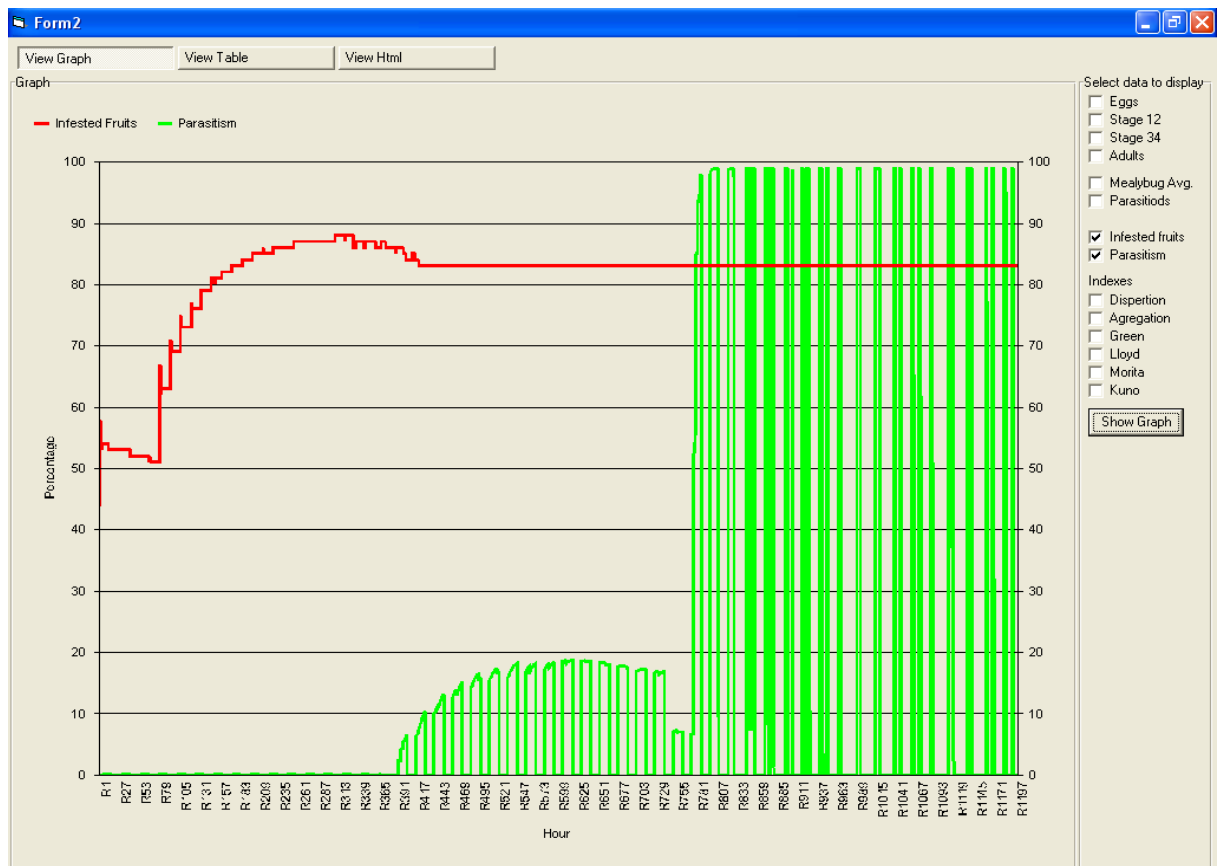


Fig 6.53 - Resultado de simulação de SimCitri para a percentagem de frutos infestados e parasitismo nas mesmas condições que na Fig. 6.49 mas foram largados 1 parasitóide/m².

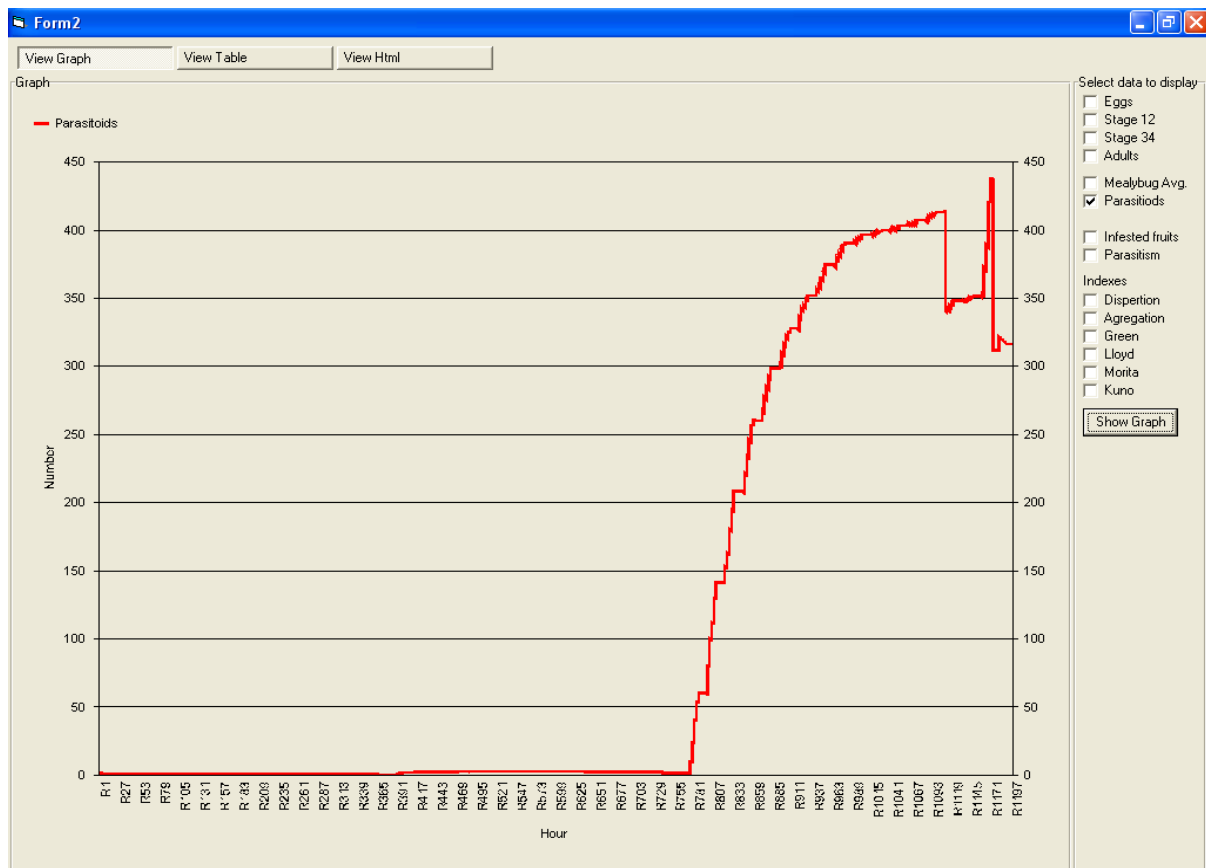


Fig 6.54 -Resultado de simulação de SimCitri para o número de parasitóides nas mesmas condições que na Fig. 6.49 mas foram largados 1 parasitóide m².

6.7 Discussão

No Capítulo 6.6 efectuou-se estudo geral para análise de sensibilidade e verificação de SimCitri. Resta, no entanto, discutir alguns aspectos importantes do output tal como comparar as tendências de crescimento populacionais de ambas as espécies *P. citri* e *L. dactylopii* com os resultados observados no campo, bem como assinalar os pontos menos robustos da simulação.

6.7.1 Comparação do output de SimCitri com observações de campo de *Planococcus citri* (Risso)

A primeira pergunta a colocar será certamente como se poderá comparar o output de SimCitri com o crescimento de populações de *P. citri* observado no campo? Pela Fig. 6.23 pode-se obter a resposta qualitativa a esta questão. Já se constatou no Capítulo 6.5.3 que os resultados de SimCitri para o período de uma geração são semelhantes aos valores observados no campo (Fig. 4.5). Também uma análise das Figs. 6.8 ou 6.9 mostra que o período entre o pico de duas gerações sucessivas é de 33 dias a uma temperatura constante de 26°C. Uma simulação similar para uma temperatura constante de 21°C dá um resultado de 65 dias e para uma temperatura constante de 18°C dá um resultado de 104 dias. Este conjunto de valores vai ao encontro dos resultados observados nas Figs. 4.16 a 4.19 (para Israel), em que a partir da primeira observação de populações de *P. citri* no início de Maio, se obtêm um pico no número de indivíduos no período de Junho, Julho, cerca de 30 a 40 dias mais tarde. Desconhece-se o momento certo da eclosão desses indivíduos, mas pode-se admitir que correspondam ao conjunto das primeira/segunda geração após o Inverno. Sabendo que as temperaturas ambientais

de Inverno e Primavera são menos favoráveis para o desenvolvimento de *P. citri* do que no Verão, pode-se admitir que os resultados previstos por SimCitri para o desenvolvimento da cochonilha algodão em condições de campo estejam correctos. Em Portugal as observações das populações de *P. citri* apenas se iniciaram no final de Junho ou mesmo depois, numa fase que não apanha o crescimento inicial da população, pelo contrário, a densidade da população da cochonilha já está a decrescer.

Também referido no Capítulo 4.3.3 existe um segundo pico de população de *P. citri* no mês de Setembro, tanto para Portugal como para Israel. Este segundo pico ocorre cerca de 40 a 50 dias após o primeiro pico, estando mais uma vez de acordo com os resultados de SimCitri para o período de uma geração (40,3 dias) no Verão. Eventualmente, temperaturas extremas mais elevadas para o período Julho, Agosto, após o primeiro pico de população, puderam atrasar o desenvolvimento da cochonilha algodão. Factores como a presença de predadores e parasitóides de *P. citri* e tratamentos fitossanitários podem também contribuir para um aumento do período entre máximos de população.

Outro resultado importante de SimCitri está relacionado com o mecanismo de pululação de populações de *P. citri*. Já foi discutido no Capítulo 6.5.2 que para haver pululação tem que existir dispersão de indivíduos. Franco (1997) refere que a população de *P. citri* no início da Primavera tem uma colonização aleatória dos frutos, apontando portanto para difusão de ninfas pelo habitat disponível no hospedeiro. Também nos Capítulos 4.3.4 e 6.5.2 se discutiu a possibilidade de existir uma capacidade inata da cochonilha algodão para a difusão de indivíduos jovens e acumulação sobre frutos, ramos e folhas. De certa forma, a discussão à volta da Fig. 3.3 parece justificar (com algumas reservas) o output observado nas Figs. 6.19 e 6.20 em que o aumento do número de indivíduos sobre frutos ocorre por “saltos”, provavelmente correspondendo também a um aumento da capacidade de sustentação do meio. No entanto, este aumento da capacidade de sustentação do meio em SimCitri resulta de um artificialismo em que os indivíduos em excesso não saem da simulação, sendo apenas adicionados de forma aleatória a indivíduos já presentes noutras colónias. Uma acção real de capacidade de sustentação do meio não foi estimada em SimCitri.

6.7.2 Comparação do output de SimCitri com observações de campo de *Leptomastix dactylopii* Howard

Numa primeira comparação do output de SimCitri para parasitismo de *P. citri* por *L. dactylopii* (Capítulo 6.6.3) com os resultados de parasitismo observados no campo (Capítulo 5.2.4) de imediato se detecta a diferença entre o parasitismo da cochonilha e o número de parasitóides adultos emergidos no campo e os valores homólogos calculados na simulação. Os valores calculados em SimCitri a partir de um determinado momento são demasiado elevados para serem considerados realistas. No entanto, nas fases iniciais da simulação os níveis de parasitismo mantêm-se baixos, estando de acordo com os resultados obtidos no campo. Compare-se por exemplo as Figs. 5.2, 5.8, 5.10 ou 5.11 com as Figs. 6.27, 6.30 ou 6.38. O valor máximo experimental de *L. dactylopii* emergidos de colónias de *P. citri* foram obtidos em Israel com 60 indivíduos (Figs. 5.6 e 5.7). Este valor é em muito inferior a por exemplo 600 indivíduos/m² calculados para a Fig. 6.45. Também foram observados valores de parasitismo de cerca de 50% tanto para Israel (Fig. 5.5) como para Portugal (Fig. 5.9), mas nunca se obtiveram valores de 100% como em SimCitri (Figs. 6.42 ou 6.44). O output de SimCitri com valores irrealistas de parasitismo e

densidade de parasitóides pode resultar da falta de conhecimento da velocidade de avanço da frente de difusão de *L. dactylopii* após a largada. Igualmente, não se conhece com exactidão a área de descoberta de fêmeas desta espécie. Muito, provavelmente, a velocidade de avanço da frente de difusão de *L. dactylopii* é superior aos valores apresentados neste trabalho e a área de descoberta é inferior. Se o primeiro elemento contribui para a diluição da população do parasitóide no terreno, o segundo retrata uma menor eficiência do parasitóide em encontrar o seu hospedeiro. Também SimCitri não toma em consideração factores que contribuam para a mortalidade precoce de fêmeas de *L. dactylopii*, como por exemplo competição com outras espécies de parasitóides pelo mesmo hospedeiro, predação por outros organismos ou hiperparasitismo

Os resultados de SimCitri apontam para uma insuficiente limitação do número de colónias de *P. citri* por parte de *L. dactylopii*, mesmo em simulações com temperaturas favoráveis ao desenvolvimento e parasitismo daquele parasitóide. As Figs. 6.40, 6.42 e 6.44 mostram níveis de parasitismo próximo dos 100% e apenas no caso da Fig. 6.44 o número de colónias é reduzido ao final de algum tempo. No entanto, esta redução é artificial porque observando a Fig. 6.43 verifica-se que a densidade de parasitóides adultos é grande e a simulação foi efectuada a uma temperatura constante elevada. No caso de se correr a simulação com predadores, a redução do número de colónias é mais rápido como se pode ver na Fig. 6.37. Os valores experimentais disponíveis estão resumidos na Fig. 5.5 e mostram infestação de frutos à volta de 35% à colheita.

De acordo com as Figs 6.49 a 6.54, um aumento na dose de *L. dactylopii* para tratamento de *P. citri* em pomares de citrinos não parece ter influência no parasitismo a longo prazo. Estes resultados parecem ser suportados pelas Figs 5.6 e 5.7 em que à aplicação de doses maiores do parasitóide no pomar não corresponde a um maior número de descendentes, tanto para um mês como para dois meses após a largada.

Todos estes resultados sugerem uma deficiente limitação de colónias de *P. citri* por parte de *L. dactylopii* em condições mediterrânicas. Outros autores chegaram a conclusões semelhantes (Carvalho 1994, Mendel et al. 1999, Villalba et al. 2006). Se, durante o período favorável para o desenvolvimento e reprodução que decorre da Primavera até ao Outono, o parasitóide não está presente em grandes densidades, já de Inverno aquela espécie não tem condições ambientais para sobreviver.

6.7.3 Funcionamento geral de SimCitri

O escalonamento no desenvolvimento de insectos torna o combate a pragas mais difícil. Este ponto está facilmente ilustrado nas Figs 6.25, 6.28, 6.31, 6.46 ou 6.48, apenas para citar alguns exemplos, em que mesmo que a densidade de parasitóides seja elevada de forma irreal, e mesmo na presença de predadores, o número de frutos infestados continua elevado e o desenvolvimento e reprodução de *P. citri* ainda ocorre. Considera-se portanto, que a decomposição do período de vida dos insectos estudados em matrizes permite obter algum escalonamento no desenvolvimento. Na Fig. 6.17 pode-se verificar que no início da simulação existe um primeiro máximo de população bem definido seguido por um mínimo também bem evidente antes da segunda geração. À medida que a simulação avança, os máximos e os mínimos de população são menos evidentes e cada um destes

picos tendem a ocorrer por um período mais dilatado. Na Fig. 6.18 este comportamento de SimCitri é ainda mais evidente. Porém, a falta de dados não permite verificar se este escalonamento reflecte a realidade observada em colónias de *P. citri* em pomares de citrinos.

A falta de dados obrigou ao cálculo da fecundidade de *P. citri* como uma função polinomial em função da temperatura e a fecundidade de *L. dactylopii* como uma constante. A natureza empírica do polinómio ajustado (Fig. 4.7) não permite calcular a fecundidade da cochonilha algodão acima dos 32.4°C. Esta temperatura não é demasiado elevada para o desenvolvimento de *P. citri* (Figs 4.3 a 4.6) e não o será para a postura. Já para o parasitóide *L. dactylopii*, a determinação da respectiva fecundidade como uma constante tem inerente um conjunto de limitações tendo em conta a equação (6.8). Para valores de temperatura mais baixa esta equação dá uma fecundidade máxima para fêmeas do parasitóide mais baixa e para temperatura mais elevadas o inverso ocorre. Sem dúvida, um dos primeiros pontos a considerar para a melhoria de SimCitri será calcular a fecundidade para ambas as espécies *P. citri* e *L. dactylopii* em função da temperatura.

Observou-se também que a mudança do parâmetro capacidade de sustentação do meio pode mudar os resultados finais de SimCitri. A maior capacidade de sustentação do meio corresponde maior número de indivíduos ao longo da simulação. A capacidade de sustentação do meio estabelece um limite superior na autolimitação de populações, que recai principalmente sobre indivíduos no terceiro e quarto instares pré-postura. Ao longo deste Capítulo verificamos que o número de indivíduos nos primeiros e segundos instares de *P. citri* no output de SimCitri é sempre superior ao número de indivíduos em instares mais avançados. Este fenómeno também é observado, de uma forma geral, em pomares de citrinos (Figs. 4.10 a 4.15), no entanto, a diferença de valores na simulação é maior do que nas observações de campo. Esta assimetria coloca em causa a validade da capacidade de sustentação do meio máxima sugerido de 162 cochonilha equivalente. Valor de capacidade de sustentação do meio tão elevado pode resultar em número irreal por colónia de instares jovens. Por exemplo, na Fig. 6.17 o número médio de indivíduos no primeiro e segundo instares alcança um valor acima de 1600 indivíduos/fruto, enquanto que na Fig. 6.18 o número de indivíduos por fruto no terceiro e quarto instares pouco passa de 100. Relembre-se que a capacidade de sustentação do meio foi estabelecido em 100 cochonilha equivalente para a simulação que deu origem às Figs. 6.17 e 6.18. Parece pois, que a relação de cochonilha equivalente entre os instares jovens e os instares mais velhos não difere por um factor de valor 50, mas sim por um factor com valor mais pequeno.

6.7.4 Classificação de SimCitri

De acordo com a nomenclatura proposta no Capítulo 2 e no Anexo 1, SimCitri pode ser classificado como modelo analítico, modelo causal, modelo biodemográfico, modelo componente, modelo ecossistema agrário, modelo de comunidades, modelo de investigação, modelo de simulação dinâmica, modelo dinâmico, modelo múltiplo, modelo matemático, e por fim, modelo não linear. Por vezes a classificação pode ser difícil por causa da natureza dualista da composição de SimCitri. Por exemplo é possível encontrar par a par modelos matemáticos mecanicistas com modelos empíricos, como as equações de desenvolvimento baseadas no trabalho de Sharpe & DeMichele (1977) e a

equação de postura de *P. citri* que é empírica polinomial. Neste caso, o carácter empírico de uma equação de SimCitri retira robustez à potência de previsão das equações mecanicistas, tornando o resultado empírico. Logo classifica-se SimCitri como um modelo empírico. O mesmo dualismo pode ser estabelecido para o carácter determinista ou estocástico de SimCitri. Uma discussão sobre este assunto já foi efectuada no Capítulo 6.6.1. Classifica-se então SimCitri como um modelo estocástico, no entanto, o carácter aleatório de SimCitri pode ser mais ou menos atenuado de acordo com a qualidade dos dados. Dados com maior número de colónias e mais indivíduos por colónia, são distribuídos de forma mais homogénea pelas matrizes de desenvolvimento e atribuem um carácter mais determinista a SimCitri.

7 Conclusões

Nos primeiros cinco Capítulos deste trabalho são abordados aspectos teóricos e experimentais de simulação, modelação, comportamento e biologia de *P. citri* e *L. dactylopii* que foram fundamentais para a construção de SimCitri. O resultado teórico mais importante sobre o comportamento daquele parasitóide mostra que após a largada a difusão dos indivíduos é muito intensa e que as populações ficam demasiado diluídas para efectuar uma luta biológica eficiente da cochonilha algodão. Espera-se também deixar um legado para uniformização da terminologia em português para o domínio da simulação e modelação aplicada às ciências da vida.

A fase de análise de sensibilidade da corrente versão de SimCitri está terminada. Foram reproduzidos aspectos básicos do comportamento e biologia de ambos os insectos em estudo. Verificou-se que o uso de matrizes é um bom modelo para simulação do avanço e escalonamento de desenvolvimento de insectos; a pululação de *P. citri* só pode ocorrer se existir dispersão; os dados obtidos em laboratório para a taxa de desenvolvimento de *P. citri* podem ser usados com o modelo de Sharpe & DeMichele (1977), modificado por Schoolfield et al. (1981) e permitir um ajustamento aproximado à taxa de desenvolvimento de *P. citri* observada no campo; um fotoperíodo mais iluminado promove a difusão de *L. dactylopii* no campo, reduz a densidade de indivíduos e como consequência diminui o impacto do parasitóide sobre as populações da cochonilha algodão no local de largada; um aumento da temperatura constante até 30,5°C favorece o aumento do parasitismo de *L. dactylopii* sobre *P. citri*; mesmo para densidades muito elevadas do parasitóide e na presença de predadores, a redução do número de frutos infestados é difícil e demorada; existe concordância entre os valores de output de SimCitri para o número de indivíduos *P. citri* nos estádios de terceiros instares e quarto instares e valores observados no campo; também existe concordância entre as fases iniciais de parasitismo em SimCitri e de parasitismo observado em pomares de citrinos; no entanto os valores de output para *P. citri* nos primeiros e segundos instares é elevado quando comparado com resultados de campo.

Face ao parágrafo anterior, considera-se que o conjunto de algoritmos e caminho lógico que se utilizaram na construção de SimCitri, permitiram obter uma simulação que reproduz e mostra alguns aspectos básicos do comportamento e bio-ecologia de *P. citri* e *L. dactylopii*.

Existe, também, uma clara falta de dados para construção avançada de SimCitri que permita uma utilização robusta desta simulação como ferramenta de previsão. Como tal, alguns processos da simulação foram sintetizados em equações de natureza empírica. Alguns resultados alcançam também valores demasiado elevados quando comparados com resultados de campo. Deve-se pois assumir este trabalho como ferramenta de estudo da interacção *P. citri* - *L. dactylopii* e ponto de partida para construção mais completa de uma simulação que reproduza o ambiente onde *P. citri* está inserido.

Apesar de todas as equações de desenvolvimento em SimCitri serem deterministas, temos que classificar simulação de desenvolvimento como estocástica porque a distribuição inicial das populações de insectos por escalões etários é aleatória. Também, quando se olha para SimCitri no seu conjunto, apesar de parte das equações usadas serem mecanicistas, as equações empíricas conferem um carácter empírico à simulação.

Finalmente, SimCitri está construído em estrutura modular, de momento com dois módulos correspondentes às espécies *P. citri* e *L. dactylopii*. Esta estrutura modular permite expandir a simulação no futuro adicionando mais espécies envolvidas no ambiente *P. citri*. Um módulo de fenologia e crescimento de citrinos seria concerteza um pilar fundamental para SimCitri porque o ritmo de crescimento das plantas hospedeiras condiciona a composição e densidades populacionais da entomofauna ligada ao pomar. Numa fase posterior SimCitri poderá englobar também módulos adicionais, cada um correspondente a uma espécie de auxiliar.

Referências bibliográficas

- Abreu, P E P 2004 Modelação da produção de tomate em estufas não aquecidas. Tese Doutor Eng Agron, ISA/UTL, Lisboa
- Ackonor J B 2002 Current levels of incidence of parasitism and predation in *Planococcus citri* Risso (Homoptera: Pseudococcidae) in Ghanaian cocoa (*Theobroma cacao* L.) farms. *Insect Science and its Application*: 22(2): 105-112
- Adams J. 2000. Western Spruce Budworm Damage Model [Online]. Disponível: <http://www.fs.fed.us/foresthealth/technology/programs/models/wsbw.html>
- Alexandrakis VZ. 1984. Integrated control on citrus mealybug *Planococcus citri* Risso. CEC Programme Integrated Biological Control, Final Report, 1979/83, pp 103-128
- Ali A, Gaylor MJ. 1992. Effects of temperature and larval diet on development of the beet armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). *Environ. Entomol.* 21: 780 – 786
- Almeida 1997 Sistema Internacional de Unidades (SI): grandezas e unidades físicas – Terminologia, símbolos e recomendações. Plátano Ed, Lisboa.
- Amaro P, Baggiolini M (Eds.). 1982. Introdução à Protecção Integrada. FAO/DGPPA, Lisboa
- Amaro P. 1994a. As pragas, doenças e infestantes de citrinos e o seu combate em Portugal. In: Amaro P & Franco JC (eds) 1º Congr Citric, Silves, 1993 Câmara Munic Silves: 145-160
- Amaro P. 1994b. A evolução dos meios de luta contra os inimigos dos citrinos em Portugal. In: Amaro P & Franco JC (eds) 1º Congr Citric, Silves, 1993 Câmara Munic Silves: 361-377
- Andrews GL, Brown LG. 1992. Application of CIM for control decisions on *Heliothis*. In: Goodenough JL & Mckinion JM (Eds.). 1992. Basics of insect modelling. American Society of Agricultural Engineers
- Anónimo .1999. Electronic Sources: APA Style of Citation [Online]. Disponível: <http://www.uvm.edu/~ncrane/estyles/apa.html>
- Anónimo 1990. Almanac for Computers, 1990. United States Naval Observatory, Nautical Almanac Office, Washington. [Online] Disponível http://williams.best.vwh.net/sunrise_sunset_example.htm
- Arai T. 1996. Temperature dependent developmental rate of the three mealybug species, *Pseudococcus citriculus* Green, *Planococcus citri* (Risso), and *Planococcus kraunhiae* (Kuwana) (Homoptera: Pseudococcidae) on citrus. *Jpn J Appl Entomol Zool* 40: 25-34
- Ascombe FJ. 1950. Sampling theory of the negative binomial and logarithmic series distributions. *Biometrika*, 37: 352 – 382
- Axelsen JA. 1993. Analysis of the population dynamics of the pod gall midge (*Dasyneura brassicae* Winn.). In winter rape and spring rape by computer simulation. *Ecol. Modelling* 69: 443-455
- Barbagallo S, Longo S, Mineo G. Integrated control of citrus pests in Italy. In: Tribulato E, Gentile A, Reforgiato G (Ed.) Proc. Int. Soc. Citric., VII Int. Citrus Congr., Acireale, 8-13 March 1992: 878-984.
- Barbagallo S, Longo S, Patti I. 1981. Primi risultati di lotta biologica-integrata in Sicilia orientale contro il cotonelo e il dialeurode degli agrumi. *Fruits*, 36: 115 – 121
- Baskerville GL, Emin P. 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology* 50: 514-517
- Battacharyya GK, Jonhson RA. 1977. Statistical concepts and methods. John Wiley & Sons, Inc. New York
- Battaglia D, Spicciarelli R, Leo A di, Tranfaglia A. 1992. Influenza della temperatura sullo sviluppo e sulla sopravvivenza dello stadio pupale e adulto di *Leptomastix dactylopii* Howard (Hymenoptera: Encyrtidae) MAF - Convegno "Lotta biologica", Acireale 1991: 133 – 138
- Battaglia D, Tranfaglia A, Franco JC, Carvalho CJ. 1996. *Leptomastix dactylopii* Howard (Hymenoptera, Encyrtidae) fecundity and innate capacity for increase under laboratory controlled conditions. *Boll Lab Entomol Agrar "Filippo Silvestri"* 52: 3-11
- Battisti A, Cescatti A. 1994. Temperature-Dependent Growth model for eggs and larvae of *Cephalcia arvensis* (Hymenoptera: Pamphiliidae). *Environ Entomol* 23: 805-811
- Belehrádek J. 1935. Temperature and living matter. *Protoplasma Monogr.* 8, Verlag Gebrüder Brontraeber, Berlin
- Benassay C, Desportes L, Onillon JC, Panis A. 1976. Orientation vers la lutte intégrée en agrumiculture dans le Sud-Est de la France. *Rev Horti* 167:41-48

- Ben-Dov Y. 1994. A systematic catalogue of the mealybugs of the world (Insecta: Homoptera: Coccoidea: Pseudococcidae and Putoidea), with data on geographical distribution, host plants, biology and economic importance. Intercept, Andover
- Berry JS, Holtzer TO, Norman JM. 1991b - MiteSim: a simulation model of the banks grass mite (Acari: Tetranychidae) and the predatory mite *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae) on maize: model development and validation. *Ecol. Modell.* 53: 291-317
- Berry JS, Holtzer, T O Norman JM. 1991a. Experiments using a simulation model of the banks grass mite (Acari: Tetranychidae) and the predatory mite *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae) in a corn microenvironment. *Environ. Entomol.* 20: 1074-1078
- Berryman AA. 1987. The theory and classification of outbreaks. In: Barbosa P, Schultz JC (Eds.). 1987. *Insect outbreaks*. Academic Press, San Diego: 3-30
- Berryman AA. 1997. On the principles of population dynamics and theoretical models. *American Entomologist Fall*: 147-151
- Billington J. 1997. High level Petri Nets – Concepts, definitions and Graphical Notation. Committe Draft ISSO/IEC 15909, Version 3.4 [Online] Disponível: http://www.info.uqam.ca/Labo_Recherche/Lrgl/sc7/private_files/07n1793.pdf
- Blumberg D, Gross S, Steinberg S, Carvalho CJ, Franco JC, Mendel Z. 1997. Biological control of the citrus mealybug (Homoptera: Pseudococcidae) in outdoor crops – still a challenge. 11th Entomophagous Insects Workshop, Madison, 1997
- Bodenheimer FS. 1951. *Citrus entomology in the middle east*. Junk, The Hague
- Boote KJ, Jones JW, Pickering NB. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.*, 88: 704-716
- Briere JF, Pracros P, Le Roux AY, Pierre JS. 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for Arthropods. *Environ. Entomol.* 28(1):22-29
- Brito, TMMFO. 2001 Modelo preditivo da ocorrência do corco (*Capreolus capreolus* Linnaeus, 1758) no distrito de Bragança, Diss Mestrado Gestao de Recursos Naturais, ISA/UTL, Lisboa
- Browning HW. 1994. Early classical biological control in citrus In: Rosen D, Bennett FD, Capinera JL (Eds.). 1994. *Pest management in the subtropics: biological control, a Florida perspective*. Intercept, Andover: 27-46
- Brownridge D. 2001. *The Comprehensive Resource for Learning the Metric System (SI)*. Belmont
- Cadima JFCL. 1985. Modelos matemáticos para a interacção hospedeiro-parasitóide entre insectos. ISA
- Calvin DD, Welch SM, Poston FL. 1988. Evaluation of a management model for second-generation european corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) for use in Kansas. *J. Econ. Entomol.* 81: 335-343
- Carrero JM. 1979. Entomophagous de coccides des agrumes dans la provence de Valencia. *Proc Int Symp IOBC/WPRS Integ Control Agric For*: 521 - 526
- Carvalho CJMV. 1994. *Leptomastix dactylopii* Howard – Biologia, criação e utilização em luta biológica. Diss Mestrado Prot Integr, ISA/UTL, Lisboa
- Carvalho J Passos, Franco JC, Aguiar MF, Soares AO. 1997. Insect pests of citrus in Portugal. In: Manicom B, Robinson J, Plessois ST du, Joubert P, Zyl JL van, Preez S du (Eds). *Proc. Int. Soc., Citric., Sun City, 1996. Int. Soc. Citric., Nelspruit*: 613 – 618
- Carvalho J Passos. 1986. *Introdução à entomologia agrícola*. Fund. Calouste Gulbenkian, Lisboa
- Carvalho J Passos. 1988. Programa de entomologia para a citricultura do Algarve. Anexo I Síntese de conhecimentos e análise crítica. *Progr. Invest. Concurr. Invest. Coord. INIA/EAN, Oeiras*
- Carvalho, A P S M 2000 Modelação do crescimento da arvore em eucaliptais em 1ª rotação localizados nas regioes Norte e Centro Litoral. Tese Doutor Eng Florestal, ISA/UTL, Lisboa
- Casteleiro JM (Coord.). 2001. *Dicionário da Língua Portuguesa Contemporânea – Academia das Ciências de Lisboa, Verbo, Lisboa*.
- Catry I. 2005 Analise da sobrevivencia do Peneireiro-das-torres (*Falco naumanni*) com base em dados de captura-recaptura Diss Mestrado Matematica Aplicada Ciencias Biologicas, ISA/UTL, Lisboa
- Chong JH; Oetting RD. 2007. Specificity of *Anagyrus* sp. nov. nr. sinope and *Leptomastix dactylopii* for six mealybug species. *BioControl.* 52(3): 289-308
- Colbert J, Racin G, Mason D, Sharov A, Sheehan K, Valentine Harry. 1999. *Gypsy Moth Modelling Programs* [Online]. Disponível: <http://www.fsl.wvnet.edu/gypsymth/>
- Coop LB, Croft BA Drapek RJ. 1993. Model of corn earworm (Lepidoptera: Noctuidae) development, damage, and crop loss in sweet corn. *J. Econ. Entomol.* 86: 906-916
- Copland MJW, Varley MJ. 1987. Progress in developing a controlled glasshouse environment to promote biological pest control. *Bull OILB/SROP*, 10: 41-45

- Copland MJW. 1983. Temperature constrains in the control mealybug and scale insects. Bull OILB/SROP, 6: 142-145
- Costa C, Soares C, Bento A, Costa J, Rosa A. 1998. Modelo preliminar da mosca da azeitona - *Bactrocera oleae* (Gmelin) por técnicas de vida artificial. Revista de Ciências Agrárias, 21: 221-230
- Coulson RN, Amman GD, Dahlsten DL, DeMars Jr CJ, Stephen FM. 1985. Forest-bark beetle interactions: bark beetle population dynamics. In: Waters WE, Stark RW, Wood DL (Eds.). Integrated pest management in pine-bark beetle ecosystems. John Willey & Sons, New York: 61-80
- Crowther J, Kavanagh K, Asby M (Eds.). 1995. Oxford advanced learner's dictionary of current English. 5th ed. Oxford University Press. Oxford. 1428 pp.
- Dallwitz R. 1984. The influence of constant and fluctuating temperatures on development rate and survival of pupae of the Australian sheep blowfly *Lucilia cuprina*. Entomol. Exp. Appl. 36: 89-95
- David FN, Moore PG. 1954. Notes on contagious distributions in plant populations. Annals of Botany 18: 47-53
- Davidson J. 1942. On the speed of development of insect eggs at constant temperature. Aust. J. Exp. Biol. Med. Sci. 20: 769-782
- Davidson J. 1944. On the relationship between temperature and rate of development of insects at constant temperatures. J. Anim. Ecol., 64: 94-98
- Davis PM. 1994. Statistics for describing populations. In: Pedigo LP, Buntin GD (Eds.). Handbook of sampling methods for arthropods in agriculture. CRC Press, Boca Raton: 33-54
- DeGrandi-Hoffman G, Diehl J, Li D, Flexner L, Jackson G, Jones W, Debolt J. 1997. BIO-CONTROL-PARASITE [Online]. Disponível: http://dino.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/biocontrolparasite_tuc.html
- Doucet P, Sloep, P. B (1992) – Mathematical modeling in the life sciences. Ellis Horwood, New-York.
- Doutt RL 1952. Biological control of *Planococcus citri* on commercial greenhouse *Staphanotis*. J Econ Entomol 45: 343-344
- Fan Y, Drummond FA, Groden E. 1991. Simulating the development of mexican bean beetle immature stages, *Epilachna varivestis* Mulsant (Coleoptera: Coccinellidae), on dry beans. Maine Agricultural Experimental Station, University of Maine, Technical Bulletin 147
- Fernandes PMC. 2000. Modelação da relação volume total altura dominante para o pinheiro bravo, *Pinus pinaster* Aiton, em Portugal. Diss Final Curso Engenharia Florestal, ISA/UTL, Lisboa
- Ferreira JPRJF 1998 Modelos de crescimento e producao para o pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait.) e o eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) em Portugal. Contributo para o seu levantamento Relatório (Licenciatura), ISA/UTL, Lisboa
- Forrester JW. 1961. Industrial dynamics. The M.I.T. Press, Cambridge
- Forrester JW. 1968. Principals of systems. Wright-Allen Press, Cambridge
- Franco JC, Silva EB, Carvalho JP. 2000. Cochonilhas-algodão (Hemiptera, Pseudococcidae) associadas aos citrinos em Portugal. ISA Press, Lisboa
- Franco JC, Suma P, Silva EB, Blumberg D, Mendel Z 2004. Management strategies of mealybug pests of citrus in mediterranean countries. Phytoparasitica 32 (5): 507-522
- Franco JC. 1994. Citrus phenology as a basis to study the population dynamics of the citrus complex in Portugal. In: Tribulato E, Gentile A, Reforgiato G (Eds.) Proc. Int. Soc. Citric. Acireale, 1992. MCS Congress, Catania: 929 - 930
- Franco JC. 1997. Contribuição para a protecção integrada em citrinos: caso das cochonilhas algodão (Hemiptera, Pseudococcidae). Tese Doutor Eng Agron, ISA/UTL, Lisboa
- Freier B, Möwes M, Triltsch H, Rappaport Verena. 1996. Investigations on the predatory effect of coccinellids in winter wheat fields and problems of situation-related evaluation. Bull OILB/SROP, 19: 41-52
- Garrido A, del Busto T. 1988 ¿Cómo controlar las cochonilhas pseudococcidae en los citricos espanholes? Levante Agric, 285-286: 155-166
- Garrido AV, Ventura JJR. 1993. Plagas de los citricos. Bases para el manejo integrado. Min. Agric. Pesca Alim., Madrid.
- Getz W, Gutierrez A. 1982. A perspective on systems analysis in crop production and insect pest management. Ann. Rev. Entomol., 27: 447-466
- Godfray HCJ, Waage JK. 1991. Predictive modelling in biological control: The mango mealy bug (*Rastrococcus invadens*) and its parasitoids. J. Applied Ecology, 28, 434-453
- Gonçalves, ACA 2003 Modelação de povoamentos adultos de pinheiro bravo com regeneração de folhosas na Serra da Lousa Tese Doutor Eng Agron, ISA/UTL, Lisboa
- Gosselke U; Triltsch H; Rossberg D; Freier B 2001. GETLAUS01 - the latest version of a model for

- simulating aphid population dynamics in dependence on antagonists in wheat. *Ecological-Modelling*; 145(2/3): 143-157
- Graf B, Baumgärtner J, Delucchi V. 1985. Simulation models for the dynamics of three apple aphids, *Dysaphis plantaginea*, *Rhopalosiphum insertum*, and *Aphis pomi* (Homoptera, Aphididae) in Swiss apple orchard. *Z. ang. Ent.* 99: 453-465
- Graf B, Lamb R, Heong KL, Fabellar L. 1992. A simulation model for the population dynamics of rice leaf-folders (Lepidoptera: Pyralidae) and their interactions with rice. *J. Applied Ecology* 29: 558-570
- Gray HE. 1954. The development of the citrus mealybug. *J. Econ. Entomol.* 47: 174-176
- Green RH. 1966. Measurement of non-randomness in spatial distributions. *Researches Population Ecology*, 8: 1-7
- Gullan PJ, Cranston PS. 1994. *The insects: an outline of entomology*. Chapman & Hall, London
- Hagstrum DW, Milliken GA. 1991. Modelling differences in insect development times between constant and fluctuating temperatures. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 84: 369-379
- Harcourt DG, Yee JM. 1982. Polynomial algorithm for predicting the duration of insect life stages. *Environ. Entomol.* 11: 581-584
- Harrari AR, Ben-Yakir D, Chen M, Rosen D. 1998. Temperature-dependent development models for predicting the phenology of *Maladera matrida* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Environ. Entomol.* 27: 1220-1228
- Hassel MP, Lawton JH, Beddington JR. 1977. Sigmoid functional responses by invertebrate predators and parasitoids. *Journal Animal Ecology*, 46: 249-262
- Hassel MP, May R.M. 1973. Stability in insect host-parasite models. *Journal Animal Ecology*, 42: 693-726
- Hatting V, Tate BA. 1997. The pest status of mealybugs on citrus in Southern Africa. In: Manicom B, Robison J, Plessis ST du, Joubert P, Zyl JL van, Preez S du (Eds.) *Proc. Int. Soc. Citric*, Sun City, 1996. *Int Soc Citric, Nelspruit*, 560-563
- Hennekam MMB, Kole M, Opzeeland K van, Alphen JJM van. 1987. Biological control of citrus mealybug in a commercial crop of ornamental plants in the Netherlands. *Med Fac Landbouwwet Rijksuniv Gent* 52(2a): 320-338
- Higley LG, Pedigo LP, Ostlie KR. 1986. DEGDAY: A program for calculating degree-days, and assumptions behind the degree-day approach. *Environ. Entomol.* 15: 999-1016
- Hilbert DW, Logan JA. 1983. Empirical model of nymphal development for migratory grasshopper *Melanoplus sanguinipes* (Orthoptera: Acrididae). *Environ. Entomol.* 12: 1 - 5
- Hoffman KH. 1985. Metabolic and enzyme adaptation to temperature. In: Hoffman, K. H. (Eds.) *Environmental physiology and biochemistry of insects*. Springer-Verlag, Berlin: 1-32
- Holling C.S. 1959a. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *Canad. Entomol.* 91: 385-398
- Holling C.S. 1959b. The components of predation as revealed by a study of small mammal predation of the European pine sawfly. *Canad. Entomol.* 91: 293-320
- Holmes, E. E., Lewis, M. A. Banks, J. E. & Veit, R. R. (1994) - Partial differential equations in ecology: Spatial interactions and population dynamics. *Ecology*, 75(1): 17-29.
- Howe RW. 1967. Temperature effects on embryonic development in insects. *Annu. Rev. Entomol.*, 10: 15-42
- Huffaker CB. 1944 The temperature relationships of the immature stages of the malarial mosquito, *Anopheles quadrimaculatus* Say, with a comparison of the developmental power of constant and variable temperatures in insect metabolism. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 37: 1-27
- Hutchinson GE. 1953. The concept of pattern in ecology. *Proceedings Academy Natural Sciences*, Philadelphia, PA
- Ingram WR, Green SM. 1972. Sequential sampling for bollworms on rain grown cotton in Botswana. *Cotton Grow. Rev.*, 49: 265-275
- Islam KS. 1993. The influence of host and other environmental factors on the biology of the mealybug parasitoid *Anagyrus pseudococci* (Girault). PhD. Thesis, Univ Lond, London
- Iwao S, Kuno E. 1971. Na approach to the aggregation pattern in biological populations. In: Patil GP, Pielou EC, Waters WE (Eds.). *Statistical ecology*, Vol 1. Univ. Park/London: Penn. State Univ. Press: 461 - 513
- Iwao S. 1968. A new regression method for analysing the aggregation pattern of animal populations. *Res. Popul. Ecol.* 10: 1-20
- Jackman J, Stone ND, Herdejürgen ND. 1997c. Sorghum midge simulation model [Online]. Disponivel: http://dino.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/acn_tx.html

- Jackman JA, Drees BM, Sardjono W. 1997a. Rice water weevil model. [Online]. Disponível: http://dino.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/acz_tx.html
- Jackman JA, Ring DR, Harris MK, Cooper JN, Teich PR, McCullough C, Stump S, Herdejürgen R. 1997d. Pecan nut casebearer model [Online]. Disponível: http://dino.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/acjl_tx.html
- Jackman JA, Westover LJ, Pang EL. 1997b. Sorghum pest management report database system. [Online]. Disponível: http://dino.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/aci_tx.html
- James HC. 1937. Sex ratios and the status of the male in Pseudococcinae (Hem. Coccidae). Bull. Entomol. Res. 28: 429-461
- Janisch E. 1925. Über die temperaturabhängigkeit biologischer vorgänge und ihre kurvenmassige analyse. Pfluger's Archiv. Ges. Physiol. 209: 414-436
- Jong PW, van Alphen JM. 1989. Host size selection and sex allocation in *Leptomastix dactylopii*, a parasitoid of *Planococcus citri*. Entomol. Exp. Appl., 50: 161-169
- Jonhson KB, Teng PS, Radcliffe EB. 1987. Coupling feeding effects of potato leafhopper, *Empoasca fabae* (Homoptera:Cicadellidae), nymphs to a model of potato growth. Environ. Entomol. 16: 250-258
- Jonhson KB. 1992. Evaluation of a mechanistic model that describes potato crop losses cause by multiple pests. Phytopathology 82: 363-369
- Jørgensen SE. 1988. Fundamentals of Ecological Modelling. Elsevier, Amsterdam
- Kerrich GJ. 1954. Report on Encyrtidae associated with mealybugs on cacao in Trinidad, and on some other species related thereto. Bull. Entomol. Res., 44: 789-810
- Kim-JeongSoo; Jung-ChuLeui; Lee-JoonHo 2001 Parameter estimation for temperature-dependent development model of *Tetranychus urticae* Koch: immature development. Journal-of-Asia-Pacific-Entomology. 4(2): 123-129
- Klein M. 1994. [Studies of the citrus mealybug *Planococcus citri* (Risso): dynamics of fruit infestation and biological control]. MSc Thesis, Hebr. Univ. Jerus., Rehovot (em hebreu).
- Knaust HJ, Poehling HM. 1996. Studies on the movement and dispersal of apterous *Sitobion avenae* in winter barley and a new simulation model on secondary spread. Bull. OILB/SROP, 19: 117-130
- Kole M, Hennekam M. 1990. Update: six years of successful biological control in interior plantscapes in The Netherlands. IPM Pract., 12: 1-4
- Kole M, van Lenteren JC, van Vliet GJ. 1985. Integrated management in the greenhouses of the botanical garden of Leiden University. Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent, 50: 403-409
- Korzukhin MD, Porter SD. 1994. Spatial model of territorial competition and population dynamics in the fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). Environ. Entomol., 23: 912-922
- Krambias A, Kontzonis A. 1980. Establishment of *Leptomastix dactylopii* (HOW.) In Cyprus. Fruits, 35: 403-409
- Krishnamoorthy A, Singh SP. 1987. Biological control of citrus mealybug, *Planococcus citri* with na intriduced parasite, *Leptomastix dactylopii* in India. Entomophaga, 32: 143-148
- Kuno E. 1991. Sampling and analysis of insect populations. Annu. Rev. Entomol., 36: 285-304
- Lactin D, Holliday NJ, Johnson DL, Craigen R. 1995. Improved rate model of temperature-dependent development by arthropods. Environ. Entomol., 24: 68-75
- Li D. 1995. Development and survival of *Erigonidium graminicolum* (Sundevall) (Araneae: Linyphiidae: Erigoninae) at constant temperatures. Bull Entomol Research 85: 79-91
- Liu S, Zhang G, Zhu J. 1995. Influence of temperature variations on rate of development in insects: analysis of case studies from entomological literature. Ann. Entomol. Soc. Am. 88: 107-119
- Lloyd DC. 1958. Studies of parasite oviposition behaviour. II. *Leptomastix dactylopii* Howard (Hymenoptera, Encyrtidae) Can. Entomol., 90: 450-461
- Lloyd M. 1967. Mean crowding. J. Anim. Ecol. 36: 1-30
- Logan JA, Stinner RE, Rabb RL, Bacheler JS. 1979. A descriptive model for predicting spring emergence of *Heliothis zea* populations in North Carolina. Environ. Entomol. 8:141-146
- Logan JA, Wollkind DJ, Hoyt SC, Tanigoshi LK. 1976. Na analytical model for description of temperature dependent rate phenomena in arthropods. Environ. Entomol., 5: 1133-1140
- Logan JA. 1988. Toward an expert system for development of pest simulation models. Environ. Entomol. 17: 359-376
- Longo S, Benfatto D. 1982. Utilizzazione di *Leptomastix dactylopii* How. por lalotta biologica al cotonello degli agrumi in Sicilia orientale Inf. Agrar., 38: 16671 - 16676
- Longo S. 1986. Risultati del controllo biologico di *Planococcus citri* (Risso) in agrumeti della Sicilia orientale. In: Delfino C (Eds.). 1986. Agrumicoltura - Il recente contributo della ricerca allo sviluppo dell'agrumicoltura italiana. Caglaiari, 29 Apr. - 3 Mag: 585 - 595

- Loomis RS, Rabbinge R, Ng E. 1979. Explanatory models in crop physiology. *Ann Ver Plant Physiol* 30: 339-367
- Ludwig JA, Reynolds JF. 1988. *Statistical ecology - a primer on methods and computing*. John Wiley & Sons, New York
- Luppino P. 1979. Lotta biologica per la difesa dagli agrumeti: si controlla il *Planococcus citri* utilizzando il *Leptomastix dactylopii*. *Inf. Agrar.*, 35: 4183-4186
- Manel S, Debouzie D. 1994. New models for mediterranean fruit fly development under constant and variable temperatures. *Bull. OILB/SROP* 17: 15-24
- Manel S, Debouzie D. 1995. Prediction of egg and larval development times in the field under variable temperatures. *Acta Œcologica*, 16: 205 - 218
- Manetsch TJ. 1976. Time-varying distributed delays and their use in aggregative models of large systems. *IEEE Trans. Systems, Man, Cybern.* 6: 547-553
- Mani M, Krishnamoorthy A. 2000 Biological suppression of mealybugs *Planococcus citri* (Risso) and *Planococcus lilacinus* (Ckll.) on pomegranate in India. *Indian-Journal-of-Plant-Protection*. 28(2): 187-189
- May RM, Hassell MP. 1988. Population dynamics and biological control. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 318: 129-169
- McDonald G. 1990. Simulation models for the phenological development of *Mythimna convecta* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae). *Aust. J. Zool.*, 38, 649-663
- McKibben GH, Willers JL, Smith JW, Wagner TL. 1997. Boll weevil dispersal model [Online]. Disponibile: http://dino.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/bwdisp.html
- Mendel Z, Gross S, Steinberg S, Cohen, Blumberg D. 1999. Trials for the control of the citrus mealybug in citrus orchards by augmentative release of two parasitoids. *Entomol Bari* 33: 251-265
- Meyerdirk DE, Chandler LD, Summy KR, Hart WG. 1981. Spatial distribution of citrus mealybug on grapefruit trees. *J. Econ. Entomol.* 74: 662-664
- Meyerdirk, DE. 1983. Biology of *Diomus flavifrons* (Blackburn) (Coleoptera: Coccinellidae), a citrus mealybug predator. *Environ. Entomol.*, 12: 1275-1277
- Michelakis S, Hamid HA. 1995. Integrated control methods of the citrus mealybug, *Planococcus citri* (Risso) in Crete, Greece. In: Mendel Z, Wysoki M (Eds.) *Proc. VII Int. Symp. Scale Insect Studies, Bet Dagan* 1994. *Isr. J. Entomol.* 29: 277-284
- Mineo G, Viggiani G. 1976a. Sull'acclimatazione in Italia di *Leptomastix dactylopii* parassita del cotonello degli agrumi. *Inf. fitopatol.*, 5: 13-15
- Mineo G, Viggiani G. 1978. Su un esperimento di lotta integrata negli agrumeti in Sicilia. *Boll Lab Entomol Agrar Filippo Silvestri*" 33: 219-231
- Mineo G, Vigianni G. 1976b Su un esperimento di lotta integrata negli agrumeti di Sicilia. *Boll. Lab. Entomol. Agrar. F. Silvestri*, 33: 219-231
- Mishoe, Wilkerson. 1992. Integrated decision model for velvetbean caterpillar control. In: Goodenough JL, Mckinion J M. (Ed.). 1992. *Basics of insect modelling*. American Society of Agricultural Engineers
- Monteith JL. 1996. The quest for balance in crop modelling. *Agron. J.*, 88: 695-697
- Mugalu S. 1988. Factors affecting host searching by hymenopteran parasitoids of glasshouse mealybugs. MSc Thesis, Univ Lond, London
- Nelson-Rees WA. 1960. A study of sex predetermination in the mealy bug *Planococcus citri* (Risso). *J. Exp. Zool.* 144: 111-137
- Nestel D, Cohen H, Saphir N, Klein M, Mendel Z. 1995. Spatial distribution of scale insects: a comparative study using Taylor's power law. *Environ. Entomol.*, 24: 506-512
- Nicholson AJ, Bailey VA. 1935. The balance of animal populations. *Proc Zool Soc London*: 551-598
- Noyes J, Hayat M. 1994. *Oriental mealybug parasitoids of the Anagyrini*. CAB International, Wallingford
- Ortu S, Delrio G. 1983. Le trappole a feromoni nella programmazione della lotta al *Planococcus citri* (Risso) in Sardegna. In: *Atti XIII Congr. Naz. Ital. Entomol., Sestriere, 1983*: 253-258
- Ortu S, Prota R. 1984. Brevi considerazioni sulle recenti introduzioni in Sardenha di entomofagi a protezione della coltura agrumicola. *Frustula Entomol* 7/8: 115-123
- Ortu S. 1986. *Planococcus citri* (Risso) control in Sardinia. In: Cavalloro R, Martino E Di (Eds.) *Integrated Pest Control in Citrus Groves*. Proc Expert Meet, Acireale, 1985. AA Balkema, Rotterdam
- Panis A. 1969. Observations faunistiques et biologiques sur quelques Pseudococcidae (Homoptera, Coccoidea) vivant dans le midi de la France. *Ann. Zool. Ecol. Anim.* 1 3: 211-244.

- Parera, HAS. 1990. Effect of host plant on mealybus and their parasitoids. PhD Thesis, Univ. London, London
- Passioura JB. 1996. Simulation models: science, snake oil, education or engineering? *Agron. J.*, 88: 690-694
- Patil GP, Stiteler WM. 1974. Concept of aggregation and their quantification. *Res. Popul. Ecol.*, 15: 121-137
- Payne RW, Lane PW, Ainsley AE, Bicknell KE, Digby PGN, Harding SA, Leech PK, Simpson HR, Todd AD, Verrier PJ & White RP. 1994. *Genstat 5: Reference Manual*. Clarendon Press, Oxford.
- Pedigo LP, Hutchins SH, Higley LG. 1986. Economic injury levels in theory and practice. *Annu Rev. Entomol.* 31: 341-368
- Pedigo LP. 1996. *Entomology & pest management*. Prentice-Hall, Upper Saddle River
- Pedreira AO. 1997. Influência do substrato vegetal (folhas versus frutos) na biologia reprodutiva das cochonilhas algodão em citrinos. *Rel. Trab. Fim Curso Eng. Agron., ISA/UTL, Lisboa*
- Penning de Vries FWT. 1982. Phases of development of models. In Penning de Vries FWT, van Laar HH (Eds.) *Simulation of plant growth and crop production*. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, The Netherlands: 20-25
- Pereira RMC. 1991. Estudo da influência da temperatura na fecundidade e fertilidade da cochonilha algodão dos citrinos (*Planococcus citri* (Risso)). *Rel. Trab. Fim Curso Eng. Agron., ISA/UTL, Lisboa*
- Pielou EC. 1977. *Mathematical ecology* John Wiley & Sons, New York
- Pinto, MAS 1996 Modelos de previsão de ataque de escolitídeos (Coleoptera, Scolytidae). Contribuição para a sua elaboração em povoamentos de pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait.) do perímetro florestal da Meia Via (Amarante). *Diss Mestrado Prot Integr, ISA/UTL, Lisboa*
- Pradhan S. 1945. The effects of temperature on the duration of insect development under variable temperatures of the field. *Proc. Natl. Inst. Sci. India* 11: 74-80
- Pradhan S. 1946. Insect population studies IV. Dynamics of temperature effect on insect development. *Ibid.* 12: 385-404
- Prakasan CB, Bhat PK. 1985. Interference of the predator *Cryptolaemus montrouzieri* with the performance of a newly introduced parasite, *Leptomastix dactylopii* J *Coffe Res* 15: 29-32
- Provencher L, Riechert S. 1994. Model and field test of prey control effects by spider assemblages. *Environ. Entomol.* 23: 1-17
- Pruess KP. 1983. Day-degree methods for pest management. *Environ. Entomol.* 12: 613-619
- Raciti E, Barraco D, Conti F 2001 Biological control of the citrus mealybug. *Informatore Agrario*, 57(19): 49-54
- Ratte HT. 1985. Temperature and insect development. In: Hoffman K. H. (Eds.) *Environmental physiology and biochemistry of insects*. Springer-Verlag, Berlin: 33-66
- Ravlin FW, Stein KJ. 2001. General information about the gypsy moth. [Online] Disponível: http://www.gypsymoth.ento.vt.edu/vagm/General_information.html
- Reddy KB, Bhat PK, Prakasan CB, Kumar AC. 1992. Establishment of *Leptomastix dactylopii* How. (Hym.: Encyrtidae) in Karnataka for control of *Planococcus citri* (Hom.: Pseudococcidae) of coffee. *J Coffe Res* 22: 37-42
- Régnière J. 1983. An oviposition model for the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Can. Entomologist* 115: 1371-1382
- Rivnay E. 1961. The phenology and status of *Planococcus citri* in citrus groves in Israel. *Isr. J. Agric. Res.* 11(29): 119-124.
- Rogers D. 1972. Random search and insect population models. *J. Anim. Ecol.* 41: 369-383
- Ronse A. 1990. Integrated pest management in the greenhouses of the national botanic garden of Belgium. *Rev Agric* 43: 429-436
- Sayed MT, Soliman AA, Salama HS. 1962. On the development stages of *Planococcus vitis* Nied. and *Planococcus citri* Risso. *Bull Soc. Entomol. Egypte* 46: 449-457
- Schaub LP, Stone ND. 1994. An empirical oviposition model of bollworms (Lepidoptera: Noctuidae) in cotton representing stochasticity due to migration. *Agricultural Systems* 45: 1-18
- Schoolfield RM, Sharpe PJH, Magnuson CE. 1981. Nonlinear regression of biological temperature dependent rate models based on absolute reaction rate theory. *J. Theor. Biol.* 88: 719-731
- Sharov A. 1996. Quantitative Population Ecology. [Online]. Disponível: <http://www.ento.vt.edu/~sharov/PopEcol/popecol.html>.
- Sharpe PJH, DeMichelle DW. 1977. Reaction kinetics of poikilotherm development. *J. Theor. Biol.* 64: 649-670

- Silva EMB 1994. Cálculo de prejuízos provocados por *Planococcus citri* (Risso) (Homoptera; Pseudococcidae) em laranja doce (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck): estudo preliminar. Tese Mestrado Prot Integr. ISA/UTL, Lisboa
- Silva EMB 2000 Cálculo de prejuízos provocados por *Planococcus citri* (Risso) (Homoptera; Pseudococcidae) em laranja doce (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck). Tese Doutor Eng Agron, ISA/UTL, Lisboa
- Silva EMB. 1991. A hipótese de partenogénese nas cochonilhas Pseudococcidae dos citrinos: estudo em ambiente controlado. Rel. Trab. Fim Curso Eng. Agron, ISA/UTL, Lisboa
- Sinclair TR, Seligman NG. 1996. Crop modelling: from infancy to maturity. *Agron. J.*, 885: 698-704
- Skellam JG. 1951. Random dispersal in theoretical populations. *Biometrika* 38: 196-218
- Skellam JG. 1973. The formulation and interpretation of mathematical models of diffusionary processes in population biology. In: Bartlett MS, Hiorns RW (Eds.) *The mathematical theory of the dynamics of biological populations*. Academic Press, London
- Smith D, Beattie GAC, Broadley R. (Eds.). 1997. *Citrus pests and their natural enemies: integrated pest management in Australia*. Queensland DPI & HRDC, Brisbane
- Smith D, Papacek DF, Murray DAH. 1988. The use of *Leptomastix dactylopii* Howard (Hymenoptera: Encyrtidae) to control *Planococcus citri* (Risso) (Hemiptera: Pseudococcidae) in Queensland citrus orchards. *Qld. J. Agric. Anim. Sci.* 45: 157-164
- Song-YooHan; Coop,-L-B; Omeg,-M; Riedl,-H 2003 Development of a phenology model for predicting western cherry fruit fly, *Rhagoletis indifferens* Curran (Diptera: Tephritidae), emergence in the Mid Columbia area of the Western United States. *Journal-of-Asia-Pacific-Entomology*. 6(2): 187-192
- Southwood TRE. 1978. *Ecological methods*. Chapman & Hall, London
- Spicciarelli R, Battaglia D, Tranfaglia A. 1994. Biological control of *Planococcus citri* (Risso) by *Leptomastix dactylopii* Howard
- Sterling W. 1975. Sequential sampling of cotton insect populations. *Proc. Beltwide Cotton Prod. Conf.*
- Stinner RE, Butler GD, Bachelier JS, Tuttle C. 1975. Simulation of temperature dependent development in population dynamic models. *Can. Entomol.*, 197: 1167-1174
- Stinner RE, Gutierrez AP, Butler GD. 1974. An algorithm for temperature-dependent growth rate simulation. *Canadian entomol.*, 106: 519-524
- Subramanyam B, Hagstrum DW. 1993. Predicting development times of six stored-product moth species (Lepidoptera: Pyralidae) in relation to temperature, relative humidity and diet. *Eur. J. Entomol.* 90: 51-64
- Summy KR, French JV, Hart WG. 1986. Citrus mealybug (Homoptera: Pseudococcidae) on Greenhouse citrus: density-dependent regulation by an encyrtid parasite complex. *J. Econ Entomol* 79: 891-895
- Taylor F. 1981. Ecology and evolution of physiological time in insects. *The American Naturalist*, 117: 1-23
- Taylor F. 1982. Sensitivity of physiological time in arthropods to variation of its parameters. *Environ. Entomol.* 11: 573-577
- Taylor LR, Perry JN, Woiwoid IP, Taylor RAJ. 1988. Specificity of the spatial power law exponent in ecology and agriculture. *Nature*, 332: 721-722
- Taylor LR, Woiwoid IP, Perry JN. 1978. The density dependence of spatial behaviour and the rarity of randomness. *J. Anim. Ecol.* 47: 383-406
- Taylor LR. 1961. Aggregation, variance and the mean. *Nature* 189: 732-735
- Taylor LR. 1984. Assessing and interpreting the spatial distribution of insect populations. *Annu. Rev. Entomol.* 29: 321-357
- Thompson. 1924. La théorie mathématique de l'action des parasites entomophages et le facteur du hasard. *Annls Fac Sci Marseille* 2: 69-89
- Throne,-J-E; Parajulee,-M-N; Phillips,-T-W 2000 Computer model for simulating population dynamics of the predator *Lyctocoris campestris* (Heteroptera: Anthracoridae) in stored shelled corn. *Environmental-Entomology*. 29(6): 1236-1243.
- Tingle CCD, Copland JW. 1989. Progeny production and adult longevity of the mealybug parasitoids *Anagyrus pseudococci*, *Leptomastix dactylopii* and *Leptomastidea abnormis* (Hym. Encyrtidae) in relation to temperature. *Entomophaga* 34: 111-120
- Tingle CCD. 1985. Biological control of the glasshouse mealybug using parasitic Hymenoptera. PhD Thesis, Univ. London, London

- Tingle, CCD, Copland JW. 1988. Predicting development of the mealybug parasitoids *Anagyrus pseudococci*, *Leptomastix dactylopii* and *Leptomastidea abnormis* under glasshouse conditions. Entomol. Exp. Appl. 46: 19-28
- Tonkyn DW. 1986. Predator mediated mutualism: theory and tests in the Homoptera. J. Theor. Biol. 118: 15-31
- Tranfaglia A, Franco JC, Spicciarelli R, Battaglia D. 1992. Primi introduzioni in Portogallo di *Leptomastix dactylopii* How. Per prove di lotta biologica al *Planococcus citri* (Risso). Infor. Agrar. 48(43): 71-72
- Turchin P. 1998. Quantitative analysis of movement. Measuring and modelling population redistribution in animals and plants. Sinauer Associates, Inc. Publishers. Sunderland, Massachusetts
- van Evert FK, Baker JM. 1999. Efficient construction of simulation models with component models. Revista Ciências Agrárias, 22: 33-56
- Varley GC, Grandwell GR. 1970. Recent advances in insect population dynamics. Ann. Rev. Entomol. 5: 243-264
- Vasquez Pique, Francisco Javier 2002 Modelos predictivos de produção de cortiça e detecção precoce da qualidade. Tese Doutor Eng Agron, ISA/UTL, Lisboa
- Viggiani G. 1975. Réintroduction de *Leptomastix dactylopii* HOW. pour la lutte biologique contre *Planococcus citri* RISSO. Fruits 30: 259-260
- Viggiani G. 1977. Lotta biologica ed integrata. Liguori Ed, Napoli
- Viggiani G, Battaglia D. 1984. Osservazioni su *Planococcus citri* (Risso) e *Pseudococcus calceolariae* (Mask.), cocciniglie associate su agrumi in Campania, con prove di lotta chimica. Atti Giorn Fitopatol 2: 363-374.
- Villalba M, Vila N, Marzal C, Garcia Mari, F. 2006. Influence of inoculative releases of natural enemies and exclusion of ants in the biological control of the citrus mealybug *Planococcus citri* (Hemiptera: Pseudococcidae), in citrus orchards. Plagas: 32(2): 203-213.
- Wagner TL, Wu H, Sharpe PJH, Schoolfield RM, Coulson RN. 1984. Modelling insect development rates: a literature review and application of a biophysical model. Ann. Entomol. Soc. Am. 77: 208-225
- Wang RS, Lan ZX, Ding YQ. 1982. Studies on mathematical models of the relationship between insect development and temperature. Acta Entomologica Sinica 2: 47-67. (Em Chinês)
- Wang Y, Gutierrez AP, Oster G, Daxl R. 1977. A population model for plant growth and development: coupling cotton-herbivore interaction. Can. Entomol., 109:1359-1374
- Wang,-K; Shipp,-J-L 2001. Simulation model for population dynamics of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) on greenhouse cucumber. Environmental-Entomology. 30(6): 1073-1081
- Waters WE. 1959. A quantitative measure of aggregation in insects. J. Econ. Entomol. 52, 1180-1186
- Wermelinger B, Seifert M. 1999. Temperature dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. Ecological Entomology 24: 103-110
- Whitehead VB. 1960. Insect enemies of the mealybug on grape vines. Deciduos Fruit Grower:1-5
- Wilson LT, Room PM. 1983. Clumping patterns of fruit and arthropods in cotton with implications for binomial sampling. Environ. Entomol. 12: 50-54
- Wilson LT. 1994. Estimating abundance, impact, and interactions among arthropods in cotton agroecosystems. In: Pedigo LP, Buntin GD. (Eds.) - Handbook of sampling methods for arthropods in agriculture. CRC Press, Boca Raton: 475-514
- Xia JY, Penning de Vries FWT, Litsinger JA. 1991. Model of population dynamics of *Scirpophaga incertulas* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae). Environ. Entomol. 20: 832-840
- Yang J, Sadof CS. 1995. Variegation in *Coleus blumei* and life history of citrus mealybug (Homoptera: Pseudococcidae). Environ. Entomol. 24: 1650-1655
- Zalom FG, Goodell PB, Wilson LT, Barnett WW, Bentley WJ. 1983. Degree-days: The calculation and use of heat units in pest management. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California, Leaflet 21373
- Zinna G. 1960a. Esperimenti di lotta biologica contro il cotonelo degli agrumi (*Pseudococcus citri* (Risso)) nell'Isola di Procida mediante l'impiego di due parassiti esotici, *Pauridia peregrina* Timb. e *Leptomastix dactylopii* How. Boll Lab Entomol Agrar "Filippo Silvestri" 18: 257-284
- Zinna G. 1960b. Ricerche sugli insetti entomofagi I. Specializzazione entomoparassitica negli Encyrtidae: studio morfologico, etologico e fisiologico del *Leptomastix dactylopii* Howard. Boll Lab Entomol Agrar "Filippo Silvestri" 18: 1-147

Agradecimentos

No final, não posso deixar de agradecer a todos aqueles me ajudaram de forma directa ou indirecta para a concretização deste trabalho.

Prof. António Mexia que imediatamente se prontificou a ser o meu orientador que me “arrumou” as ideias em relação ao tema deste doutoramento.

Prof. António St’Aubyn, meu co-orientador, pelas excelentes aulas de estatística que me deu no mestrado e por me ter despertado para o mundo da matemática aplicada às ciências da vida.

Prof. Zvi Mendel, a primeira pessoa que me recebeu de braços abertos e me deu a conhecer Israel (onde resido), sempre me acompanhou no decurso deste doutoramento e me forneceu dados originais apresentados neste trabalho.

Dr. Michael Copland e Jon Varley do Departamento de Ciências Biológicas do Wye College da Universidade de Londres que me abriram as portas do mundo dos modelos e simulação aplicado à biologia

Prof. José Carlos Franco, meu mentor de entomologia e da perspectiva científica em geral desde os anos de estudante do curso universitário e pela amizade sempre presente.

Elsa Borges amiga das lides académicas desde os anos noventa, que me ajudou em vários trabalhos referidos nesta tese, ainda me forneceu dados originais e trocou ideias comigo sobre alguns pontos desta tese.

Igor Korol pela preciosa ajuda na programação de SimCitri em Visual Basic 6.

Prof. Pedro Aguiar Pinto pela ideia e ajuda inicial na elaboração da proposta de glossário nomenclatura relacionada com modelos e simulações

Manuel Cariano pela ajuda nos trabalhos de campo e pela amizade sempre presente.

A meu Pai José Soares Valente Carvalho, e minha Mulher Chen Shochat Carvalho pela ajuda e incentivo incondicionais sem os quais não me seria possível terminar esta tese.

A todos os citricultores que gentilmente me cederam pomares para a realização dos mais diversos trabalhos.

Anexos

Anexo 1 Proposta glossário de nomenclatura relacionada com modelos e simulações

A

Algoritmo

Procedimento utilizado na execução de ordens muito específicas. Muitas vezes os algoritmos confundem-se com modelos matemáticos porque executam operações com valores numéricos.

Processo de resolução de um problema constituído por uma sequência ordenada e bem definida de passos que, em tempo finito, conduzem à solução do problema ou indicam que, para o mesmo, não existem soluções.

Casteleiro 2001

Analogia

Analogy

Determinação de semelhanças ou diferenças entre as propriedades do sistema e do modelo, através da comparação das propriedades de ambos. Em modelação é possível distinguirem-se três tipos diferentes de analogia: a analogia negativa quando não existem propriedades comuns entre o sistema e o modelo; a analogia positiva quando existem propriedades comuns entre o sistema e o modelo; e a analogia neutra quando se desconhece a natureza positiva ou negativa da analogia. Entre um sistema e um modelo é sempre possível observar-se os três tipos de analogia. Tomando como exemplo um modelo de simulação de produção da cultura da batata para computador, uma analogia negativa será que o sistema produz batatas e o modelo fornece os valores da produção; analogia positiva será a quantidade de dióxido de carbono fixado em função do comprimento do fotoperíodo, quer pela planta, quer nos valores representados no modelo; analogia neutra será a previsão de produção final por planta de batata do modelo e a produção real no campo.

Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: sistema, modelo.

C

Calibragem

Calibration

Procedimento no âmbito do desenvolvimento de um modelo que tem por objectivo encontrar o melhor ajustamento entre variáveis de estado observadas e calculadas, pela variação do valor de um certo número de parâmetros.

Jørgensen 1988, Boote et al. 1996

Termos relacionados: variáveis de estado, parâmetros.

Comando

Command, Control, control functions

Input pretendido. Input cujos momento e intensidade de introdução no modelo foram previamente determinados com o objectivo de se obter e/ou estudar o output.

Jørgensen 1988, Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: input, output.

Comando pro-activo

Feedforward control

Durante o estudo e utilização de sistemas ou de modelos muitas vezes é necessário modificar a intensidade tanto de factores exteriores como de factores interiores. Em função do momento em que é aplicada a modificação da intensidade dos factores podemos ter um comando pró-activo ou um comando retroactivo. O comando pro-activo aplica-se após a medição da intensidade de um factor exterior, sendo depois convertido numa acção compensadora em função dos valores medidos.

Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: comando, sistema, modelo, comando retroactivo.

Comando retroactivo ou retroregulação

Feedback control

Ao contrário do comando pro-activo, só após a medição da intensidade da perturbação que o factor exterior induz na variável de estado se aplica uma acção compensadora e se altera o valor ou condição da variável comandada.

Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: comando pro-activo, perturbação, variável de estado.

Constante

Constant

Coefficiente assumido como verdadeiro, não sendo sujeito a calibragem e cujo valor não se altera com o funcionamento do modelo.

Jørgensen 1988

Termos relacionados: calibragem.

D

Diagrama relacional

Diagram, net, relational diagram, conceptual diagram

Esquema representativo das relações existentes entre as diversos componentes do sistema e da lógica de funcionamento da simulação ou modelo, mostrando essencialmente aspectos qualitativos. Existem várias formas de representação de um diagrama relacional podendo alguns deles também apresentar representações de aspectos quantitativos.

Jørgensen 1988, Xia et al. 1991, Sharov 1996

Termos relacionados: sistema.

H

Hipótese básica

Theoretical hypothesis

As hipóteses básicas ou pressupostos do modelo, representam conhecimento que existe sobre o processo e podem funcionar como ponto de partida para a construção do modelo. Muitas vezes quando o sistema a modelar é complexo, é necessário estabelecer hipóteses simplificadas que só se verificam em algumas condições particulares e não em todo o domínio de possibilidades de ocorrência. Obviamente, estas hipóteses simplificadas retiram potência de previsão ao modelo, mas ao mesmo tempo simplificam a sua construção.

Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: modelo.

I

input

input

Entidade real ou conceptual que entra no sistema, no modelo ou simulação, podendo estar ou não sujeito a transformação (Doucet & Sloep 1992).

De acordo com Casteleiro (2001), o termo input é sinónimo de entrada. Entrada é a acção ou resultado de passar de fora para dentro ou chegar a algum ponto ou lugar.

Termos relacionados: sistema, modelo, simulação.

M

Marcador no sistema

Tracer

Entidade cujo percurso é passível de acompanhamento dentro do sistema. Os marcadores do sistema são muitas vezes utilizados na determinação experimental de taxas ou intensidade de um processo.

Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: sistema.

Modelo

Model

Representação simplificada de uma parte da realidade, sendo construído como ferramenta para a resolução de problemas. Um modelo nunca conterà todos os aspectos de um sistema real, mas deverá apresentar as suas características essenciais para a resolução ou descrição do problema colocado.

Southwood 1978, Jørgensen 1988

Termos relacionados: sistema.

Modelo analítico

Analytical model, explanatory model, reduced model, detailed model

Modelo que utiliza tantos pormenores relevantes quanto possível para a sua elaboração, evidencia a estrutura hierárquica do sistema e interpreta o seu comportamento. Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo analítico opõe-se ao conceito de modelo sintético.

de Wit & Arnold 1976, Southwood 1978, Getz & Gutierrez 1982, Jørgensen 1988, Godfray & Waage 1991

Termos relacionados: modelo, modelo sintético.

Modelo animal

Model animals

Modelo físico dinâmico sob a forma de um animal, sendo utilizado em substituição de outros animais em experiências. Ex: cobaias em testes de medicina humana.

Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: modelo, modelo físico, modelo dinâmico.

Modelo biodemográfico

Biodemographic model

Modelo cuja organização visa a conservação de espécies ou de informação genética, o padrão são os ciclos de vida e as variáveis de estado são o número de indivíduos ou número de espécies.

Denominação de acordo com a classificação dos componentes utilizados como variável de estado no modelo. O conceito de modelo biodemográfico opõe-se ao conceito dos modelos bioenergético e biogeoquímico.

Jørgensen 1988

Termos relacionados modelo, modelo bioenergético, modelo biogeoquímico, variável de estado.

Modelo bioenergético

Bioenergetic model

Modelo cuja organização visa a conservação de energia, o padrão são os fluxos de energia e as variáveis de estado são energia.

Denominação de acordo com a classificação dos componentes utilizados como variável de estado no modelo. O conceito de modelo bioenergético opõe-se ao conceito dos modelos biodemográfico e biogeoquímico.

Jørgensen 1988

Termos relacionados: modelo, modelo biodemográfico, modelo biogeoquímico, variável de estado.

Modelo biogeoquímico

Biogeochemical model

Modelo cuja organização visa a conservação de massa, o padrão são os ciclos dos elementos e as variáveis de estado são a massa ou concentração.

Denominação de acordo com a classificação dos componentes utilizados como variável de estado no modelo. O conceito de modelo biogeoquímico opõe-se ao conceito dos modelos biodemográfico e bioenergético

Jorgensen 1988

Termos relacionados: modelo, modelo biodemográfico, modelo bioenergético, variável de estado.

Modelo caixa negra

Black box model

Os input afectam apenas os output. Não existe causalidade. Modelo em que apenas se consegue caracterizar e medir o input e o output, não se sabendo qual a transformação das variáveis de estado no seu interior

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo caixa negra opõe-se ao conceito de modelo causal.

Jorgensen 1988

Termos relacionados: input, modelo causal, output, variáveis de estado.

Modelo causal

Causal model

Modelo em que os input, as variáveis e os output estão relacionados por relações causais. Neste caso o modelo permite o acompanhamento da alteração das variáveis de estado.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo causal opõe-se ao conceito de modelo caixa negra.

Jorgensen 1988

Termos relacionados: input, modelo, modelo caixa negra, output, variáveis de estado.

Modelo componente

Component model, comprehensive model

Modelo analítico, completamente quantificado experimentalmente e é um teste ao rigor e compreensão dos componentes do sistema e à forma e grandeza das funções de transferência.

Denominação de acordo com a classificação da complexidade da estrutura e objectivos do modelo. O conceito de modelo componente encontra-se numa fase de evolução posterior a modelo preliminar e anterior a modelo estratégico e modelo de gestão.

Southwood 1978, Penning de Vries 1982

Termos relacionados: modelo, modelo preliminar, modelo estratégico, modelo de gestão, modelo reduzido.

Modelo conceptual

Conceptual model, abstract model

Modelo apenas concebido mentalmente; não têm existência homologa no mundo real e as regras de funcionamento são preestabelecidas artificialmente; a sua representação é efectuada por símbolos. O conceito de modelo conceptual opõe-se ao conceito de modelo físico.

(Doucet & Sloep 1992, Forrester 1961)

Termos relacionados: modelo, modelo físico, símbolo.

Modelo de aconselhamento

Advisory model

Modelo utilizado para tomada de decisão e que é construído pela integração dos modelos de gestão, de gestão regional e de agro-ecossistema.

Nestel comunic. pessoal

Termos relacionados: modelo de gestão, modelo de gestão regional e modelo de agro-ecossistema

Modelo de comunidades

Community model

Modelos de simulação baseados na teoria ecológica e que visam o estudo da relação entre populações de diferentes espécies como por exemplo competição, predador-presa ou parasitóide-hospedeiro

Nestel comun. pessoal

Termos relacionados: modelo, modelo de simulação.

Modelo de diferenças

Difference model

modelo em que as variáveis definidas no sistema são quantificadas através de equações de diferenças com o objectivo de traduzir fenómenos que ocorrem em intervalos de tempo (ou espaço) discretos.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo diferencial é paralelo ao conceito de modelo diferencial e de modelo matriz.

Southwood, 1978

Termos relacionados: modelo, modelo diferencial, modelo matriz, sistema.

Modelo de ecossistema agrário

Agroecosystem model

Modelo de simulação sobre ecossistemas agrícolas onde se inclui a teoria ecológica

Nestel, comun. pessoal

Termos relacionados: modelo.

Modelo de gestão

Management model, economic management model

Evolução de modelo estratégico em que foi acrescentado o critério económico, envolvendo o conceito de optimização. Estes modelos são utilizados em decisões de gestão de sistemas complexos.

Denominação de acordo com a classificação da complexidade da estrutura e objectivos do modelo. O conceito de modelo de gestão encontra-se numa fase de evolução posterior a modelo preliminar, modelo componente e modelo estratégico.

O conceito de modelo de gestão opõe-se ao conceito de modelo de investigação-

Southwood 1978, Jorgensen 1988, Sinclair & Seligman 1996, Boote et al. 1996, Nestel comunic. pessoal

Termos relacionados: modelo, modelo preliminar, modelo componente, modelo estratégico, modelo de investigação

Modelo de gestão regional

Regional management model

Modelo de gestão que incorpora a teoria de gestão espacial e que tem por objectivo a optimização da utilização do espaço de acordo com as suas potencialidades.

Nestel comun. pessoal

Termos relacionados: modelo.

Modelo de investigação

Modelo utilizado como ferramenta de investigação.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo de investigação opõe-se ao conceito de modelo de gestão.

Jorgensen 1988, Sinclair & Seligman 1996, Boote et al. 1996

Termos relacionados: modelo, modelo de gestão.

Modelo de simulação dinâmica

Dynamic simulation model

Modelo que através de equações matemáticas simulam a evolução do comportamento global de um sistema biológico.

Nestel comun. pessoal

Termos relacionados: equação matemática, modelo.

Modelo determinista

Deterministic model

Modelo cujas variáveis são deterministas e não aleatórias.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo determinista opõe-se ao conceito de modelo estocástico.

Southwood 1978, Jorgensen 1988, Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: modelo, modelo estocástico.

Modelo diferencial

Differential model, compartment model

Modelo em que as variáveis definidas no sistema são quantificadas através de equações diferenciais com o objectivo de traduzir fenómenos que ocorrem em intervalos de tempo (ou espaço) contínuos.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo diferencial é paralelo ao conceito de modelo de diferenças e de modelo matriz.

Southwood 1978, Jorgensen, 1988

Termos relacionados: modelo, modelo de diferenças, sistema.

Modelo dinâmico

Dynamic model, nonautonomous model, distributed model

Modelo em que as variáveis que definem o sistema são função da variável independente tempo (ou talvez do espaço).

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo dinâmico opõe-se ao conceito de modelo estático.

Forrester 1961, Jorgensen 1988

Termos relacionados: modelo, modelo estático

Modelo empírico

Empirical model

Modelo desenvolvido com base em regras práticas estabelecidas num determinado ambiente. Os modelos empíricos são descritivos e desprovidos de qualquer fundamentação de teoria de populações ou de teoria biológica (Berryman 1997), pelo que estão sempre condicionados a uma aplicação dentro das condições em que foram desenvolvidos.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo empírico opõe-se ao conceito de modelo mecanicista.

Passioura 1996, Monteith 1996

Termos relacionados: modelo, modelo mecanicista

Modelo estático

Static model, autonomous model, Lumped model

Modelo em que as variáveis que definem o sistema não dependem da variável independente tempo (ou talvez espaço); os parâmetros do modelo estão condicionados a certas localizações e períodos, considerados constantes.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo estático opõe-se ao conceito de modelo dinâmico.

Doucet & Sloep 1992, Forrester 1961, Jorgensen 1988, Southwood 1978

Termos relacionados: modelo, modelo dinâmico.

Modelo estocástico

Stochastic model

Modelo cujos valores previstos são calculados de acordo com uma distribuição de probabilidades.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo estocástico opõe-se ao conceito de modelo determinista.

Southwood 1978, Jorgensen 1988, Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: modelo, modelo determinista.

Modelo estratégico

Strategic model

Evolução de modelo componente em que alguns aspectos foram simplificados e quantificados e é utilizado em análise ou simulação de sistemas complexos após dadas as condições iniciais.

Denominação de acordo com a classificação da complexidade da estrutura e objectivos do modelo. O conceito de modelo estratégico encontra-se numa fase de evolução posterior a modelo preliminar e modelo componente e anterior a modelo de gestão

Southwood 1978

Termos relacionados: modelo, modelo preliminar, modelo componente, modelo de gestão.

Modelo físico

Physical model

Modelo cuja percepção é empírica; podem ser medidos, e comportam-se de acordo com as leis da natureza. Muitas vezes estes modelos são réplicas à escala dos objectos em estudo. O conceito de modelo físico opõe-se ao conceito de modelo conceptual.

Doucet & Sloep 1992, Forrester 1961

Termos relacionados: modelo, modelo conceptual.

Modelo físico dinâmico

Dynamic physical model

Modelo físico com fluxo de material ou energia. Ex: túnel de vento.

Forrester 1961

Termos relacionados: modelo, modelo físico, modelo físico estático.

Modelo físico estático

Static physical model

Modelo físico sem fluxos de material ou energia. E. g. uma estrutura.

Forrester 1961

Termos relacionados: modelo, modelo físico, modelo físico dinâmico

Modelo linear

Linear model

Modelo em que são utilizadas sucessivas equações cujos parâmetros são lineares.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo linear opõe-se ao conceito de modelo não linear.

Jorgensen 1988

Termos relacionados: modelo, modelo não linear.

Modelo matemático

Mathematical model

Modelo conceptual em que as características dos sistemas e aspectos com eles relacionados são descritos em termos matemáticos; representação conceptual de uma teoria.

Jørgensen 1988, Doucet & Sloep 1992, Berryman 1997

Termos relacionados: modelo, modelo conceptual.

Modelo matriz

Matrix model

Modelo que utiliza matrizes na formulação matemática.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo diferencial é paralelo ao conceito de modelo de diferenças e de modelo diferencial.

Jorgensen, 1988

Termos relacionados: modelo, modelo de diferenças, modelo diferencial, sistema.

Modelo mecanicista

Mechanistic model, biophysical mechanistic model

Modelo desenvolvido com base em princípios científicos, concebido para representar processos biológicos, fisiológicos, químicos, etc.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo mecanicista opõe-se ao conceito de modelo empírico.

Coulson et al. 1985, Passioura 1996, Monteith 1996
Termos relacionados: modelo, modelo empírico.

Modelo múltiplo

Explanatory model

Modelo baseado em várias equações, transmitindo maior pormenor.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo múltiplo opõe-se ao conceito de modelo singular.

Loomis et al. 1979

Termos relacionados: modelo, modelo singular.

Modelo múltiplo de multinível

Explanatory multiple model

Modelo múltiplo com uma estrutura hierárquica que permite a previsão e explanação do comportamento integrado do sistema

Loomis et al. 1979

Termos relacionados: modelo, modelo múltiplo.

Modelo múltiplo pormenorizado

Descriptive explanatory model

Modelo múltiplo de multinível alcançando a sua extensão máxima.

Loomis et al. 1979

Termos relacionados: modelo, modelo múltiplo, modelo múltiplo de multinível.

Modelo não linear

Non linear model

Modelo em que uma ou mais equações cujos parâmetros não são de primeiro grau.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo não linear opõe-se ao conceito de modelo linear.

Jorgensen 1988

Termos relacionados: modelo, modelo linear.

Modelo preliminar

Preliminary model

Modelo geralmente de concepção simples, que procura evidenciar aspectos qualitativos, mas de forma vaga e imprecisa.

Denominação de acordo com a classificação da complexidade da estrutura e objectivos do modelo. O conceito de modelo preliminar encontra-se numa fase de evolução anterior a modelo componente, modelo estratégico e modelo de gestão.

Penning de Vries 1982

Termos relacionados: modelo, modelo componente, modelo estratégico, modelo de gestão.

Modelo singular

Deterministic model

Modelo baseado numa única equação.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo singular opõe-se ao conceito de modelo múltiplo.

Loomis et al. 1979

Termos relacionados: modelo, modelo múltiplo.

Modelo sintético

Holistic model, dioristic model, analytical model

Modelo que utiliza princípios gerais para a sua elaboração.

Denominação de acordo com a classificação da estrutura e objectivo do modelo. O conceito de modelo genérico opõe-se ao conceito de modelo analítico.

Southwood 1978, Jorgensen 1988, Godfray & Waage 1991

Termos relacionados: modelo, modelo analítico.

O

Output

Output

Entidade real ou conceptual que sai do sistema, modelo ou simulação (Doucet & Sloep 1992).

De acordo com Casteleiro (2001), o termo output é sinónimo de saída. Saída é a acção ou resultado de sair.

Termos relacionados: sistema, modelo, simulação.

P

Parâmetro

Parameter

Coefficiente considerado constante para um determinado sistema, utilizado no processo de calibragem de um modelo ou simulação. Uma vez determinado o valor do parâmetro, este será o utilizado no modelo ou simulações.

Jørgensen 1988

Termos relacionados: modelo, sistema, calibragem, simulação.

Perturbação

Disturbance

Input não pretendido cuja acção tende a alterar a condição do sistema, modelo ou simulação e os valores dos respectivos output, variáveis de estado, fluxos, etc.

Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: input, sistema, modelo, simulação, output, variável de estado

Potência de previsão

Accuretness

Capacidade que um modelo ou simulação tem para prever resultados com valores tão próximo quanto possível do sistema real e para o conjunto de situações a que este último está sujeita.

Termos relacionados: modelo, simulação.

Jørgensen 1988

Previsão

Procedimento executado no teste de um pressuposto com um modelo, em que é calculado o estado futuro ou passado com o objectivo de comparar os valores calculados com os observados.

Termos relacionados: modelo.

S

Símbolo

Linguagem conceptual desenvolvida de acordo com um conjunto de regras com o objectivo de representação de sistemas, componentes de sistemas e/ou linguagens.

Termos relacionados: sistema.

Simulação

Simulation

Reprodução ou imitação de um processo por qualquer outra forma diferente do processo real, de modo que se obtenha uma resposta em relação a aspectos específicos. Conjunto organizado de modelos cuja utilização visa o estudo ou análise de um problema.

(Doucet & Sloep, 1992)

Termos relacionados: modelo.

Sistema
System

Colecção finita de elementos associados que partilham uma função ou propósito comum. Um número finito de elementos implica uma definição automática de fronteira. Existindo um objectivo ou propósito comum num sistema, será necessário reunir todas as partes que são indispensáveis ao sistema para atingir o objectivo, funcionando com sinergia.

Ferrari 1978, Doucet & Sloep 1992.

Sub-sistema

Conjunto de partes de um sistema que ainda podem ser observados como tal.

Termos relacionados: sistema.

V

Validação

Validate

Testar um modelo comparando os output do modelo com os output do sistema durante uma série de ciclos, ou em diversos locais com o objectivo de aceitar as respostas do modelo como sendo suficientemente próximas das respostas do sistema.

Doucet & Sloep 1992, Monteith 1996

Termos relacionados: output, modelo, sistema.

variável de estado

State variable

Variável que descreve o estado do sistema e que se localiza no seu interior. Variável que funciona em simultâneo como variável causal e variável efeito.

Jørgensen 1988, Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: sistema.

Variável força

Forcing function, external variable

Variáveis de natureza externa e que influenciam o estado do sistema. A acção de uma variável força poderá ser permanente, periódica cíclica ou acíclica ou instantânea.

Jørgensen 1988

Termos relacionados: sistema.

Verificação

verify

Demonstração de que um modelo ou um componente de um modelo são verdadeiros, reproduzindo de forma conceptual ou proporcional as respostas ou componentes do sistema com um nível de aproximação admitido como satisfatório.

Doucet & Sloep 1992

Termos relacionados: modelo.

Anexo 2 Modelos de relação entre taxa de desenvolvimento ($r(T)$) e período de desenvolvimento (p) como função de temperatura constante (T)

Modelo	Variáveis e constantes	Referência
$r(T) = \rho (T - T_b)$	(A2.1) $\hat{\rho}$ aumento constante de taxa de desenvolvimento em relação à temperatura T – temperatura T_b – zero de desenvolvimento	Logan 1988
$p = \frac{m}{2} (a^T + a^{-T})$	(A2.2) p – período de desenvolvimento m – Período de desenvolvimento à temperatura ótima por cálculo empírico a – constante empírica	Janisch 1925 Huffaker 1944
$d(T) = \frac{a(\beta - T)^c}{(T - \alpha)^b}$	(A2.3) $d(T)$ – dias para eclosão α – zero de desenvolvimento inferior β – zero de desenvolvimento superior a, b, c – constantes empíricas	Belehrádeck 1935
$r(T) = \Psi e^{\rho (T - T_b)}$	(A2.4) $\hat{\rho}$ valor que define o local da regressão linear em relação ao eixo xx $\hat{\rho}$ declive da curva T – temperatura T_b – zero de desenvolvimento	Logan 1988
$r(T) = e^{\rho (T - T_b)} - 1$	(A2.5) $\hat{\rho}$ declive da curva T – temperatura T_b – zero de desenvolvimento	Logan 1988
$r(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n$	(A2.6) a_0, \dots, a_n – constantes T – temperatura	Tingle & Copland 1988 Harcourt & Yee 1982
$r(T) = \frac{k}{1 + e^{a-bT}}$	(A2.7) k – constante que define o limite superior da curva sigmóide a – valor que define o local da regressão linear em relação ao eixo xx b – declive da curva T – temperatura	Davidson 1942, 1944

Modelo	Variáveis e constantes	Referência
$r(T) = r_M e^{-\frac{1}{2}a(T_M - T)^2}$	(A2.8) r_M – taxa máxima de desenvolvimento a – constante que define inibição de processos biológicos por aumento de temperatura acima de T_M T_M – temperatura para a qual o desenvolvimento máximo ocorre T – temperatura	Pradham 1945, 1946
$r(T) = r_M e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T - T_M}{T_\sigma}\right)^2\right]}$	(A2.9) r_M – taxa máxima de desenvolvimento T – temperatura T_M – temperatura para a qual o desenvolvimento máximo ocorre T_σ – medida da dispersão da curva correspondente ao desvio padrão de uma distribuição normal (°C)	Taylor 1982
$r(T) = \frac{T_M}{1 + e^{k_1 + k_2 T}}, \text{ para } T \leq T_M$	(A2.10) T_M temperatura para a qual o desenvolvimento máximo ocorre k_1, k_2 – constantes empíricas T – temperatura	Stinner et al. 1975 Logan 1988
$r(T) = \frac{T_M}{1 + e^{k_1 + k_2(2T_M - T)}}, \text{ para } T > T_M$		
$r(T) = e^{\rho T} - e^{\left[\rho T_M - \frac{(T_M - T)}{\Delta T}\right]} + \lambda$	(A2.11) \bar{Q}_{10} – valor Q_{10} para catálise crítica enzimática, declive da curva T – dimensão do limite para alta temperatura $\bar{\lambda}$ – parâmetro que permite o cálculo do zero de desenvolvimento T_m – temperatura máxima letal para seres vivos durante longos períodos T – temperatura T_b – zero de desenvolvimento	Logan et al. 1976 Lactin et al. 1995
$r(T) = \frac{\rho(25^\circ\text{C}) \frac{T}{298} e^{\left[\frac{\Delta H_A^\ddagger}{R} \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)\right]}}{1 + e^{\left[\frac{\Delta H_L}{R} \left(\frac{1}{T_{1/2L}} - \frac{1}{T}\right)\right]} + e^{\left[\frac{\Delta H_H}{R} \left(\frac{1}{T_{1/2H}} - \frac{1}{T}\right)\right]}}$	(A2.12) T – temperatura em °K R – constante universal dos gases (1,987 cal deg ⁻¹ mol ⁻¹) $\rho(25^\circ\text{C})$ – taxa de desenvolvimento a 25°C na ausência de desactivação enzimática (tempo ⁻¹) ΔH_A^\ddagger – entalpia de activação de reacção que é catalisada pela enzima (cal mol ⁻¹) $T_{1/2L}$ – temperatura baixa (°K) à qual a enzima está meio activa e meio inactiva ΔH_L – alteração na entalpia associada à desactivação da enzima por baixa temperatura (cal mol ⁻¹) $T_{1/2H}$ – temperatura alta (°K) à qual a enzima está meio activa e meio inactiva ΔH_H – alteração na entalpia associada à desactivação da enzima por alta temperatura (cal mol ⁻¹)	Sharpe & DeMichele 1977 Schoolfield et al. 1981 Wagner et al. 1984

Modelo	Variáveis e constantes	Referência
$r(T) = \Psi \left[e^{\rho(T-T_b)} - e^{-\frac{T-T_b}{\Delta T}} \right]$	(A2.13) \bar{Q}_{10} – valor Q_{10} para catálise crítica enzimática, declive da curva T – temperatura T_b – zero de desenvolvimento $\square T$ – dimensão do limite para baixa temperatura \square taxa de desenvolvimento a $T_b + \Delta T$	Logan et al. 1979 Logan 1988
$r(T) = \frac{k \left[1 - e^{\left(-\frac{T-T_L}{\delta}\right)} \right] \cdot \left[1 - e^{\left(-\frac{T_H-T}{\delta}\right)} \right]}{1 + e^{-r(T-T_M)}}$	(A2.14) T – temperatura k – valor da assíptota superior da curva r – modelo de crescimento exponencial T_M – temperatura para a qual o desenvolvimento máximo ocorre T_M – limite de temperatura máxima T_L – limite de temperatura mínima \square dimensão do limite de altas e baixas temperaturas	Wang et al. 1982 Li 1995
$r(T) = r_M \left[\frac{(T - T_b)^2}{(T - T_b)^2 + D^2} - e^{-\frac{T_M - T}{\Delta T}} \right]$	(A2.15) r_M – taxa máxima de desenvolvimento D – constante empírica T – temperatura T_b – zero de desenvolvimento $\square T$ – dimensão do limite para temperatura alta	Hilbert & Logan 1983 Logan 1988
$r(T) = \begin{cases} 0 \Leftarrow T \leq T_b \\ aT(T - T_b)\sqrt{T_M - T} \Leftarrow T_b \leq T \leq T_M \\ 0 \Leftarrow T \geq T_M \end{cases}$	(A2.16) a – constante empírica T_b – zero de desenvolvimento T_M – limite de temperatura máxima	Briere et al. 1999
$r(T) = \begin{cases} 0 \Leftarrow T \leq T_b \\ aT(T - T_b)(T - T_b)^{\frac{1}{m}} \Leftarrow T_b \leq T \leq T_M \\ 0 \Leftarrow T \geq T_M \end{cases}$	(A2.17) a – constante empírica m – parâmetro a avaliar pela equação (A2.18) T_b – zero de desenvolvimento T_M – limite de temperatura máxima	Briere et al. 1999
$T_{\text{opt}} = \frac{2mT_L + (m+1)T_b + \sqrt{4m^2T_L^2 + (m+1)^2T_b^2 - 4m^2T_bT_L}}{4m+2}$	(A2.18)	Briere et al. 1999

Anexo 3 Índices de ocupação ambiental de organismos e respectivas fórmulas.

Índice e denominação	Variáveis e constantes	Observações			Referência
		Uniformidade máxima	Aleatório	Agregação máxima	
Dispersão $ID = \frac{s^2}{m}$ Índice de Dispersão	(A3.1) s^2 variância estimada da população m média estimada da população	0	1	n (número total de indivíduos)	Ludwig & Reynolds 1988
$IC = \frac{s^2}{m} - 1$ Índice de agregação	(A3.2)	-1	0	$n-1$	David & Moore 1954 Ludwig & Reynolds 1988
$GI = \frac{\frac{s^2}{m} - 1}{n - 1}$ Índice de Green	(A3.3)	$-\frac{1}{n-1}$	0	1	Green 1966 Ludwig & Reynolds 1988
					Testa a diferença em relação a padrões aleatórios Testes fortemente afectados por n Testa a diferença em relação a padrões aleatórios Testes não afectados por n Testa a diferença em relação a padrões aleatórios Testes não afectados por n Os valores estão relacionados com m em padrões espaciais uniformes e aleatórios

Índice e denominação	Variáveis e constantes	Observações			Referência
		Uniformidade máxima	Aleatório	Agregação máxima	
$\hat{k} = \frac{m^2}{s^2 - m}$	(A3.4) N número total de amostras N_0 número de amostras com 0 indivíduos x número de indivíduos por amostra		$\hat{k} > 8$	$\hat{k} < 8$	Southwood 1978 Ludwig & Reynolds 1988 Davis 1994
$\text{Log}_{10} \frac{N}{N_0} = k \log_{10} \left(1 + \frac{m}{\hat{k}} \right)$	(A3.5) Ax soma de todas as frequências de amostras com mais de x indivíduos				
$N \log_e \left(1 + \frac{m}{\hat{k}} \right) = \sum \frac{Ax}{\hat{k} + x}$	(A3.6)				
estimativa de \hat{k} da binomial negativa					Valor de \hat{k} permanece quase inalterado com a redução de densidade de amostras, desde que a distribuição população se ajuste à binomial negativa Caso contrário, \hat{k} é influenciado pelo número total de amostras
$\frac{1}{\hat{k}}$	(A3.7)	<0	=0	>0	Waters 1959
Agrupamento					As mesmas observações que para o índice \hat{k}
$m^* = m + \frac{\sigma^2}{m} - 1$	(A3.8)	<1	=1	>1	Lloyd 1967 Davis 1994
Índice de Lloyd					Depende da dimensão da amostra

Concentração

Índice e denominação	Variáveis e constantes	Observações			Referência
		Uniformidade máxima	Aleatório	Agregação máxima	
$I_{\delta} = \left(\frac{n}{n-1} \right) \left(\frac{m^*}{m} \right)$ <p>Índice de Morita</p>	(A3.9)	<0	=0	>0	Hill 1973 Kuno 1991 Davis 1994
$C_A = \frac{\sigma^2 - m}{m^2}$ <p>Índice de Kuno</p>	(A3.10)	$-\frac{1}{m}$	0	>0	Kuno 1991
$\frac{m^*}{m} = 1 + \frac{\sigma^2}{m^2} - \frac{1}{m}$ <p>Índice de Lloyd</p>	(A3.11)	<1	1	>1	Lloyd 1967
$m^* = \alpha + \beta m$ <p>Regressão de concentração de Iwao</p>	(A3.12)	□ <1 □ - Índice de distribuição básica (coeficiente relacionado com o padrão que a espécie utiliza o ambiente. Medida espacial de distribuição de agregados)	□ =1	□ >1	Iwao 1968 Davis 1994
		(α > 0 tendência para agrupamento; α < 0 tendência para repulsão)			

Índice e denominação	Variáveis e constantes	Observações			Referência
		Uniformidade máxima	Aleatório	Agregação máxima	
Relação Variância/média $s^2 = am^b$ Lei da potência de Taylor	(A3.13) a Índice relacionado com a técnica de amostragem b Índice considerado constante e característico para cada espécie	$b < 1$	$b = 1$	$b > 1$	Taylor 1961 Davis 1994
$s^2 = (a + 1)m + (b - 1)m^2$ equação quadrática dedutiva de Iwao & Kuno	(A3.14) a, b - Índice da lei da potência de Taylor	Modelo empírico			Iwao & Kuno 1971
		Modelo dedutivo			

Anexo 4 "Equação de disco" de Holling

A descrição que se segue sobre a “equação de disco” de Holling foi baseada em Sharov (1996)

Respostas funcional e numérica

Holling (1959), ao estudar a actividade predatória de pequenos mamíferos sobre Diprionidae (Hymenoptera), descobriu que a taxa predatória aumenta com o aumento da densidade populacional das presas. Este fenómeno é o resultado de dois efeitos: (1) cada predador aumentou o consumo de alimento quando exposto a maior densidade de presas, e (2) a densidade de predadores aumenta com o aumento da densidade de presas. Holling (1959) considerou estes efeitos como dois tipos de respostas: (1) como resposta funcional e (2) como resposta numérica.

Modelo da resposta funcional

Holling (1959) apresentou um modelo de resposta funcional, o qual ficou muito popular entre ecologistas. Este modelo é muitas vezes denominado por “equações de discos” porque aquele autor utilizou discos de papel para simular a área examinada por predadores.

Este modelo ilustra o conceito de gestão de tempo em ecologia do comportamento na medida em que se assume que o predador passa o seu tempo em dois tipos de actividade: Busca da presa e lide da presa que inclui perseguição e captura, matança, alimentação e digestão.

A taxa de consumo de um predador está limitada neste modelo porque mesmo que a presa seja muito abundante ao ponto de não ser necessário qualquer tempo de busca, o predador ainda necessita de despende tempo na lide da presa. O tempo total (θ) será igual à soma de tempo passado nas buscas (θ_{busca}) e na lide (θ_{lide}) (A4.1)

$$\theta = \theta_{busca} + \theta_{lide} \quad (A4.1)$$

Suponha-se que o predador capturou H_a presas durante o tempo θ . O Tempo de lide será então proporcional ao número de presas capturadas (A4.2)

$$\theta_{lide} = H_a \theta_h \quad (A4.2)$$

Em que θ_h é o tempo despendido na lide de uma presa h .

A captura de presas é assumida como aleatória. Um predador examina a área a por unidade de tempo (apenas tempo de busca é considerado) e captura todas as presas existentes. O parâmetro a é designado “área de busca”, mas também poderá ser chamada “taxa de busca”.

Após pesquisar durante o tempo θ_{busca} o predador examina a área = $a\theta_{busca}$ e captura $aH\theta_{busca}$ presas, onde H representa a densidade destas últimas (A4.3).

$$H_a = aH\theta_{busca} \quad (A4.3)$$

Donde (A4.4)

$$\theta_{busca} = \frac{H_a}{aH} \quad (A4.4)$$

Agora a gestão de tempo pode ser balanceada (A4.5)

$$\theta = \theta_{busca} + \theta_{lide} = H_a\theta_h + \frac{H_a}{aH} \quad (A4.5)$$

O último passo será encontrar o número de presas atacadas H_a (A4.6)

$$H_a = \frac{aHT}{1 + aHT_h} \quad (A4.6)$$

O gráfico da resposta funcional que corresponde à última equação é apresentado na Fig. A4.1.

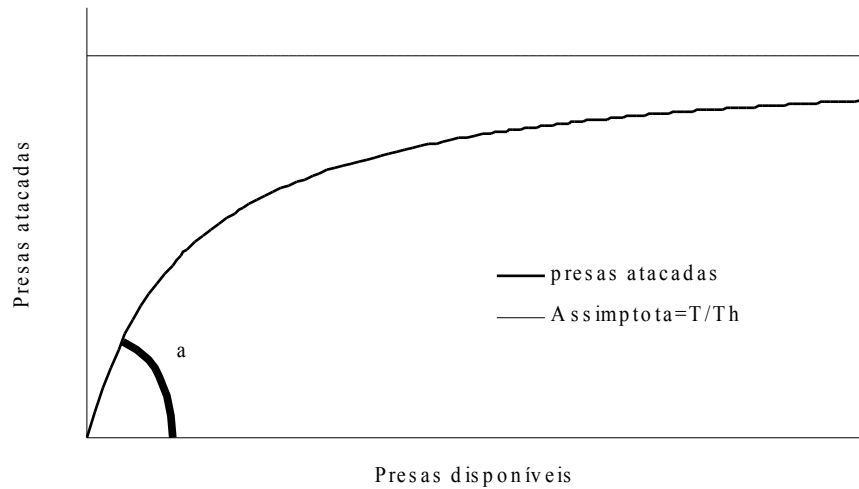


Fig A4.1 – Resposta funcional de um predador de acordo com o modelo de Holling (1959).

A função indica, para diversas densidades, o número de presas mortas por um predador. Esta curva tem a forma típica de uma resposta funcional para predadores de muitas

espécies. Para densidades baixas de presas, os predadores passam mais tempo em busca, enquanto que para densidades altas os predadores passam mais tempo em lide.

Anexo 5 Inimigos naturais de *Planococcus citri* (Risso) identificados em Portugal de acordo com Franco (1997).

Ordem: Família	Espécie
Hymenoptera: Encyrtidae	<i>Anagyrus diversicornis</i> Mercet <i>Anagyrus pseudococci</i> (Girault) <i>Coccidoxenoides peregrinus</i> (Timberlake) <i>Leptomastidea abnormis</i> (Girault) <i>Pseudaphycus perdignus</i> Compere & Zinna
Signiphoridae	<i>Chartocerus subaeneus</i> (Foerster)
Hemiptera: Anthocoridae	<i>Orius minutus</i> (L.) <i>Cardiastethus fasciventris</i> (Garbiglietti)
Thysanoptera: Phlaeothripidae	<i>Karnyothrips flavipes</i> (Jones)
Coleoptera: Coccinellidae	<i>Chilocorus bipustulatus</i> L. <i>Cryptolaemus montrouzieri</i> Mulsant <i>Exochomus nigromaculatus</i> (Goeze) <i>Exochomus quadripustulatus</i> L. <i>Lindorus lophante</i> (Blaisdell) <i>Nephus binotatus</i> Brisout <i>Nephus hiekei</i> Fürsch <i>Nephus peyerimhoffi</i> (Sicard) <i>Nephus quadrimaculatus</i> Herbst <i>Nephus reunioni</i> Fürsch <i>Scymnus apetzi</i> Mulsant <i>Scymnus frontalis</i> (F.) <i>Scymnus interruptus</i> (Goeze) <i>Scymnus levaillanti</i> Mulsant <i>Scymnus subvillosus</i> (Goeze) <i>Scymnus suturalis</i> Thunberg
Diptera: Cecidomyiidae	<i>Dicrodiplosis pseudococci</i> Felt
Chamaemyiidae	<i>Leucopis alticeps</i> Czerny
Neuroptera: Chrysopidae	<i>Mallada prasina</i> (Burmeister) <i>Chrysoperla carnea</i> (Stephens)
Hemerobiidae	<i>Symphorobius fallax</i> Navás <i>Symphorobius maculipennis</i> Kimmins <i>Symphorobius pygmaeus</i> (Rambur)

Anexo 6 Crescimento exponencial e logístico de populações quando afectado por difusão contínua de organismos

De acordo com o Capítulo 3.6, do modelo de Skellam (1973) para a difusão de organismos é possível obter a equação (A6.1) para a expansão de uma população

$$V = \sqrt{4rD} \quad (\text{A6.1})$$

onde,

V - taxa de expansão

r - taxa intrínseca de crescimento

D - coeficiente de difusão definido de acordo com (A6.2)

$$D = \frac{2M_t^2}{\pi \theta} \quad (\text{A6.2})$$

M_t - deslocamento médio de organismos recapturados θ unidades de tempo após a largada.

A partir da expressão (A6.1) defina-se “área de expansão” após o tempo θ (AE_θ) como (A6.3)

$$AE_\theta = \pi (\theta \cdot V)^2 \quad (\text{A6.3})$$

Considerando que num crescimento exponencial de uma população, não existe qualquer tipo de limitação para o aumento do número de indivíduos, excepto o da própria taxa intrínseca de crescimento da população, pode considerar-se que o efeito de uma difusão contínua, homogénea e optimizada da população se pode traduzir matematicamente da forma (A6.4)

$$DEG_\theta = \frac{N_0 e^{r\theta}}{AE_\theta} \quad (\text{A6.4})$$

onde,

DEG_θ - densidade de uma população no momento θ , sob um crescimento exponencial

N_0 - Número de organismos largados inicialmente

Neste caso, a seguinte questão poderá ser colocada: Será a taxa de difusão passível de afectar o crescimento da população a longo prazo? A resposta a esta questão pode ser estudada a partir da expressão (A6.5)

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} DEG_{\theta} = \lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{N_0 e^{r\theta}}{AE_{\theta}} \quad (\text{A6.5})$$

Que, de acordo com a definição em (A6.3) para AE_{θ} obtém-se (A6.6)

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{N_0 e^{\theta t}}{\pi (V\theta)^2} \quad (\text{A6.6})$$

Uma dedução simples mostra que este limite é indeterminado e da forma $\frac{\infty}{\infty}$. Portanto, para se calcular o limite desta função, aplica-se o teorema de Lagrange, derivando separadamente o numerador e denominador, obtendo-se a expressão (A6.7)

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{N_0 r e^{\theta t}}{\pi V^2 2\theta} \quad (\text{A6.7})$$

A expressão (A6.7) ainda é indeterminada do tipo $\frac{\infty}{\infty}$. Em consequência, aplica-se novamente o teorema de Lagrange's para levantar a indeterminação e chega-se à expressão (A6.8)

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{N_0 r^2 e^{r\theta}}{2\pi V^2} \quad (\text{A6.8})$$

Com um limite do tipo $\frac{\infty}{\text{constant}}$, o qual é equivalente a ∞ . Portanto, da mesma forma que o crescimento exponencial de uma população não tem limite superior, também o mesmo tipo de crescimento numa população afectado por uma difusão contínua não apresenta limite superior.

Agora, suponhamos que a população tem um crescimento limitado, tal como descrito na equação (3.19). Quando o crescimento logístico de uma população é afectado por uma população em contínua expansão num ambiente infinito e favorável, a expressão (A6.9) é obtida

$$DLG_t = \frac{N_0 K \cdot AE_{\theta t}}{N_0 + (K \cdot AE_{\theta} - N_0)e^{-r_0 \theta}} \quad (A6.9)$$

onde,

DLG_t – Densidade de uma população no momento θ , tendo um crescimento logístico

K – capacidade de sustentação do meio

onde $K \cdot AE_{\theta}$ representa a quantidade absoluta de recursos em AE_{θ} para a população. Simplificando (A6.9) obtém-se (A6.10)

$$DLG_{\theta} = \frac{N_0 K}{N_0 + (K \cdot AE_{\theta} - N_0)e^{-r_0 \theta}} \quad (A6.10)$$

Também, neste caso, poder-se-á colocar a seguinte questão: Será a taxa de difusão passível de afectar o crescimento da população a longo prazo? A resposta a esta questão pode ser estudada a partir da expressão (A6.11)

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} DLG_{\theta} = \lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{N_0 K}{N_0 + (K \cdot AE_{\theta} - N_0)e^{-r_0 \theta}} \quad (A6.11)$$

Que, de acordo com a definição em (A6.3) para AE_{θ} obtém-se (A6.12)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N_0 K}{N_0 + (K \cdot \pi (\theta V)^2 - N_0)e^{-r_0 t}} \quad (A6.12)$$

O estudo do limite desta função passa pelo estudo do termo que inclui a variável θ , especificamente o termo (A6.13). Todos os outros termos são meros constantes.

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} (K \cdot \pi (\theta V)^2 - N_0)e^{-r_0 \theta} \quad (A6.13)$$

Rescrevendo,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{K \cdot \pi (\theta V)^2 - N_0}{e^{r_0 \theta}} \quad (\text{A6.14})$$

Uma dedução simples mostra que este limite é indeterminado e da forma $\frac{\infty}{\infty}$. Portanto, para se calcular o limite desta função, aplica-se o teorema de Lagrange, derivando separadamente o numerador e denominador, obtendo-se a expressão (A6.15)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{2K \cdot \pi \theta V^2}{r_0 e^{r_0 \theta}} \quad (\text{A6.15})$$

A expressão (A6.15) ainda é indeterminada do tipo $\frac{\infty}{\infty}$. Em consequência, aplica-se novamente o teorema de Lagrange's para levantar a indeterminação e chega-se à expressão (A6.16)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{2K \cdot \pi V^2}{r_0^2 e^{r_0 \theta}} \quad (\text{A6.16})$$

Com o limite do tipo $\frac{\text{constant}}{\infty}$ que é equivalente a 0. Portanto, de uma forma semelhante ao crescimento exponencial de uma população tem uma asymptota em K, também crescimento logístico de uma população afectado por uma difusão contínua tende para K (A6.17).

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{N_0 K}{N_0 + 0} = K \quad (\text{A6.17})$$

Anexo 7 Cálculo do comprimento das matrizes de desenvolvimento de *Planococcus citri* (Risso) e *Leptomastix dactylopii* Howard

A7.1 – *Planococcus citri* (Risso)

O cálculo do número de sub-estádios em que se divide cada estágio considerado (Capítulo 4.3) foi efectuado com o método proposto por Manetsch (1976) (Capítulo 2.6.2). Para o efeito usaram-se os dados de Arai (1996) e Pedreira (1997) (Quadro A7.1)

Quadro A7.1 – Média (\bar{x}) e desvio padrão (σ_x) de períodos de desenvolvimento de *Planococcus. citri*.

Temp (°C)	20		22,5		22,5		25		27		27,5		30		Fonte
	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	
ovo	5,6	1,5	3,7	2,1	3,9	2,1	4,0	2,1	3,2	1,3	4,0	0,7			
1° instar	13,3	2,1	11	2,8	9,2	1,2	7,6	0,7	7,5	1,5	7,2	0,8	8	2,1	Arai
2° instar	7,9	1,3	7,1	2,5	6	0,8	6,1	1,8	5,3	1,8	4,8	0,7	8,3	3,1	(1996)
3° instar	11,1	1,7	14,4	4,7	10,6	2,7	9,7	3,6	8,1	1,8	9	3,5	17,3	1,5	
4° pre-pos	25,5	3,4	25,9	12,1	26,8	6,5	21,6	9	20,7	5,8	18,5	2,4			

Temp (°C)		26		Fonte
	\bar{x}		σ_x	
4° instar postura	14,9		4,05	Pedreira (1997)

Aplicando equação (2.1) a cada combinação de temperatura/estádio e calculando as médias, obteve-se a Quadro A7.2.

Quadro A7.2 – Número de sub estados de *Planococcus citri* (Risso) calculados de acordo com equação (2.1) utilizando dados da Quadro A7.1.

Temp (°C)	20	22,5	22,5	25	27	27,5	30	Nº médio sub estádios
Ovo	13,9	3,1	3,5	3,7	6,1	32,7		10,4
1° instar	40,1	15,4	58,8	118	25	81	14,5	50,4
2° instar	36,9	8,07	56,3	11,5	8,67	47	7,17	25,1
3° instar	42,6	9,39	15,4	7,26	20,3	6,61	133	33,5
4° pre-post	56,3	4,58	17	5,76	12,7	59,4		26,0

Fêmeas postura								13,6
----------------	--	--	--	--	--	--	--	------

Somando o número de sub-estádios para 1° + 2° instars, 3°+4° (pré-postura) instars, obtém-se respectivamente 75,5 e 59,5. Simplificando para se obter números inteiros obtêm-se os valores 76 e 60 respectivamente. Para ovos em incubação o valor adoptado foi 10 sub-estádios. Para fêmeas em postura o valor adoptado foi 10 sub-estádios.

A7.2 – *Leptomastix dactylopii* Howard

O cálculo do número de sub-estádios em que se divide cada estágio considerado (Capítulo 4.3) foi efectuado com o método proposto por Manetsch (1976) (Capítulo 2.6.2). Para o efeito usaram-se os dados de Battaglia et al. (1992, 1996) (Quadro A7.3)

Quadro A7.3 - Média (\bar{x}) e desvio padrão (σ_x) de períodos para desenvolvimento de *Leptomastix dactylopii* Howard.

Temp(°C)	25		26		Fonte
	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	
Ovo-pupa	18,39	1,58			Battaglia et al. 1996
Adulto	14,4	7,6	18,9	6,7	

Aplicando equação (2.1) a cada combinação de temperatura/estádio e calculando as médias, obteve-se a Quadro A7.4.

Quadro A7.4 - Número de sub estados de *Leptomastix dactylopii* Howard calculados de acordo com equação (2.1) utilizando dados da Quadro A7.3

Temp(°C)	25	26	Fonte
Ovo-pupa	135,47		Battaglia et al. 1996
Adulto	3,59	7,96	

Atendendo à escassez de dados para o cálculo do comprimento de matrizes de desenvolvimento de *L. dactylopii* (Quadro A7.3), o número de sub-estádios é obtido directamente para o estágio ovo - pupa arredondando o valor 135,47 para 135. O número de sub-estádios para os adultos resulta da média entre os dois valores existente, com um valor de 5,78, arredondado para 6.

Anexo 8 Algoritmo para determinação do horário nascer do sol/por do sol

Fonte:

Almanac for Computers, 1990
published by Nautical Almanac Office
United States Naval Observatory
Washington, DC 20392

Inputs:

dia, mês, ano: data do nascer do sol/por do sol
latitude, longitude: localização para nascer do sol/por do sol
zenite: Zenith do sol para nascer do sol/por do sol
oficial = 90 ° 50'
civil = 96 °
nautico = 102 °
astronómico = 108 °

NOTA: A longitude é positiva para Leste e negativa para Oeste

1. Cálculo do dia do ano

$$\begin{aligned}N1 &= \text{Int}(275 * \text{mês} / 9) \\N2 &= \text{Int}((\text{mês} + 9) / 12) \\N3 &= (1 + \text{Int}((\text{ano} - 4 * \text{Int}(\text{ano} / 4) + 2) / 3)) \\N &= N1 - (N2 * N3) + \text{Dia} - 30\end{aligned}$$

2. Converter a longitude para hora e calcular uma hora aproximada

$$\text{lngHour} = \text{longitude} / 15$$

para hora do nascer do sol:

$$t = N + ((6 - \text{lngHour}) / 24)$$

para hora do por do sol:

$$t = N + ((18 - \text{lngHour}) / 24)$$

3. Cálculo da anomalia média do sol

$$M = (0,9856 * t) - 3,289$$

4. Cálculo da verdadeira longitude do sol

$$L = M + (1,916 * \sin(M)) + (0,020 * \sin(2 * M)) + 282,634$$

NOTA: Eventualmente L necessita de ser ajustado para o intervalo [0,360]
adicionando/subtraindo 360

5a. Cálculo da correcta ascensão do sol

$$RA = \text{atan}(0,91764 * \tan(L))$$

NOTA: Eventualmente RA necessita de ser ajustado para o intervalo [0,360]
adicionando/subtraindo 360

5b. O valor da correcta ascensão do sol precisa de estar no mesmo quadrante de L

$$L\text{quadrant} = (\text{Int}(L/90)) * 90$$

$$RA\text{quadrant} = (\text{Int}(RA/90)) * 90$$

$$RA = RA + (L\text{quadrant} - RA\text{quadrant})$$

5c. A correcta ascensão do sol tem que ser convertida a horas

$$RA = RA / 15$$

6. Cálculo da declinação do Sol

$$\begin{aligned} \sin Dec &= 0,39782 * \sin(L) \\ \cos Dec &= \cos(\arcsin(\sin Dec)) \end{aligned}$$

7a. Cálculo da hora angulo local do Sol

$$\cos H = (\cos(\text{zenite}) - (\sin Dec * \sin(\text{latitude}))) / (\cos Dec * \cos(\text{latitude}))$$

Se ($\cos H > 1$)

 O Sol nunca nasce neste local (para a data especificada)

if ($\cos H < -1$)

 O Sol nunca se põe neste local (para a data especificada)

7b. Terminar de calcular H e converter a horas

Se a hora de nascer do Sol for desejada:

$$H = 360 - \arccos(\cos H)$$

Se a hora de Por do Sol for desejada:

$$H = \arccos(\cos H)$$

$$H = H / 15$$

8. Cálculo da hora média para o nascer do Sol/por do Sol

$$T = H + RA - (0,06571 * t) - 6,622$$

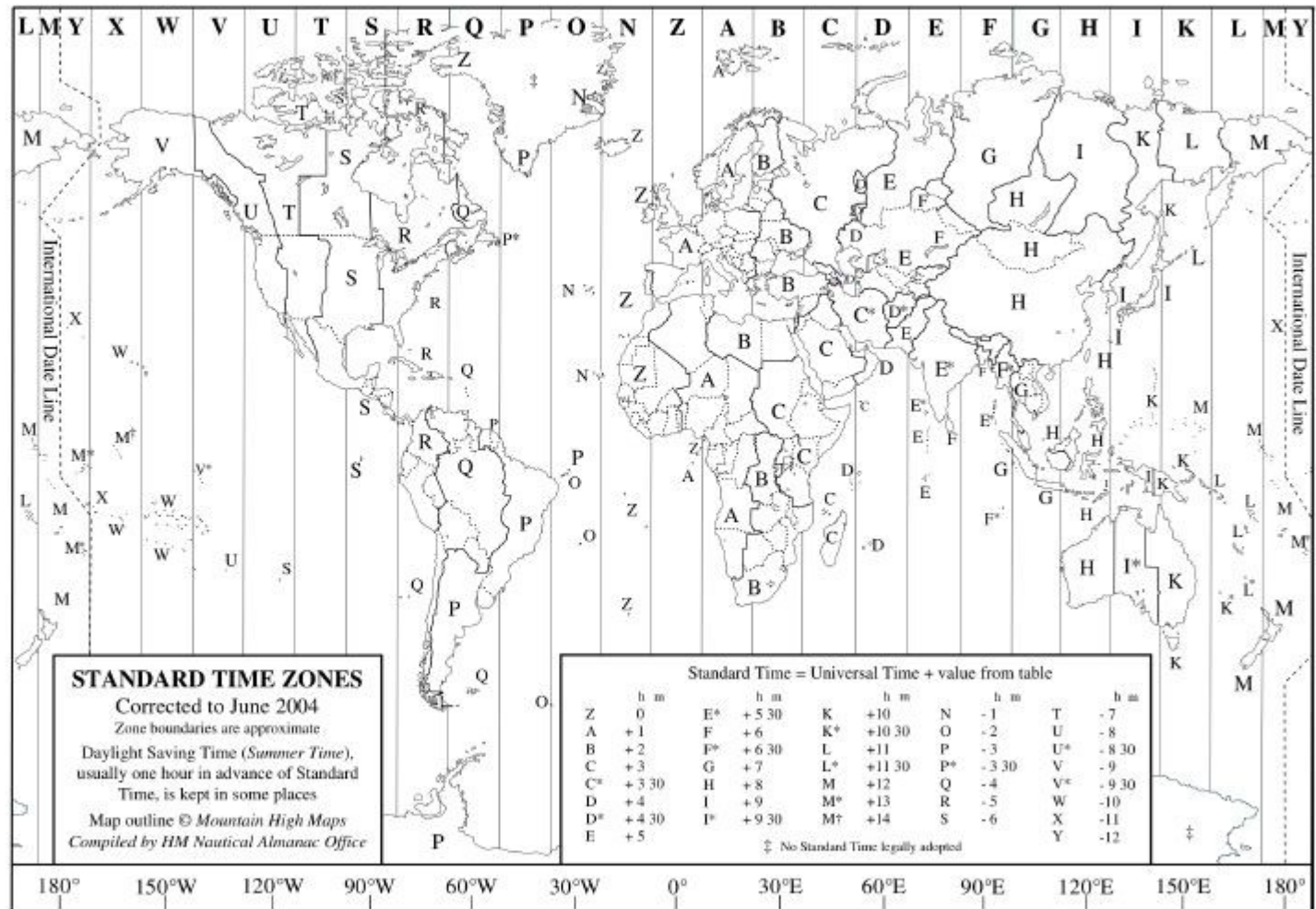
9. Ajustar a UTC

$$UT = T - \text{lngHour}$$

NOTA: Eventualmente UT necessita de ser ajustado ao intervalo [0,24] adicionando ou subtraindo 24

10. Converter para a hora local correspondente à latitude/longitude

$$\text{localT} = UT + \text{ajuste hora local}$$



WORLD MAP OF TIME ZONES

Anexo 9 Conjunto de variáveis e parâmetros relevantes usados em SimCitri

Quadro A9.1 Variáveis força.

Variável	Descrição
Temperatura	A temperatura é o factor que determina a velocidade de desenvolvimento dos insectos. Permite calcular a taxa de desenvolvimento. A temperatura é dada em °C.
Latitude, Longitude, Fuso horário	Estas variáveis são apenas importantes, caso se pretenda a actividade de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard. Com elas calcula-se o comprimento do período iluminado por cada 24 horas, dependendo da data e local
Fotoperíodo	O fotoperíodo condiciona a actividade conforme períodos iluminados ou períodos escuros
Tempo	O tempo obviamente determina o período de simulação. Pode ser atribuído em número de dias ou por datas
Capacidade sustentação do meio	Esta variável condiciona o crescimento das populações de <i>Planococcus citri</i> (Risso). Nesta variável inclui-se por opção a actividade de inimigos naturais

Quadro A.9.2 Variáveis auxiliares.

Variável	Descrição
Taxas de desenvolvimento	Estas variáveis são função da temperatura. Determinam o ritmo de desenvolvimento dos insectos
Contador de dias	O contador de dias é obtido a partir do número de dias de simulação ou por diferença de datas, valores introduzidos pelo utilizador

Quadro A9.3 Variáveis de estado.

Variável	Descrição
Número de indivíduos por célula de matriz de desenvolvimento	Número de indivíduos em cada sub-estádio de desenvolvimento
Estatísticas resumo do número de indivíduos+ indicadores ecológicos	Valores a apresentar em gráfico
Contador de desenvolvimento	Valor que varia entre 0 e 1, com o significado de avanço fisiológico

Quadro A9.4 Parâmetros.

Parâmetro	Descrição
Taxa intrínseca de crescimento	Esta taxa é utilizada em modelos de dispersão de <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard, autolimitação de populações de <i>Planococcus citri</i> (Risso)
Área de descoberta	Este parâmetro é utilizado na equação de parasitismo de Rogers (1972)
Capacidade sustentação meio	Determina o nível de autolimitação de populações de <i>Planococcus citri</i> (Risso).
Fecundidade <i>Leptomastix dactylopii</i> Howard	Por falta de dados suficientes, considerou-se a fecundidade constante e independente das variações de temperatura

Anexo 10 Código programação SimCitri em Visual Basic 6