

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

**Otimização do controle da *Diatraea saccharalis*
(Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) através do
parasitoide *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891)
(Hymenoptera: Braconidae) visando redução de custos.**

AUTOR – Rubens Gamaliel Bergamo de Souza

ORIENTADOR – Prof. Dr. Alexandre Colato

UFSCar - São Carlos

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

**Otimização do controle da *Diatraea saccharalis*
(Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) através do
parasitoide *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891)
(Hymenoptera: Braconidae) visando redução de custos.**

Rubens Gamaliel Bergamo de Souza

Tese submetida ao Departamento de
Física da Universidade Federal de
São Carlos - DF/UFSCar - como
parte dos requisitos para a obtenção
do título de Doutor em Física.

ORIENTAÇÃO:

Prof. Dr. Alexandre Colato

UFSCar - São Carlos

2018

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Cana-de-açúcar	1
1.1.1	Produção mundial	3
1.1.2	Produção nacional	7
1.2	Biocombustível	9
1.3	Broca-da-Cana	11
1.3.1	Prejuízos da broca-da-cana	12
1.3.2	Métodos de controle	13
1.4	<i>Cotesia flavipes</i>	15
2	Modelo Lotka-Volterra para a interação da <i>Diatraea saccharalis</i> e <i>Cotesia flavipes</i>	21
2.1	Modelo Lotka-Volterra	23
2.1.1	Pontos de equilíbrio	27
2.1.2	Período de oscilação em torno dos pontos de equilíbrio	29
2.1.3	Análise de estabilidade dos pontos de equilíbrio	31
2.2	Análise dos resultados do modelo Lotka-Volterra	34
3	Simulação computacional da dinâmica <i>Diatraea saccharalis</i> X <i>Cotesia flavipes</i>	45
3.1	Configuração do início da simulação utilizada	45
3.2	Descrição da interação entre parasitoide e hospedeiro na simulação	45
3.2.1	Parâmetros utilizados para a <i>Diatraea saccharalis</i>	46
3.2.2	Parâmetros utilizados para a <i>Cotesia flavipes</i>	47
3.3	Análise dos resultados	47
4	Otimização do custo	67
4.1	Avaliação do custo	67
4.1.1	Custo estimado através do modelo Lotka-Volterra	68
4.1.2	Custo estimado através da simulação multi-agentes	73
4.2	Inferência Bayesiana	75
4.3	Avaliação do métodos de levantamento de praga no campo	81
4.4	Comparação Bayes x Método tradicional	83
4.5	Eficácia do método tradicional em situação simulada	90
4.6	Otimização de Custo	93
4.6.1	Teste de robustez dos dados do campo usados na construção do prior	93

4.6.2	Avaliação da recomendação padrão comparado com o modelo utilizando EDO	94
4.6.3	Avaliação da recomendação padrão comparado com a simulação .	99
5	Conclusão	103

Lista de Figuras

1	Produção agrícola mundial. Dados Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT)	4
2	Produção de cana-de-açúcar no mundo desde 1994. Dados FAOSTAT	4
3	Produção de cana-de-açúcar no Mundo. Dados FAOSTAT	4
4	Dez Maiores produtores de cana-de-açúcar no Mundo. Dados FAOSTAT	5
5	Produção dos cinco maiores produtores de cana-de-açúcar no Mundo. Dados FAOSTAT	6
6	Valor da produção Brasil e Índia. Dados FAOSTAT	6
7	Preço da tonelada de cana no Brasil, Índia e EUA. Dados FAOSTAT	7
8	Produção de cana-de-açúcar no Brasil. Dados UNICA	8
9	Produção de cana-de-açúcar nos estados mais produtores, sem o estado de São Paulo. Dados UNICA	8
10	Produção de cana-de-açúcar nos 3 estados mais produtores na safra 2016/2017. Dados UNICA	9
11	Ciclo de vida da <i>D. saccharalis</i> . Fonte: RODERO (2016) [28]	12
12	Ciclo de vida da <i>C. flavipes</i> . Fonte: RODERO (2016) [28]	17
13	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> e da <i>Cotesia flavipes</i> de acordo com as equações (12) e (13)	27
14	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> e da <i>Cotesia flavipes</i> de acordo com as equações (12) e (13) próximo ao equilíbrio	31
15	Evolução temporal do tamanho das populações da <i>Cotesia flavipes</i> de acordo com as equações (12) e (13)	35
16	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> de acordo com as equações (12) e (13) com 1000 brocas inicialmente	36
17	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> de acordo com as equações (12) e (13) com 2500 brocas inicialmente	37
18	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> de acordo com as equações (12) e (13) com 5000 brocas inicialmente	37
19	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> e da <i>Cotesia flavipes</i> de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 1000 brocas e 6000 vespas	39
20	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> e da <i>Cotesia flavipes</i> de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 2500 brocas e 6000 vespas	39

21	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> e da <i>Cotesia flavipes</i> de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 5000 brocas e 6000 vespas	40
22	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> e da <i>Cotesia flavipes</i> de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 2500 brocas e 12000 vespas	41
23	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>Diatraea saccharalis</i> e da <i>Cotesia flavipes</i> de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 2500 brocas e 18000 vespas	41
24	Plano de fases da interação entre populações de <i>Diatraea saccharalis</i> e da <i>Cotesia flavipes</i> com condição inicial de 2500 brocas e 6000 vespas . . .	43
25	Plano de fases da interação entre populações de <i>Diatraea saccharalis</i> e da <i>Cotesia flavipes</i> com condição inicial de 2500 brocas e variação na quantidade inicial de vespas.	44
26	Descrição da simulação	46
27	Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas	48
28	Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas	49
29	Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas	50
30	Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas	50
31	Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas	51
32	Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas	52
33	Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas	53
34	Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas	53
35	Evolução temporal da simulação com interação da populações de praga e parasitoides com eficiência de parasitismo $E_C = 2$	54
36	Evolução temporal da simulação com interação da populações de praga e parasitoides com eficiência de parasitismo: canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$	55

37	Evolução temporal da simulação com interação com divisão das mortes dos indivíduos de <i>C. flavipes</i> , com $E_C = 2$	56
38	Evolução temporal da simulação com divisão das mortes dos indivíduos de <i>C. flavipes</i> : canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$	57
39	Evolução temporal da simulação com interação descrevendo a população de lagartas e parasitismo, com $E_C = 2$	58
40	Evolução temporal da simulação com interação descrevendo a população de lagartas e parasitismo: canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$	58
41	Evolução temporal da simulação com interação descrevendo as mortes da população de <i>D. saccharalis</i> , com $E_C = 2$	59
42	Evolução temporal da simulação com interação descrevendo as mortes da população de <i>D. saccharalis</i> : canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$	60
43	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da <i>D. saccharalis</i> , com $E_C = 2$	61
44	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da <i>D. saccharalis</i> : canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$	62
45	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da <i>D. saccharalis</i> , com $E_C = 2$, 1000 brocas e 6000 parasitoides	63
46	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da <i>D. saccharalis</i> , $E_C = 2$: canto superior esquerdo 2500 brocas e 6000 parasitoides; superior direito 5000 brocas e 6000 parasitoides; inferior esquerdo 2500 brocas e 12000 parasitoides; inferior direito 2500 brocas e 18000 parasitoides	64
47	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da <i>D. saccharalis</i> , com $E_C = 10$, 1000 brocas e 6000 parasitoides	65
48	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da <i>D. saccharalis</i> , $E_C = 10$: canto superior esquerdo 2500 brocas e 6000 parasitoides; superior direito 5000 brocas e 6000 parasitoides; inferior esquerdo 2500 brocas e 12000 parasitoides; inferior direito 2500 brocas e 18000 parasitoides	66

49	Varição do custo do controle variando o valor do dano econômico produzido pela broca, C_{broca} , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 200 dias com custo da vespa fixo, $C_{vespa} = 0,0027$ e $N_0 = 2500$	69
50	Varição do custo do controle variando o valor do dano econômico produzido pela broca, C_{broca} , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 550 dias com custo da vespa fixo, $C_{vespa} = 0,0027$ e $N_0 = 2500$	70
51	Varição do custo do controle variando o valor da vespa, C_{vespa} , em função dos parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 200 dias com dano econômico causado pela broca fixo, $C_{broca} = 0.002$ e $N_0 = 2500$	71
52	Varição do custo do controle variando o valor da vespa, C_{vespa} , em função dos parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 550 dias com dano econômico causado pela broca fixo, $C_{broca} = 0.002$ e $N_0 = 2500$	72
53	Resultado da simulação multi-agentes com variação do custo do controle alterando o valor do dano econômico produzido pela broca, C_{broca} , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 200 dias com custo da vespa fixo, $C_{vespa} = 0,0027$ e $N_0 = 2000$	74
54	Resultado da simulação multi-agentes com variação do custo do controle variando o valor da vespa, C_{vespa} , em função dos parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 200 dias com dano econômico causado pela broca fixo, $C_{broca} = 0.002$ e $N_0 = 2000$	75
55	Distribuição de Poisson para $n = 1$ observados numa área $A = 120m^2$	77
56	Distribuição de Poisson para alguns levantamentos obtidos do campo, canto superior esquerdo - $n = 7$, $A = 35m^2$, superior direito - $n = 96$, $A = 315m^2$, inferior esquerdo - $n = 16$, $A = 300m^2$, inferior direito - $n = 21$, $A = 135m^2$	78
57	Histograma dos dados mostrando a quantidade de brocas encontradas no campo no ano de 2011 em cada levantamento que não apresentavam presença de parasitoides, dados pela empresa SmartBio	79
58	Representação logarítmica dos dados mostrando a quantidade de brocas encontradas no campo no ano de 2011 em cada levantamento sem a presença de parasitoides, dados pela empresa SmartBio	79
59	Teorema de Bayes para $n = 1$ brocas observadas para uma área $A = 120m^2$	80

60	Teorema de Bayes para os levantamentos realizados no campo, canto superior esquerdo - $n = 7$, $A = 35m^2$, superior direito - $n = 96$, $A = 315m^2$, inferior esquerdo - $n = 16$, $A = 300m^2$, inferior direito - $n = 21$, $A = 135m^2$	81
61	Comparação dos métodos de levantamento com 50 amostras por levantamento - 1000 levantamentos realizados	85
62	Dados de levantamento com 50 amostras por levantamento - 1000 levantamentos realizados separados em quartis	85
63	Dados de levantamento com 50 amostras por levantamento com comparação entre o método aleatório, Bayes e Bayes sem histórico - 1000 levantamentos realizados separados em quartis	87
64	Comparação dos métodos de levantamento com 200 amostras por levantamento - 1000 levantamentos realizados	88
65	Dados de levantamento com 200 amostras por levantamento - 1000 levantamentos realizados separados em quartis	89
66	Evolução temporal da simulação utilizada para avaliação das amostragens comercial e acadêmica	91
67	Histograma de 200 amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 34 com 5 repetições a partir do início da dinâmica. . .	91
68	Histograma de 50 amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 34 com 5 repetições a partir do início da dinâmica. . .	92
69	Histograma comparativo entre 200, 50 canas amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 34 com 5 repetições a partir do início da dinâmica e dados reais obtidos do campo	93
70	Custo para alguns dos levantamentos realizados no campo para 200 dias com priors diferentes. Canto superior esquerdo - 500 primeiros levantamentos eliminados, superior direito - 300 últimos levantamentos eliminados, inferior esquerdo - 500 últimos levantamentos eliminados, inferior direito - levantamentos alternados eliminados	94
71	Custo estimado através do modelo com EDO para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 200 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$, $A = 120m^2$, $\rho = 0.0083$, superior direito - $n = 0$, $A = 14m^2$, $\rho = 0$, inferior esquerdo - $n = 0$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, inferior direito - $n = 7$, $A = 36m^2$, $\rho = 0,19$	96

72	Custo estimado através do modelo com EDO para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 550 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$, $A = 120m^2$, $\rho = 0.0083$, superior direito - $n = 0$, $A = 14m^2$, $\rho = 0$, inferior esquerdo - $n = 0$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, inferior direito - $n = 7$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, 19	97
73	Custo estimado através da simulação para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 50 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$, $A = 120m^2$, $\rho = 0.0083$, superior direito - $n = 0$, $A = 14m^2$, $\rho = 0$, inferior esquerdo - $n = 0$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, inferior direito - $n = 7$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, 19	100
74	Custo estimado através da simulação para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 200 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$, $A = 120m^2$, $\rho = 0.0083$, superior direito - $n = 0$, $A = 14m^2$, $\rho = 0$, inferior esquerdo - $n = 0$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, inferior direito - $n = 7$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, 19	101

Agradecimientos

Resumo

Abstract

1 Introdução

1.1 Cana-de-açúcar

A Cana-de-açúcar é uma monocotiledónea, pertencente à família Poaceae, mesma família do milho, trigo e arroz e do gênero *Saccharum*. A nomenclatura original proposta por Linnaeus deste gênero foi revisada e hoje seis espécies compõem o mesmo: *Saccharum spontaneum*, *Saccharum robustum*, *Saccharum officinarum*, *Saccharum sinense*, *Saccharum edule* e *Saccharum barberi*. As duas primeiras espécies são consideradas selvagens (*Saccharum spontaneum*, *Saccharum robustum*) enquanto as demais são consideradas espécies domesticadas. Entretanto, os clones atualmente cultivados são híbridos obtidos no início do século 20 entre *Saccharum spontaneum* e *Saccharum officinarum*[1].

A cana-de-açúcar é produto agrícola utilizado pelo ser humano desde a antiguidade, sendo os primeiros registros datados entre 3000 à 3400 anos atrás na região da Ásia [2]. Durante o século XVI, através das explorações espanholas e portuguesas, ela foi introduzida na América Latina e, particularmente no Brasil, a produção de açúcar derivado da cana foi por muito tempo uma atividade econômica de grande relevância. No entanto, a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) em 1920 para auxiliar a regulamentar a produção da cana pelo governo, entra como um marco da importância que o álcool vinha tomando. Em 1925, Henry Ford dá sua contribuição para a cultura da cana, construindo seu primeiro automóvel movido à etanol. É então em 1930 que a produção de bioetanol ganha proporção industrial, quando o estado brasileiro implementa política instituindo o etanol como combustível para automóveis [3]. A cana ganhou nova importância quando o governo federal brasileiro instituiu o programa Pró-álcool em 1975 devido à crise do petróleo que ocorria nesta década. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de álcool e de açúcar da cana, sendo responsável por mais de 50% do açúcar comercializado no mundo, de acordo com o relatório da safra 2014/2015 da Conab (Companhia Nacional de Abastecimento). Dentre os estados brasileiros, São Paulo se destaca na plantação da cana, detendo mais de 50% das áreas cultivadas no país. Esta safra produziu cerca de 634 milhões de toneladas, mesmo com uma queda de 2.6% em relação à safra anterior, devido à falta de chuvas pelo território nacional. A produção de etanol total (anidro e hidratado) chegou à 28.146 bilhões de litros. Já a produção de açúcar deve atingir 31.987 milhões de toneladas, sendo que mais de 70% dele foi originado da região sudeste [4]. É interessante notar que a cana pode chegar a ter uma produção diária de biomassa de cerca de 550 kg/ha [3].

Além da grande produção de álcool e açúcar, a cana-de-açúcar ainda gera um segundo efeito importante, que consiste na redução de gases geradores do efeito estufa liberados na atmosfera. Análises da contribuição da cana brasileira no balanço dos gases estufa tem

a muito tempo sido feitas. Macedo (1998) faz uma análise da safra 96/97, onde a produção brasileira de cana estava na ordem de $273 \cdot 10^6 t$ de cana onde foram produzidos cerca de $13.7 \cdot 10^6 m^3$ de etanol, sendo 31% anidrido, direcionado a mistura na gasolina, e o restante vendido na forma hidratada. Nesta mesma safra também foram produzidas cerca de $13.4 \cdot 10^6 t$ de açúcar. Neste estudo, o aumento da produtividade da cana, comparado com os 10 anos anteriores, é destacado como um ponto positivo, sendo a média nacional de $80.4 t/ha$ um pouco maior que a anterior de $78 t/ha$, ambas considerando canas com possibilidade de 5 cortes. É também destacada como forma de redução das emissões a evolução das tecnologias de transporte, porém tendo um aumento no consumo de combustíveis fósseis devido a utilização de colheita mecanizada, sendo na época de cerca de 20%. O avanço das tecnologias de recuperação de etanol também são destacadas, tendo gerado um crescimento de 73 l etanol/t sido elevado para 85.4 l etanol/t no período comparado. A produção de etanol gera, através da substituição da gasolina pelo etanol, uma redução de cerca de $9.13 \cdot 10^6 t/ano$ de CO_2 . Um outro ponto destacado foi a utilização do bagaço para a cogeração de energia elétrica nas usinas, fazendo estas ficarem sustentáveis e independentes das redes de geração tradicional. No entanto, a queima do canavial antes da colheita entra neste estudo como ponto negativo, porém seu impacto é estimado como contribuindo com cerca de 6.5 kg metano/ha. Ao final das análises, o balanço de CO_2 é estimado como tendo evitado a emissão de $46.7 \cdot 10^6 t/ano$, o que na época representava 20% das emissões deste gás através de combustíveis fósseis no país [5].

Um ponto importante a ser notado é a transição da colheita manual de cana queimada para a colheita mecânica. No processo de queima, cerca de 30.3% dos gases emitidos pela cultura da cana eram devido à queima, em estimativas realizadas em 2012, seguido por 29.6% resultantes de aplicações de fertilizantes [6]. Já na colheita manual são estimados que os maiores contribuintes para os gases estufa na cultura da cana são o uso de fertilizantes sintéticos e diesel, com cerca de 42 e 33% de participação respectivamente. Além da não liberação dos gases prejudiciais ao ambiente através da queima, evitar este processo ainda permite retorno de material orgânico para o solo, o que também melhora a qualidade deste. No processo de colheita mecanizada sem queima é estimado um sequestro pelo solo de cerca de 1173 kg de CO_2/ha anualmente[6]. O manejo adequado dos fertilizantes, redução das áreas queimadas para facilitar a colheita, combustíveis fósseis usados para o transporte entre distâncias pequenas são alguns aspectos que colocam o cenário brasileiro de emissões de gases estufa como sendo melhor do que países que também produzem cana [7].

Tomando os preços correntes pode-se estimar que a indústria do etanol e açúcar movimentarão na próxima safra mais de 120 bilhões de reais. Contudo, devido às condições climáticas favoráveis do país, algumas pragas podem se instalar nas plantações e prejudi-

car seu rendimento, como é o caso da *Diatraea saccharalis* onde 1% de infestação, pode representar uma perda de 0.49% na produção de açúcar e 0.28% na produção de álcool.

Apesar da indústria da cana-de-açúcar ser uma atividade que movimenta muitos recursos no Brasil, dentre os trabalhos aplicados ao controle de suas pragas, poucos apresentam parâmetros que tenham sido testados em condição de campo, descrevendo satisfatoriamente a dinâmica da interação. O modelo de Ambrosano et al.[8] é um dos poucos em que o valor de cada parâmetro utilizado é obtido em condição de laboratório e campo para a interação entre a broca e *cotesia flavipes*, um de seus predadores naturais. Em outras regiões do mundo, pragas diferentes da cana-de-açúcar são mais destrutivas e, para a África do Sul foi possível encontrar modelos matemáticos validados com dados obtidos nas propriedades [9] da região. É possível encontrar outros modelos matemáticos que têm como motivação o controle de pragas, mas que não são validados com dados de campo e sim através, de simulação [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Existe, no entanto, uma enorme quantidade de estudos empíricos testando a eficácia do controle biológico nas suas mais diversas formas. Podem ser aqui citados como exemplos métodos de controle integrando mais de um predador [16], utilização de fungos [17], eficiência da razão sexual de liberação da cotesia [18], combinação do parasita e bactérias [19], entre tantos outros.

1.1.1 Produção mundial

A cana-de-açúcar é um produto agrícola muito importante economicamente. Sua produção é gigantesca, como pode ser visto na figura 1, estando apenas atrás da produção de cereais. Nos últimos 20 anos a produção de cana quase que dobrou, onde podemos observar na figura 2 que a área plantada tem praticamente acompanhado esta ampliação. No entanto, a partir do ano 2005 podemos ver que o crescimento da produção mundial teve um aumento maior do que a área plantada, o que retrata uma melhora nas técnicas usadas nesta cultura, o que têm-se mantido desde então. A produção mundial da cana-de-açúcar está espalhada por quase todos os continentes, com exceção do europeu, onde a cana não encontra um clima favorável ao seu crescimento e a contribuição para a produção é praticamente nula. A Oceania entra também como uma produção bem pequena, sendo que neste continente a Austrália se destaca como o maior produtor, tendo ao longo dos anos tendo até sido um dos 5 maiores produtores mundiais. No entanto, a maior parte da produção é encontrada nos continentes Asiático e Americano, como podemos observar na figura 3.

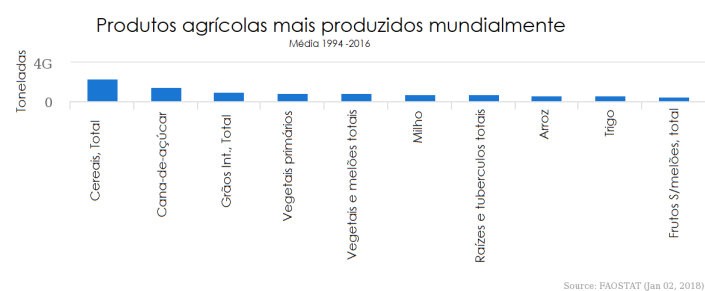


Figura 1: Produção agrícola mundial. Dados Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT)

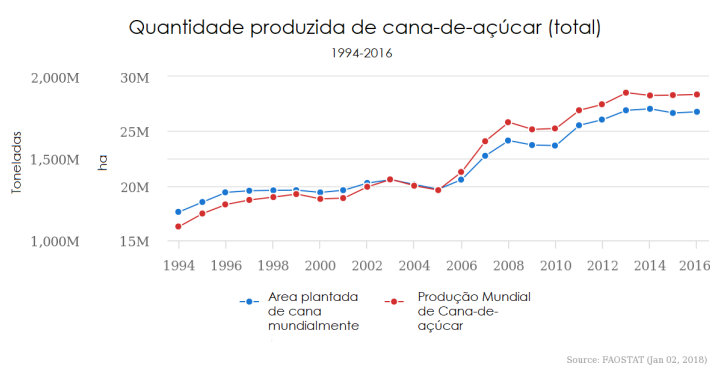


Figura 2: Produção de cana-de-açúcar no mundo desde 1994. Dados FAOSTAT

Production share of Sugar cane by region
Average 2015 - 2016

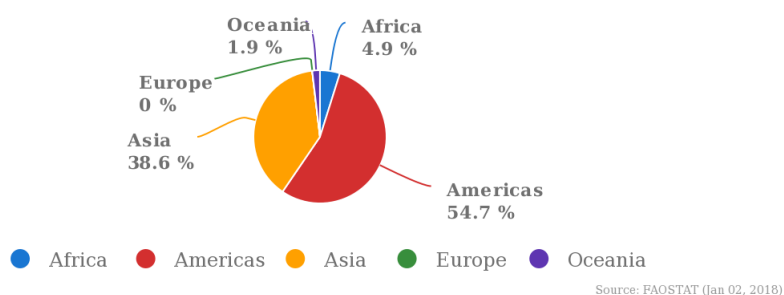


Figura 3: Produção de cana-de-açúcar no Mundo. Dados FAOSTAT

Entre os países os que mais se destacam, podemos observar na figura 4 que o Brasil é de longe o maior produtor. Os maiores produtores seguintes, Índia e China, mesmo combinados não possuem a mesma produção que a brasileira. Os outros grandes produtores do continente americano são México, Colômbia, Guatemala e EUA, no entanto com uma participação muito pequena quando combinados ao comparar-se com a produção brasileira. No entanto este fenômeno não foi sempre assim. Como podemos ver na figura 5,

no início do milênio a produção brasileira e indiana eram quase equivalentes, no entanto a partir do ano 2005 o crescimento na produção nacional, que já acontecia de forma contínua, aumentou grandemente. Este crescimento gerou um impacto na produção mundial notável, como pode ser visto na figura 2 a partir deste ano. Comparada à produção brasileira, o que podemos observar é que o crescimento na produção dos outros países tem sido relativamente baixo ao longo do tempo, com exceção da Índia que em 2005 também começou a aumentar sua produção comparavelmente ao Brasil, o que não foi mantido a partir de 2007. O aumento na produção da cana foi acompanhado também pelo retorno financeiro gerado pela venda desta, o que pode ser visto na figura 6. Podemos perceber que um aumento na produção nem sempre vem seguido de um retorno financeiro proporcional, como o que ocorre entre os anos 2011-2013 na Índia, onde aumento na produção ocorreu seguido por uma baixa no último ano, porém o valor arrecadado vai diminuindo no período. No entanto, ao observarmos a figura 7 vê-se que o preço da tonelada da cana produzida nos EUA é consideravelmente maior que o obtido pela cana brasileira e indiana.

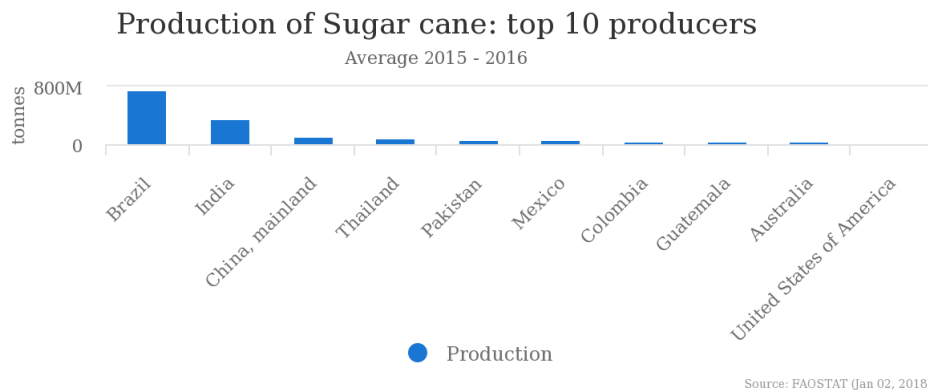


Figura 4: Dez Maiores produtores de cana-de-açúcar no Mundo. Dados FAOSTAT

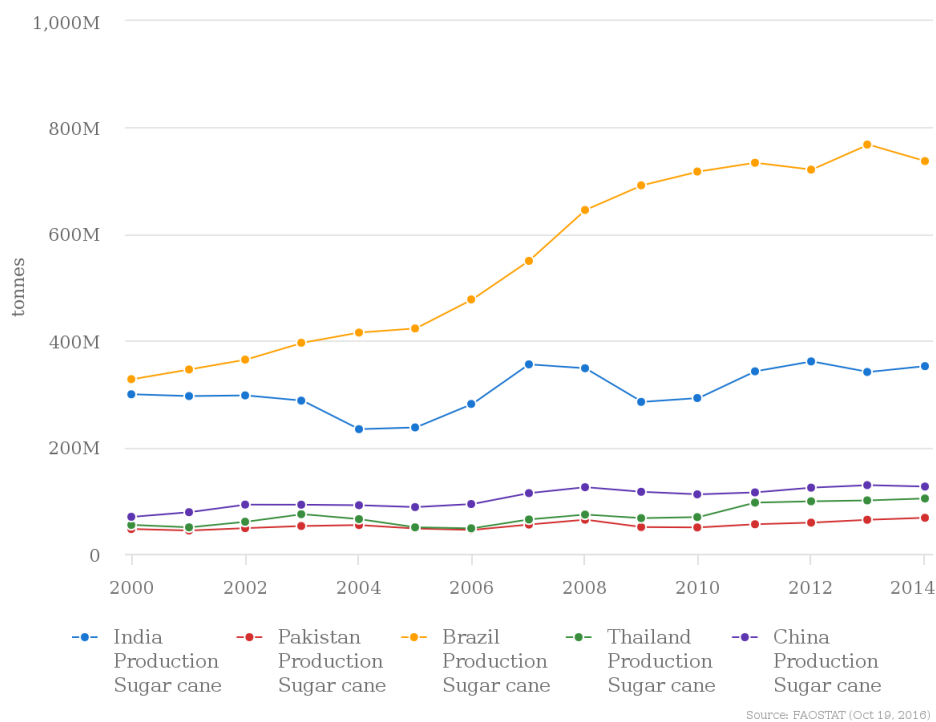


Figura 5: Produção dos cinco maiores produtores de cana-de-açúcar no Mundo. Dados FAOSTAT

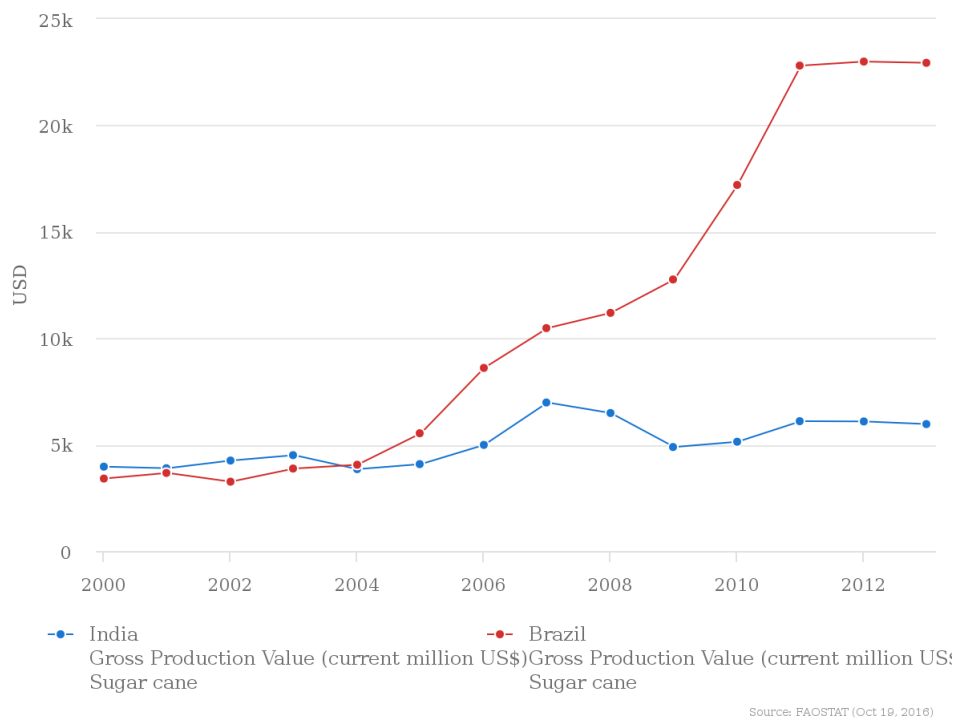


Figura 6: Valor da produção Brasil e Índia. Dados FAOSTAT

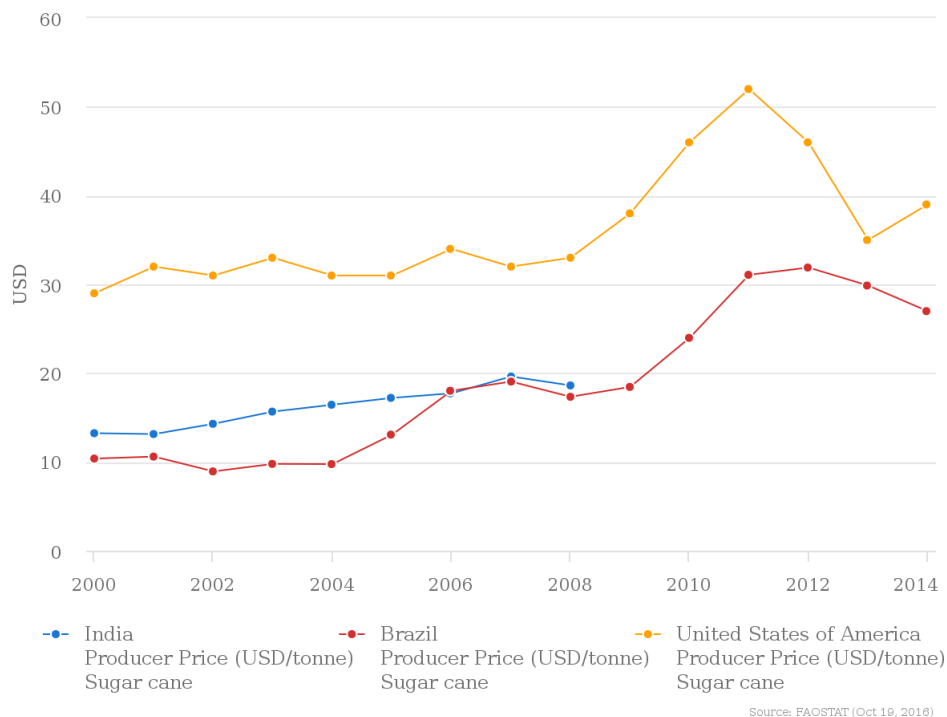


Figura 7: Preço da tonelada de cana no Brasil, Índia e EUA. Dados FAOSTAT

1.1.2 Produção nacional

Dentro do Brasil a produção de cana-de-açúcar está principalmente concentrada na região Sudeste, onde o estado de São Paulo se destaca. Uma das principais entidades que registram a produção nacional é a UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar), sendo possível encontrar dados relacionados à produção desde 1981 até os dias de hoje entre outros parâmetros.

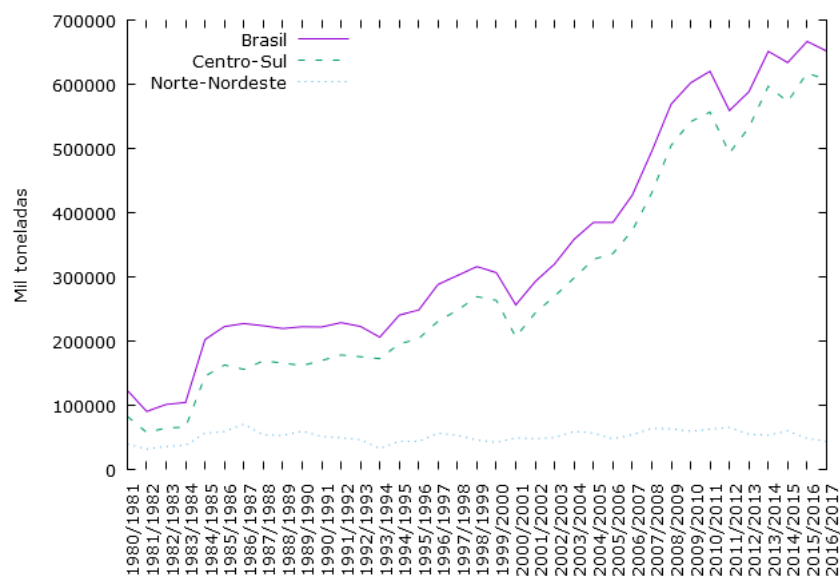


Figura 8: Produção de cana-de-açúcar no Brasil. Dados UNICA

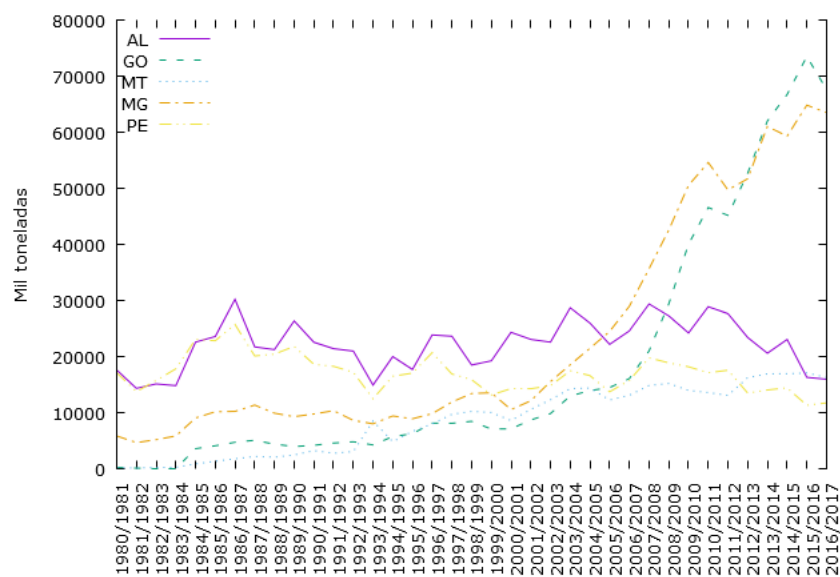


Figura 9: Produção de cana-de-açúcar nos estados mais produtores, sem o estado de São Paulo. Dados UNICA

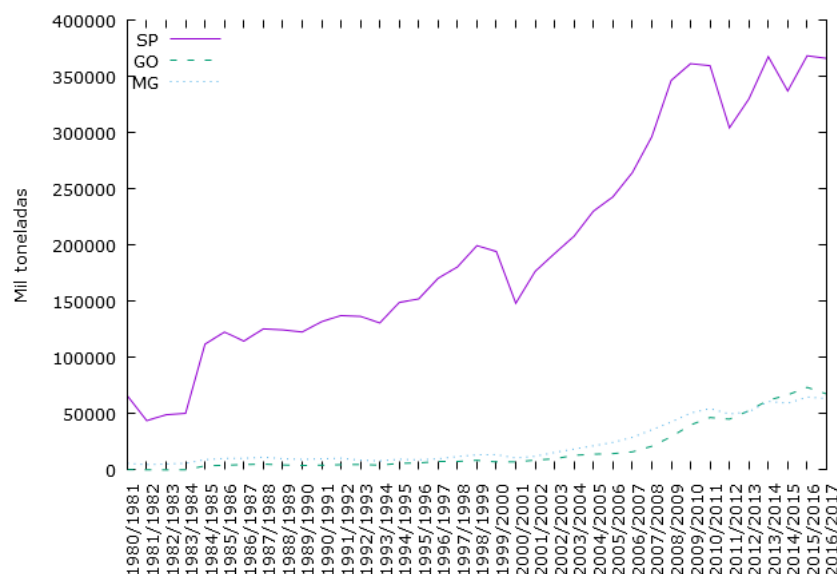


Figura 10: Produção de cana-de-açúcar nos 3 estados mais produtores na safra 2016/2017. Dados UNICA

A produção nacional de cana em 1981 foi de cerca de 124 milhões toneladas, sendo 83 milhões toneladas produzidas na região centro-sul e 40 milhões ton na região norte/nordeste. Entre os estados produtores, São Paulo se destacava como o maior produtor, sendo responsável por 66 mil ton **de cana seguido dos estados** Alagoas com 18 milhões ton e Pernambuco com 17 milhões ton. É interessante notar que estes estados do nordeste na safra 2016/2017 tinham uma produção de 16 milhões ton e 12 milhões ton respectivamente enquanto São Paulo apresentou uma produção de 366 milhões ton. Este grande crescimento em produção também se repetiu em vários estados da região centro-sul, onde Goiás apresenta uma produção de 68 milhões ton e Minas Gerais 64 milhões ton, o que lhes confere a segunda e terceira posição em produção nacional de cana. Curiosamente, em 1981 Goiás estava entre os estados menos produtores, com cerca de 300 mil ton enquanto Minas Gerais era o 5 maior produtor, com uma produção de 6 milhões ton. É interessante notar também que foi estimado em cerca de 3,56 milhões os trabalhadores empregados direta ou indiretamente no cultivo e produção da cana na safra de 2013/2014, sendo assim um importante mercado empregador da população brasileira [20].

1.2 Biocombustível

O bioetanol é uma fonte de energia renovável e pode ser obtido através de vários cultivos agrícolas ao se realizar a fermentação dos açúcares presentes. As principais fontes de bioetanol são a cana-de-açúcar, sorgo, beterraba e milho. O Brasil entra nesse contexto

como o principal produtor de etanol **provinho de** cana. O modelo de produção brasileiro apresenta preço de produção aceitável economicamente e baixa emissão de gases que contribuem para o efeito estufa. Este modelo é beneficiado graças principalmente ao clima brasileiro, que favorece o crescimento dessa cultura agrícola [21].

A história do etanol combustível no Brasil está intrinsecamente ligada ao conflito entre Israel-Palestina em outubro de 1973, conhecido como guerra do Yom Kippur. Neste conflito, Egito e Síria cruzaram a linha de cessar-fogo no Sinai nas colinas de Golã durante o feriado judaico de Yom Kippur. Como era de se esperar, as duas superpotências da época, EUA e URSS defenderam seus aliados, Israel e países árabes respectivamente. Isto fez com que a OPAEP (Organização dos Países Árabes Exportadores de Petróleo) impusesse um embargo aos EUA e seus aliados, fazendo o preço do barril quadruplicar nessa década, dando origem à crise do petróleo de 1973 [22]. Com o embargo, o Brasil, que não era um produtor de petróleo significativo no cenário mundial, teve graves problemas devido à sua dependência de importação de combustíveis fósseis. Nesta época as importações de petróleo no país eram realizadas com dinheiro emprestado, o que levou a uma crise econômica nacional no início dos anos 80 [23]. É nesse cenário que em 14 de Novembro de 1975 entra em vigor o Decreto 76.593 que institui o Programa Nacional do Alcool (proálcool). Entre as principais medidas presentes neste decreto é importante ressaltar o estímulo à produção de matéria prima, modernização das indústrias de etanol, subsídios para compra e adição de etanol à gasolina [24]. Nesse cenário surgem os primeiros carros completamente movidos a álcool vendidos comercialmente, o que ocorre em 1978 [3]. Porém é em 2003 que surgem os carros flex, que podem então ser movidos tanto a álcool quanto a gasolina em qualquer proporção. Este fato contribui então para o aumento na produção da cana brasileira apresentado na figura 5.

Além da cana-de-açúcar, outras culturas agrícolas podem também gerar etanol, porém entre as opções disponíveis, a cana é o mais interessante para regiões tropicais, gerando etanol com custo de cerca de 3 vezes menor que a cultura de beterraba e 2 vezes menor que o etanol de sorgo [3]. Entre as características desejáveis numa planta destinada à produção de etanol, crescimento rápido com o menor ciclo até a colheita possível e quantidade grande de biomassa utilizável são destacadas. Nos tempos atuais, **plantas que façam a balança de carbono fique positiva, ao considerar o que é inserido e o que é retirado do ambiente, se apresentam como almejavél.** O Brasil, possuindo uma indústria para a cana-de-açúcar muito desenvolvida, tem o bioetanol produzido da forma mais eficiente atualmente. Entre os anos de 1980 e 1998 a produtividade da cana subiu de 73 para 90 t/ha anualmente ao mesmo tempo que a eficiência de extração dos açúcares da cana subiu de 90 para 96% e a fermentação de 84 para cerca de 91%[3]. No entanto existe ainda muito potencial para crescimento da eficiência na produção de etanol, principalmente ao

se levar em consideração que apenas 1/3 da fermentação vem dos açúcares solúveis, enquanto 2/3 são mantidos nas biomassas do bagaço e folhas da cana, um processo que gera combustível conhecido como etanol de segunda geração. Contudo, melhorias nos aspectos biológicos da cana já mostram resultados muito importantes, tendo aumentado a produtividade do bioetanol em cerca de 100% entre os anos de 1980 e 2005. Entre elas se destacam as canas mais resistentes a pragas e doenças, bem como maior produtividade devido a tolerância à secas, uniformidade das plantas e velocidade de crescimento [3].

Utilizando o etanol como matéria prima, o Brasil ainda apresenta o bioplástico, material 100% reciclável. Na safra 2013/2014 este material movimentou cerca de US\$ 300 milhões, sendo estimada a produção em cerca de 120 mil toneladas com preço médio de US\$ 2,50 por quilo. Do total de vendas, 30% ficaram no mercado brasileiro enquanto 70% foi destinada ao mercado externo [20].

1.3 Broca-da-Cana

De acordo com Shoemaker [25], pragas são grupos de seres que estão em competição direta com o ser humano. A cana-de-açúcar, como a maioria das grandes culturas agrícolas, apresentam várias pragas, sendo que no caso da cana, podemos elencar a broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*), como a mais importante no Brasil, pois é capaz de causar danos diretos e indiretos à cana. Outras pragas são também encontradas, mas consideradas pragas secundárias, por causarem menos danos que a broca.

A *D. saccharalis* é um inseto de desenvolvimento holometabólico, ou seja, passa pelas fases de ovo, larva, pupa e adulto. O ciclo de vida da *D. saccharalis* pode ser visto na figura 11. O adulto da broca é uma mariposa com capacidade de gerar, a cada postura, entre 5 e 50 ovos, preferencialmente na parte dorsal das folhas da cana. Após 4 a 9 dias as lagartas recém-nascidas eclodem dos ovos, alimentando-se inicialmente das folhas. A seguir, a lagarta se desloca para as regiões mais baixas na cana em busca de abrigo. Nesta região a broca se alimenta da raspagem das folhas ou casca do entrenó em formação durante a primeira ou até segunda semana nesta fase. Posteriormente, após a primeira ou segunda troca de pele (ecdise), penetram pela parte mais mole do colmo da cana, formando galerias internas de baixo para cima. Durante a fase larval, que dura cerca de 40 dias após a eclosão dos ovos, pode chegar a atingir de 22 à 25 mm de comprimento. Esta fase pode apresentar até 6 ecdises, sendo a fase mais longa do ciclo de vida da broca, muito influenciada pela temperatura ambiente que pode abreviar um pouco em épocas com clima favorável ou alongá-la caso a broca seja sujeita à intempéries. A fase seguinte, de crisálida, dura entre 9 e 14 dias, após os quais emerge a mariposa adulta que vive em torno de 5 dias. Esta fase começa com a lagarta abrindo um orifício na casca e conseguindo

oclusão do mesmo através de fios de seda e restos de alimentações realizadas, formando então o casulo. Durante a vida adulta acontece o acasalamento e postura de ovos das fêmeas. O ciclo de vida completo se dá, em média, entre 53 e 60 dias, podendo ter 4 gerações anuais e, a depender das condições, chegando a ter 5 gerações. Entretanto, na última geração, na época das secas que se dá entre maio e agosto, a lagarta pode ficar viva dentro do colmo por 5 ou 6 meses [26]. As variações na velocidade nos ciclos de vida dos indivíduos funciona então como um mecanismo de autodefesa, defendendo a população de situações adversas que podem acometer alguma das fases, como parasitoides que atuam nas fases de ovos, *Trichogramma galloi*, ou a *Cotesia flavipes*, que atua somente na fase de lagarta, por exemplo [27].



Figura 11: Ciclo de vida da *D. saccharalis*. Fonte: RODERO (2016) [28]

1.3.1 Prejuízos da broca-da-cana

Os prejuízos da broca são contabilizados através do cálculo do Índice de Infestação (II), obtido através de processo de amostragem no campo onde são contabilizados os entrenós da cana brocados, dividindo esta quantidade pelo número total de entrenós encontrados.

A broca-da-cana pode provocar danos diretos bem como possibilitar danos indiretos. Os danos diretos ocorrem na fase de lagarta, que ao abrirem galerias nos colmos causam perda de peso da cana e podem levar à morte das gemas, ocasionando falhas na germinação. Caso a lagarta faça galerias transversais, o vento pode levar a cana a se quebrar e tombar. Nas plantas novas as lagartas podem ainda produzir o secamento dos ponteiros, gerando a morte da gema, também conhecido por coração morto. Os danos indiretos que

a broca produz são causados por fungos que se aproveitam das galerias abertas para penetrar na planta. Isto gera a podridão vermelha do colmo, que pode abranger toda a região das diversas galerias. Microrganismos que se aproveitam das galerias podem ainda concorrer com as leveduras responsáveis pela fermentação, destinadas à produção de álcool e diminuir sua qualidade [26].

1.3.2 Métodos de controle

Plant e Mangel [29] relatam que existem 3 formas de controle de pragas disponíveis para o agricultor: controle químico, biológico e cultural. Entre os métodos químico e biológico, o Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento, através do sistema de agrotóxicos fitossanitários (AGROFIT) revela que existem 49 produtos cadastrados para o controle da *D. saccharalis* na cana-de-açúcar [30], sendo destes 32 pesticidas químicos e 17 biológicos (11 *C. flavipes*, 3 *T. galloi*, 3 *Bacillus thuringiensis*).

A forma mais comum de controle de pragas é o uso de pesticidas de amplo alcance com pouca especificidade [25]. Este método é barato e de fácil acesso, mas prejudica em grande escala o meio ambiente, destruindo predadores naturais da praga, contaminando o solo e fontes de água e muitas vezes envenenando até os próprios responsáveis pela aplicação de forma direta, entre tantos outros prejuízos. Inseticidas específicos podem também ser utilizados, entretanto são mais caros, e no seu desenvolvimento exigem mais tempo para pesquisas e produção. Estas características diminuem muito o interesse dos agricultores em utilizá-los, e acabam majoritariamente optando pelo método mais barato disponível. Os pesticidas gerais, como vários produtos industriais, apresentam alguns produtos mais populares, mas utilizar poucas variedades de pesticidas com alta frequência leva ao desenvolvimento de linhagens resistentes de pragas, o que pode anular o efeito de controle. Além disso, muitas pragas consideradas secundárias, com a morte de seus predadores pelo uso destes produtos químicos, tornam-se importantes, trazendo grandes prejuízos às plantações. No ano de 2017, o setor de agroquímicos gerou um balanço de 9.6 bilhões de dólares no Brasil, o que significou uma redução de 21.56% comparado com 2014. Em geral a queda é atribuída a desvalorização do real frente ao dólar, contrabando de pesticidas, dificuldade de obtenção de linhas de crédito rural. As culturas que mais utilizam os produtos químicos no Brasil são soja, cana, milho e algodão respectivamente. Dentre estes, a soja é responsável por 52% da movimentação dos produtos químicos e a cana por 10%. Já os estados que mais fazem uso dos produtos químicos são o Mato Grosso, com 23% do mercado, seguido por São Paulo com 13%. Entre os defensivos químicos na cultura da cana na safra 2013/2014, o que movimentou cerca de US\$ 1,24 bilhão, 65% do faturamento dos produtos comercializados foi através de herbicidas, seguido por 30% de inseticidas, 1% de fungicidas e 4% de outros produtos [20]. Para

controle químico na broca-da-cana os pesticidas mais utilizados no Brasil pertencem aos seguintes grupos químicos: antralinamida, benzoiluréia, diacilhidrazina, metilcarbamato de benzofuralina, neonicotinóides, pirazol e piretróide [30]. No entanto, o uso dos inseticidas nas grandes áreas de plantações de cana trazem prejuízos tanto à insetos benéficos [32], quanto a saúde humana [33, 34].

Além dos pesticidas, o controle biológico, definido como o conjunto de técnicas que utilizam outros organismos para controlar uma praga [25], também é encontrado no Brasil, especialmente nas culturas de cana-de-açúcar. Este controle pode ser feito usando predadores, parasitas, liberação de indivíduos estéreis, feromônios, entre outros agentes biológicos. O uso de populações de predadores para controle de pragas é amplamente estudado e considerado um meio eficaz. Uma grande vantagem do uso de predadores é que estes reagem com o tamanho da população da praga, aumentando sua resposta automaticamente com o aumento da quantidade de presas. Outra grande vantagem está na possibilidade de encontrar estados de equilíbrio entre a praga e a população de predadores para que os danos causados sejam mínimos e sem a necessidade de reaplicação de novos predadores. Entre os predadores que podem ser usados na cana formigas *Solenopsis spp* foram testadas no controle da *D. saccharalis*. Seu uso se mostrou economicamente viável, mas devido ao baixo índice de infestação da broca nos lugares testados, as formigas não se mostraram capazes de reduzir a praga comparando com o grupo controle [35]. Já a técnica da liberação de indivíduos estéreis consiste em inundar o ambiente com uma proporção grande de indivíduos que não podem se reproduzir, normalmente 10 vezes maior que a de indivíduos férteis, que entrarão em competição intraespecífica pelos recursos naturais disponíveis [9, 36, 37]. Essa técnica é, particularmente, efetiva para o controle de populações onde as fêmeas copulam uma única vez na vida, já que a chance de encontrar um macho infértil para a cópula é maior do que encontrar um fértil. É importante notar que o controle total da praga não se dá rapidamente com essa técnica, sendo necessárias muitas vezes novas aplicações de indivíduos estéreis até que a praga seja erradicada. Ela foi responsável pela erradicação de várias pragas, incluindo a *Cochliomyia hominivorax* dos EUA, México, América Central e Líbia [40]. Entre os parasitoides, um com grande destaque é o *Trichogramma galloi*, que é uma pequena vespa que ocorre naturalmente no Brasil e parasita os ovos da *D. saccharalis* [41]. Esta vespa é especialmente eficaz em áreas com baixa predação de ovos da broca, podendo então ser associada com parasitoides de lagartas para uma maior eficácia. Em 1999 foi testada a associação do *T. galloi* com a *Cotesia flavipes*, sendo realizadas liberações múltiplas de *T. galloi*, cada uma com 200 mil indivíduos associados a 6 mil indivíduos de *C. flavipes*. Essa associação conseguiu ser cerca de 60% mais efetiva que o grupo não tratado e 3,7 vezes mais eficiente que o tratamento convencional [16]. No entanto, em 2009 os custos por hectare do controle químico,

com *T. galloi* e com *C. flavipes* eram de R\$ 45,00; R\$ 36,00; R\$ 15,00 respectivamente [42]. Existe também uma grande dificuldade de utilização do *T. galloi* por conta reduzido número de laboratórios produtores, que para a *C. flavipes* é de 11 empresas, comparada com 3 laboratórios registrados para produção do *T. galloi* [30]. A indústria do controle biológico destinada às pragas da cana movimentou na safra 2013/2014 cerca de US\$ 26,67 milhões, sendo o uso da *C. flavipes* responsável por cerca de 27% do faturamento, o fungo *Metarbizium anisopliae* 67% e os outros produtos biológicos usados na cana com os 10% restantes [20].

Por fim, os métodos de controle cultural se utilizam das características da plantação para combater pragas. Esse controle pode se dar através da rotação de plantações, onde alterna-se o cultivo de culturas com pragas em potencial diferentes, tendo como objetivo evitar que alguma praga consiga se instalar no ambiente permanentemente. Outro método de controle cultural é feito ao se escolher a época da colheita, tendo em vista que as pragas podem ter uma época do ano que são mais destrutivas. Dessa forma, o agricultor evita que a praga tenha acesso à plantação durante o período em que causa mais danos. É possível também considerar a destruição direta das pragas, como no caso do extermínio de insetos por meios físicos. Na cana os métodos de controle cultural se constituem da escolha da época de plantio e colheita, bem como escolha de variedades resistentes a pragas e a rotação com culturas menos susceptíveis as pragas da cana, tais como hortaliças, amendoim e outras leguminosas [43, 44]. Outros métodos menos utilizados incluem a inundação dos campos por 48h bem como a queima dos resíduos, ambos após a colheita [45]. No Brasil, a queima da cana vem sendo substituída pela colheita mecanizada, sendo que no Estado de São Paulo existe legislação sobre a substituição gradual da queima pela colheita mecanizada, apresentando por limite o ano de 2031 [46]. No entanto, de forma voluntária, os produtores se propuseram a realizar esta transição já em 2017, recebendo assim o certificado emitido pelo estado de “etanol verde” [47].

1.4 *Cotesia flavipes*

Para o caso específico da cana-de-açúcar e sua praga mais relevante, os métodos de controle mais utilizados são os de controle biológico, dentre os quais, o uso do parasitoide de lagartas da vespa *Cotesia flavipes*, originário da Ásia, é o mais encontrado no Brasil [48, 49].

A *Cotesia flavipes* é um endoparasitoide larval gregário, o que significa que as fêmeas depositam múltiplos ovos dentro das larvas hospedeiras, os quais se desenvolvem dentro das mesmas. É um inseto que apresenta desenvolvimento holometabólico, passando então pelas fases de ovo, larva, pupa e adulto, com ciclo de vida em torno de 20 dias,

dependendo da temperatura e idade do hospedeiro, que pode ser observado na figura 12. Os machos são gerados por partenogênese, sendo um inseto haplóide, já que nascem de ovos não fertilizados. As fêmeas por sua vez, são geradas de ovos fertilizados, onde a cópula é bastante influenciada pela presença de luz forte. Após ocorrer a oviposição, em até 4 dias a larva eclodirá e a partir de então, num período entre 4 e 12 dias passará por três instares, onde chegará a medir 3 mm de comprimento. Quando atinge o 3º instar, a larva permanece no hospedeiro por mais um ou 2 dias e então emerge deste, começando o processo onde formará a pupa, protegida por um casulo construído com fios de seda. Em geral, os insetos advindos de uma mesma lagarta se agrupam formando uma massa. Esta fase é sensível à temperatura, fazendo com que sua duração aumente quando mantida no frio. Após virar um adulto, a vespa pode sobreviver por cerca de 24 h em condições de laboratório. O adulto irá então procurar o hospedeiro através de seu sistema de localização mediado por uma substância presente nas fezes da lagarta, sendo seu alcance **cerca de 35 m¹** [27]. A substância presente nas fezes da *D. saccharalis* é solúvel em água e faz com que a vespa, ao entrar em contato com as fezes diminua sua locomoção e apresente palpação destas com sua antena. No entanto, se as fezes não são frescas, a resposta da vespa à substância não é iniciada. Porém, ao se reidratar as fezes a atratividade nas vespas é reativada. É importante observar que a *C. flavipes* apresenta maior atração pelas fezes de *D. saccharalis* quando existe opção entre esta e a *Sorghum halepense* [50]. A própria planta infestada pode também apresentar voláteis atrativos à *C. flavipes*, incluindo folhas sadias de plantas infectadas, como no estudo realizado em milho por Potting et al (1995) [51].

¹ Este alcance foi reavaliado em 2014 por HAROLDO et al. [52] onde encontraram que fêmeas estavam voando cerca de 18m enquanto machos conseguiam percorrer cerca de 22m. Porém o parasitismo decrescia para mais de 50% após 10m do ponto de liberação do parasitoide.



Figura 12: Ciclo de vida da *C. flavipes*. Fonte: RODERO (2016) [28]

A qualidade dos insetos encontrados comercialmente pode variar bastante, podendo ser os fatores influenciadores a diferença nos ingredientes da dieta, quantidade de insetos por placa petri, temperatura do ambiente, escolha dos parasitoides mantidos no laboratório para procriação, entre outros. Variações nesses fatores podem aumentar os lucros dos laboratórios que produzem as vespas, porém a qualidade destas pode cair drasticamente, causando diferenças nas quantidades de indivíduos gerados, alterações na razão entre os sexos e duração do ciclo de vida dos insetos. Cenários onde muitas vespas, com grande maioria de fêmeas (acima de 60% da população), alta mobilidade e ciclo de vida curtos apresentam-se como desejáveis [53]. Ao escolher dietas para os hospedeiros baseada em grandes quantidades de germe de trigo, seus ciclos de vida são acelerados e os parasitoides obtidos posteriormente apresentam maior longevidade [54]. É importante observar que ao escolher lagartas grandes para a produção de parasitoides, maiores quantidades de vespas são obtidas [54].

Uma característica importante a ser avaliada na produção da *C. flavipes* é a presença de doenças nos hospedeiros utilizados. No estudo de Simões et. al. (2012) foi observado que o patógeno *Nosema* sp, que infecta colônias de broca são transmitidos à vespas no processo de parasitismo. Estas por sua vez podem então transmitir o patógeno para *D. saccharalis*. Brocas altamente infectadas não podem suportar o parasitismo, porém ao ser infectada a *C. flavipes* esta exibe aumento na duração das fases larval e de pupa, diminuição na longevidade da fase de adulto, bem como quantidade de filhos gerados[55]. Além de patógenos, características de controle cultural, como queimadas, bem como a liberação de espécies competidoras para o controle da *D. saccharalis* [56] também podem

influenciar negativamente o parasitismo [57].

Entre as técnicas de liberação, destaca-se a liberação de adultos recém emergidos, onde aguarda-se que 80% da população tenha emergido ainda dentro do laboratório, anteriormente à aplicação no campo. A liberação no campo é então realizada em pontos distando cerca de 50 - 60 m um do outro. Isto é feito levando em consideração o alcance da vespa de cerca de 34 m. Entretanto, Santos e Mihsfeldt (2014) observaram que o alcance da *C. flavipes* pode ter caído para 10 m. Esta observação foi feita através de experimento em laboratório, onde 80 entrenós brocados artificialmente foram colocados distando 5 m entre eles a cada avaliação e 2000 vespas liberadas a partir de 24h após a eclosão dos adultos [58]. Resultado similar foi observado por Haroldo et. al. (2014), onde 1000 entrenós brocados foram liberados no campo, agrupados em grupos de 10 entrenós por ponto distando cerca de 10 m uns dos outros. Foi observado que apesar do alcance ter atingido 25 m, o parasitismo só era eficaz até 10 m do ponto de liberação. Esta variação no alcance quando comparado com os primeiros estudos é apontada como sendo resultado de isolamento reprodutivo que ocorre nos laboratórios produtores [52].

No entanto, outras técnicas como a liberação das massas são possíveis, porém, neste caso podem sofrer predação [59]. Em condições de laboratório foi também avaliada a influência da idade da *C. flavipes* no parasitismo e observado que indivíduos com até 24 h de idade apresentam-se como melhores, porém o parasitismo pode ocorrer com vespas de até 120 h de idade [58].

No continente americano, a primeira tentativa de introdução da *C. flavipes* foi feita em Trinidad, no Caribe, porém sem sucesso [61]. De acordo com o Bennett, o fracasso da *C. flavipes* em Trinidad poderia ser explicada por sua origem asiática, com condições ecológicas e climáticas diferentes do continente americano, hospedeiros diferentes e experimentos fracassados. Isto, na visão de Bennett, tornava o parasitoide *C. flavipes* pouco promissor para o controle da broca. No entanto, resultados advindos de outras localidades, onde diversos métodos de controle biológico para a broca estavam sendo testados, tais como *Lixophaga diatraea*, *Metagonistylum minense* e *Trichogramma japonicum* em Barbados, apontaram o grande potencial da *C. flavipes*. A broca estava presente no estado da Flórida desde 1923, com tentativa de controle biológico datando desde 1926. Entretanto a inserção da *C. flavipes* só ocorreu em 1963, após estudos laboratoriais para definir parâmetros biológicos desta quando o hospedeiro era a broca. Foram introduzidas cerca de 28 mil *C. flavipes* e após 4 meses da inserção foram encontrados os primeiros parasitoides no campo. Isto significava que a *C. flavipes* tinha passado por cerca de 4 gerações, sendo que foram encontradas 5 brocas parasitadas, onde todas geraram entre 26 e 48 parasitoides.

A introdução de *C. flavipes* no Brasil se deu no início da década de 70. Os primeiros

testes para inserção do parasitoide foram realizados pela Copersucar e pelo Departamento de Entomologia da Esalq/USP. A abordagem adotada inicialmente por estas entidades foi limitada a algumas liberações isoladas e observações em laboratório [27]. No nordeste brasileiro a *C. flavipes* foi introduzida através do Programa Nacional de Controle biológico de *Diatraea* spp. desenvolvido pelo IAA/Planalsucar em 1974. Nesta introdução o uso do parasitoide mostrou-se promissor na região, já que em 16 dias já foram recuperadas massas de casulos, porém em lagartas de *D. flavipenella*.

Em outubro de 1980 foi iniciado um estudo para avaliar a eficiência do número de *C. flavipes* inseridas no canavial para o controle da *D. saccharalis*. O estudo foi realizado no estado de São Paulo em 7 usinas de 3 regiões diferentes, Piracicaba, Ribeirão Preto e Jaú por pesquisadores do IAA/Planalsucar e Esalq/USP. Como método de tratamento foram propostos 5 quantidades de liberação, além de um tratamento controle, onde não seria liberada nenhuma vespa. Os tratamentos foram distribuídos dentro de talhões de áreas diferentes, onde as quantidades liberadas de *C. flavipes* foram 0, 2500, 5000, 10000, 20000 e 40000. O método de avaliação utilizado foi de lagartas encontrada por hora/homem mensalmente, e o tratamento era implementado toda vez que 10 ou mais lagartas eram encontradas no campo. Ao final do experimento, em abril de 1981, realizou-se uma última avaliação da percentagem de intensidade de infestação, com coleta da *D. saccharalis* para avaliação posterior do estágio de desenvolvimento e espécies presentes. Os autores observaram um incremento significativo na intensidade de infestação entre outubro e abril das áreas controle e um decréscimo significativo no tratamento com 10 mil cotesias. Ao considerarem o número de lagartas encontradas, os tratamentos se mostraram eficazes na sua redução, sendo que ocorreu uma redução significativa no passar dos meses em todas as regiões estudadas. Observou-se também que as maiores taxas de parasitismo ocorreram com tratamentos utilizando 10, 20 e 40 mil vespas, sendo que estes apresentaram valores muito próximos. A taxa de parasitismo foi também mais alta entre os meses de fevereiro e abril, atingindo valores de até pouco mais de 40%. Com base nesses dados, os autores recomendaram que o tratamento da broca fosse feito com 10 mil indivíduos de *C. flavipes* [62]. A quantidade mínima para tratamento também pode ser estimada em lagartas/hectare e o controle indicado quando se estimar uma população de 2500 lag/hec [27].

Atualmente entretanto, o que se encontra comercialmente são outras recomendações de quantidades de *C. flavipes* a serem liberadas. Uma das empresas pesquisadas recomenda a introdução de 6000 parasitoides por hectare quando for constatada a presença de 800 a 1000 lagartas de *D. saccharalis*. A venda dos parasitoides nesse caso ocorre em embalagens contendo 750, 1000 e 1500 pupas por copo [63]. Uma segunda empresa recomenda a aplicação de 6000 indivíduos de *C. flavipes* quando forem identificadas de

800 a 3000 brocas, 2 indivíduos para cada broca identificada entre 3000 e 10 mil brocas, 3 cotesias por lagarta identificada entre 10 mil e 15 mil brocas e 4 vespas para cada broca em quantidades identificadas acima de 15 mil brocas, sendo os parasitoides vendidos apenas em copos de 1500 vespas [64]. Cada embalagem com cerca de 1500 indivíduos apresenta um custo de produção de cerca de 2 reais em 2015 [65], e atualmente sendo comercializado por cerca de 5 reais [66].

De acordo com Veiga et al, o uso de *C. flavipes* para combater a *D. saccharalis* é o maior programa de controle biológico de pragas do mundo, com cerca de 3 milhões de hectares sendo controlados por cerca de 18 bilhões de vespas [48]. O uso do controle biológico, em especial da *Cotesia flavipes* quando comparado com métodos químicos, encontra nas ciências grandes aliados. Seu uso não polui o ambiente e também não cria resistências na praga, como no caso de inseticidas, ao mesmo tempo promove uma produção maior para a plantação do que usando métodos químicos de controle de praga [67]. Desde sua introdução no Brasil em 1970, as infestações de *Diatraea saccharalis* caíram de 8-10% para uma média de 3% em 2012 [67], o que representou uma economia de 8 bilhões de reais que deixaram de ser perdidos anualmente.

Este trabalho tem o potencial de diminuir drasticamente custos com danos de pragas na cana-de-açúcar, aumentando os ganhos desta que é uma das culturas agrícolas mais rentáveis do Brasil. O trabalho aqui apresentado utiliza modelos matemáticos para descrição da interação entre as populações de hospedeiros e parasitoides através de equações diferenciais no segundo capítulo, utiliza simulações multi agentes para essa descrição no terceiro capítulo e por último uma abordagem de otimização de custos utilizando estatística bayesiana é apresentada. Tão importante quanto a otimização dos recursos empregados é o potencial na diminuição dos produtos químicos utilizados nessas plantações, resultado indireto da maior competitividade do controle biológico com relação aos métodos químicos, minimizando danos ao solo e à saúde da população.

2 Modelo Lotka-Volterra para a interação da *Diatraea saccharalis* e *Cotesia flavipes*

O primeiro modelo de interação populacional utilizado para descrever dinâmicas populacionais foi proposto de forma independente por Alfred J. Lotka (1920) [68] e Vito Volterra (1928) [69], a fim de compreender o comportamento de diferentes espécies. Este modelo, denominado hoje em dia como Lotka-Volterra, tem sido usado para explicar o controle biológico devido à sua simplicidade para estudar a relação entre a presa e seu predador [15, 71, 72]. Hoje em dia, o controle biológico é considerado um dos melhores métodos de controle de pragas devido ao seu baixo impacto ambiental, e é particularmente útil nos campos de cana-de-açúcar no Brasil, o principal recurso de controle de pragas do mundo [55]. No entanto, como a maioria dos modelos matemáticos, esse método enfrenta o mesmo problema, eles não possuem os extensos dados de campo para verificar completamente sua validade [11, 73]. Um dos aspectos mais importantes para um modelo matemático é ser útil para explicar novos fenômenos, apesar de esse retrato não ser completamente fidedigno [39]. No entanto, essa conquista só é obtida com quantidade suficiente de dados adequados, o que significa que ele deve ser preciso, relevante e imparcial. Os dados podem ser utilizados tanto para motivar a construção de um novo modelo como para validá-lo. Vários modelos já foram propostos para explicar os fenômenos biológicos na agricultura. Um fenômeno interessante a ser entendido está relacionado à *D. saccharalis*, que pode ser encontrada em todo o continente americano e é considerada a praga de cana-de-açúcar mais destrutiva no Brasil. A *Diatraea saccharalis* pode danificar os talos da cana-de-açúcar perfurando-os, o que pode, entre outros efeitos, matar a planta [74]. Hensley (1961) propôs um método de amostragem que permitiu a avaliação da população de pragas no campo escolhendo aleatoriamente 10 pontos por hectare onde cortava canas longitudinalmente e realizando a contagem das lagartas presentes [75]. Este método de seleção aleatória de talos de cana-de-açúcar, coletando as brocas e extrapolando para o tamanho de sua população ainda é usado hoje em dia [76, 77]. Nesta seção, temos por objetivo adotar o modelo Lotka-Volterra para descrever a interação entre a broca da cana e a vespa *Cotesia flavipes*. A partir deste modelo faremos uma avaliação dos parâmetros presentes afim de buscar estratégias novas para aprimorar o controle biológico. Ainda usando o modelo Lotka-Volterra, mostraremos que o uso de métodos destrutivos de levantamento no campo para obter dados, como cortar a cana-de-açúcar, se apresenta como um procedimento inviável para medir o crescimento diário da população de pragas com boa precisão, mantendo cana-de-açúcar suficiente para não interferir significativamente com o comportamento da população de pragas.

Plant e Mangel [29] delineiam 3 pontos que os modelos matemáticos podem ser usa-

dos para o controle de pragas: seleção de estratégia, seleção da tática e estimação do estado da praga. A seleção de estratégia é a etapa onde deve ser determinada qual a combinação de métodos de controle, químico, biológico e culturais serão usadas no controle da praga. A seleção da tática segue a anterior e determina a forma como aplicar a estratégia adotada em resposta ao estado atual da praga. A estimação do estado da praga é o estágio onde é feito um esforço para se determinar o ponto onde o controle ativo deve ser implementado. O estágio onde é necessário fazer controle ativo da praga é chamado de limite econômico e é o ponto onde os danos da praga trarão mais prejuízos do que seu controle [70]. Os modelos comumente estudados são os de seleção de estratégia e o objetivo desse trabalho é também estudar qual estratégia adotar para controlar pragas da cana-de-açúcar.

O primeiro modelo matemático para descrever o crescimento de uma população segue as ideias que Malthus propôs em 1798, mas foi sugerido muito antes por Euler [78]. Esse modelo de um sistema determinístico (não aleatório) fechado, onde não existe imigração ou emigração, é escrito como

$$\frac{dN(t)}{dt} = bN(t) - dN(t), \quad (1)$$

onde b é a taxa de nascimento per capita, d a taxa de morte per capita e N é o tamanho da população. Definindo o crescimento líquido per capita como

$$r = b - d, \quad (2)$$

a equação (1) é reescrita como

$$\frac{dN(t)}{dt} = rN(t).$$

A solução da equação (1) é

$$N(t) = N_0 e^{rt}. \quad (3)$$

Podemos observar alguns casos limite simples para esse modelo para melhor entendê-lo. No instante inicial, onde $t = 0$, $N(0) = N_0$. Conforme o tempo passa, se a taxa de crescimento líquido for positiva, $r > 0$, a população cresce exponencialmente, e $t \rightarrow \infty$, $N \rightarrow \infty$. Caso $r = 0$, não existe alteração no tamanho da população. Sendo a taxa de crescimento líquido negativa, $r < 0$, a equação nos diz que em $t \rightarrow \infty$, $N \rightarrow 0$.

Esse modelo considera uma população isolada, contínua, sem diferenças etárias e onde todos os indivíduos são iguais. O ambiente, nesse modelo, não influencia o crescimento da população, assim como os indivíduos não mudam hábitos importantes que podem variar as taxas de nascimento e morte. É importante notar que nesse sistema os

indivíduos se reproduzem de forma contínua, o que não acontece em todas as espécies. Esse modelo apresenta muitas limitações e tem pouca aplicação real, ainda assim, sua importância histórica e como ponto de partida para muitos outros modelos o torna relevante.

2.1 Modelo Lotka-Volterra

Por apresentar aplicações econômicas, sistemas de equações considerando interações entre populações começaram a ser criados e estudados. O primeiro destes modelos ficou conhecido como modelo presa predador de Lotka-Volterra, e desde seu desenvolvimento eles se tornaram poderosos auxílios para ajudar na tomada de decisões. Neste primeiro sistema, a população de presas, N , cresce exponencialmente na ausência de predadores, P , seguindo a taxa de crescimento líquido (mortes subtraídas dos nascimentos) per capita a . Os predadores, na ausência de presas, têm sua população diminuída de forma exponencial, com uma taxa d . Na presença de predadores, as presas são mortas proporcionalmente à população destes, considerando ainda o fator de captação de presas, b . As presas mortas são então convertidas em predadores, na equação (5), através do fator de aproveitamento c .

$$\frac{\partial N}{\partial t} = N(a - bP) \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = P(cN - d) \quad (5)$$

Apesar de útil, esse modelo desconsidera muitos aspectos importantes na interação entre duas populações. Como exemplo, vale ser citado que não existe diferença etária entre os indivíduos, ou diferença sexual, bem como os recursos disponíveis para a população de presas são infinitos.

Outros modelos utilizando equações diferenciais para descrição da interação da *D. saccharalis* e *C. flavipes* já foram propostos. Entre estes, RAFIKOV e AGELELLI (2009) apresentam uma variação do modelo presa-predador adaptado com termo para efeito de superpovoamento das brocas. Neste trabalho os autores utilizam o modelo para propor um método de controle ótimo por feedback linear para manter a população abaixo do nível de dano econômico, adotado como 2500 lagartas/hectare [79]. Foi apresentado como exemplo uma situação onde 5000 lagartas/hectare seriam levadas abaixo do limite econômico, o que foi obtido através da inserção de 20 000 parasitoides/hectare após 35 dias e aplicando conjuntamente o controle com feedback linear, após 45 dias não seria mais necessária a introdução de novos parasitoides. Este modelo foi também utilizado por CAMPOS, et al (2016) trabalhando com intervalos para lidar com incertezas das avaliações das populações iniciais e então poder introduzir controle ótimo para manter a praga abaixo do limite de dano econômico, porém com introduções diárias de 16,4 de

parasitoides/hectare [73]. Isto de um ponto de vista prático é problemático, já que as vespas são vendidas comercialmente em copos de 1500 indivíduos, sendo produzidas em massas com pelo menos 50 indivíduos que viram adultos aproximadamente ao mesmo tempo.

Um outro modelo derivado do Lotka-Volterra é utilizado em por RAFIKOV e SILVEIRA (2014), onde a capacidade do ambiente é considerada, bem como uma terceira equação para descrever especificamente a população de brocas infectadas [80]. É então utilizada a técnica de controle por feedback linear, de onde é observado nos resultados numéricos obtidos que quantidades de até 40 000 parasitoides/hectare não eram suficientes para manter a população da praga, inicialmente acima do limite de dano econômico, controlada. Porém, considerando como exemplo a presença de 2500 brocas/ha, e que a condição ideal seria a presença de 2000 lagartas/ha, 3158 massas/ha e 19 441 parasitoides/ha, 1826 parasitoides/ha por dia deveria ser inseridos.

As equações diferenciais parciais (4) e (5) podem se tornar ferramentas úteis na previsão tanto do tamanho da população da broca-da-cana como medir a eficácia do controle utilizando o parasitoide *C. flavipes*. O primeiro parâmetro que deve ser encontrado é a taxa de crescimento líquido para a população da broca, a . Supondo que a população de mariposas tenha alimento abundante, como a equação (4) sugere, e na ausência de parasitoides, a população da praga vai crescer exponencialmente, como retratado na equação (1)

$$\frac{dN}{dt} = aN, \quad (6)$$

que tem por solução

$$N(t) = N(0) e^{at}. \quad (7)$$

De acordo com Gallo et al. [26], uma broca vive entre 53 e 60 dias, e apenas na sua fase adulta acontece o acasalamento e postura dos ovos. Vamos supor que o acasalamento aconteça, em média, após 54 dias de vida, $\tau_1 = 54$. Vale ressaltar que este resultado é uma aproximação inicial. Um modelo mais realista pode utilizar-se de uma distribuição de probabilidades para melhor representar as condições encontradas na Natureza. Neste trabalho usaremos o valor médio para a expectativa de vida

$$\frac{53 + 60}{2} = 56,5$$

e que o acasalamento e postura de ovos só acontece em algum dos 5 últimos dias de vida (adotaremos que isso ocorre com 2.5 dias da fase adulta). O número de indivíduos gerados a cada geração varia entre 5 e 50 indivíduos. Adotaremos que em média são gerados $R = 20$ indivíduos a cada geração. Assim, a equação (7), após a primeira geração

de indivíduos alcançar o período fértil, pode ser escrita como

$$N(\tau_1) = RN(0) = N(0)e^{a\tau_1}.$$

Substituindo os valores adotados, obtemos a taxa de crescimento líquido

$$a = \frac{\ln 20}{54} = 0,056. \quad (8)$$

Para encontrar o valor da taxa de captura das presas por um predador, representado pelo parâmetro b na equação 4, vamos considerar dois instantes, $t = 0$ onde os predadores são inseridos e $t = \tau_2$ onde as vespas já são adultas e podem preda a broca. A aplicação da cotesia no campo se dá através da liberação de seus ovos em alguns pontos estratégicos dentro do canavial a depender do tamanho da população da praga. Araújo, et al (1984) [62] recomendam que sejam liberados 6 mil predadores quando são encontrados até mil indivíduos da broca no canavial. Considerando que no instante da liberação não existe nenhum indivíduo da população de *C. flavipes* presente e o tamanho da população só vai alterar após τ_2 , que se dá em média 10 dias após a liberação, poderemos tomar nesse intervalo P como sendo constante, assim a equação 4, dada por

$$\frac{dN}{dt} = N(a - bP) \quad (9)$$

tem por solução

$$N(t) = N_0 e^{(a-bP)t} \quad (10)$$

Assumindo que a população da vespa reduza a praga em τ_2 com um fator f , teremos

$$N(\tau_2) = fN_0 = N_0 e^{(a-bP)\tau_2}$$

que pode ser arrumada da seguinte maneira

$$b = \frac{-\ln f + a\tau_2}{P\tau_2}$$

Assumindo que 6 mil predadores consigam reduzir a população da praga em τ_2 à 40% do seu tamanho original, $f = 0.4$, teremos que a taxa de captura será $b = 0,000025$

A taxa de mortalidade das vespas pode ser encontrada considerando que o ciclo de vida delas é de cerca de 20 dias e que até 24 dias a população inicial vai ter sido reduzida à 5%, $g = 0,05$, do seu tamanho inicial. Considerando que nesse período não existe a possibilidade de surgirem novos predadores, a equação 5 se reduz ao modelo de crescimento

exponencial. Assim

$$P(24) = 0,05P_0 = P_0 e^{-24d},$$

que após algumas manipulações mostra que o valor da taxa de mortalidade para as vespas é

$$d = 0,1248 \quad (11)$$

Para descobrir o valor da taxa de reprodução das vespas, c , que é dependente do tamanho da população da broca, consideraremos que cada vespa pode gerar 26 indivíduos que completarão o ciclo. Sendo assim, após a oviposição dos indivíduos liberados, em $t = 18$, considerando que a broca até esse instante tem sua população constante e inalterada, podemos fazer

$$\frac{dP}{dt} = P(cN_0 - d)$$

que tem como solução

$$P(18) = 26P_0 = P_0 e^{(cN_0 - d)18},$$

de onde tiramos que, se inicialmente $N_0 = 2500$, $c = 0,00012$. Assim as equações 4 e 5 parametrizadas para retratar a interação broca-cotesia são reescritas como

$$\frac{\partial N}{\partial t} = N(0,056 - 0,000025P) \quad (12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = P(0,00012N - 0,1248) \quad (13)$$

É importante ressaltar que as características biológicas de ambas as populações podem sofrer variações, tanto por região, quanto com o passar do tempo. Em ambos os casos, antes da aplicação prática das estratégias que podem surgir deste modelo, uma avaliação das populações locais deve ser feita para poder propor qualquer medida.

A dinâmica apresentada nas equações (12) e (13) pode ser obtida numericamente, o que foi feito neste trabalho através do método Runge-Kutta de 4º ordem. Isto é observado na figura 13, onde as oscilações características desse tipo de sistema estão presentes. No entanto, o modelo Lotka-Volterra desconsidera vários aspectos biologicamente importantes. Entre os fatores podemos referir a falta de uma estrutura etária, sendo que todos os indivíduos são tratados como idênticos, o que também implica que todos os indivíduos apresentam mesmas características fisiológicas e genéticas, não apresentando nem mesmo diferença entre sexo entre os indivíduos. O modelo também desconsidera a capacidade de suporte do ambiente para as populações, não limitando o crescimento destas onde se atinjam as condições para as quais os recursos começariam a ser escassos. A população de parasitoides é considerada como super especialista, não podendo aumentar

na ausência dos hospedeiros, o que pode não ocorrer no campo se houver algum outro hospedeiro alternativo em algum ambiente específico. A consideração de encontros aleatórios no campo também pode ser uma aproximação que não se retrate fielmente no campo. Esta consideração implica que não existem refúgios espaciais ou temporais contra os parasitoides. Também não são considerados movimentos migratórios, sendo o modelo de descrição de um sistema fechado. No entanto, esta forma de descrever esse tipo de dinâmica, apesar de possuir uma estrutura bem simples e limitada, pode gerar resultados bem interessantes, o que será discutido a seguir.

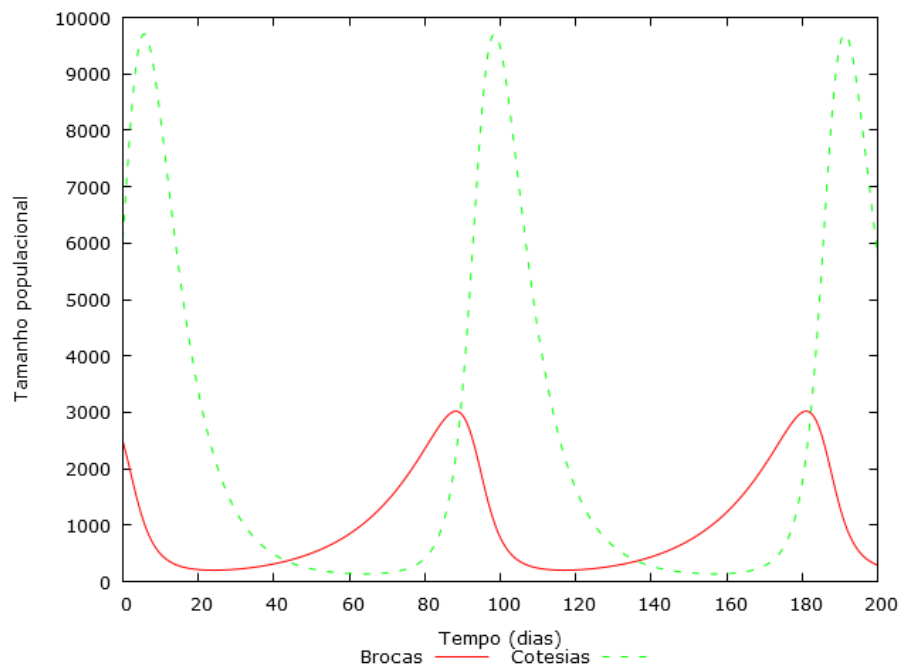


Figura 13: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* e da *Cotesia flavipes* de acordo com as equações (12) e (13)

2.1.1 Pontos de equilíbrio

Encontrar os pontos de equilíbrio é uma tarefa importante para melhor compreender a dinâmica do sistema. Para tanto deve-se definir o que queremos dizer por equilíbrio, e aqui consideraremos que as populações estão em equilíbrio quando a variação temporal do tamanho de suas populações é nulo. Sendo assim, para encontrar o ponto de equilíbrio do sistema presa-predador, deve-se inicialmente fazer $\frac{\partial N}{\partial t} = 0$ e $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$. Nesta seção vamos apenas analisar o ponto de equilíbrio com populações não nulas e na seção posterior analisaremos com mais detalhes todas as situações possíveis. Ao aplicar a condição para

obtenção do ponto de equilíbrio para o caso geral, apresentado nas equações 4 e 5 obtemos

$$\frac{\partial N}{\partial t} = 0 = N^* (a - bP^*) \quad (14)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 0 = P^* (cN^* - d) \quad (15)$$

sendo N^* a população de presas no equilíbrio e P^* a população de predadores no equilíbrio. Da equação 14, ao considerar que a população de presas é não nula pode-se fazer

$$a - bP^* = 0 \rightarrow P^* = \frac{a}{b} \quad (16)$$

Isto significa que o equilíbrio na população das presas é obtido quando a população de predadores atinge o valor igual à razão entre a taxa de crescimento das presas e o coeficiente de captura de presas por predadores. Sendo assim, quanto maior a taxa de crescimento líquido das presas, mais predadores são necessários para se atingir o equilíbrio. Por outro lado quanto maior o coeficiente de captura de presas por predadores, menos destes últimos são necessários para atingir o ponto de equilíbrio. Um exemplo disso acontece com a interação entre zooplânctons e baleias, já que o coeficiente de captura desses indivíduos minúsculos por baleias é grande, significando que uma única baleia tem o potencial de capturar vários indivíduos de uma só vez. Sendo assim, se a taxa de reprodução destas presas for baixa, a quantidade necessária de baleias para se atingir o equilíbrio entre as populações é pequena também.

Ao aplicar a segunda condição, $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$, como o feito na equação 15, considerando que a população de predadores é não nula, obtemos

$$cN^* - d = 0 \rightarrow N^* = \frac{d}{c} \quad (17)$$

A partir deste resultado vemos que, similarmente com o que aconteceu com o ponto de equilíbrio para a população de presas, o equilíbrio para a população de presas depende de uma quantidade fixa de presas presentes no sistema. Esta quantidade diretamente proporcional à taxa de morte dos predadores e inversamente proporcional ao coeficiente de conversão de presas em predadores.

Para a situação particular da interação entre a população da *Diatraea saccharalis* e a *Cotesia flavipes*, as condições apresentadas nas equações 16 e 17 são então respectivamente

$$P^* = \frac{a}{b} \rightarrow \frac{0,056}{0,000025} = 2240$$

$$N^* = \frac{d}{c} \rightarrow \frac{0,1248}{0,00012} = 1040$$

Assim, se houverem 2240 vespas presentes no sistema com 1040 brocas, o modelo Lotka-Volterra aplicado à esta situação apresenta um ponto de equilíbrio, onde as duas populações manteriam seus tamanhos indefinidamente. Esta situação, é uma aproximação idealizada, já que fatores externos poderiam facilmente tirar qualquer uma das populações de seu ponto de equilíbrio. Estes fatores, como variações na temperatura, geografia do ambiente, ventos, etc, não são considerados nesse modelo.

2.1.2 Período de oscilação em torno dos pontos de equilíbrio

Em torno dos pontos de equilíbrio é possível encontrar o período de oscilação ao propor a seguinte mudança de variáveis nas equações 4 e 5

$$n = N - N^*, \quad p = P - P^*$$

que nas variáveis anteriores era escrita como

$$N = n + N^*, \quad P = p + P^* \quad (18)$$

onde n e p são pequenas oscilações em torno do ponto de equilíbrio.

Ao fazer a substituição das variáveis na equação 4 e sabendo que $\frac{dN}{dt} = \frac{dn}{dt}$ obtemos

$$\frac{dn}{dt} = (n + N^*) (a - bp - bP^*)$$

$$\frac{dn}{dt} = a(n + N^*) - b(n + N^*)(p + P^*)$$

ao substituirmos as condições obtidas para os pontos de equilíbrio, descritas nas equações 16 e 17, $N^* = \frac{d}{c}$ e $P^* = \frac{a}{b}$

$$\frac{dn}{dt} = a \left(n + \frac{d}{c} \right) - b \left(n + \frac{d}{c} \right) \left(p + \frac{a}{b} \right)$$

e rearrumando a equação anterior

$$\frac{dn}{dt} = an + \frac{ad}{c} - bnp - an - \frac{bd}{c}p - \frac{ad}{c}$$

lembrando que $n \ll N^*$ e $p \ll P^*$ o termo bnp se torna muito pequeno, podendo ser desconsiderado. Assim esta última equação se torna

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{bd}{c}p \quad (19)$$

De forma análoga, a equação 5 se torna

$$\begin{aligned}\frac{dp}{dt} &= (p + P^*)(cn + cN^* - d) \\ \frac{dp}{dt} &= -d(p + P^*) + c(p + P^*)(n + N^*)\end{aligned}$$

e ao usarmos as condições impostas pelo ponto de equilíbrio nas equações 16 e 17 obtemos

$$\begin{aligned}\frac{dp}{dt} &= -d\left(p + \frac{a}{b}\right) + c\left(p + \frac{a}{b}\right)\left(n + \frac{d}{c}\right) \\ \frac{dp}{dt} &= -dp - \frac{da}{b} + cpn + dp + \frac{ca}{b}n + \frac{da}{b}\end{aligned}$$

o que ao considerarmos novamente $n \ll N^*$ e $p \ll P^*$ o termo cpn se torna muito pequeno e pode ser desconsiderado. Com isso

$$\frac{dp}{dt} = \frac{ca}{b}n \quad (20)$$

Ao tomarmos uma segunda derivada temporal nas equações 19 e 20 torna

$$\frac{d^2p}{dt^2} = \frac{ca}{b} \frac{dn}{dt} = -adp \Rightarrow \frac{d^2p}{dt^2} + adp = 0$$

e

$$\frac{d^2n}{dt^2} = -\frac{bd}{c} \frac{dp}{dt} = -adn \Rightarrow \frac{d^2n}{dt^2} + adn = 0$$

o que apresenta a forma $\frac{d^2r}{dt^2} + \omega_0^2 r = 0$, que pode ser identificada com a equação de oscilador harmônico, cujo período é dado por

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \approx \frac{2\pi}{\sqrt{ad}} \quad (21)$$

No caso particular da interação entre brocas e vespas, cujos parâmetros para a taxa de crescimento líquido das brocas e de morte das vespas foram estimados nas equações 8 e 11 como $a = 0,056$ e $d = 0,1248$, ω_0 pode ser então estimado como $\omega_0 = \sqrt{ad} = \sqrt{0,1248 \cdot 0,056} = 0,0836$ e então $T = 21,7$. Isto pode ser visto na figura 14 onde as condições iniciais continham $N = 1050$ brocas e $P = 2250$ *C. flavipes*. É importante notar que esta condição só pode ser usada para valores próximos ao ponto de equilíbrio e para outros pontos ela não deve ser usada. Na figura 13 podemos ver que o período de oscilação das populações não se mantém e para qualquer valor longe do ponto de equilíbrio o período de oscilação aumenta.

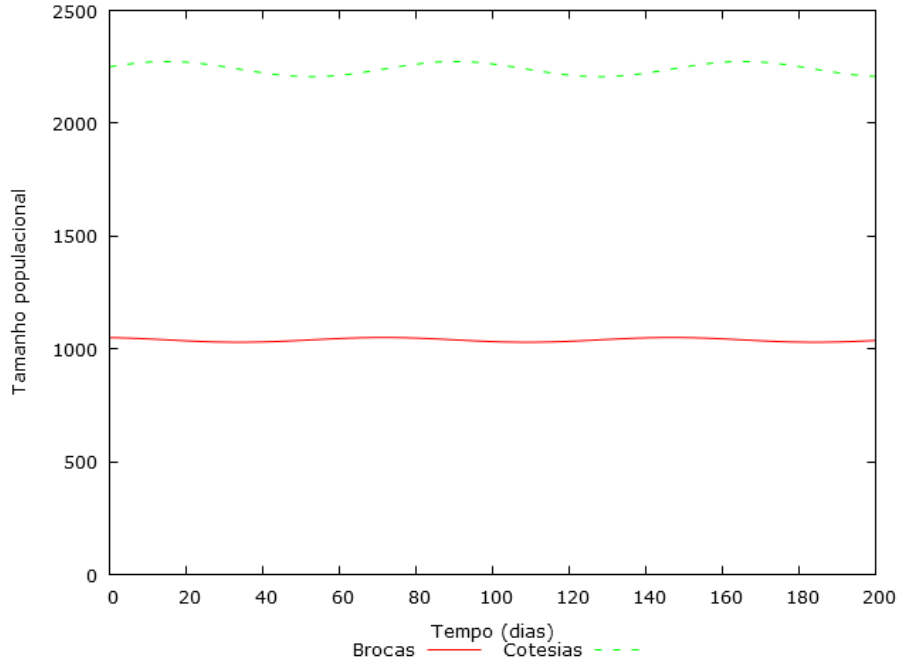


Figura 14: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* e da *Cotesia flavipes* de acordo com as equações (12) e (13) próximo ao equilíbrio

2.1.3 Análise de estabilidade dos pontos de equilíbrio

Afim de facilitar a análise de estabilidade dos pontos de equilíbrio, faremos as seguintes transformações

$$u(\tau) = \frac{cN(t)}{d}, \quad v(\tau) = \frac{bP(t)}{a}, \quad \tau = at, \quad \gamma = \frac{d}{a} \quad (22)$$

Assim a equação representativa da população das presas é reescrita como

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} \frac{c}{d} \frac{dN(t)}{dt},$$

e usando a equação 4

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{c}{d} \frac{N(a - bP)}{a}$$

que ao aplicarmos as transformações propostas em 22 podemos escrever

$$\frac{du}{d\tau} = u(1 - v) = f(u, v) \quad (23)$$

Similarmente a equação representativa da população de predadores se torna

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} \frac{b}{a} \frac{dP(t)}{dt},$$

que, ao se substituir a equação 5, toma a forma

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{1}{a} \frac{bP(cN - d)}{a}$$

e usando as transformações presentes em 22, obtém-se

$$\frac{dv}{d\tau} = \gamma v(u - 1) = g(u, v) \quad (24)$$

O novo sistema de equações representativo da dinâmica presa-predador apresenta os seguintes pontos de equilíbrio

$$\begin{cases} u(1 - v) = 0 \\ \gamma v(u - 1) = 0 \end{cases}$$

Este sistema apresenta como solução as seguintes situações $(u^*, v^*) = [(0, 0), (1, 1)]$

De posse das soluções, analisar o comportamento no entorno delas pode ser feito propondo a seguinte mudança de variáveis para acrescentar uma pequena perturbação em torno do ponto de equilíbrio

$$\tilde{u} = u - u^*, \quad \tilde{v} = v - v^*$$

ou

$$u = \tilde{u} + u^*, \quad v = \tilde{v} + v^*$$

Ao considerarmos pequenas variações, \tilde{u} e \tilde{v} , em torno dos pontos de equilíbrio, u^* e v^* , podemos então expandir as equações 23 e 24 em séries de Taylor, lembrando que $f(u^*, v^*) = g(u^*, v^*) = 0$

$$f(u, v) = f(u^*, v^*) + \frac{\partial f(u^*, v^*)}{\partial u} \tilde{u} + \frac{\partial f(u^*, v^*)}{\partial v} \tilde{v} + \dots$$

$$g(u, v) = g(u^*, v^*) + \frac{\partial g(u^*, v^*)}{\partial u} \tilde{u} + \frac{\partial g(u^*, v^*)}{\partial v} \tilde{v} + \dots$$

e ignorando os termos superiores e tendo que

$$\frac{du}{dt} = \frac{d\tilde{u}}{dt}, \quad \frac{dv}{dt} = \frac{d\tilde{v}}{dt}$$

obtemos o seguinte sistema linearizado

$$\frac{d\tilde{u}}{dt} = \frac{\partial f(u^*, v^*)}{\partial u} \tilde{u} + \frac{\partial f(u^*, v^*)}{\partial v} \tilde{v} = a\tilde{u} + b\tilde{v} \quad (25)$$

$$\frac{d\tilde{v}}{dt} = \frac{\partial g(u^*, v^*)}{\partial u} \tilde{u} + \frac{\partial g(u^*, v^*)}{\partial v} \tilde{v} = c\tilde{u} + d\tilde{v} \quad (26)$$

Podemos então construir a matriz Jacobiana utilizando os coeficientes do sistema anterior fixada no ponto de equilíbrio. Podemos então escrever as equações 25 e 26 na sua forma vetorial

$$\dot{\vec{x}}(t) = J \vec{x}(t)$$

Sendo $\vec{x}(t) = (\tilde{u}(t), \tilde{v}(t))$ e $\dot{\vec{x}}(t) = (\dot{\tilde{u}}(t), \dot{\tilde{v}}(t))$ e admitindo como solução

$$\vec{x}(t) = e^{\lambda t} \vec{x}_0$$

que também pode ser escrita na forma

$$\vec{x}(t) = e^{Re(\lambda)t} e^{iIm(\lambda)t} \vec{x}_0 \quad (27)$$

obtemos

$$(J - \lambda I) \vec{x}_0 = 0$$

desta forma é possível obter os autovalores da matriz jacobiana, o que permitirá analisar a estabilidade dos pontos de equilíbrio. Para tanto, calcularemos o determinante da equação anterior

$$\det |J - \lambda I| = 0$$

Neste ponto é possível explicitar o que é definido como estabilidade das soluções de equilíbrio. Ao usarmos uma pequena perturbação em torno do ponto de equilíbrio, caso a solução não tenda ao infinito, dizemos que a solução é estável. Sendo assim, de posse da solução 27 é possível ver que $e^{iIm(\lambda)t}$ é uma função limitada e não fará a solução tornar-se instável. No entanto, quando $Re(\lambda) > 0$ a solução $\vec{x}(t) \rightarrow \infty$ quando $t \rightarrow \infty$, o que pode ser caracterizado como um ponto de equilíbrio não estável, já que usando uma pequena perturbação, conforme o tempo aumenta a solução distancia-se cada vez mais do ponto de equilíbrio. Já para a situação onde $Re(\lambda) < 0$, $\vec{x}(t) \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$ caracterizando um ponto de equilíbrio estável.

Ao usarmos uma pequena perturbação em torno do ponto $(u^*, v^*) = (0, 0)$ no sistema linearizado composto pelas equações 25 e 26 obtemos as seguintes expressões

$$\frac{d\tilde{u}}{dt} = \tilde{u} + 0\tilde{v}, \quad \frac{d\tilde{v}}{dt} = 0\tilde{u} - \gamma\tilde{v}$$

cuja matriz Jacobiana é

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\gamma \end{bmatrix}$$

e assim

$$\det|J - \lambda I| = \lambda^2 + \lambda(\gamma - 1) = 0$$

de onde tiramos que os autovalores são então $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = -\gamma$, caracterizando uma solução instável do tipo sela. Esta solução aponta que uma pequena perturbação na população de predadores quando esta está no ponto $(u^*, v^*) = (0, 0)$ faz $\tilde{v}(t) \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$. Porém nesta situação, uma pequena perturbação no tamanho da população de presas, quando $(u^*, v^*) = (0, 0)$ faz com que $\tilde{u}(t) \rightarrow \infty$ quando $t \rightarrow \infty$.

No segundo ponto de equilíbrio, onde $(u^*, v^*) = (1, 1)$ o sistema linearizado se torna

$$\frac{d\tilde{u}}{dt} = 0\tilde{u} - \tilde{v}, \quad \frac{d\tilde{v}}{dt} = \gamma\tilde{u} + 0\tilde{v}$$

de onde construímos a matriz Jacobiana

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \gamma & 0 \end{bmatrix}$$

e assim obtemos os autovalores através da equação

$$\det|J - \lambda I| = \lambda^2 + \gamma^2 = 0$$

como sendo $\lambda_1 = i\sqrt{\gamma}$ e $\lambda_2 = -i\sqrt{\gamma}$, o que caracteriza uma solução estável do tipo centro, já que os autovalores não apresentam parte real. Sendo assim, uma pequena perturbação em torno do ponto de equilíbrio $(u^*, v^*) = (1, 1)$ faz com que o sistema oscile indefinidamente para $t \rightarrow \infty$.

2.2 Análise dos resultados do modelo Lotka-Volterra

Com relação à dinâmica populacional, é importante notar alguns pontos. Primeiramente podemos observar pela figura 15 que na ausência de hospedeiros, a população de parasitoides decresce de forma exponencial e atinge tamanho nulo em cerca de 40 dias, sendo que com 20 dias a população já está com valores muito pequenos. É importante notar que esta situação acontece por estarmos considerando a população de *C. flavipes* como sendo especialistas, sem outro hospedeiro disponível presente no ambiente. Outro ponto importante de se observar é que, ao contrário do que aconteceria na realidade, com o sistema de equações utilizadas não é possível garantir que no momento de introdução dos indivíduos todos estejam na fase adulta. Para tanto, um conjunto maior de equações poderia ter sido utilizado, porém neste estudo, com o objetivo de verificar comportamentos qualitativos, isto não é necessário. Lembrando que a taxa de morte, d , foi obtida

considerando que no período de 24 dias a população inicial, na ausência de hospedeiros, é reduzida à 5% da população inicial, podemos confirmar visualmente com este gráfico este comportamento.

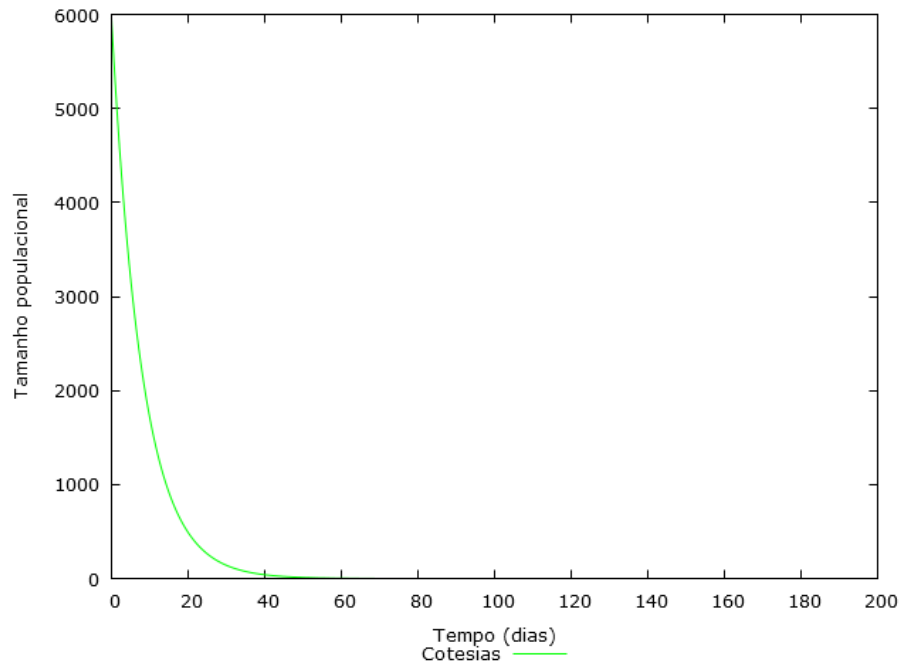


Figura 15: Evolução temporal do tamanho das populações da *Cotesia flavipes* de acordo com as equações (12) e (13)

A figura 16 mostra a situação oposta ao cenário apresentado anteriormente na figura 15. Nesta situação é apresentada o comportamento da população de brocas na ausência dos parasitoides. Vemos nesta figura uma explosão populacional. Esta situação idealizada seria impossível de ocorrer no campo, já que recursos naturais, tais como espaço e alimentos, limitariam o crescimento populacional. Predadores naturais encontrados no campo também poderiam ter sua atuação potencializada na presença de populações de broca grandes, o que alteraria a taxa de crescimento líquido, a , tornando-a dependente do tamanho populacional ou sendo descrita por outro conjunto de equações dedicadas à esta situação.

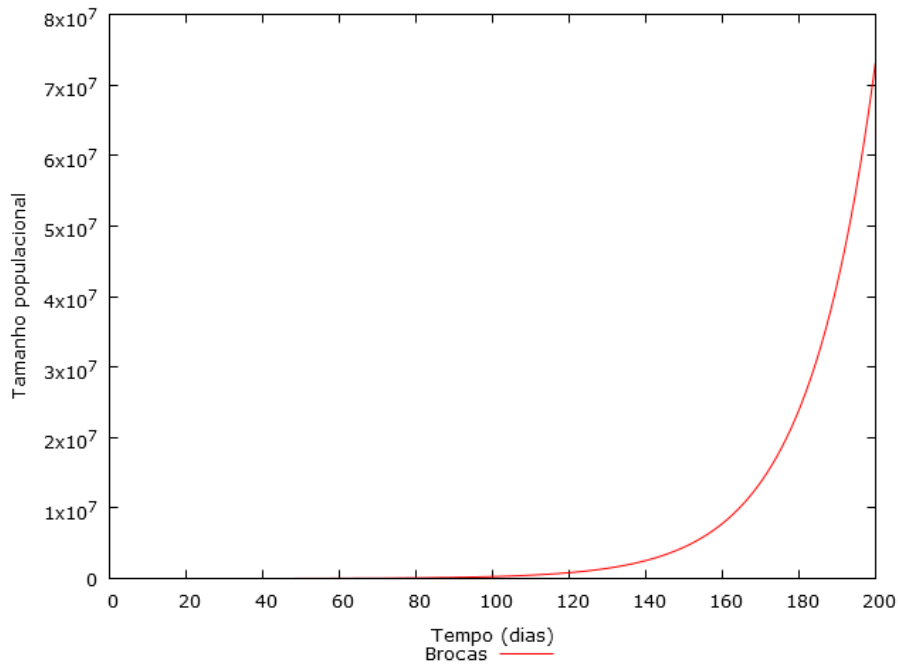


Figura 16: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* de acordo com as equações (12) e (13) com 1000 brocas inicialmente

As figuras 17 e 18 podem então ser contrastadas com a figura 16 e assim analisarmos o impacto do tamanho populacional inicial com o passar do tempo. Vemos nas condições com 2500 e 5000 brocas iniciais que a duplicação da população inicial é refletida na duplicação da população com o passar do tempo. Uma situação similar é observada com a situação com 1000 brocas iniciais, já que a população ao passar do tempo se mantém 5 vezes menor que o caso com 5000 brocas iniciais. Este comportamento era de se esperar pela estrutura usada para simular este comportamento, já que a regra do múltiplo constante diz que se f é uma função diferenciável em x e c for um número real

$$\frac{d}{dx} [cf(x)] = c \frac{df(x)}{dx} \quad (28)$$

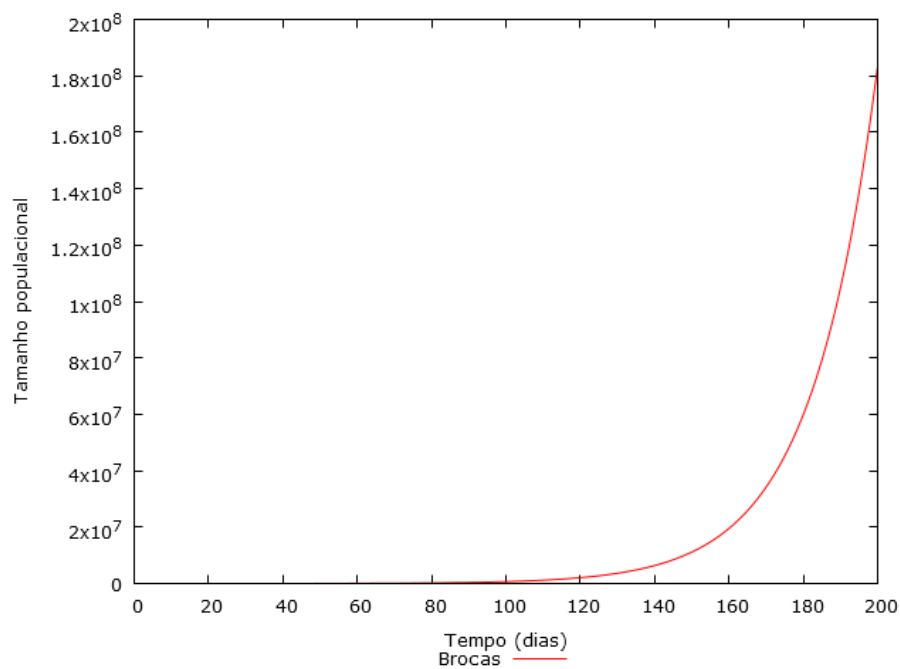


Figura 17: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* de acordo com as equações (12) e (13) com 2500 brocas inicialmente

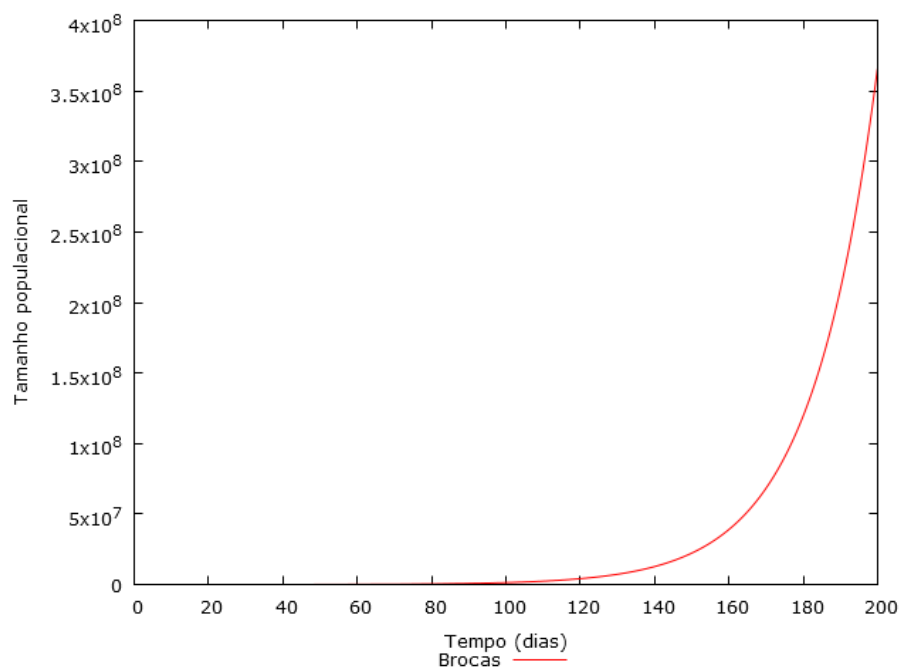


Figura 18: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* de acordo com as equações (12) e (13) com 5000 brocas inicialmente

A figura 19 apresenta uma das situações onde as duas populações apresentam valores não nulos. As populações de *C. flavipes* e *D. saccharalis* foram iniciadas com populações

de 6000 e 1000 indivíduos respectivamente. É possível observar que as populações oscilam com uma defasagem entre as populações de hospedeiros e parasitoides. Isto ocorre devido a resposta de uma população a segunda. Quando existe uma abundância de hospedeiros presentes no sistema, a população de parasitoides cresce livremente. Conforme esta segunda população cresce, a broca começa a sair rapidamente do sistema, o que começa a gerar escassez de recursos para que a população de parasitoides possa crescer, fazendo com que ela comece então a diminuir. Com a diminuição de seus inimigos, a broca encontra novamente um ambiente propício ao seu crescimento. Isto faz com que após a retomada do crescimento das brocas, os parasitoides que ainda estavam no sistema possa se reproduzir e aumentar novamente sua população, até atingir o valor onde o crescimento da população dos hospedeiros não seja mais viável, fechando então este ciclo de evolução de crescimento populacional.

É possível ainda observar aqui também um primeiro exemplo das limitações impostas para a obtenção do período de oscilação próximo ao ponto de equilíbrio. Este foi definido previamente como sendo de 21.7 dias para a situação onde as populações estão próximas à condição de equilíbrio, com 1040 brocas e 2240 parasitoides. Na situação apresentada na figura 19, onde a população de brocas está próxima ao equilíbrio inicialmente, porém a de hospedeiros está distante, o período de oscilação observado é de cerca de 80 dias. Este período de oscilação aumenta conforme as populações distanciam-se do equilíbrio, o que pode ser observado nas figuras 20 e 21. Nesta duas figuras o período de oscilação chega a cerca de 100 e 140 dias respectivamente. Estas situações ocorrem devido a estrutura adotada para descrever a dinâmica, já que uma vez atingido um tamanho populacional alto, o tempo para atingir valores baixos novamente vai depender de quão grande for o pico anterior. Isto porém só ocorre quando existe interação entre as duas populações, já que independentemente do tamanho da população *C. flavipes*, ela será extinta do sistema no mesmo tempo na ausência de brocas, o único meio na estrutura adotada para crescimento dos parasitoides.

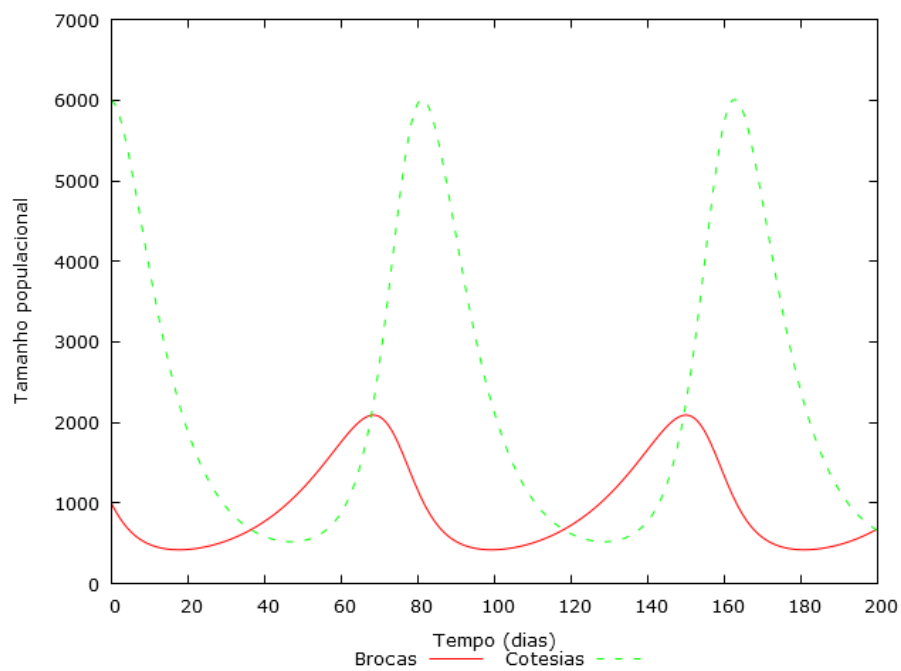


Figura 19: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* e da *Cotesia flavipes* de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 1000 brocas e 6000 vespas

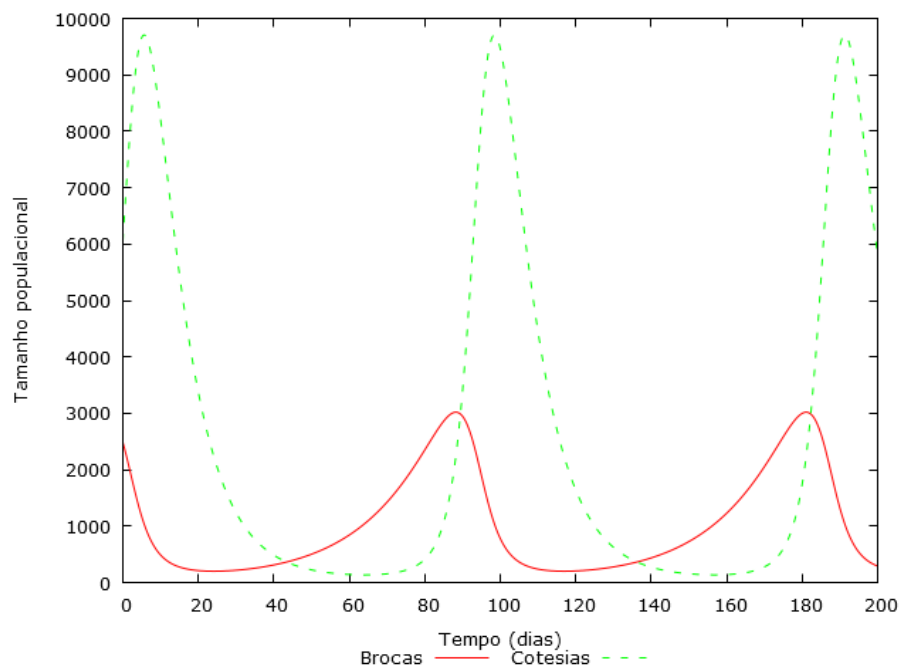


Figura 20: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* e da *Cotesia flavipes* de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 2500 brocas e 6000 vespas

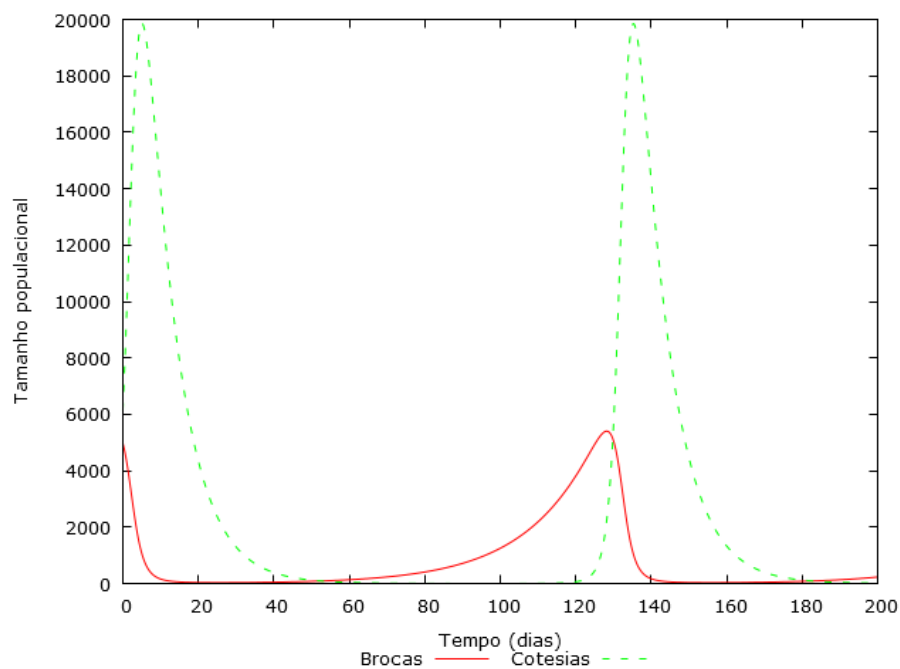


Figura 21: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* e da *Cotesia flavipes* de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 5000 brocas e 6000 vespas

Ao retomar a condição onde a população inicial de brocas é de 2500 indivíduos, como na figura 20 e aumentando a população de parasitoides, obtemos as figuras 22 e 23. Nestas condições, analogamente com o que foi observado anteriormente, o período de oscilação também aumenta conforme é aumentada a população de *C. flavipes*. Outro ponto interessante a ser observado é o aumento do valor do pico em ambas as populações. Ao aumentar a quantidade de parasitoides do sistema isto tem impacto direto no valor máximo que será atingido de indivíduos na população da praga, apesar de isso ocorrer após decorrido um tempo maior também.

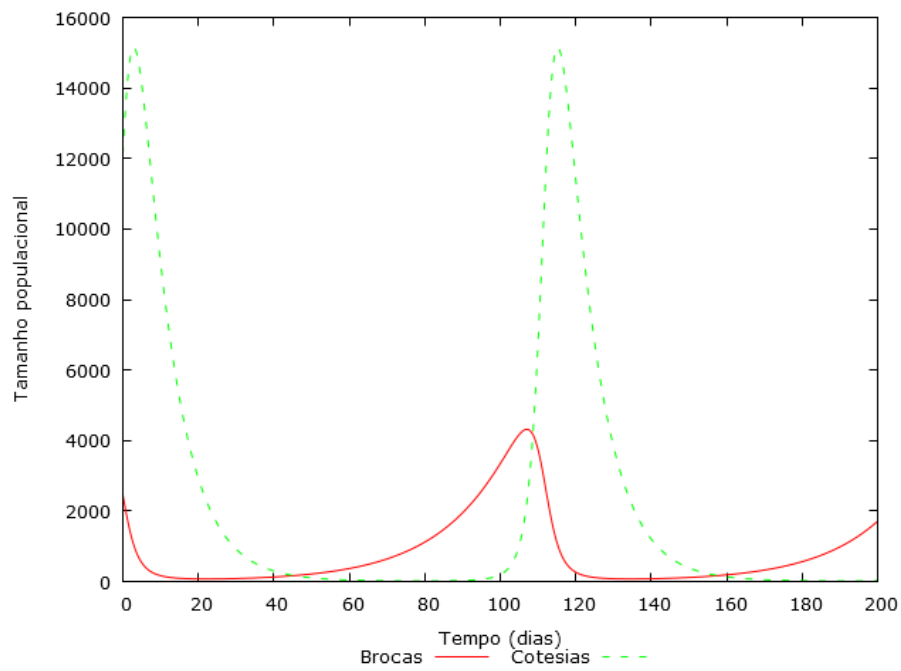


Figura 22: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* e da *Cotesia flavipes* de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 2500 brocas e 12000 vespas

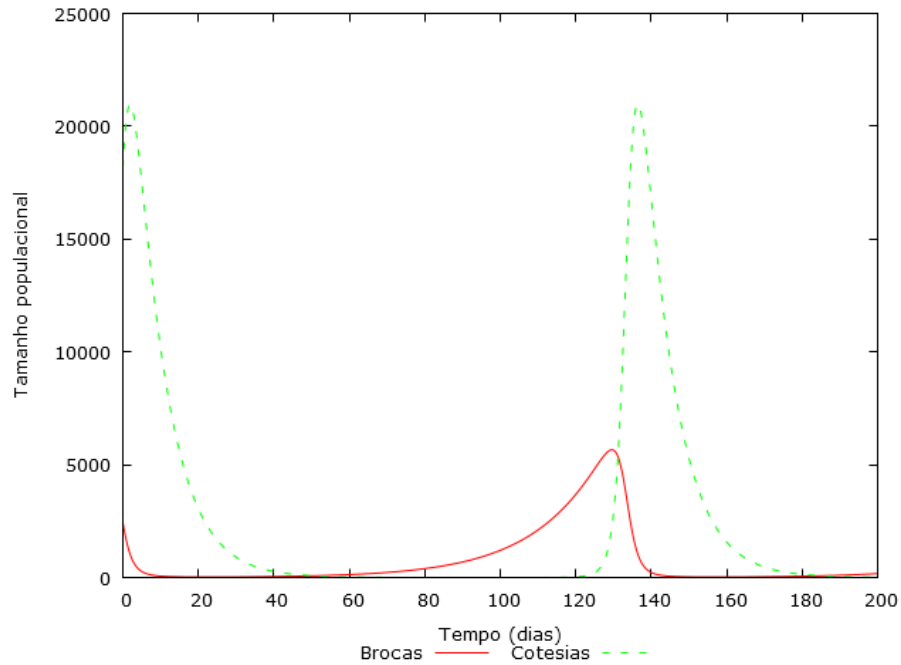


Figura 23: Evolução temporal do tamanho das populações de *Diatraea saccharalis* e da *Cotesia flavipes* de acordo com as equações (12) e (13) com condição inicial de 2500 brocas e 18000 vespas

Observar um aumento no período de oscilação na dinâmica das populações envolvidas

é extremamente importante para formular protocolos de controle da praga. Isto porque, caso deva ser adotada uma política a poucos dias da colheita, por exemplo, um período de oscilação maior poderia ser estrategicamente interessante. No entanto, se a colheita for ser realizada após muito tempo, pode ser estrategicamente interessante se aproveitar dos picos menores da população da praga, mesmo que por um tempo maior.

No entanto, uma forma valiosa para se avaliar a dinâmica considerando apenas o que ocorre às populações, sem analisar o efeito do tempo, pode ser encontrada ao construir-se o plano de fases. O plano de fases é um retrato do que acontece ao descrever as equações 12 e 13 independente do tempo:

$$\frac{dN}{dP} = \frac{N(0,056 - 0,000025P)}{P(0,00012N - 0,1248)} \quad (29)$$

A figura 24 apresenta um ciclo estável, obtido com as condições iniciais de 2500 brocas e 6000 parasitoides. Nesta figura foram traçadas as linhas isoclinais, que retratam a condição para taxa de crescimento populacional nulo. É importante lembrar que o crescimento de uma população é limitado pelas características impostas pela outra, tais como taxa de crescimento e a constante que aparece no termo que retrata os encontros aleatórios. O ponto onde elas se encontram ocorre crescimento nulo para ambas as populações. No entanto, como foi mostrado ao analisarmos a estabilidade do sistema, este ponto não pode ser atingido se o sistema inicia de qualquer outra condição inicial. Se o sistema inicia de qualquer outra condição, o que surge são os ciclos limite, como pode ser observado na figura 24. Estas linhas dividem o ciclo limite em 4 quadrantes, que apresentam características comportamentais distintas para ambas populações. Caso a análise se dê à direita da isoclinal que define o crescimento dos parasitoides, esta população estará crescendo, e o oposto ocorre no lado esquerdo do gráfico. Já se a análise ocorrer acima da isoclinal que rege o crescimento da praga, estes perceberão acréscimos em sua população, e o inverso na região inferior. Sendo assim, na região superior direita, tanto a praga quanto seu parasitoide apresentam abundância de indivíduos e tendência para crescimento populacional. Como esta região favorece o crescimento das vespas, sua população aumenta. No entanto, por estar na porção superior a população da praga apresenta decréscimo. Conforme a população de praga diminui, os recursos para os parasitoides vão se tornando escassos, até que esta passe para a porção esquerda de sua isoclinal. No entanto, a população de vespas na região superior esquerda ainda é muito grande para permitir que a praga gere acréscimo indivíduos. Isto gera uma situação onde ambas as populações estejam diminuindo. Quando a população de parasitoides diminui o suficiente para que seu tamanho atinja os valores da região inferior esquerda a população da praga pode então começar a crescer, já que não existem mais uma quantidade suficiente destes para suprimir seu crescimento.

Conforme a população da broca cresce, o último quadrante do gráfico é atingido. Nesta porção existe abundância de praga suficiente para que os parasitoides retomem seu crescimento, ao mesmo tempo que a baixa quantidade deste ainda não é suficiente para inibir o crescimento desta. Isto acontece até que existam brocas e vespas suficientes para que o primeiro quadrante seja novamente atingido, fechando assim o ciclo.

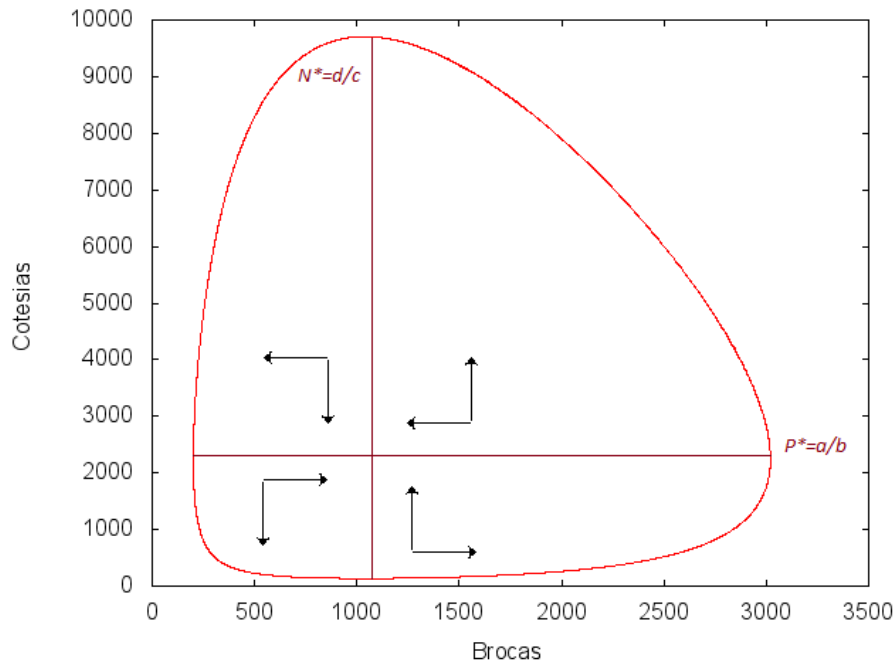


Figura 24: Plano de fases da interação entre populações de *Diatraea saccharalis* e da *Cotesia flavipes* com condição inicial de 2500 brocas e 6000 vespas

Na figura 25 são apresentados cenários com 2500 brocas e quantidades diferentes de parasitoides inicialmente. Vê-se aqui que cada conjunto de condições iniciais diferentes gera um novo ciclo estável. É ainda importante notar que qualquer quantidade de brocas e parasitoides inicialmente introduzidos em qualquer ponto sobre um destes ciclos fará com que o ciclo seja estabelecido. Sendo assim, o ciclo obtido com 2500 brocas e 6000 parasitoides poderia também ser obtido ao se introduzir esta quantidade de parasitoides quando cerca de 300 hospedeiros estavam presentes no sistema. Analogamente, o mesmo ciclo também seria estabelecido se cerca de 520 vespas fossem introduzidas ao serem observadas 2500 brocas no sistema.

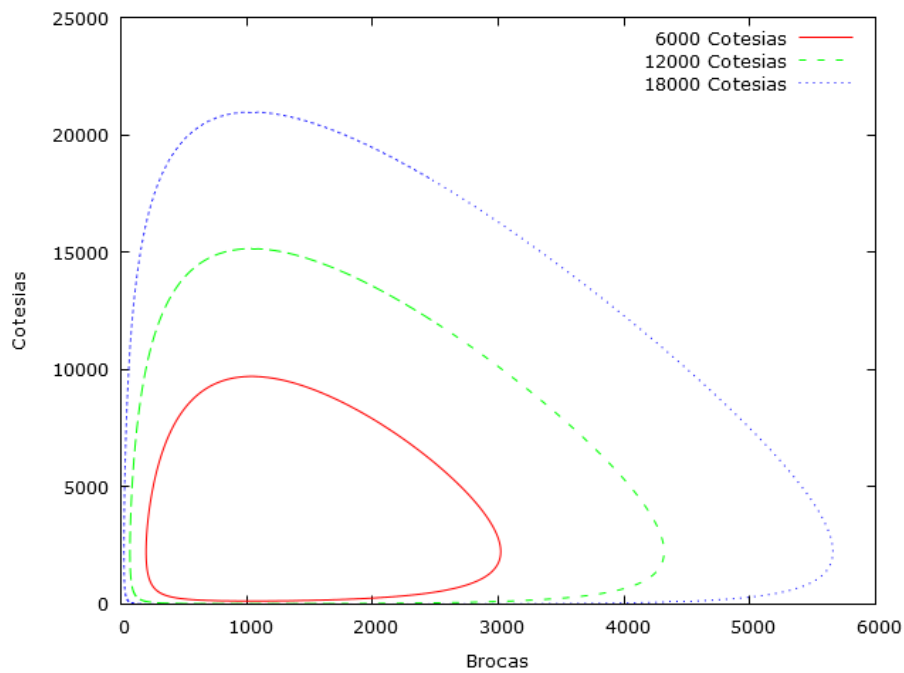


Figura 25: Plano de fases da interação entre populações de *Diatraea saccharalis* e da *Cotesia flavipes* com condição inicial de 2500 brocas e variação na quantidade inicial de vespas.

No entanto, estabelecer um certo ciclo através de condições iniciais diferentes pode acarretar tanto em alguma estratégia prática útil no campo, quanto inclusive estratégias que sejam economicamente prejudiciais ao produtor. Esta avaliação das estratégias que poderiam ser formuladas com base nesse modelo serão apresentadas nas seções posteriores.

3 Simulação computacional da dinâmica *Diatraea saccharalis* X *Cotesia flavipes*

A simulação computacional entra como grande aliado no entendimento do problema, já que experimentos em campo dispendem muito tempo (cerca de pelo menos 1 ano se for considerado todo o ciclo da cana-de-açúcar), podem ser custosos e através dos métodos convencionais ainda não é possível avaliar o crescimento populacional diário da praga e método de controle.

Como alternativa para solucionar estas questões, a utilização de simulações computacionais se apresenta como um intermediário entre experimentos em campo e modelos matemáticos, comprometendo um pouco dos aspectos realísticos do campo e obtendo em troca a evolução temporal diária das populações envolvidas.

3.1 Configuração do início da simulação utilizada

A simulação foi construída em linguagem C++ e em Python utilizando o paradigma de orientação à objeto, possibilitando a criação de classes de objetos “brocas” e “cotesias”, que possuíam como características o tempo de vida, número de filhos e gênero. Na configuração inicial de cada simulação a proporção entre machos e fêmeas para cada uma das populações era determinada sendo que cada indivíduo tinha o gênero escolhido de forma aleatória com base nas proporções encontradas na literatura. Vários destes parâmetros apresentavam discordância entre autores e a escolha do conjunto utilizado como padrão foi feita de maneira arbitrária neste trabalho, deixando outros conjuntos expostos comparativamente em uma quantidade menor de análises aqui presentes. O número de dias que o indivíduo viveria bem como quantidade de filhos que cada fêmea teria era determinado através de distribuições gaussianas, implementadas através da biblioteca “random.h” incluída no visual studio 2015, com valores médios e desvio padrão também determinados pela literatura. Para cada grupo de simulações, 200 repetições eram realizadas e o valor médio apresentado nos gráficos. Para diminuir a poluição visual, as barras do desvio padrão obtidos foram omitidas, excluindo os casos onde a análise dele se mostrava necessária.

3.2 Descrição da interação entre parasitoide e hospedeiro na simulação

Na figura 26 vemos como ocorre a interação entre as brocas e cotesias na simulação. A interação checa todos os indivíduos sequencialmente e realiza testes. Inicialmente é

gerado um sorteio para descobrir se o indivíduo morreu por algum fator aleatório. A taxa para a morte aleatória é fixada sempre no início da simulação e é uma informação levada por cada indivíduo. Da mesma maneira a expectativa de vida é um parâmetro fixado na criação do indivíduo e levada com este enquanto estiver vivo. Caso o indivíduo não morra por algum fator aleatório e consiga completar seu ciclo de vida completo, no último dia de vida ele poderá deixar descendentes a depender se ele está hábil para isso e é realizado de forma diferente entre parasitoides e hospedeiros. Para a população de brocas, se a fêmea é fértil ela pode gerar filhos. Para os parasitoides, além de ser uma fêmea fértil, a probabilidade de deixar descendentes é dependente da quantidade de lagartas da broca presentes no sistema multiplicado por um fator de predação. Quando o parasitoide deixa filhos ele mata uma lagarta sorteada aleatoriamente. Caso o indivíduo seja macho, nada além da morte do indivíduo ocorre para ambas as populações no último dia de vida.

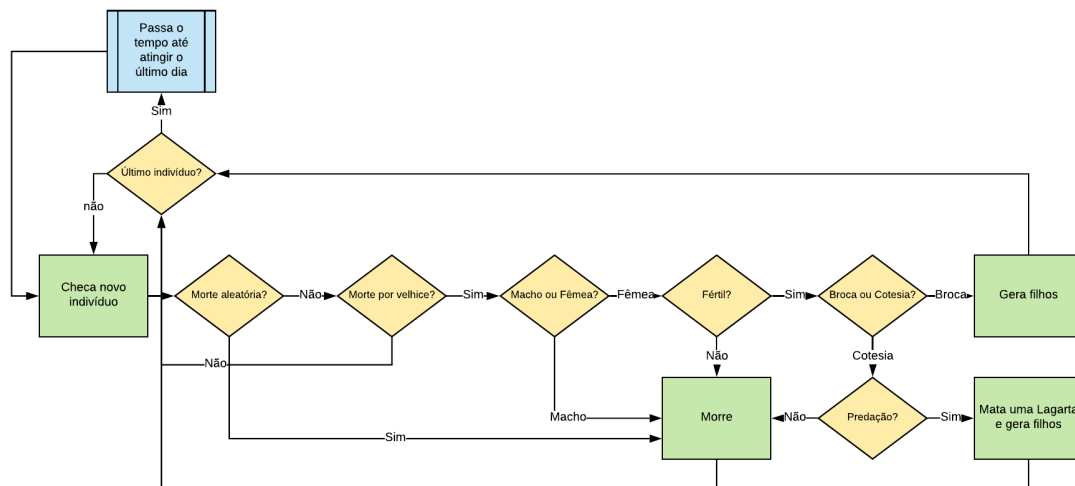


Figura 26: Descrição da simulação

3.2.1 Parâmetros utilizados para a *Diatraea saccharalis*

Para a implementação computacional da dinâmica, foi necessário obter alguns parâmetros a partir da literatura para os indivíduos. Não existe um consenso entre todos os valores que caracterizam o ciclo de vida broca, e um ponto importante a ser considerado é estas podem se adaptar à região onde se encontram presentes e assim alterar seus ciclos de vida. Sendo assim, adotaremos o conjunto de parâmetros a seguir apresentados como sendo o padrão para a simulação e estudaremos qual o efeito de parâmetros diferentes encontrados em trabalhos diferentes posteriormente. O ciclo de vida da broca foi obtido através do trabalho de Dinardo-Miranda (2008) [81] como sendo de 70 ± 2 dias. Como o objetivo principal da simulação era observar o comportamento das lagartas, seus ciclos de

vida foram resumidos em 3 fases: ovos, nos primeiros 10 dias; lagartas, nos próximos 53; e por último adultos, nos últimos 7 dias. A proporção entre machos e fêmeas foi fixada em 1:1 e os filhos gerados pelas fêmeas adultas são 60 ± 20 indivíduos. A taxa de morte aleatória diária foi adotada arbitrariamente como sendo de 3%.

3.2.2 Parâmetros utilizados para a *Cotesia flavipes*

Analogamente à situação apresentada com a *D. saccharalis*, não existe um consenso entre os parâmetros biológicos da *C. flavipes* na literatura. No entanto, como o objetivo deste trabalho não é descrever cada situação presente no campo, e sim montar o ferramental necessário para a descrição e otimização dos problemas presentes no controle de pragas na cana, os parâmetros serão arbitrariamente escolhidos para a utilização na simulação. O ciclo da *C. flavipes* foi usado como 24 ± 4 dias [81], onde consideramos que só no último dia deste o parasitoide pode gerar filhos através do parasitismo de uma broca. A probabilidade do parasitismo ocorrer depende do tamanho da população de lagartas da broca presentes multiplicado por um valor arbitrário, o que pode ser visto através da equação 30

$$P_{\text{parasitismo}} = E_C \frac{T_L}{T_C} \quad (30)$$

onde $P_{\text{parasitismo}}$ é a probabilidade do parasitismo ocorrer, T_L é o total de lagartas e T_C o total de cotesias presentes no sistema no momento da verificação, e E_C é uma constante que mede a eficiência do parasitoide. Como condição padrão foi adotado um parasitoide altamente eficiente, sendo o coeficiente $E_C = 10$. O tamanho da prole da vespa foi adotado como 28 ± 19 e a proporção entre machos e fêmeas foi adotada como 1 : 2,13 [82]. Como o interesse do trabalho é a simulação da situação de inserção dos parasitoides artificialmente no campo, a idade inicial de todos eles foi estimada como sendo 3 dias antes da morte destes. Por último, a taxa de morte aleatória diária foi adotada como sendo de 5%.

3.3 Análise dos resultados

Antes de avaliar a interação entre a população de *D. saccharalis* e *C. flavipes*, será importante avaliar como cada uma dessas populações evolui isoladamente. Particularmente, a interação de nosso maior interesse é a de brocas, que pode ser observada na figura 27. Nela vemos a população total de brocas e a evolução de machos e fêmeas, que crescem de forma igualitária, já que a literatura apresenta taxa de 1:1 entre eles. Porém o fato mais curioso nesta imagem é a presença de ciclos de cerca de 70 dias, correspondendo ao ciclo de vida de cada broca. A dinâmica apresenta uma população inicial pequena, sofrendo

um crescimento na metade do ciclo e subsequente decréscimo, atingindo valores maiores que o ponto de partida.

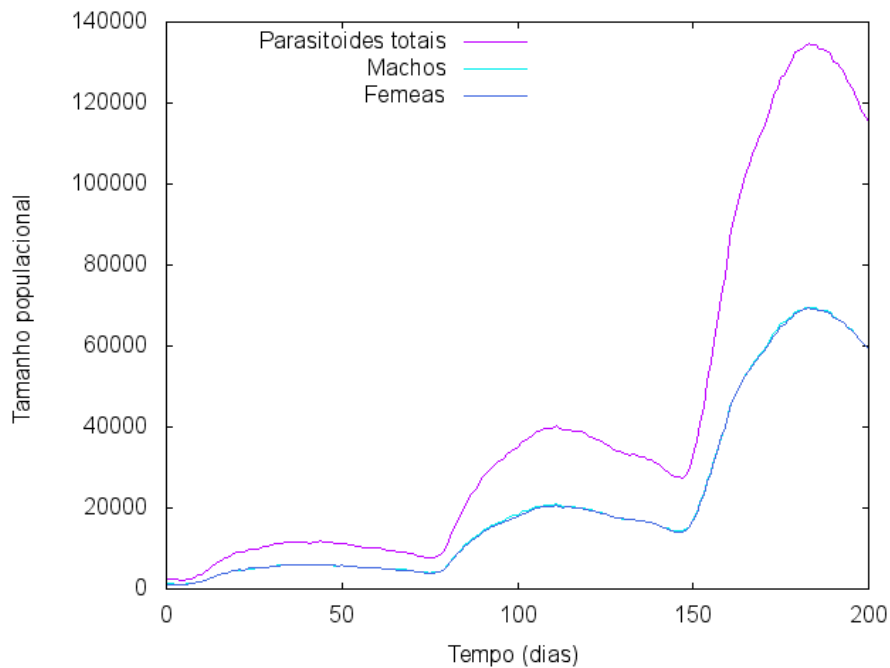


Figura 27: Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas

Para contribuir para o entendimento da existência destes ciclos podemos dividir a evolução da população total entre as fases de ovos, lagarta e o que chamaremos aqui de fase de adulto, agregando as fases de pupa e mariposa nesta última. A figura 28 retrata tal situação, porém considerando que os indivíduos só morrem de velhice, ao completarem seus ciclos de vida completos. É possível perceber que a população de indivíduos adultos é sempre muito pequena, quando comparada com as outras. Isto ocorre devido ao fato de ser a última fase do ciclo de vida, onde os indivíduos são nela inseridos cerca de 7 dias antes de suas mortes. Na figura 29 podemos observar que a quantidade de indivíduos mortos num determinado dia é constante, entretanto, a quantidade de novos indivíduos oscila bastante no decorrer dos dias, isto devido ao desvio padrão, onde cada adulto gera em média 60 ± 20 novos indivíduos. Contudo, esta oscilação se dá em torno de um certo valor médio, cerca de 60 vezes o número de fêmeas adultas que morreram.

Ao observarmos a figura 28 e considerando o ciclo de vida com 70 dias, tendo a população uma distribuição uniforme para a idade, aproximadamente 10% dos indivíduos iniciais estariam fase adulta. No entanto, a cada novo dia novas lagartas passam para a fase adulta, o que inicialmente significaria cerca de $\frac{1}{70}$ da população total. Cada um destes indivíduos que passam a serem adultos, se forem fêmeas, ovopositam uma média

de 60 ovos, efetivamente aumentando a população total da espécie. Vale lembrar que a população inicial teve a distribuição de idades feita de forma uniforme, onde a fase de ovo se dava nos 10 primeiros dias, o que representaria $\frac{1}{7}$ da população total inicial. Com o acréscimo de 60 ovos em média para cada adulto que deixa o sistema, a probabilidade de se encontrar um ovo aumenta significativamente após os primeiros dias. Assim, conforme os dias vão passando, os primeiros ovos passam para a fase de lagarta, e isto ocorre até que a quantidade de ovos que entra no sistema é igual a quantidade de ovos que vira lagarta. Após o ciclo dos primeiros ovos gerados dentro do sistema se completa, este se repete, o que pode ser visto na figura 30.

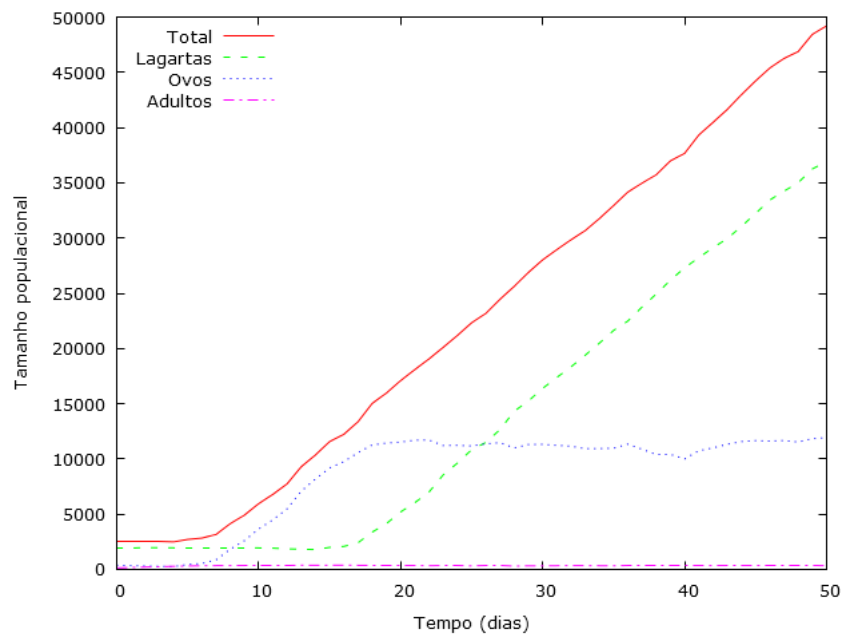


Figura 28: Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas

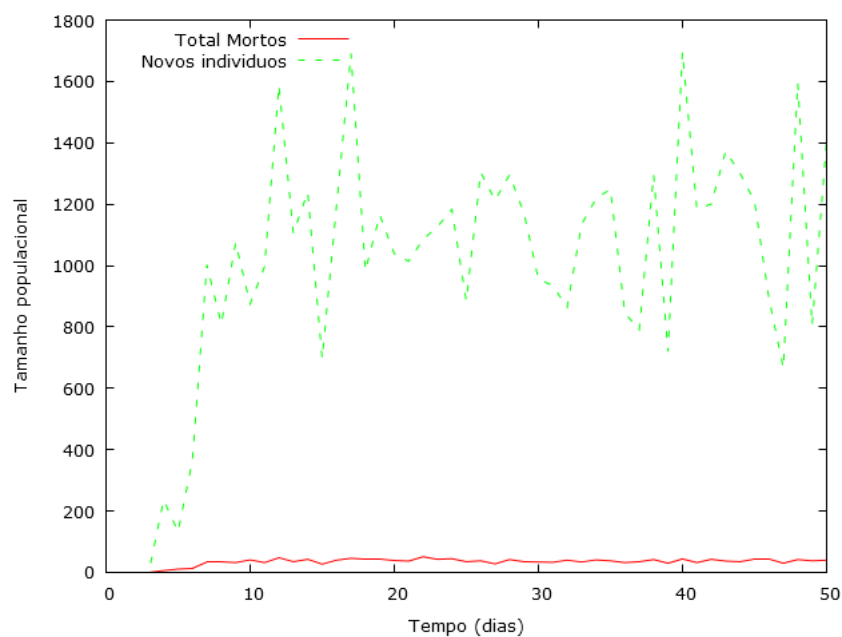


Figura 29: Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas

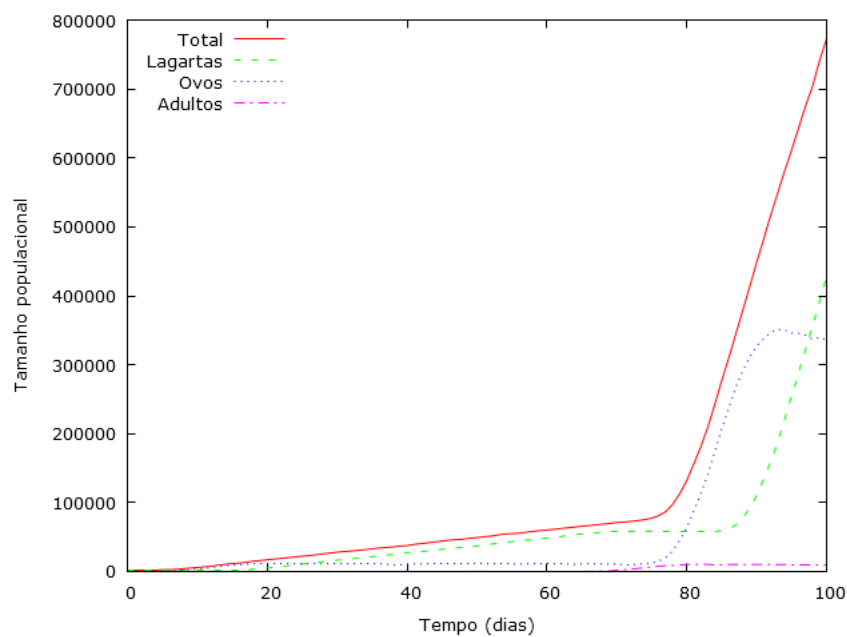


Figura 30: Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas

É importante lembrar que na natureza a situação descrita anteriormente, onde o indivíduo só morre ao completar o seu ciclo de vida completo, pode muitas vezes não ocorrer. Para simular esta condição, foi estabelecida uma probabilidade do indivíduo morrer a cada dia, P_d . Esta probabilidade foi inicialmente fixada em 3% ao dia, o que faria com que após

decorrida uma quantidade de dias, t_d , a probabilidade de o indivíduo estar vivo, P_v , é dada por

$$P_v = (1 - P_d)^{t_d} \quad (31)$$

Sendo assim, a probabilidade de um indivíduo estar vivo após 70 dias é de aproximadamente 12%. Isto contribui para o entendimento da dinâmica apresentada na figura 27, onde a população total apresenta valores máximos e mínimos no ciclo esperado para cada geração. A figura 31 apresenta a contribuição dos dois tipos de morte implementadas na dinâmica. Nesta figura é possível ver que para a condição imposta de 3% de morte por fatores aleatórios diariamente, $P_d = 0.03$, esta é muito mais significativa quando comparada aos indivíduos que morrem ao completarem seus ciclos de vida completos. É interessante notar que a morte aleatória apresenta valores maiores nos períodos com mais indivíduos e nos períodos onde a morte por “velhice” ocorre ela é menor. Tendo em vista que quanto maior a quantidade de indivíduos, mais fácil será visualizar o efeito da probabilidade P_d , podemos então comparar as figuras 30 e 32. Vemos nesta última que, ao contrário do que acontecia na situação onde $P_d = 0$, os indivíduos na fase de ovos não atingem mais uma população constante. Isto ocorre por dois motivos, o primeiro é a morte dos indivíduos nesta fase e o segundo é decorrência da morte de indivíduos das outras fases, principalmente adultos e lagartas mais velhas, que não mais poderão completar seus ciclos e deixar descendentes.

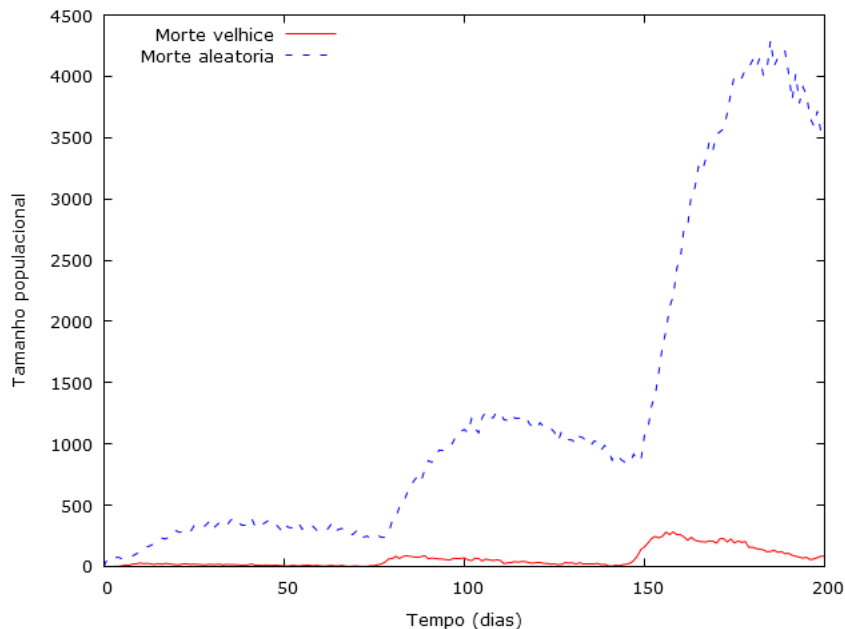


Figura 31: Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas

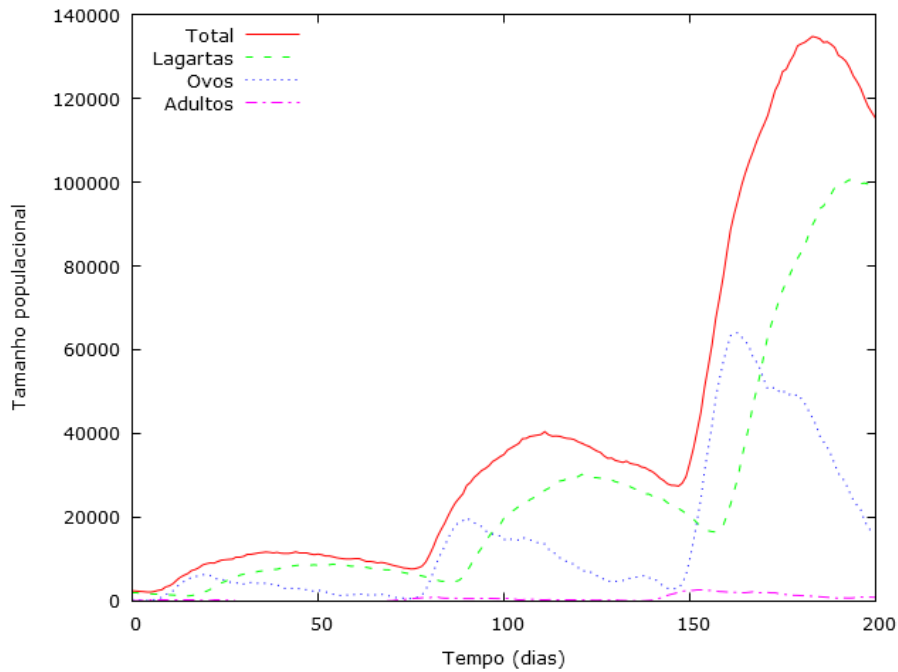


Figura 32: Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas

Como estamos considerando a população de parasitoides como sendo especialistas que não vivem na ausência dos hospedeiros, a descrição desta população isoladamente é um pouco mais simples. A figura 33 apresenta a situação onde 6000 vespas foram introduzidos com idades seguindo uma distribuição uniforme. Vemos que em menos de 30 dias a população foi inteiramente extinta. É possível também perceber que a população de machos e fêmeas não apresenta o mesmo tamanho, devido à condição inicial imposta onde foi considerado que 70% dos indivíduos é fêmea. Ao considerar este cenário onde os parasitoides estão isolados e no processo de extinção, a figura 34 pode mostrar a parcela da população que completa seu ciclo de vida (sem reprodução) e quais indivíduos morrem por fatores aleatórios antes disto. É possível ver que logo nos primeiros dias uma grande quantidade de indivíduos morre por velhice. A probabilidade de um indivíduo estar vivo após um tempo t_d é novamente dada pela equação 31, sendo que neste caso foi utilizado $P_d = 0.05$, o que faria a probabilidade $P_v = 28\%$ após 25 dias. No entanto, com esses parâmetros utilizados, a quantidade de indivíduos mortos por cada sistema é praticamente equivalente, sendo a morte por velhice, cerca de 3100 indivíduos, um pouco maior que a aleatória. É importante notar que após cerca de 15 dias os indivíduos presentes no sistema são praticamente todos adultos, os quais eram muito jovens no tempo 0.

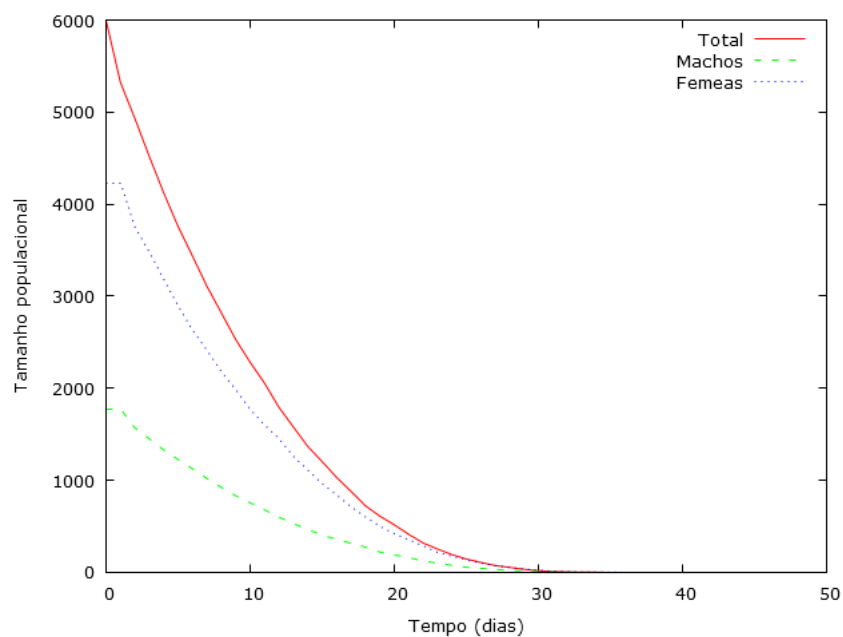


Figura 33: Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas

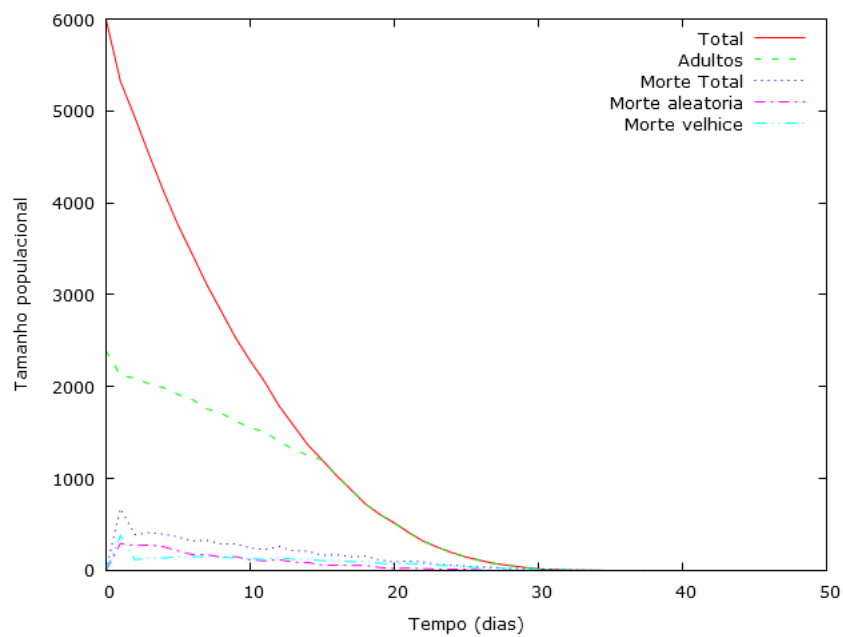


Figura 34: Evolução temporal da simulação com evolução da população de machos e fêmeas

Eficiência do parasitoide A figura 35 apresenta a interação entre as populações de *D. saccharalis* e *C. flavipes* obtidas através da simulação multi agentes. Na situação apresentada, o parasitoide presente é pouco eficaz, apresentando eficiência $E_C = 2$. Neste cenário

podemos observar que existe coexistência das populações dentro do período estimado. Para as condições utilizadas a população de brocas apresenta logo após a inserção dos parasitoides, porém após poucos dias da inserção a população de brocas cresce novamente, atingindo o dobro da população inicial em cerca de 20 dias após o início da simulação. Após atingir o valor máximo, a população dos hospedeiros começa a decrescer e após cerca de 70 dias o ciclo se fecha com esta atingindo os valores iniciais. O efeito do controle biológico nesta situação pode ser observado nos valores máximos atingidos, que a cada ciclo atingem valores menores. No entanto, a coexistência entre os indivíduos não ocorre para os casos onde o predador é mais eficiente, como pode ser visto na figura 36 para $E_C > 4$. Vemos nesta figura que conforme a eficiência do parasitoide aumenta, o tempo para a extinção da broca diminui. Porém o tamanho populacional máximo atingido não diminui consideravelmente. No entanto, vale ressaltar que a população de *C. flavipes*, que apresenta pouca diferença no primeiro pico máximo, na sua segunda geração vê-se um aumento no número de indivíduos conforme E_C aumenta.

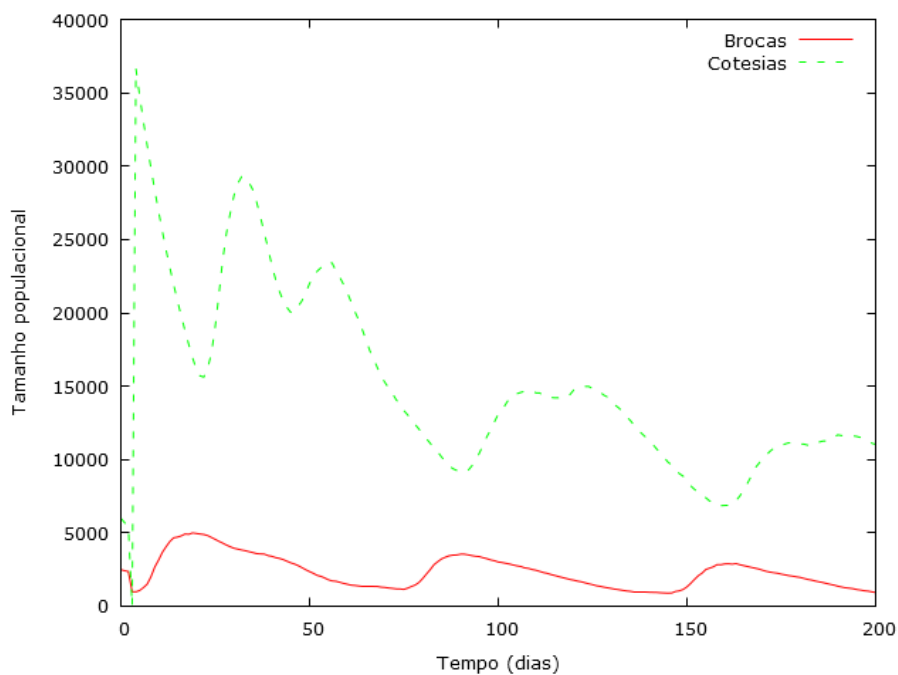


Figura 35: Evolução temporal da simulação com interação da populações de praga e parasitoides com eficiência de parasitismo $E_C = 2$

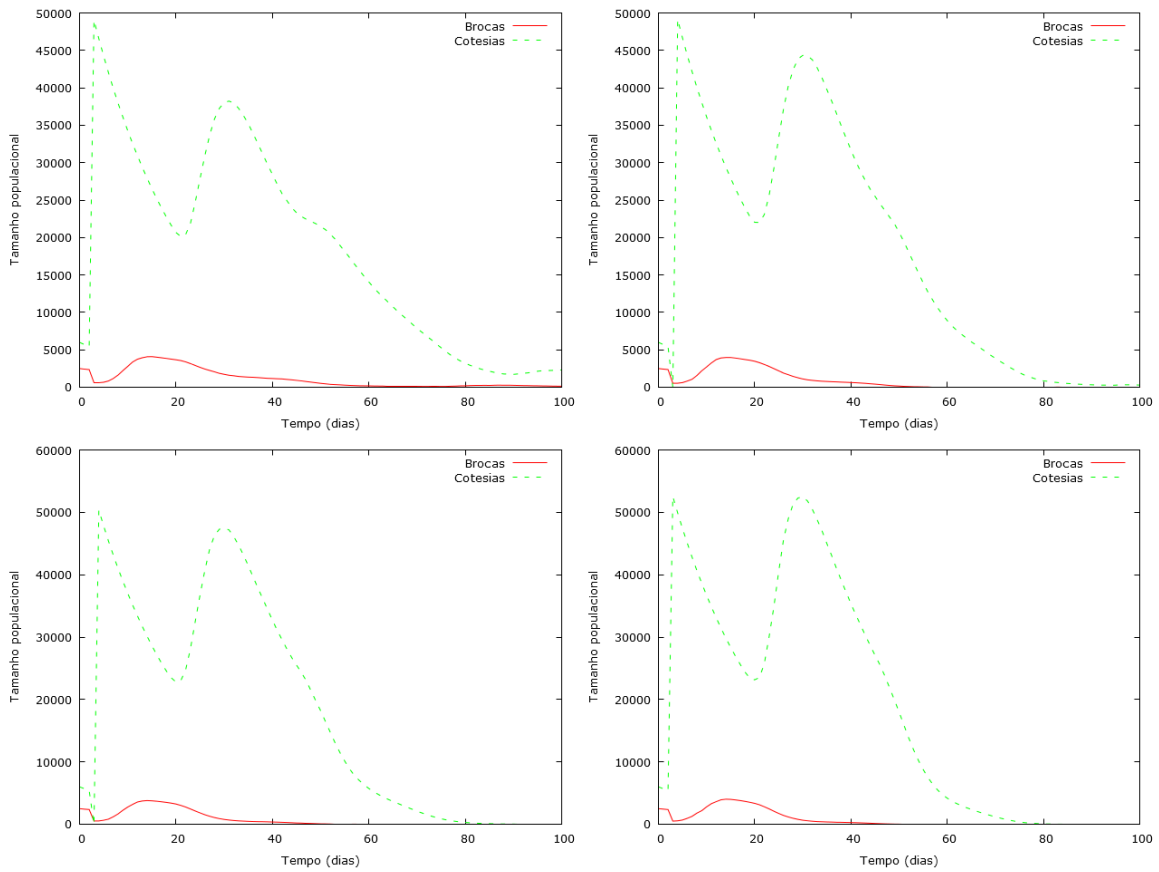


Figura 36: Evolução temporal da simulação com interação da populações de praga e parasitoides com eficiência de parasitismo: canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$

De forma a explicar um pouco mais a dinâmica, entender como se dão os processos de morte dos parasitoides se torna importante. Estes processos estão descritos na figura 37, onde vemos a situação para $E_C = 2$, onde ocorre coexistência entre as populações para o tempo avaliado. Vemos nos primeiros dias um grande pico de mortes por indivíduos que completaram seus ciclos de vida. Isto é a característica da dinâmica adotada, onde a vespa é colocada no sistema muito próxima do momento do parasitismo ocorrer. Porém, como os indivíduos inseridos morrem logo nos primeiros dias, pelos próximos cerca de 20 dias todas as mortes ocorridas serão devidos aos fatores aleatórios, com a probabilidade diária $P_d = 5\%$, anteriormente fixada. Nas situações com mais indivíduos, mortes por fatores aleatórios são mais comuns. Contudo, após 20 dias do início da simulação novamente ocorrem a morte dos indivíduos que conseguiram atingir seus ciclos de vida completos. Vale ressaltar que após cerca de 100 dias as mortes dos indivíduos com ciclos completos começam a ser um pouco menos localizadas, o que pode ser explicado pela expectativa de vida diferente para cada indivíduo.

Na figura 38 é retratado o efeito de E_C sobre a morte dos parasitoides. É possível

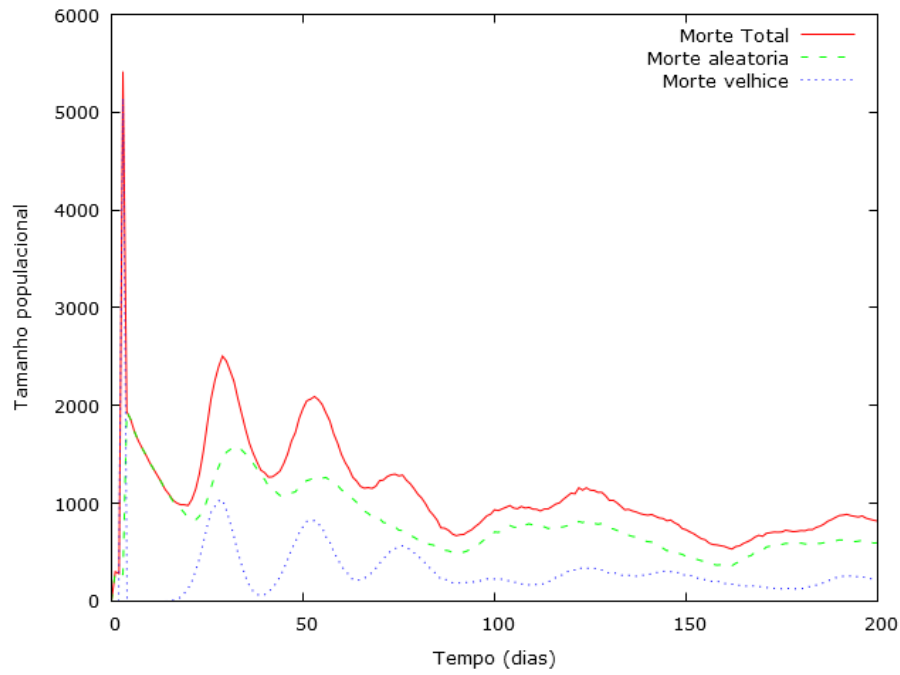


Figura 37: Evolução temporal da simulação com interação com divisão das mortes dos indivíduos de *C. flavipes*, com $E_C = 2$

então observar que quanto maior E_C mais rapidamente as mortes dos indivíduos acaba, o que foi explicado pela ausência de hospedeiros no sistema. Vê-se também que quanto mais eficaz o parasitoide, maior os picos dos indivíduos que conseguem completar seus ciclos de vida. Porém, como as vespas são mais abundantes quando E_C é maior, mais mortes aleatórias vão ocorrer também. É interessante notar que para E_C maiores, ocorrem casos onde a morte aleatória é menos expressiva que a morte por velhice

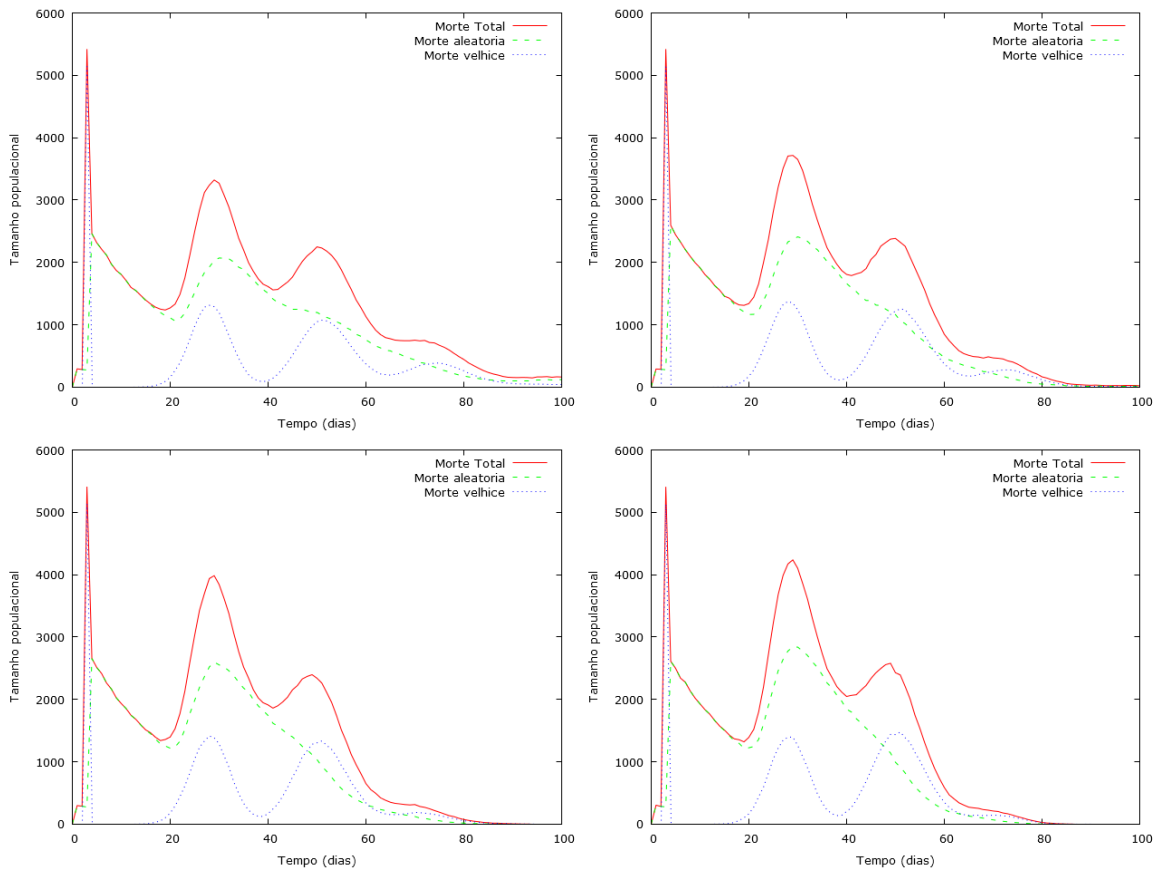


Figura 38: Evolução temporal da simulação com divisão das mortes dos indivíduos de *C. flavipes*: canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$

O parasitismo neste cenário apresentado só ocorre quando a broca está na fase de lagarta. A figura 39 apresenta a população de lagartas e o parasitismo. É possível observar que início da dinâmica, onde a maior parte das brocas estão na fase susceptível ao ataque dos parasitoides, a população de lagartas sofre uma grande baixa. No entanto, o efeito supressor neste caso não dura por muito tempo, sendo que a população de lagartas logo recomeça a crescer. Ao comparar este cenário com a situação sem parasitoides, retratada na figura 32 vê-se que o período ciclo das brocas não é expressivamente alterado pela inserção dos parasitoides. Contudo, os picos desta população são grandemente reduzidos, o que mostra a eficácia do controle. Ao empregar-se parasitoides mais eficientes, é possível observar pela figura 40 que tanto os picos de valor máximo quanto o tempo para atingir valor mínimo de lagartas presentes é reduzido.

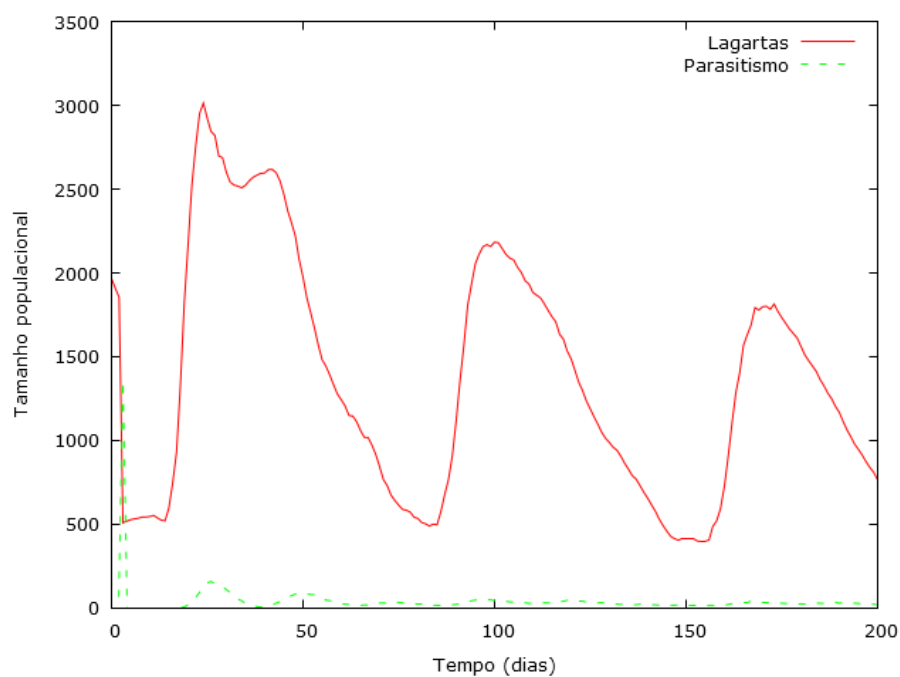


Figura 39: Evolução temporal da simulação com interação descrevendo a população de lagartas e parasitismo, com $E_C = 2$

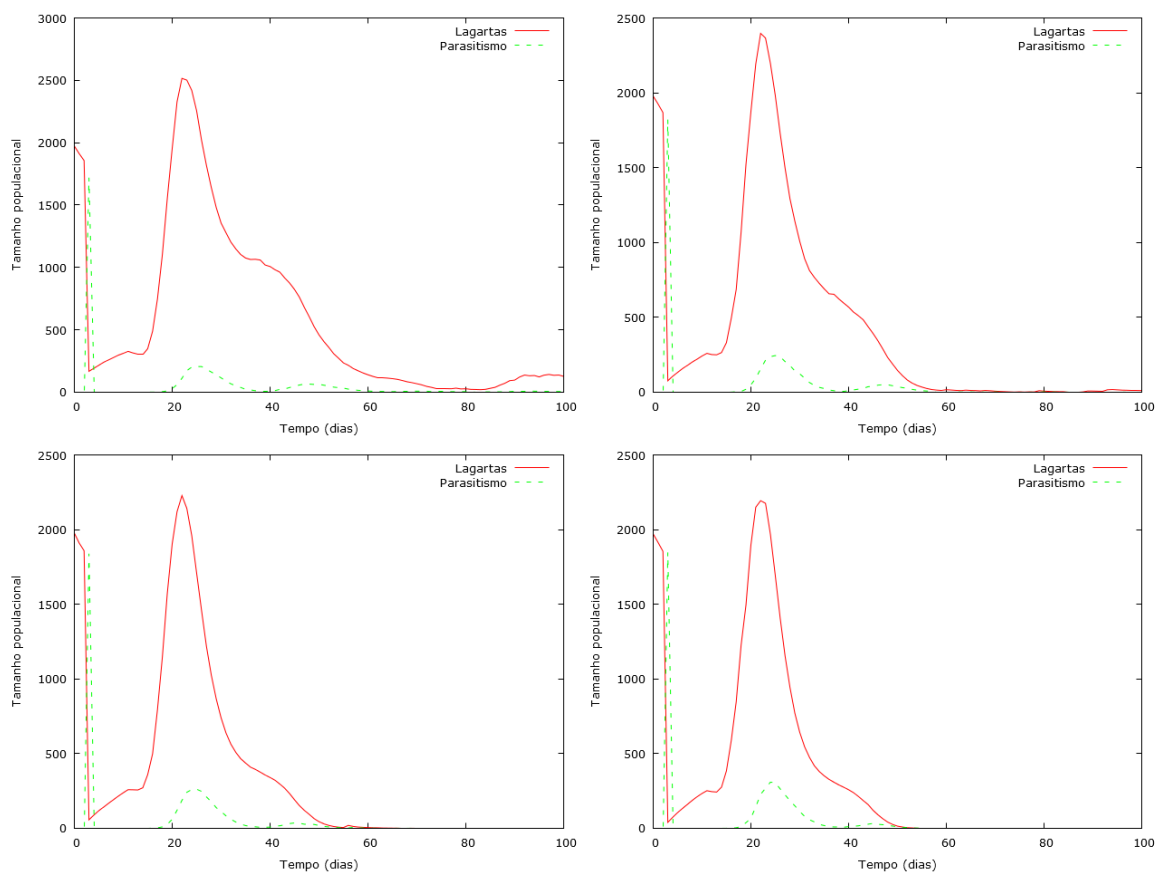


Figura 40: Evolução temporal da simulação com interação descrevendo a população de lagartas e parasitismo: canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$

Uma questão importante a se observar é a contribuição de cada tipo de morte das brocas na dinâmica. Inicialmente o que pode ser observado na figura 41 é a contribuição quase que total da morte por parasitismo. Porém, após este primeiro evento, morte por velhice ocorre, em escala baixa e morte por fatores aleatórios se apresentam como mais expressiva, novamente acompanhando a disponibilidade de indivíduos no sistema. É possível ver que a cada cerca de 20 dias inicialmente, o parasitismo dá uma contribuição expressiva para o total de mortes, o que começa a ficar mais uniforme no tempo a partir de 100 dias. Neste sistema, a população de broca só pode crescer quando uma morte por velhice ocorre, o que vemos ser um evento relativamente raro, sendo que o encurtamento do período onde ela ocorre diminui conforme o tempo passa, indicando que a população está direcionada ao extermínio completo se não houver influência externa. O que pode ser visto na figura 42 é a grande contribuição do parasitismo para o total de mortes, principalmente ao adotar-se parasitoides mais eficazes. Esta é então a maior contribuinte para a morte da praga após os primeiros 20 dias, o que não era observado no caso onde $E_C = 2$.

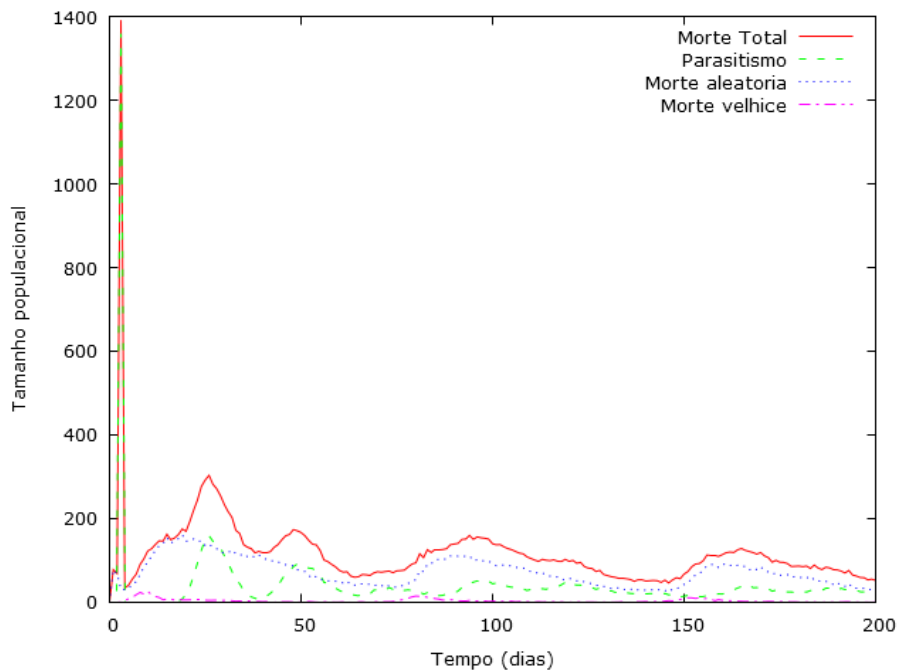


Figura 41: Evolução temporal da simulação com interação descrevendo as mortes da população de *D. saccharalis*, com $E_C = 2$

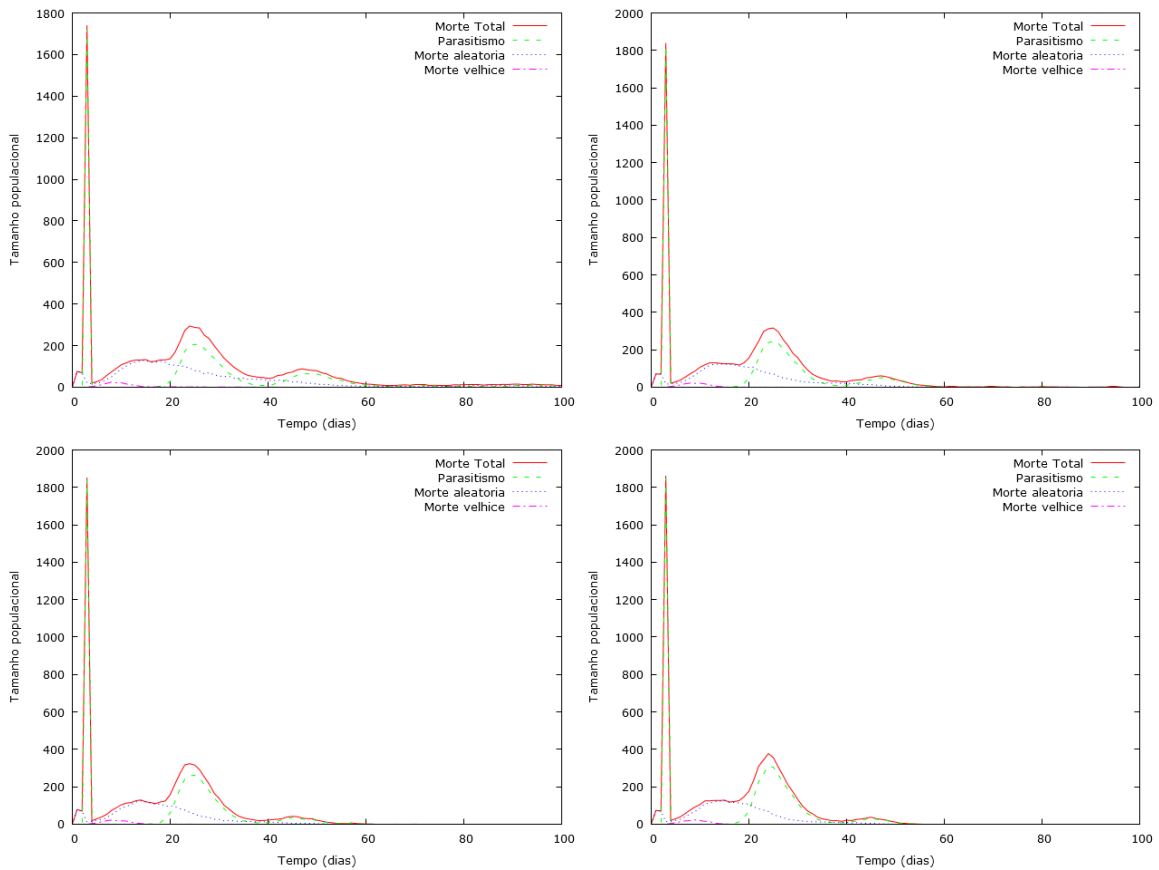


Figura 42: Evolução temporal da simulação com interação descrevendo as mortes da população de *D. saccharalis*: canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$

Por fim, a população de brocas pode ser observada em suas fases de vida diferentes na figura 43. Vê-se que inicialmente ocorre uma grande queda na população total, o que foi anteriormente explicado pela ação do parasitismo, sendo que no ponto mínimo, metade da população presente é de lagartas e a outra metade é constituída quase que igualmente por adultos e ovos. Estas duas últimas fases agem como uma barreira protetora da população, já que o parasitoide não atua sobre elas. É possível observar que a população total nos primeiros 20 dias tem sua maior expressão na fase de ovos. Porém é importante notar que mesmo quantidades muito pequenas de adultos geram crescimentos muito rápidos.

Na figura 44 a população de lagartas apresenta menor contribuição das lagartas quando comparadas ao caso anterior, com $E_C = 2$. É curioso notar que quanto maior a eficiência do parasitismo mais rapidamente o primeiro pico da população de ovos e adultos entra em extinção. Isto ocorre devido ao maior controle inicial das lagartas mais velhas, que desta forma não completam mais seus ciclos de vida. Outro ponto importante a se considerar é a presença do pico máximo de lagartas com cerca de 25 dias após a inserção dos parasitoides e o baixo valor de brocas após 70 dias em qualquer um dos casos considerados.

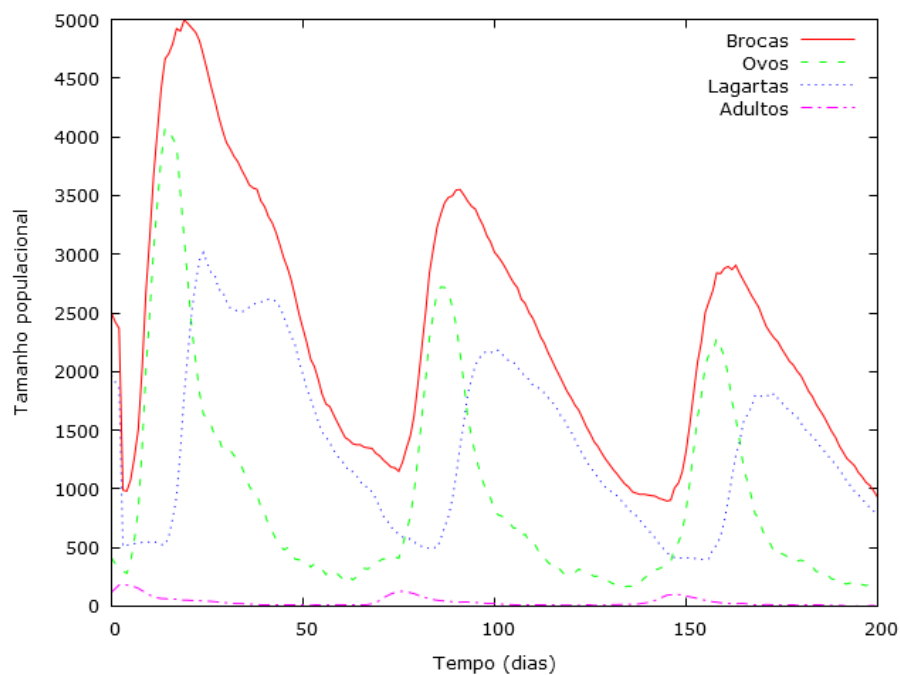


Figura 43: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da *D. saccharalis*, com $E_C = 2$

Este resultado é importante ao realizar levantamentos, já que a realização destes com 25 dias da inserção do controle pode gerar uma estimativa errônea quanto à eficácia do parasitoide. Por outro lado, realizando o levantamento com cerca de 70 dias também pode gerar uma estimativa ineficaz, já que nesta situação se encontra um ponto de mínimo, o que geraria uma representação falsa com relação à eficácia da *C. flavipes*. Idealmente, a partir das situações apresentadas aqui podemos estimar que a época ideal para realizar um levantamento de estimativa da eficácia do parasitoide, através da quantidade de lagartas presentes no sistema, é obtida entre 40 e 50 dias. Caso o levantamento neste período apresente populações estimadas com valor próximo ao inicial, a eficácia do parasitoide pode então ser questionada.

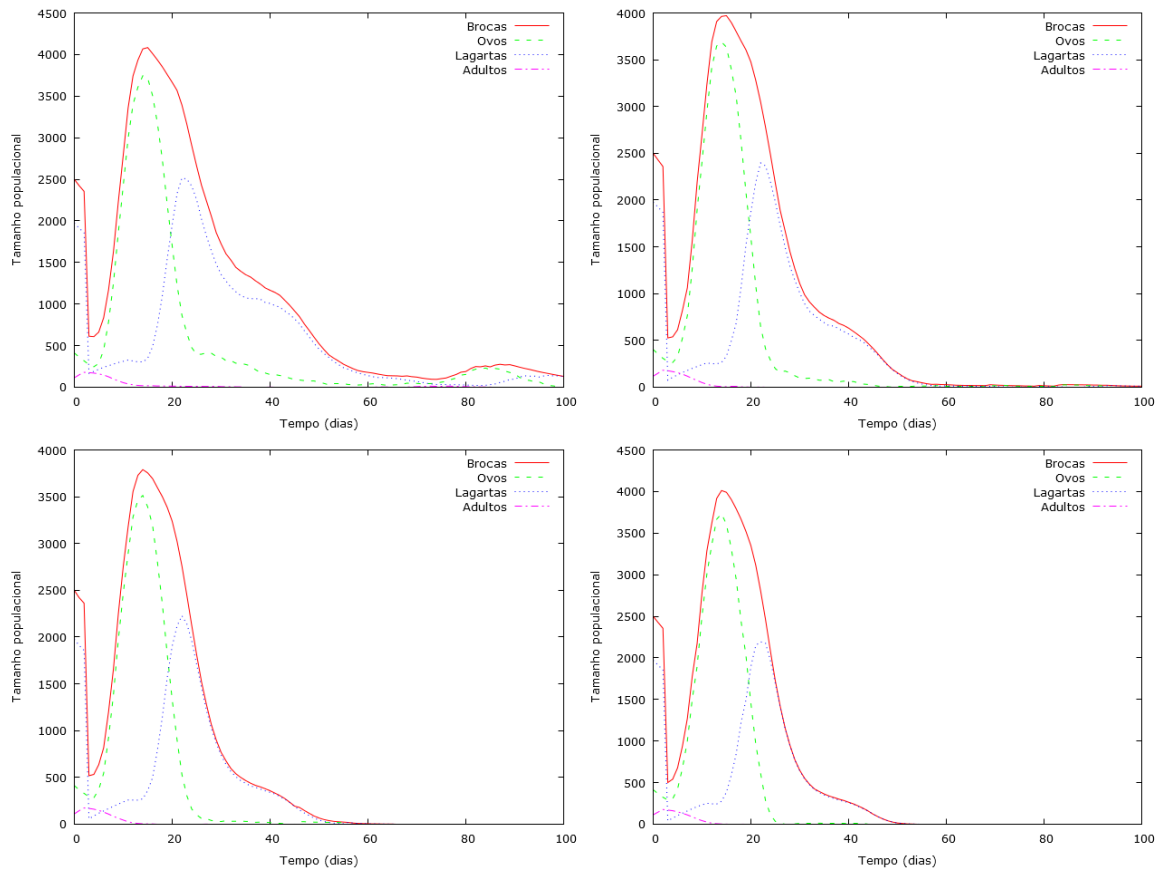


Figura 44: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da *D. saccharalis*: canto superior esquerdo $E_C = 4$; superior direito $E_C = 6$; inferior esquerdo $E_C = 8$; inferior direito $E_C = 10$

Influência da quantidade de vespas inseridas A figura 45 apresenta a situação onde a eficiência da vespa é de $E_C = 2$, sendo que foram introduzidas 6000 parasitoides quando foram identificadas 1000 brocas. Esta situação, onde a vespa é pouco eficaz, gera uma dinâmica de coexistência durante o período avaliado. Neste cenário a quantidade de ovos no primeiro pico após o parasitismo entrar em ação é de quase o dobro a quantidade de brocas inicialmente encontradas no sistema. Esses ovos com o tempo geram uma população de lagartas também maior que a quantidade inicial de brocas totais. É importante notar que as pequenas reduções da quantidade de lagartas, que podem ser observadas próximas ao pico destas, podem também ser explicadas pela quantidade de parasitoides adultos presentes no sistema. Ao comparar esta figura com a figura 46 podemos observar o efeito de tamanhos populacionais diversos na dinâmica. Inicialmente vemos que a vespa não foi igualmente eficaz para reduzir às mesmas quantidades populações com valores diferentes, caso a vespa utilizada não seja muito eficaz. Isto pode ser visto ao comparar os cenários onde o tratamento foi de 6000 vespas e a quantidade de praga presente foi de 1000, 2500 e 5000 brocas. No entanto, ao comparar as situações onde a broca manteve-se com tamanho

populacional de 2500 indivíduos e os tratamentos foram alterados, tendo sido empregados 6000, 12000 e 18000 parasitoides, vemos que estes apresentaram reduções equivalentes da praga.

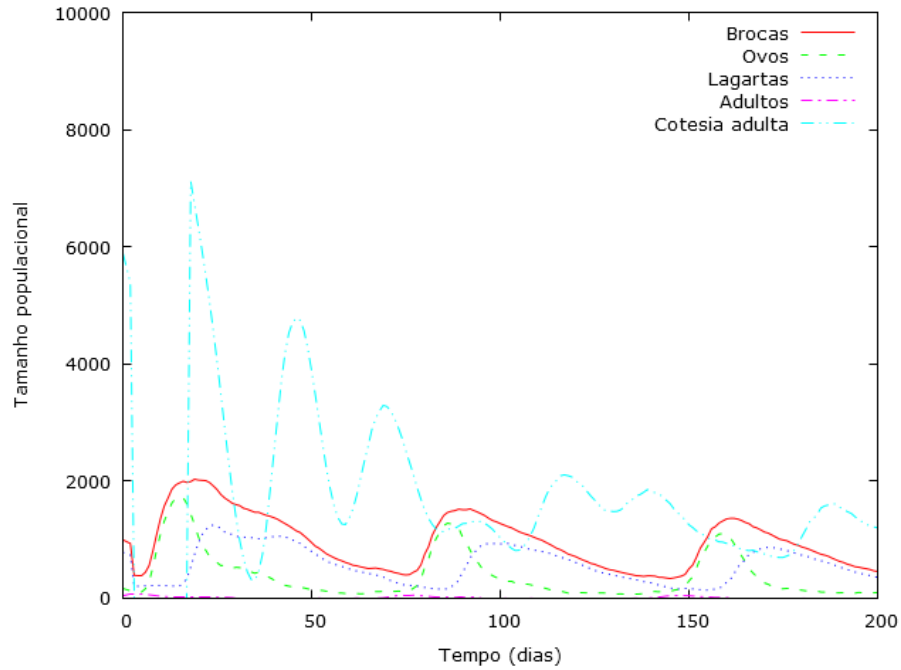


Figura 45: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da *D. saccharalis*, com $E_C = 2$, 1000 brocas e 6000 parasitoides

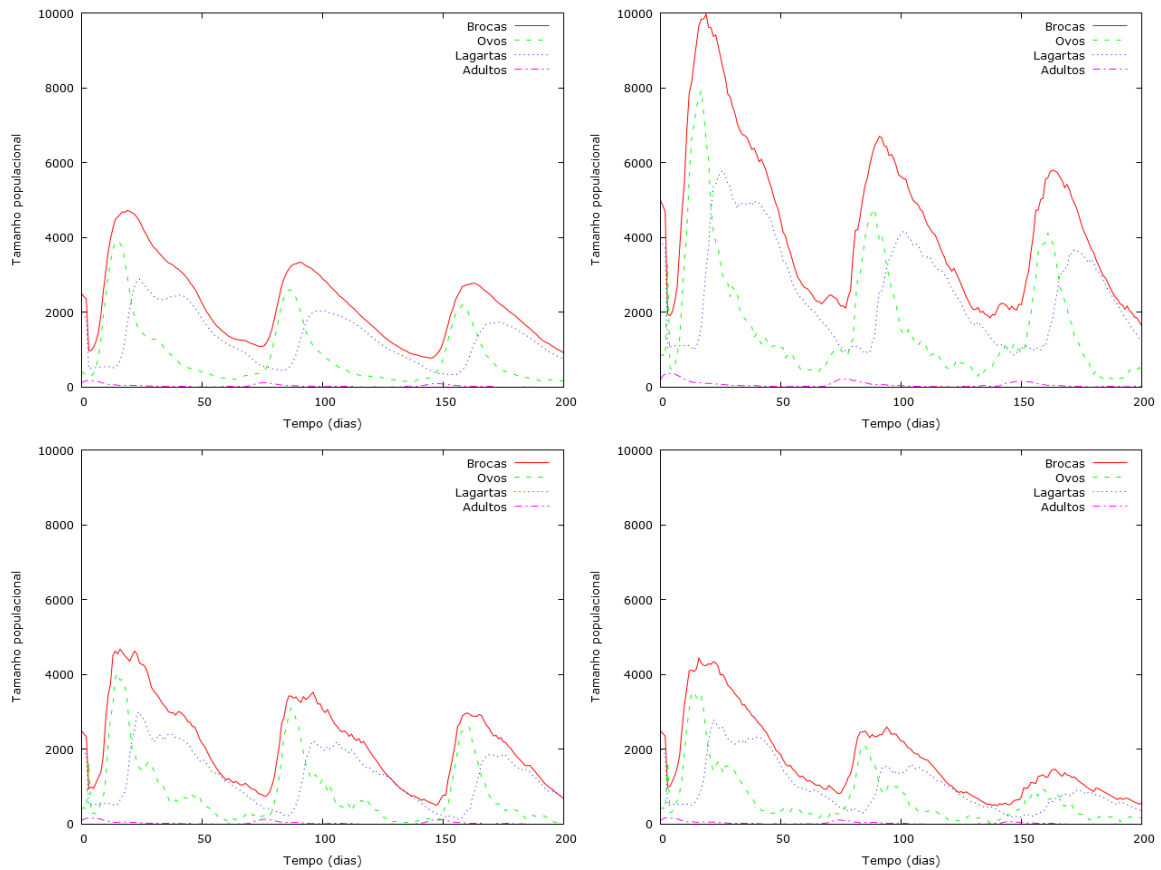


Figura 46: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da *D. saccharalis*, $E_C = 2$: canto superior esquerdo 2500 brocas e 6000 parasitoides; superior direito 5000 brocas e 6000 parasitoides; inferior esquerdo 2500 brocas e 12000 parasitoides; inferior direito 2500 brocas e 18000 parasitoides

Contudo, os cenários apresentados nas figuras 45 e 46 consideram vespas bem pouco eficazes. Para se obter um entendimento melhor da influência dos tamanhos populacionais sobre o sistema, cenários com $E_C = 10$ são apresentados nas figuras 47 e 48. Em todos os cenários apresentados nestas figuras a população da praga foi extinta. É interessante notar a quantidade de parasitoides adultos presentes nas figuras 45 e 47. Nesta segunda situação, o primeiro pico de adultos é muito maior que no caso onde $E_C = 2$, e então para $E_C = 10$ a população da praga é extinta do sistema. Isto pode indicar uma possibilidade de tratamento com 2 inserções de parasitoides, caso a eficiência da vespa seja baixa, cerca de 20 dias após a primeira inserção.

Comparando os cenários com tratamento fixado em 6000 parasitoides, vemos através das figuras 47 e 48 que a quantidade inicial de brocas é muito importante para o resultado do controle. Isto indica que levantamentos sistemáticos devem ser realizados para evitar que a praga atinja valores muito altos, onde mesmo o controle sendo efetivo na extinção desta, o dano causado ao sistema seja considerável. No entanto, os resultados obtidos com

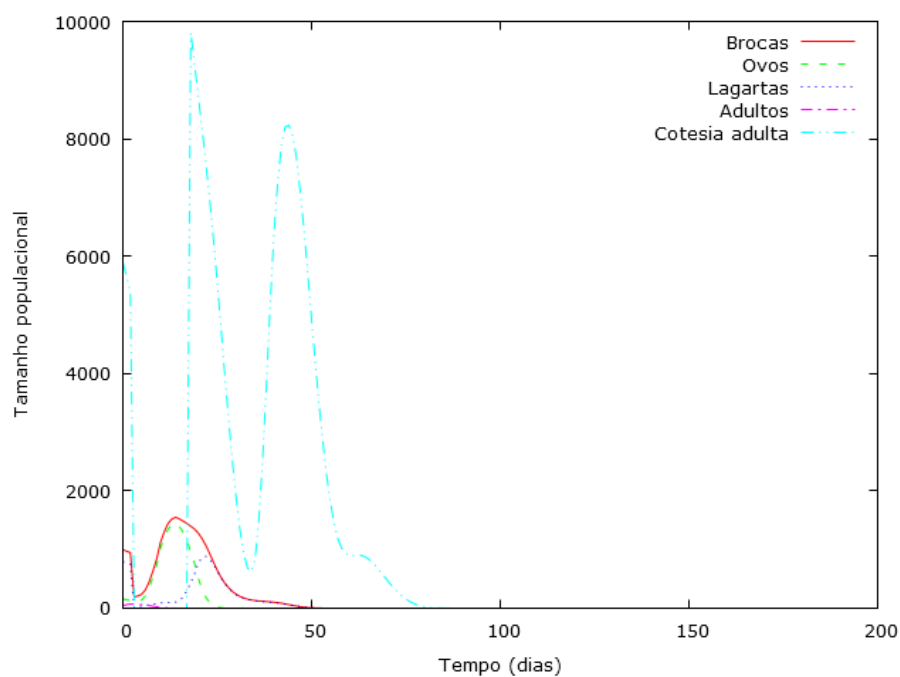


Figura 47: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da *D. saccharalis*, com $E_C = 10$, 1000 brocas e 6000 parasitoides

uma vespa altamente eficiente mostram que os tratamentos com 6000, 12000 e 18000 parasitoides apresentam resultados muito semelhantes, o que indica que o parasitismo neste sistema está saturado.

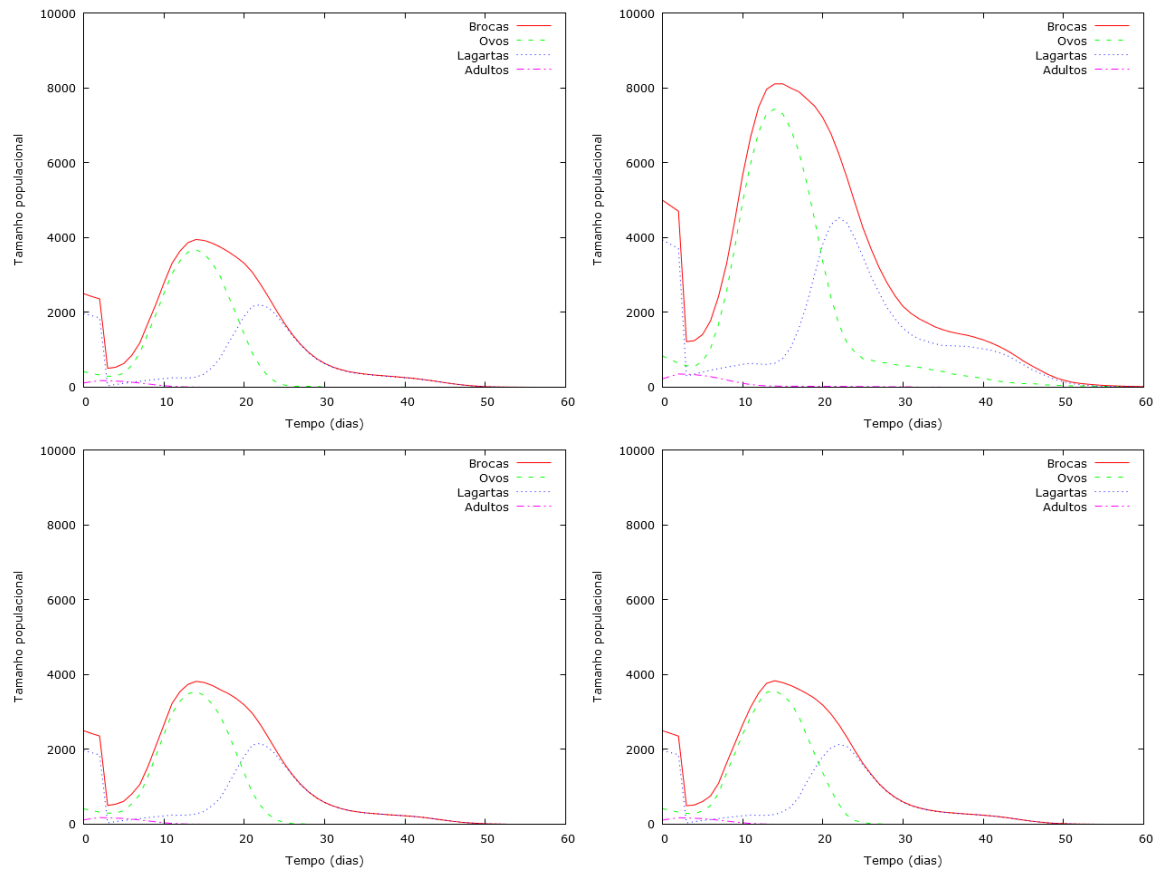


Figura 48: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida da *D. saccharalis*, $E_C = 10$: canto superior esquerdo 2500 brocas e 6000 parasitoides; superior direito 5000 brocas e 6000 parasitoides; inferior esquerdo 2500 brocas e 12000 parasitoides; inferior direito 2500 brocas e 18000 parasitoides

4 Otimização do custo

4.1 Avaliação do custo

Utilizando-se como ponto de partida o modelo Lotka-Volterra para descrever a interação entre hospedeiros e parasitoides, isto é, entre a broca-da-cana e a *C. flavipes*, inicialmente foi avaliado o dano financeiro causado pela população de brocas. Isto pode ser feito avaliando o dano financeiro causado por uma quantidade definida de brocas durante um período específico conhecido. É importante notar que nesta parte do estudo foram adotados parâmetros que descrevem a interação entre as brocas e vespas obtidos da literatura [81], mas que podem ser reavaliados para outros casos, já que ambos aparentam apresentar uma alta sensibilidade ao clima. Desta forma alterações climáticas, especialmente na temperatura, podem então alterar a dinâmica entre as populações significativamente.

Usando então como aproximação que cada broca presente no sistema causa sempre o mesmo dano à plantação, pôde-se considerar que o dano total causado pela população de brocas era descrito pela integral da curva gerada no modelo Lotka-Volterra, multiplicado por uma constante C_{broca} . Esta constante é influenciada tanto por características fisiológicas da broca, tais como quantidade da cana consumida, como também preço da cana. Isto ocorre por ser a constante C_{broca} um parâmetro que avalia essencialmente o dano financeiro causado pela presença de uma única broca no sistema. Com base no artigo de Sandoval e Senô (2010) [83], que consideram que a cada 1% de brocas por hectare presentes no momento da colheita, uma perda de cerca de R\$ 100,00 ocorrerá, foi possível propor que $C_{broca} = 0,002$. Este parâmetro pode e deve ser reavaliado conforme o valor da cana seja alterado ou a cada nova introdução de espécies novas, já que a interação/dano da broca pode variar nesses casos.

Outro parâmetro importante a ser considerado é o custo do uso das vespas, C_{vespa} . Esse parâmetro considera o custo de cada vespa no momento da inserção, o que em valores atuais, apresenta um custo de R\$ 4,00 para a compra de um copo com cerca de 1500 indivíduos da *Cotesia flavipes*, o que faria $C_{vespa} = 0.0027$. Este valor também está sujeito às variações do mercado e também deve ser ajustado quando alguma alteração for identificada.

Com base nos valores de C_{broca} e C_{vespa} , a função que contabiliza o custo gerado pelo dano das brocas somado ao custo do controle utilizando a *Cotesia flavipes* é

$$C(w) = P_0 C_{vespa}(w) + C_{broca} \int_0^{tf} V(t) dt \quad (32)$$

onde w são as vespas, P_0 é a quantidade inicial de predadores, $V(t)$ é a dada pela evolução temporal da população de brocas e t_f é o tempo final do período desejado, que aqui foi considerado como sendo o tempo até a colheita.

Sabendo que C_{broca} pode variar, alguns cenários foram simulados para se entender um pouco melhor como este parâmetro poderia influenciar no custo do controle.

4.1.1 Custo estimado através do modelo Lotka-Volterra

Na figura 49 é possível ver a influência de C_{broca} no custo total do controle, C , onde inicialmente o dano causado pelas brocas é nulo e qualquer inserção de vespas gerará custos. Conforme o valor de C_{broca} aumenta, o custo de não adotar nenhuma estratégia vai se tornando alto, o que justificaria o uso da vespa. Iremos levar em consideração que uma boa estratégia é uma estratégia que tenha um apelo forte o suficiente para convencer os produtores à sua adoção. Sendo assim, parece interessante adotar como definição da estratégia ótima aquela que gere o menor custo total possível. É interessante notar que para o período escolhido é possível sempre descobrir o ponto ótimo, onde a quantidade empregada de vespas geraria o menor custo final. Curiosamente, ao contrário ao que se poderia acreditar, utilizar quantidades grandes de vespas não significaria economia, mesmo que essas quantidades levem a praga próxima à extinção. Outro ponto que pode ir contrário a intuição do produtor é que a estratégia que mais gera economia é a estratégia que acabe totalmente com a praga no campo, o que não é sempre o caso. Além desses pontos destacados vale a pena notar que conforme C_{broca} aumenta de valor, o ponto ótimo com C mínimo é obtido para quantidades iniciais de predadores maiores.

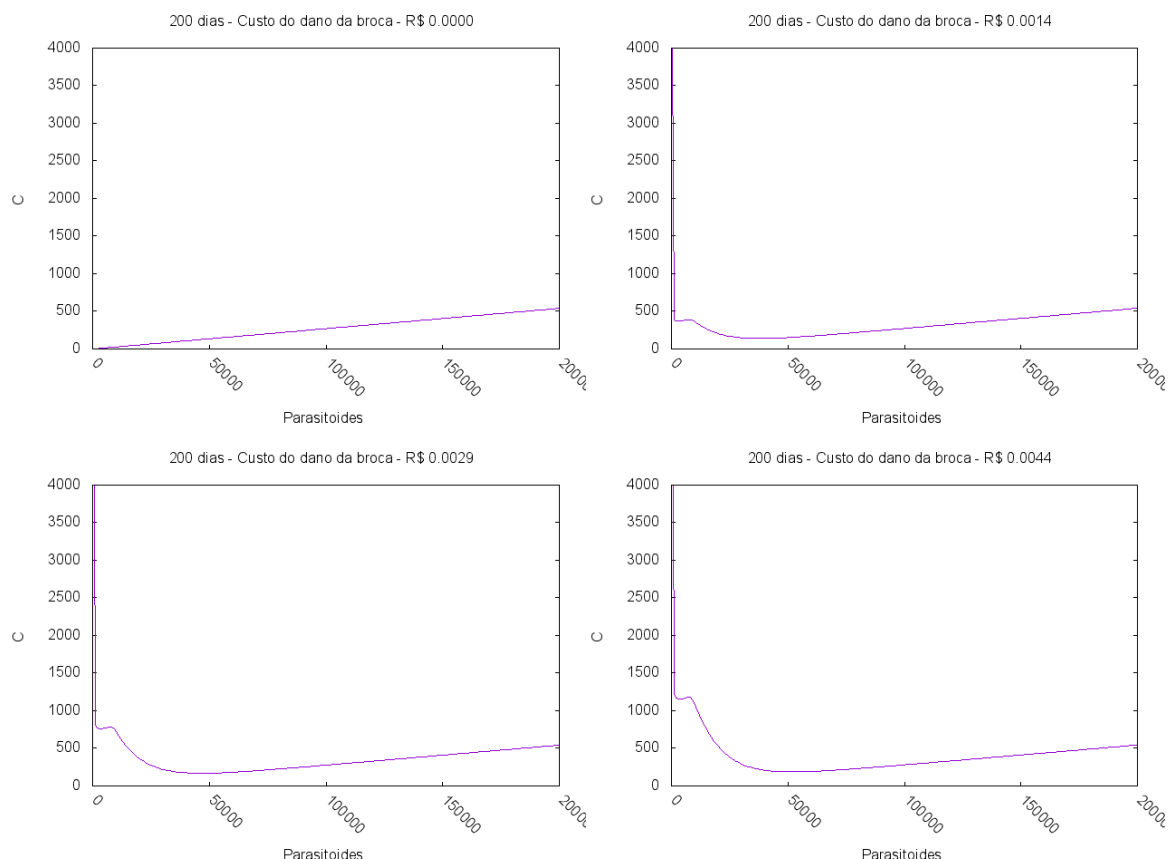


Figura 49: Variação do custo do controle variando o valor do dano econômico produzido pela broca, C_{broca} , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 200 dias com custo da vespa fixo, $C_{vespa} = 0,0027$ e $N_0 = 2500$

Na figura 50 observamos algo parecido com a figura 49, considerando agora o período avaliado de 550 dias². É importante notar que nesse caso o eixo y, que representa o custo total da estratégia adotada, foi truncado em 4000 reais para facilitar a análise das estratégias com inserção, já que o custo de não se empregar nenhum controle é da ordem de centenas de milhares de reais já no primeiro caso retratado. Novamente é possível observar que com C_{broca} nulo, o valor mais significativo ainda é o valor de C_{vespa} , o que faz com que a melhor estratégia nesse caso seja não fazer nada. Conforme o custo do dano da broca deixa de ser nulo, começam a surgir valores mínimos para o custo C do controle. Como no caso anterior, esses valores ótimos são obtidos com quantidades maiores de vespas a cada incremento em C_{broca} . É interessante notar também algumas diferenças entre os dois casos, entre elas as quantidades de vespas nos pontos ótimos. Ao se avaliar um período menor, a quantidade ótima de vespas é muito menor do que a segunda situação apresentada. Essa quantidade menor, ótima no primeiro caso, sendo utilizada no segundo

²O que seria equivalente a cana conhecida como cada de ano e meio, variedade utilizada para que a produção de álcool se dê o ano todo.

período avaliado geraria grandes prejuízos, muito maiores do que os valores próximos à quantidade ótima nesta situação. Isto leva à primeira consideração qualitativa que deve ser feita, tão importante quanto a quantidade de vespas a ser utilizada é ter em mente o período em que a cana será colhida, o que não é observado nas recomendações em vigor para o controle da praga. Uma segunda consideração qualitativa que pode ser feita é que se o período avaliado será grande, liberação de grandes quantidades de predadores se torna uma boa estratégia, ao contrário do que se poderia dizer para os períodos mais curtos.

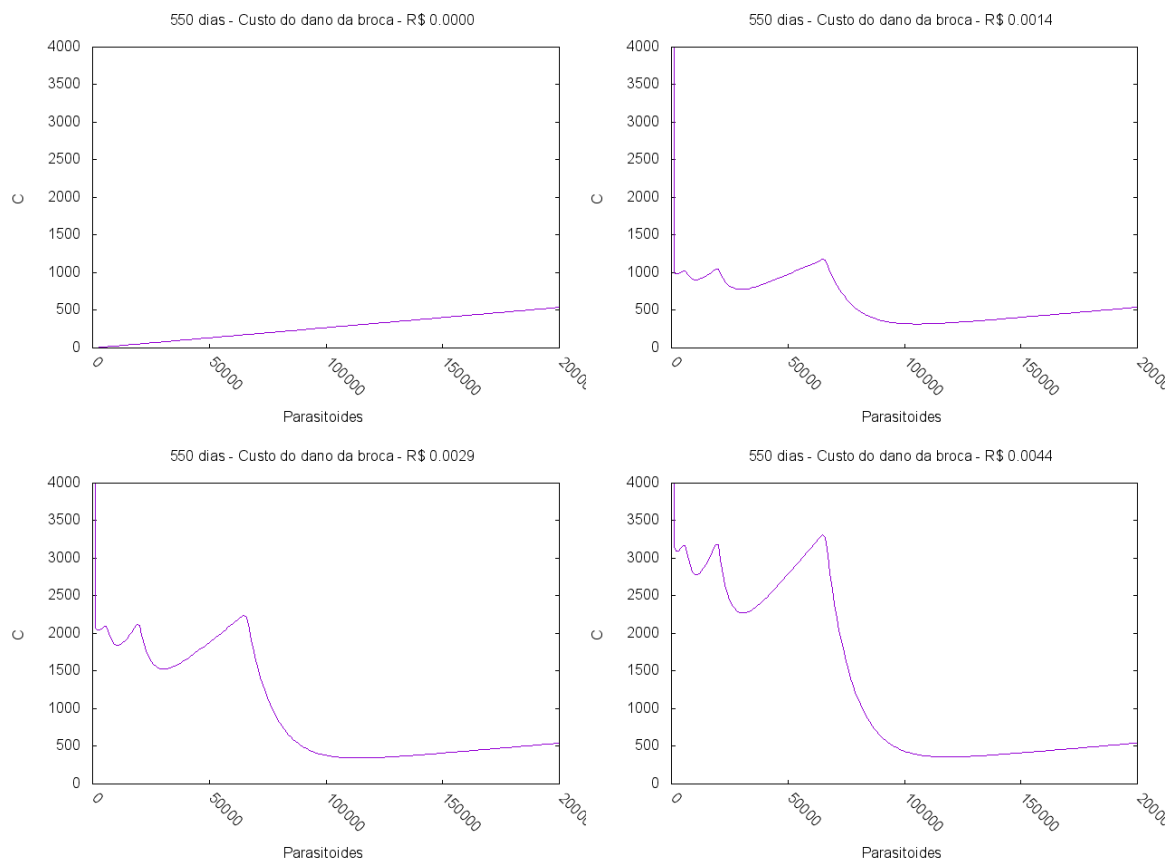


Figura 50: Variação do custo do controle variando o valor do dano econômico produzido pela broca, C_{broca} , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 550 dias com custo da vespa fixo, $C_{vespa} = 0.0027$ e $N_0 = 2500$

O outro parâmetro que foi avaliado foi C_{vespa} , que pode variar com as flutuações financeiras que alteram o valor de produção e venda da *Cotesia flavipes*. Na figura 51 é possível observar o custo do controle variando com o aumento em C_{vespa} para um período de 200 dias. No primeiro caso, onde o custo para utilização da cotesia é nulo, não utilizar alguma quantidade da mesma representa perdas econômicas geradas pelo dano causado pela broca. O custo efetivo do controle, nesse primeiro caso atinge um valor muito próximo à zero e se mantém nesse valor, já que o período escolhido para avalia-

ção da dinâmica não possibilita a presença de oscilações do sistema. Ao avaliar o valor $C_{vespa} = 0,003$, muito próximo ao custo corrente para utilização das vespas, é possível ver que um valor ótimo aparece e, ao contrário do caso anterior, conforme o custo aumenta, o custo da estratégia adotada também aumenta. O mesmo pode ser visto ao se aumentar em 5 vezes o custo, sendo que o ponto ótimo é deslocado para quantidades menores de vespas. O último caso apresentado nos gráficos, com custo das vespas muito maior do que o encontrado aponta uma situação em que o ponto ótimo é encontrado muito próximo ao zero, mas é importante notar que mesmo nesse caso, liberar quantidades inferiores a aproximadamente 100 mil vespas ainda é melhor do que não adotar nenhum controle.

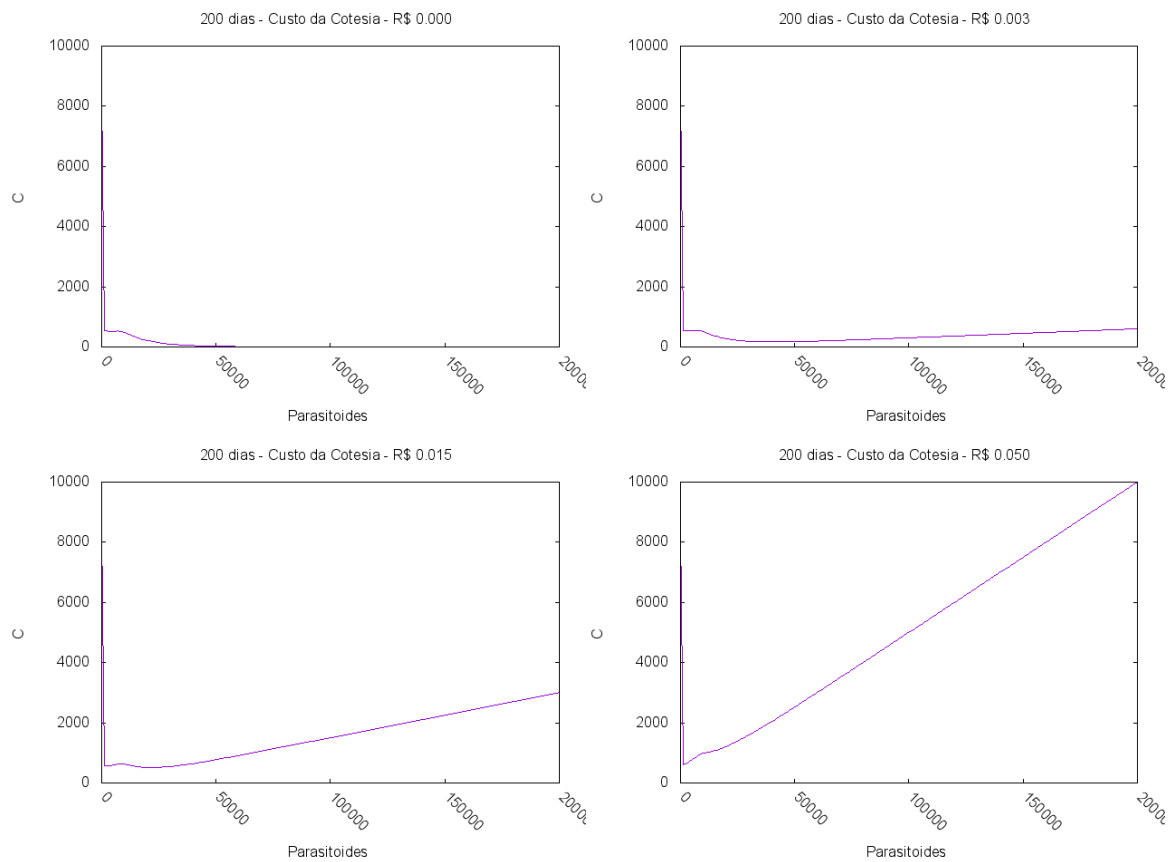


Figura 51: Variação do custo do controle variando o valor da vespa, C_{vespa} , em função dos parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 200 dias com dano econômico causado pela broca fixo, $C_{broca} = 0.002$ e $N_0 = 2500$

Tendo em vista o período de 550 dias, podemos observar na figura 52 alguns pontos interessantes. Novamente, como foi feito na figura 50, o custo máximo foi truncado em 10 mil reais afim de avaliarmos as estratégias de liberação de vespas, já que não adotar nenhuma estratégia geraria gasto da ordem de milhares de reais. Na primeira situação é interessante notar a quantidade de vespas para gerar um custo próximo a zero é quase 2 vezes maior que o mesmo caso na figura 51. O mesmo acontece com ponto ótimo com os

valores correntes de custo das vespas, com $C_{vespa} = 0,003$, passando de uma quantidade próxima à 40 mil vespas para algo em torno de 110 mil vespas, gerando ainda custo superior de controle, o que também era esperado. O que podemos ver nos dois últimos gráficos da figura 52 é que novamente os valores ótimos são obtidos ao se liberar poucas vespas, o que pode ser arriscado, já que com pouquíssimas vespas no sistema, fatores aleatórios podem gerar a morte das mesmas, anulando o efeito do controle. Por outro lado, qualquer quantidade de vespas liberadas, mesmo apresentando benefícios menores do que nas situações anteriores, ainda apresentam grandes benefícios quando comparado com não adotar nenhum controle. É interessante notar também os valores para grandes quantidades de vespas, que em ambas as figuras, comparando os gráficos para os mesmos valores do custo da cotesia, apresentam valores similares, o que indicaria um domínio do valor de C_{vespa} em relação à C_{broca} .

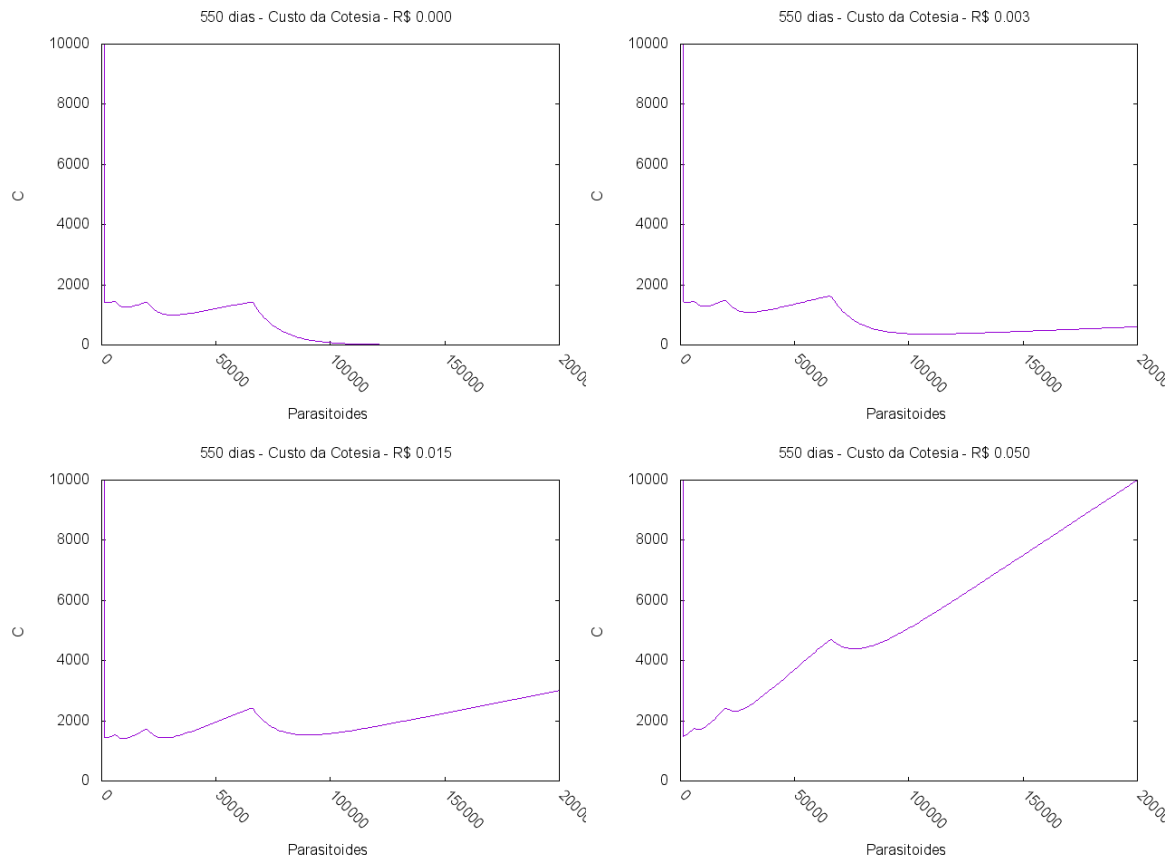


Figura 52: Variação do custo do controle variando o valor da vespa, C_{vespa} , em função dos parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 550 dias com dano econômico causado pela broca fixo, $C_{broca} = 0.002$ e $N_0 = 2500$

4.1.2 Custo estimado através da simulação multi-agentes

Sendo a simulação multi-agentes um pouco mais realista, é interessante avaliar o impacto dos custos dos parasitoides e da praga na solução ótima quando se tem posse do valor real das populações envolvidas. Para tanto foram usadas as condições biológicas padrão apresentadas no capítulo anterior, com uma população de praga apresentando uma resistência baixa às condições do ambiente e uma população de parasitoides muito eficientes.

Inicialmente vemos na figura 53 o impacto do aumento do dano econômico das brocas sobre o sistema para uma situação de 200 dias para uma população de brocas iniciais fixas em $N_0 = 2000$. No primeiro caso apresentado nesta figura o dano financeiro causado pela praga é nulo, o que ocorreria na situação onde o valor da cana é nulo ou na situação onde a broca não estivesse se alimentando da broca. Nesta situação vemos que o aumento do custo total do controle aumenta apenas em função do incremento de parasitoides inseridos no sistema. No segundo caso, onde o dano causado por 1 broca/dia é de R\$ 0,0015, não tratar a broca se torna custoso e surge uma solução ótima de *C. flavipes* a ser inserida no sistema para gerar o menor custo. Esta quantidade é de cerca de 3000 parasitoides, porém qualquer uma das quantidades testadas oferece maior economia do que a não utilização do controle. É interessante notar que o aumento do custo do controle com quantidades de vespas acima de 4500 é relativo ao preço destas, o que sugere não haver vantagens econômicas diretas na adição de mais indivíduos. O próximo cenário, onde o dano financeiro da broca é estimado em R\$ 0,01/dia apresenta como solução ótima a inserção de 4500 parasitoides, sendo que a partir de 6000 brocas o aumento do custo do controle pode novamente ser atribuído ao aumento do custo do tratamento. Uma condição interessante é alcançada quando o dano da broca atinge R\$ 0,06/dia, onde a solução ótima é obtida através da inserção de 9000 vespas. Porém neste cenário, não é possível explicar a variação do custo do controle apenas pelo aumento do valor do tratamento, o que sugere que a solução otimizada deva ser utilizada, apesar de o custo total para as outras soluções não apresentar valores muito diferentes.

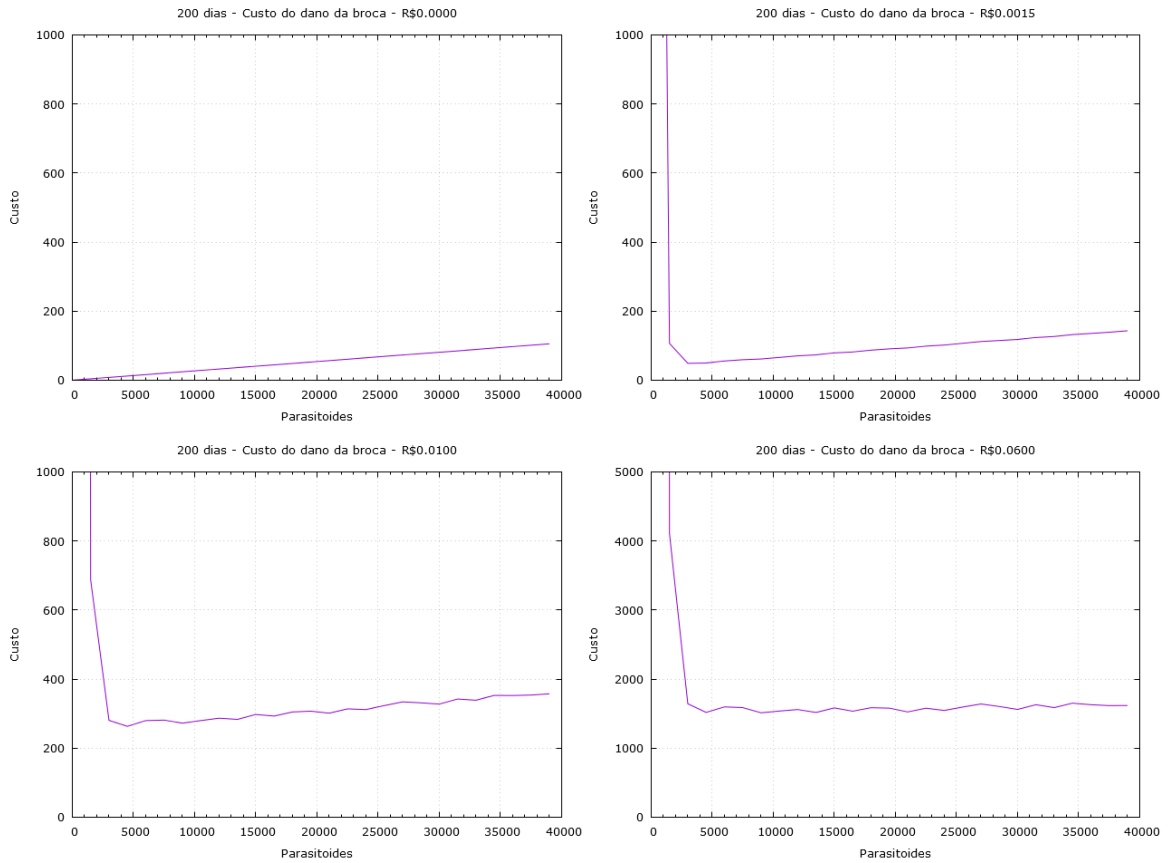


Figura 53: Resultado da simulação multi-agentes com variação do custo do controle alterando o valor do dano econômico produzido pela broca, C_{broca} , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 200 dias com custo da vespa fixo, $C_{vespa} = 0,0027$ e $N_0 = 2000$

Na figura 54 podemos observar a influência do valor da $C. flavipes$ sobre o custo total do controle da praga. No primeiro cenário vemos a situação onde o parasitoide é obtido sem custo. Neste caso, acima de 4500 indivíduos, o custo do controle na prática o mesmo, o que indicaria que o total da praga tem sido eliminado logo nos primeiros instantes para todas as quantidades acima deste valor. Nas próximas 3 situações o tratamento otimizado da praga ocorre através da utilização de 3000 vespas. No segundo cenário, onde o custo de uma $C. flavipes$ é de R\$ 0,003, o tratamento otimizado é cerca de 70% mais econômico que os tratamentos testados com a maior quantidade de indivíduos. Porém o tratamento com 1500 indivíduos é apenas cerca de 15% mais econômico que o com a maior quantidade de indivíduos testados, o que indicaria que o prejuízo da broca a longo prazo é compatível ao custo imediato de uma grande dose de $C. flavipes$. A partir de 3000 vespas, o incremento pode também ser justificado pelo aumento de preço do parasitoide, indicando que a praga foi eliminada no tempo mínimo da interação entre as populações. No terceiro cenário é possível identificar um aumento muito maior do custo do tratamento

após a solução ótima, novamente correlacionado com custo maior dos tratamentos aplicados. Isto ocorre também na quarta situação, porém a condição otimizada sendo cerca de 90% mais econômica que o tratamento mais dispendioso.

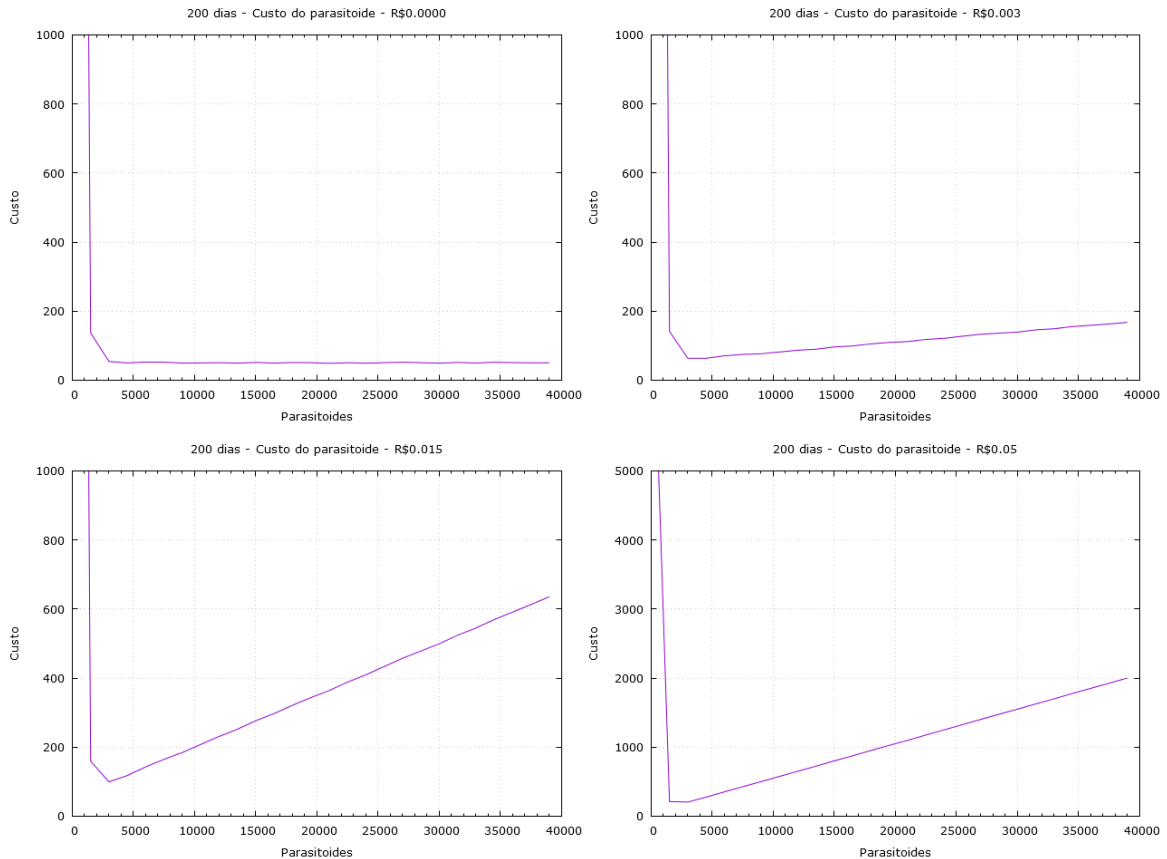


Figura 54: Resultado da simulação multi-agentes com variação do custo do controle variando o valor da vespa, C_{vespa} , em função dos parasitoides inicialmente inseridos, P_0 , para um período de 200 dias com dano econômico causado pela broca fixo, $C_{broca} = 0.002$ e $N_0 = 2000$

4.2 Inferência Bayesiana

Um dos grandes problemas para se estimar o tamanho da população de brocas na cana de açúcar é o método de avaliação utilizado tanto comercialmente quanto em muitas pesquisas. Como um efeito conjunto, validar modelos matemáticos se torna muito difícil e o processo pouco confiável dada a pouca precisão do método utilizado. O processo de avaliação mais comum consiste em escolher uma parcela do talhão a ser avaliado, cortando uma pequena porção de canas e abrindo-as, de forma a tornar possível a contagem das lagartas. A contagem então é realizada e o valor obtido é extrapolado para o talhão completo e, muitas vezes, para outros talhões.

Para tentar diminuir o efeito da imprecisão do método de avaliação, foi proposto utili-

zar a inferência Bayesiana. Esta permite estimar probabilidades para densidades possíveis de lagartas com base em conhecimentos prévios. Neste estudo, ela foi descrita como

$$P(\rho | n, A) = \frac{P(n | A, \rho) P(\rho)}{P(n)} \quad (33)$$

onde :

$P(\rho | n, A)$, também chamado de posterior, é a probabilidade de se encontrar uma certa densidade, ρ , caso sejam encontradas n lagartas numa área A .

$P(\rho)$, também chamado de prior, é a probabilidade de se encontrar uma certa densidade. Ele foi construído utilizando parte dos dados doados por uma empresa de levantamento de pragas dentro da região sudeste do Brasil, composto de 700 amostragens realizadas no ano de 2012.

$P(n)$, é o fator de normalização.

Por último, $P(n | A, \rho)$, conhecido como a função de verossimilhança, é a probabilidade de se encontrar um certo número de brocas, dada uma área e uma certa densidade. Neste projeto foi assumido que o número de lagartas encontradas nas amostras para cada área A era independente da quantidade de brocas encontradas na amostra anterior. Isto permitiu o uso da distribuição de poisson para descrever este processo. Os requisitos para a utilização da distribuição de Poisson neste caso são eventos independentes e aleatórios, o que é uma boa aproximação dada a falta na literatura de uma descrição espacial da broca no campo. Entretanto Schexnayder (2001) [84] desenvolve um experimento de 3 anos de duração onde a distribuição das canas infestadas é retratada, o que permitiu uma dupla interpretação dos dados obtidos, descrevendo a distribuição como aleatória ou poisson.

Esta distribuição pôde então ser escrita como

$$P(n | A, \rho) = \frac{(\rho A)^n e^{-\rho A}}{n!}$$

Como exemplo usaremos uma das medições, onde foram encontradas 1 broca em $120 m^2$. A densidade de brocas nessa área é de $0.0083 \frac{brocas}{m^2}$, sendo assim, a probabilidade de se observar 1 broca se estivermos considerando $120 m^2$ e uma densidade $\rho = 0,0083$ é de

$$P(1 | 120, 0,0083) = \frac{(0,0083 \cdot 120)^1 e^{-(0,0083 \cdot 120)}}{1!} \simeq 0,368$$

Afim de termos um melhor entendimento deste caso, podemos observar a distribuição de probabilidades, dada na figura 55. Neste primeiro caso vemos que

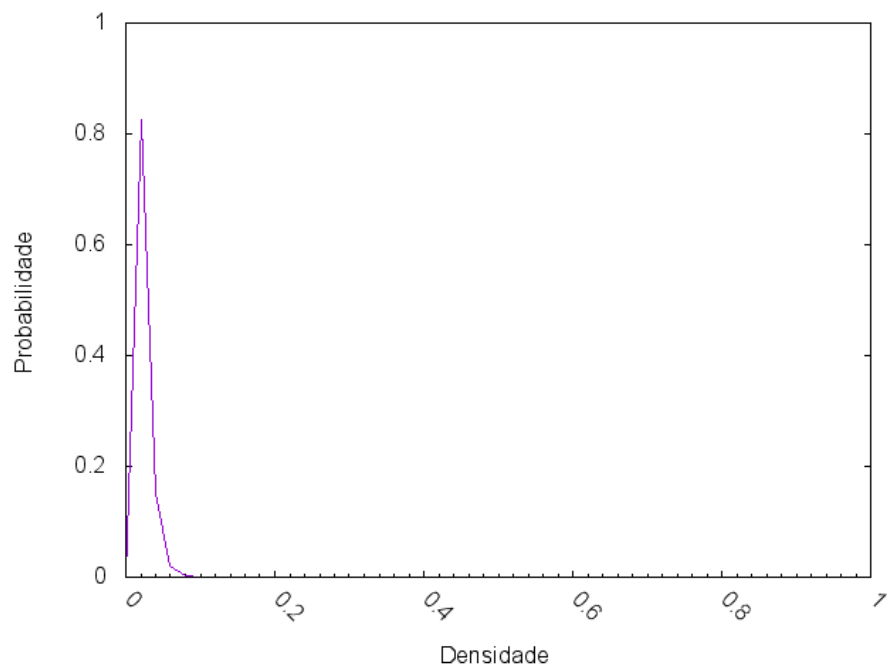


Figura 55: Distribuição de Poisson para $n = 1$ observados numa área $A = 120m^2$

Podemos observar algumas das distribuições para amostras obtidas do campo na figura 56. Para a construção desses gráficos foram usadas densidades múltiplas de $0,02 \frac{brocas}{m^2}$. Esta abordagem é interessante já que assume probabilidades para as densidades possíveis, ao invés de só admitir uma única densidade. Sendo assim, ao extrapolar a densidade para as áreas muito maiores de onde foram obtidas as amostras, poderemos avaliar qual o grau de confiança temos em determinada densidade. Isto é particularmente importante no desenvolvimento de estratégias de controle, como será visto mais a frente.

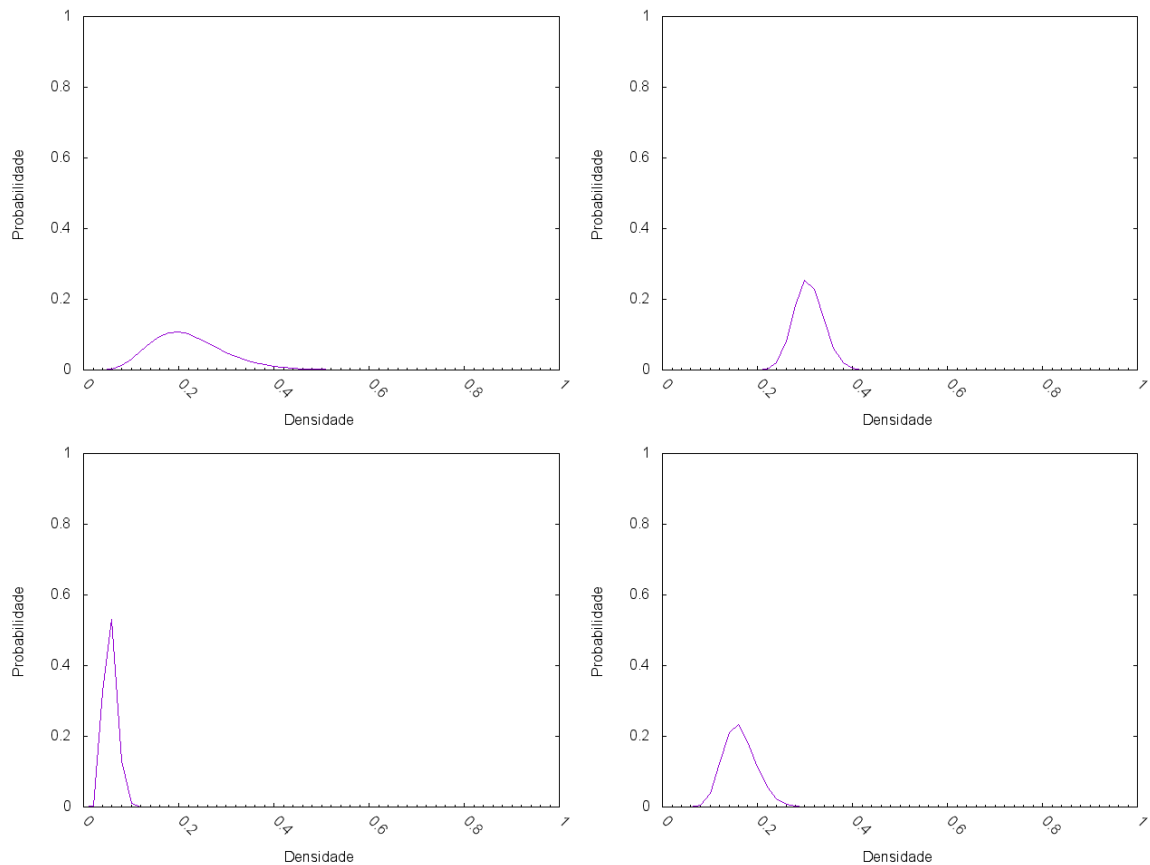


Figura 56: Distribuição de Poisson para alguns levantamentos obtidos do campo, canto superior esquerdo - $n = 7$, $A = 35m^2$, superior direito - $n = 96$, $A = 315m^2$, inferior esquerdo - $n = 16$, $A = 300m^2$, inferior direito - $n = 21$, $A = 135m^2$

Ao usar o processo de Bayes, apresentado na equação 33, a distribuição de probabilidade é combinada com o conhecimento prévio. No presente caso, este último foi obtido através dos dados de campo doados, apontando a frequência das densidades encontradas no campo, o que pode ser visto na figura 57. As densidades foram construídas em um gráfico log, visando observar um possível comportamento de lei de potência, o que não pôde ser constatado e pode ser visto na figura 58. Essa nova distribuição de probabilidades é então construída a partir do pressuposto de uma distribuição de Poisson para as amostras encontradas, levando em consideração o histórico apresentado pelos dados do campo. Podemos então, através do teorema de Bayes, construir as figuras 55 e 56.

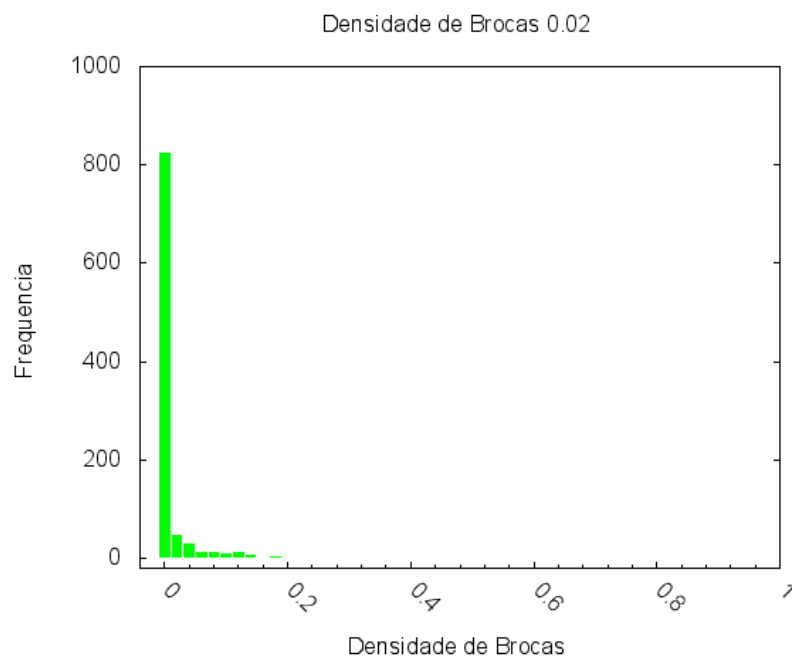


Figura 57: Histograma dos dados mostrando a quantidade de brocas encontradas no campo no ano de 2011 em cada levantamento que não apresentavam presença de parasitoides, doados pela empresa SmartBio

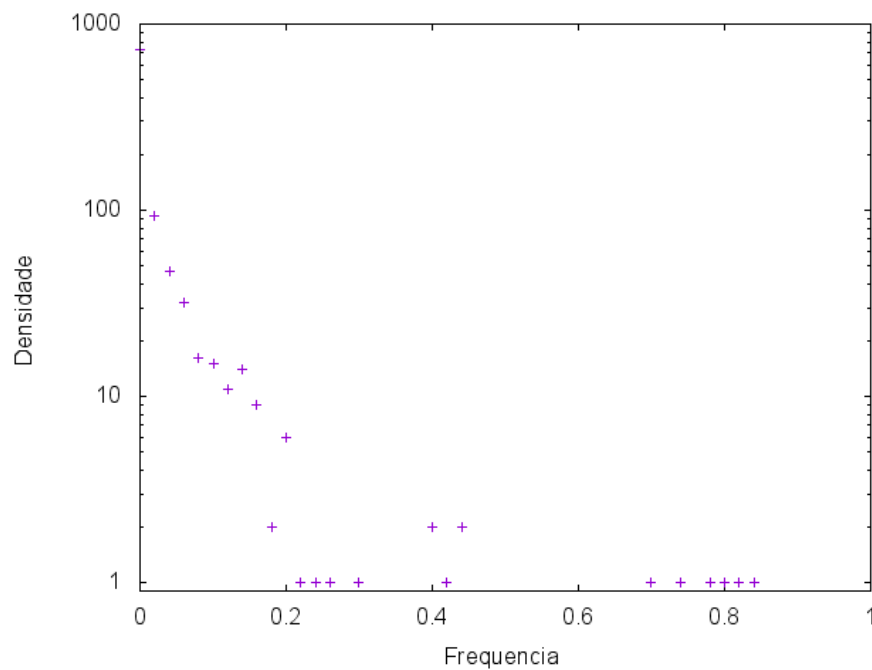


Figura 58: Representação logarítmica dos dados mostrando a quantidade de brocas encontradas no campo no ano de 2011 em cada levantamento sem a presença de parasitoides, doados pela empresa SmartBio

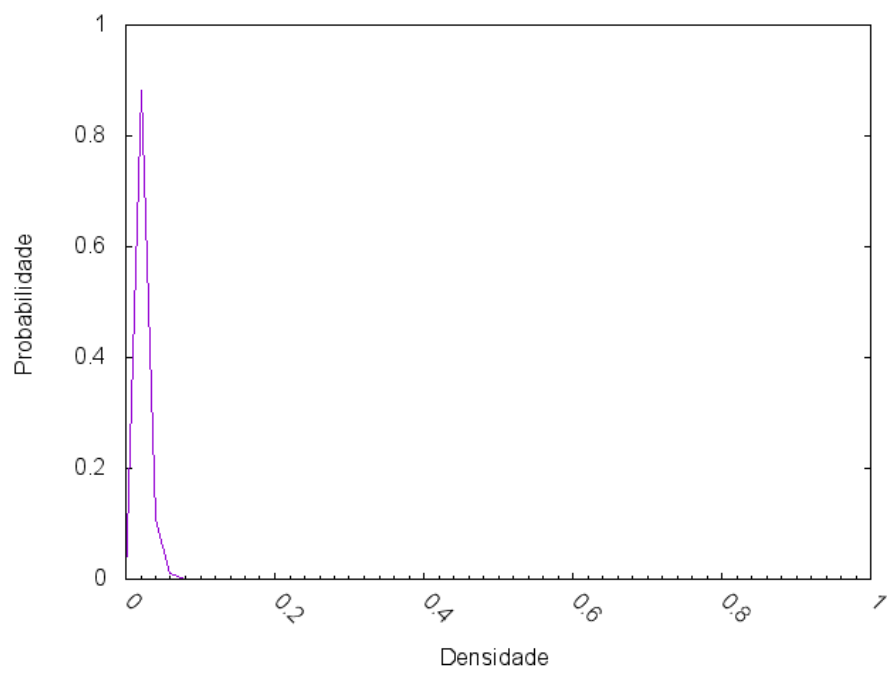


Figura 59: Teorema de Bayes para $n = 1$ brocas observadas para uma área $A = 120m^2$

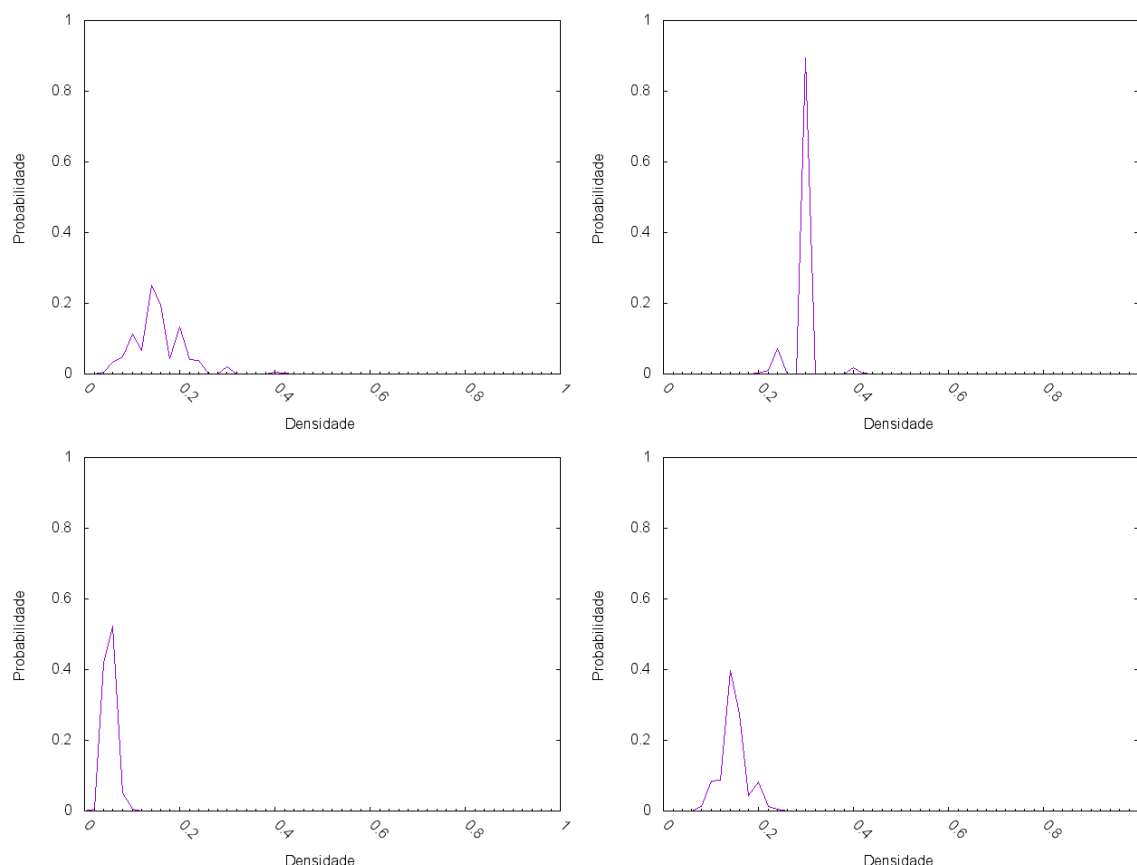


Figura 60: Teorema de Bayes para os levantamentos realizados no campo, canto superior esquerdo - $n = 7$, $A = 35m^2$, superior direito - $n = 96$, $A = 315m^2$, inferior esquerdo - $n = 16$, $A = 300m^2$, inferior direito - $n = 21$, $A = 135m^2$

4.3 Avaliação do métodos de levantamento de praga no campo

Um dos principais métodos de levantamento da *Diatraea saccharalis* no campo consiste na escolha aleatória de pontos para realizar o corte longitudinal da cana. Após o corte, é realizada contagem de entrenós totais e brocados, e realiza-se a extrapolação da densidade obtida para o talhão³ avaliado. Isto tem sido feito tanto para experimentos quanto comercialmente dentro de um período longo de tempo [75, 76, 77]. A quantidade de amostras por levantamento é de cerca de 20 canas/hectare da mesma variedade, corte, idade e tipo de solo. O Índice de Infestação (II) pode ser classificado como baixo (0-5%), moderado (5 a 10%), regular (10-15%), elevado (15-25%) e muito elevado ($> 25\%$). No entanto o controle é adotado a partir de 3% de II [85].

Deve-se considerar que poucos trabalhos são desenvolvidos para otimizar os métodos

³Um talhão pode ser descrito como a unidade mínima da área total destinada ao cultivo da cana, sendo circunscrito por ruelas por onde o maquinário pode trafegar. O talhão possui tamanho variável a depender da geografia local e do tipo de maquinário que deverá percorrer seu interior, geralmente possuindo entre 10 e 20 hectares na cultura da cana.

de amostragem da *Diatraea saccharalis* na cana-de-açúcar [84]. Em particular, um dos métodos que podem ser utilizados para avaliar o tamanho populacional da broca é baseado no teste da taxa probabilística sequencial ⁴. Os critérios necessários para desenvolver um plano de amostragem utilizando este teste são um limite econômico ou densidades de peste que correspondam à alguma decisão de tratamento; o nível de risco que pode ser tolerado; e por último o modelo de distribuição da variável a ser empregada, por exemplo o número de plantas infestadas [84]. Um exemplo deste método considera apenas aspectos visuais da cana pelo seu exterior, onde o amostrador verifica os sinais da presença da praga sem necessidade de avaliar precisamente o tamanho real da população desta, estimando apenas a população mínima presente. Caso a quantidade mínima de praga para se realizar o tratamento fosse encontrado, o levantamento era encerrado naquela região e pesticidas eram então empregados [84]. Este método é particularmente eficaz ao se utilizar tratamentos onde não é necessário saber precisamente o tamanho da população da praga, sendo suficiente saber que a praga atingiu o valor mínimo requerido para aplicação do tratamento. Um outro método de levantamento consiste em fazer o amostrador escolher aleatoriamente canas para realizar a coleta das formas biológicas, que consistem em lagartas e pupas da praga e pupas dos parasitoides, anotando o tempo de trabalho [27]. No entanto, em propriedades com áreas muito grandes, onde os recursos para levantamento deve ser priorizado, regiões mais susceptíveis são priorizados [27]. Após o levantamento, PARRA et al (2002) apresenta a recomendação de tratamento com 6000 *C. flavipes* quando mais que 2500 lagartas/ha ou 10 lagartas/hora/homem sejam identificadas. No entanto, recomendam ainda que não menos de 2500 e não mais que 10.000 parasitoides sejam usados para o tratamento [27].

Levando em consideração as limitações impostas pelos métodos tradicionais de amostragem, que podem ser destrutivos retirando canas da plantação, foi proposto neste trabalho uma avaliação da eficácia do método adotado convencionalmente. Para tanto, utilizamos como ponto de partida o modelo Lotka-Volterra para gerar os dados simulados que representariam a população de brocas presentes no campo por hectare, considerando que em média 100 mil canas, C_{hec} estariam presentes nessa área. De posse destas informações, construímos um processo para simular a amostragem aleatória das brocas, que consistia em realizar sorteios onde a probabilidade de encontrar uma broca era dada pela

⁴O teste da taxa probabilística sequencial é um método estatístico que considera alguns critérios para a finalização do processo de amostragem. Este teste não apresenta necessariamente inicialmente o tamanho da amostra que deve ser obtida, sendo o tamanho desta determinado pela satisfação dos critérios estabelecidos inicialmente. Os critérios dependem da situação avaliada, que podem ser cenários onde o processo avaliado já deu um resultado positivo ou negativo esperados para a tomada de alguma decisão.

razão entre brocas presentes dividida pela quantidade de canas do hectare.

$$\rho(t) = \frac{N(t)}{C_{hec}} \quad (34)$$

Como em geral a quantidade de canas amostradas é muito menor do que a quantidade presente em um hectare, C_{hec} foi considerada constante, porém a quantidade de brocas presente variou de acordo com o modelo Lotka-Volterra, fazendo a probabilidade $\rho(t)$ também depender do tempo.

Durante a simulação, foram considerados dois processos de amostragem, o primeiro feito com 200 amostragens, usado em trabalhos acadêmicos [67, 77]. O segundo processo foi construído baseado no trabalho de Dinardo-Miranda, et al (2011) e o que dizem especialistas na área, que consideram que comercialmente uma quantidade menor de amostragens é realizada, e no nosso caso 50 canas foram usadas para simular o levantamento de brocas. É importante notar que a população de brocas obtida através da extrapolação da amostragem será discreta e seguirá a seguinte equação

$$\Delta N = \frac{C}{s} \quad (35)$$

onde s é o tamanho da amostra, C a quantidade de canas presentes e ΔN o tamanho mínimo da população estimada. Sendo assim, no caso de 200 amostras em um levantamento, considerando 100 mil canas, a população estimada será discretizada com $\Delta N_{200} = 500$ e no caso comercial $\Delta N_{50} = 2000$.

4.4 Comparação Bayes x Método tradicional

Podemos usar a estatística Bayesiana para estimar a população de brocas presentes em um dado momento. Para tanto é necessário saber a quantidade de brocas encontradas no levantamento, L , e ter posse do histórico de brocas encontradas para a área anteriormente. Como abordagem para comparação, as quantidades de brocas presentes em um hectare foram impostas com base na média de infestação do estado de São Paulo, de cerca de 1-2%. Neste processo o interesse era retratar situações que acontecem no campo. Para tanto, valores de brocas eram fixadas e o processo de levantamento se dava da seguinte maneira - atribuía-se uma probabilidade, $P_{amostra}$, de se encontrar uma broca por amostra, sendo esta probabilidade igual à quantidade de brocas fixadas, N_{fixado} , dividida pela quantidade de canas presentes em um hectare, C :

$$P_{amostra} = \frac{N_{fixado}}{C} \quad (36)$$

Este processo de amostragem era então repetido pela quantidade de vezes presentes no levantamento, sendo que foram usadas duas condições - 50 e 200 amostras por levantamento, o que representaria o levantamento usado comercialmente e o usado academicamente. A quantidade de brocas encontradas no levantamento L era então extrapolada para a quantidade total no caso do método tradicional para estimar a população de brocas total. Para se obter a estimativa através do teorema de Bayes, os mesmos dados obtidos no levantamento L eram usados para alimentar o novo método. Este procedimento requer que se insira a quantidade de brocas encontradas em L , a área total amostrada, as densidades possíveis e suas probabilidades de ocorrência. As densidades possíveis utilizadas no processo são todas as densidades obtidas através da equação 35 divididas pela área amostrada. Considerando que em cada metro linear existem cerca de 15 canas e que em geral o espaçamento entre as fileiras de canas pode ser considerado como 1.5 m, a área amostrada foi tomada como sendo

$$A_{amostrada} = \frac{L}{15} * 1,5$$

Já o histórico das probabilidades para cada densidade possível foi obtido realizando 100 levantamentos L com o método tradicional e registrando a frequência com que cada quantidade de brocas era encontrada no levantamento e então dividindo pela área amostrada. É importante notar que a equação 33 não apresenta um valor de brocas, mas sim uma probabilidade para uma dada densidade. Sendo assim, foi escolhido nesta comparação utilizar a densidade média, obtida através da multiplicação da densidade, ρ , por sua probabilidade de acontecer, P_{bayes} , e somando sobre todas as densidades possíveis.

$$\bar{\rho} = \sum_{\rho} \rho P_{bayes}$$

Esta densidade média era então multiplicada pela área total, no caso 1 hectare - 10.000 m^2 .

A quantidade de brocas fixadas N_{fixado} foi também variada em diferentes valores para tentar descobrir se algum dos métodos se apresentava mais eficaz na determinação da quantidade de brocas em alguma faixa de valores. Para se obter mais informações, cada levantamento com um dado N_{fixado} foi realizado 1000 vezes, o que permitiu o tratamento estatístico desses dados.

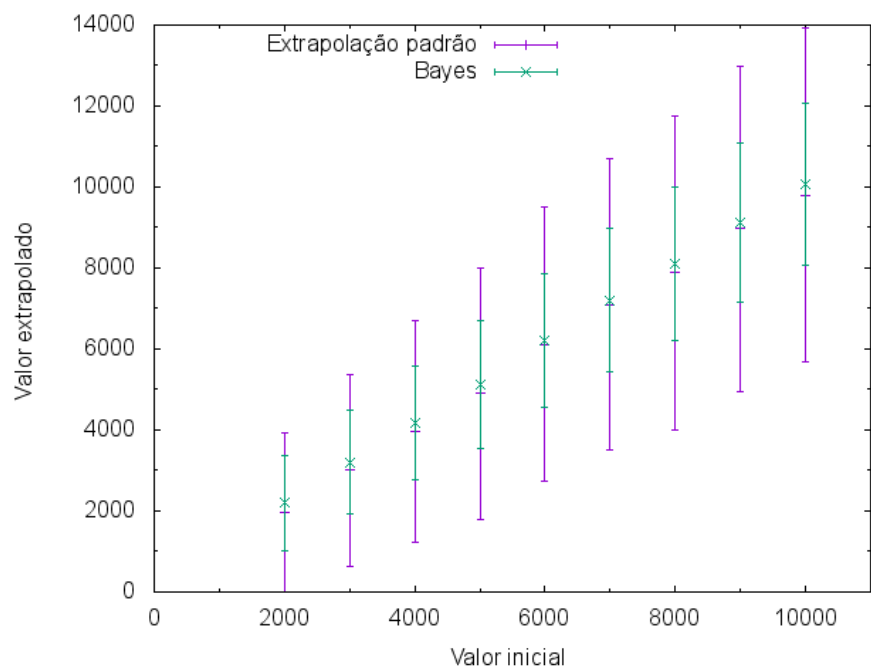


Figura 61: Comparação dos métodos de levantamento com 50 amostras por levantamento - 1000 levantamentos realizados

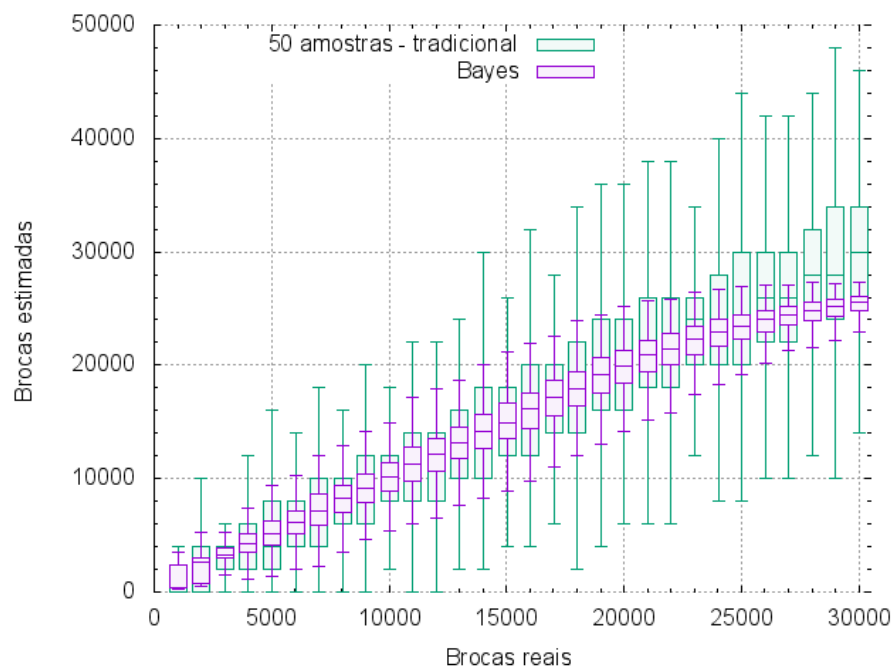


Figura 62: Dados de levantamento com 50 amostras por levantamento - 1000 levantamentos realizados separados em quartis

A figura 61 retrata a comparação dos métodos tradicional, com 50 amostras realizadas, e o método usando estatística Bayesiana. Neste caso, ao utilizar-se o método tradicional

com 50 canas amostradas por hectare, uma grande quantidade de dados fica longe do valor esperado. Ao usar o processo com o teorema de Bayes vemos principalmente uma menor dispersão desses dados. Ambos os métodos, ao se repetir os processos de estimativas 1000 vezes para cada N_{fixado} apresentam valor médio próximo do esperado. Contudo, uma informação mais útil no campo pode ser quão eficaz será cada método ao se realizar um único levantamento numa certa área. Neste ponto é interessante avaliar que a mediana do método tradicional só poderá gerar valores múltiplos de ΔN da equação 35, enquanto o segundo método permite encontrar-se qualquer valor.

Na figura 62 temos os dados de 1000 levantamentos para cada N_{fixado} obtidos através da extrapolação de 50 amostras por levantamento divididos em 4 quartis. Esta abordagem pode trazer informações muito úteis para o agricultor, já que ao realizar um levantamento, a quantidade de brocas presente vai estar dispersa entre os valores apresentados. Vemos logo que mesmo para quantidades pequenas de brocas, o método tradicional pode gerar extrapolações para a população presente muito acima do que está presente. O mesmo ocorre ao se observar os valores mínimos estimados. Esta última situação é bastante preocupante, já que 25 % de todos os dados obtidos com o método tradicional apresentaram população de broca nula, mesmo quando as populações reais eram muito grandes. Menos grave, mas tão preocupante quanto é a situação apresentada no segundo quartil, onde mais 25% dos dados apresentam valores entre 0 e algum valor mais próximo da mediana. É importante neste momento relembrar que a mediana nem sempre vai poder estimar o valor real de brocas presentes, já que nem todos os valores para o tamanho populacional podem ser extrapolados com o método tradicional. Isto faz com que este segundo quartil apresente na maior parte dos casos valores longe do real com distância proporcional à diferença entre o valor médio e a mediana. O terceiro quartil apresenta as melhores estimativas com o método tradicional, contudo, vale lembrar que este quartil é responsável por apenas 25% dos dados. Por último, vemos que o último quartil pode gerar tamanhos populacionais com mais do que o dobro do tamanho real, o que pode gerar uma reação exagerada no momento do controle da praga por parte do fazendeiro.

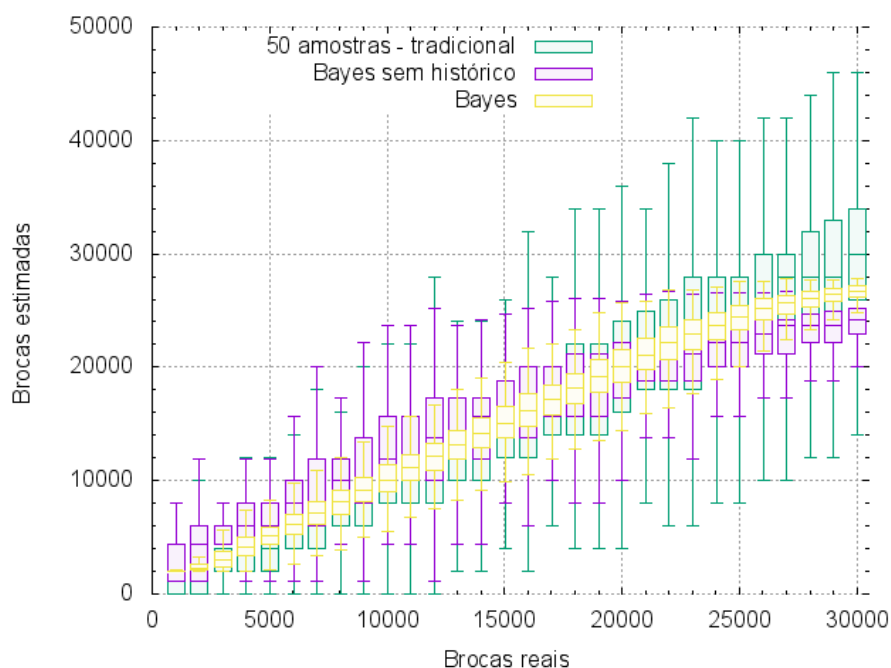


Figura 63: Dados de levantamento com 50 amostras por levantamento com comparação entre o método aleatório, Bayes e Bayes sem histórico - 1000 levantamentos realizados separados em quartis

A figura 63 apresenta uma comparação entre usar a estatística Bayesiana com e sem histórico utilizando o método tradicional com 50 amostras para referência. Sem o histórico as avaliações foram um pouco melhor que o método tradicional nos primeiros quartis, no entanto a mediana mesmo nesse primeiro quartil não estava próxima comparada com os outros métodos. Em geral os valores obtidos com a estatística Bayesiana com o histórico é muito melhor que sem o histórico ou que o método tradicional, mostrando assim a importância de um bom histórico.

Como solução aos problemas apresentados pelo método tradicional, o método de Bayes foi utilizado para estimar o tamanho populacional utilizando os mesmos dados obtidos para a extrapolação no método tradicional. É possível notar rapidamente pela figura 62 que este método apresenta menor dispersão nas estimativas populacionais. A primeira situação a ser analisada e bem útil são os dados do primeiro quartil. Vemos que nenhum dos casos apresentados apresenta população de broca nula estimada, mesmo apresentando valores muito baixos comparados com o valor real. Isto se deve à natureza do método que utiliza os dados do método tradicional, onde casos onde no levantamento L não havia sido encontrada nenhuma broca. Entretanto, ao contrário do método tradicional, não ter sido encontrada nenhuma broca no levantamento não significa automaticamente que não existem brocas presentes, já que o método utilizando o teorema de Bayes considera o histórico de ocorrências e a probabilidade da amostra apresentar uma melhor representação

da realidade. É interessante notar que mesmo neste primeiro quadrante já existem valores bem próximos do valor real. Mais interessante ainda é notar que o segundo quartil agora apresenta quase totalidade das estimativas próximas dos valores reais na maior parte dos casos, o que também acontece no terceiro quartil. Por último é possível observar que o último quartil agora apresenta resultados mais próximos do valor real quando comparado com o último quartil no método tradicional. Os dados estimados neste último quartil ainda não estão muito próximos podendo chegar a valores de cerca do dobro do real, porém cabe notar que os dados de entrada foram gerados pelo método tradicional, onde as estimativas estavam muito mais distantes do que o obtido com este novo método.

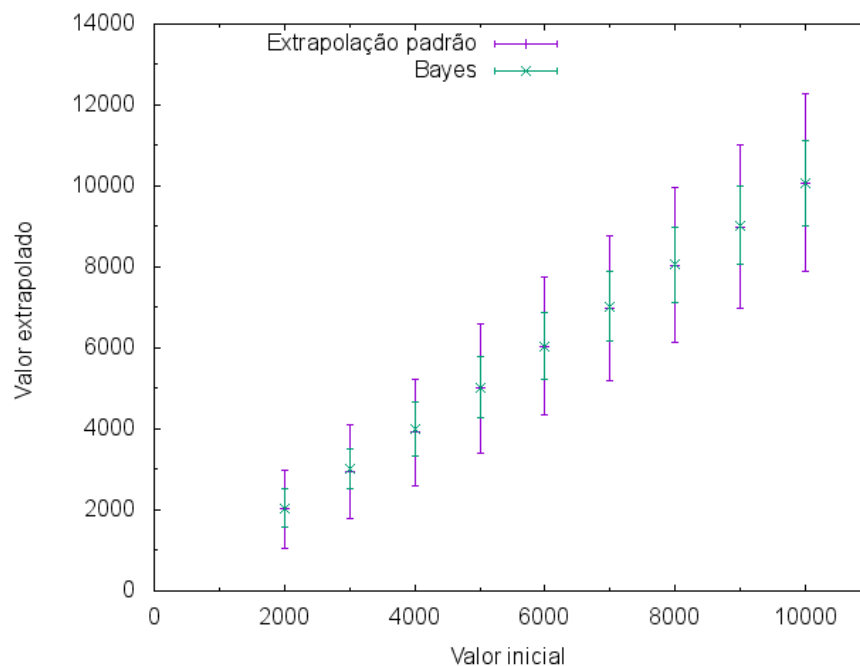


Figura 64: Comparação dos métodos de levantamento com 200 amostras por levantamento - 1000 levantamentos realizados

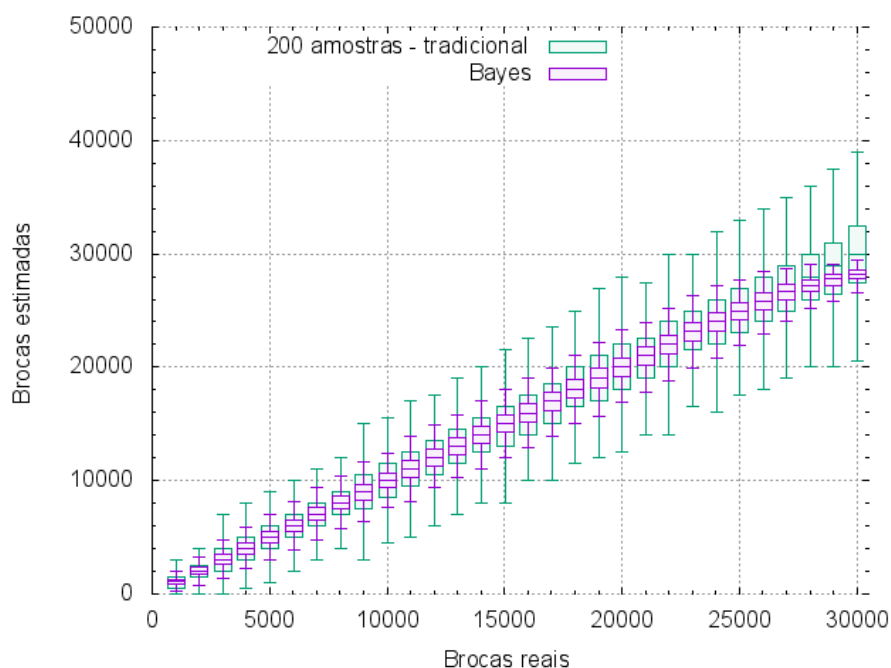


Figura 65: Dados de levantamento com 200 amostras por levantamento - 1000 levantamentos realizados separados em quartis

Na figura 64 vemos uma comparação entre o método padrão e o método usando estatística Bayesiana com 200 amostras por levantamento. Em geral esta condição próxima da indicada em estudos para poder estimar o tamanho populacional, onde a recomendação é que 0.28% da plantação seja avaliada, mas poucos são os casos onde ela é efetivamente realizada no campo [87]. Vemos aqui que a precisão mesmo no método tradicional é bem maior que no caso anterior com 50 amostras por levantamento, o que era de se esperar. O valor médio e o valor real são muito próximos novamente, porém o desvio padrão reduziu-se à menos da metade do caso anterior, sendo um pouco menor ainda que o método usando o teorema de Bayes naquela situação. No entanto, ao usarmos os dados obtidos com as 200 amostras no método de Bayes para levantamento da praga, vemos que novamente este apresenta cerca do dobro de precisão. Uma análise parecida pode ser feita ao observarmos a figura 65, onde são apresentados os dados distribuídos em quartis. Vemos agora que o método tradicional consegue apresentar estimativas nos 2º e 3º quartis muito próximas à sua mediana. Contudo vale lembrar que o método tradicional não tem como aproximar a mediana suficientemente do valor real, já que os dados possíveis seguem ainda a equação 35. É interessante notar ainda que para populações reais pequenas, ainda algumas estimativas ainda considerarão a população de brocas como inexistente.

A figura 65 também apresenta os dados obtidos através da aplicação do teorema de Bayes ao método tradicional, com 200 amostras por levantamento. Vemos novamente uma melhora entre as estimativas dos 2º e 3º quartis quando comparadas ao método tra-

dicional. Entretanto, são nos 1º e 4º quartis onde vemos as melhoras mais significativas. Primeiramente o método não apresenta nenhum valor nulo para a estimativa da população total presente, o que é especialmente importante para populações reais pequenas. Ainda no primeiro quartil vemos que os valores mínimos estimados estão consideravelmente mais próximos dos valores reais. Por fim, é possível observar que o último quartil apresenta extrapolações para a população muito menores do que no caso do método tradicional.

4.5 Eficácia do método tradicional em situação simulada

Na figura 66 vemos a evolução temporal das brocas interagindo com seus predadores, o que idealmente deveria ser reobtido ao se realizar o processo de amostragem. Aplicando a equação 34 para 200 amostras diárias para o período de 200 dias com 5 repetições da interação a partir do primeiro dia, totalizando mil levantamentos, obtemos o histograma retratado na figura 67. É possível notar neste histograma que quase metade das amostras realizadas apresentaram nenhuma ou apenas 1 broca, o que representaria uma estimativa de cerca de 0 ou 500 brocas presentes/hectare. É importante notar que a dinâmica representada na figura 66 tem uma população média de 1300 brocas, onde 43% da população era maior do que a média, e com picos máximo e mínimo em 2800 e 460 brocas respectivamente. Dentro deste intervalo, apenas 25% dos dados apresentam valores menores que 660 brocas e apenas 6% apresentam valores menores de 500 brocas e 37% apresentava população maior que 1500 brocas e apenas 23% acima de 2000 brocas. Já os dados estimados e apresentados no histograma apresentam 37% de amostras estimando população de 500 brocas ou menos. Os valores acima de 1500 brocas estimadas foram encontrados em 45% dos casos, sendo que valores acima de 3000 brocas ocorreram em 6% dos casos. Ainda assim, o valor médio de brocas presentes estimado pelo método aleatório foi de 1300 brocas.

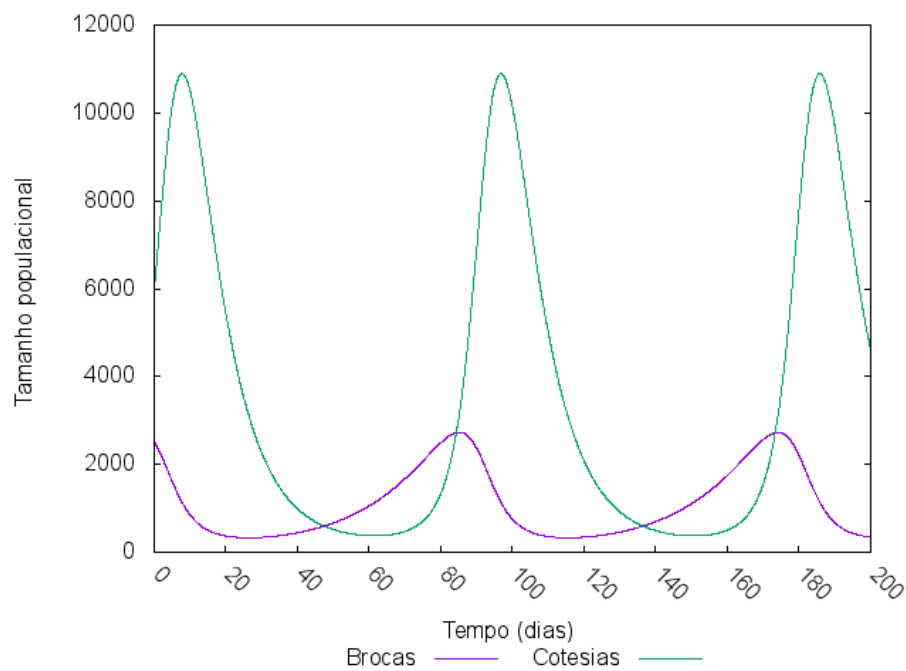


Figura 66: Evolução temporal da simulação utilizada para avaliação das amostragens comercial e acadêmica

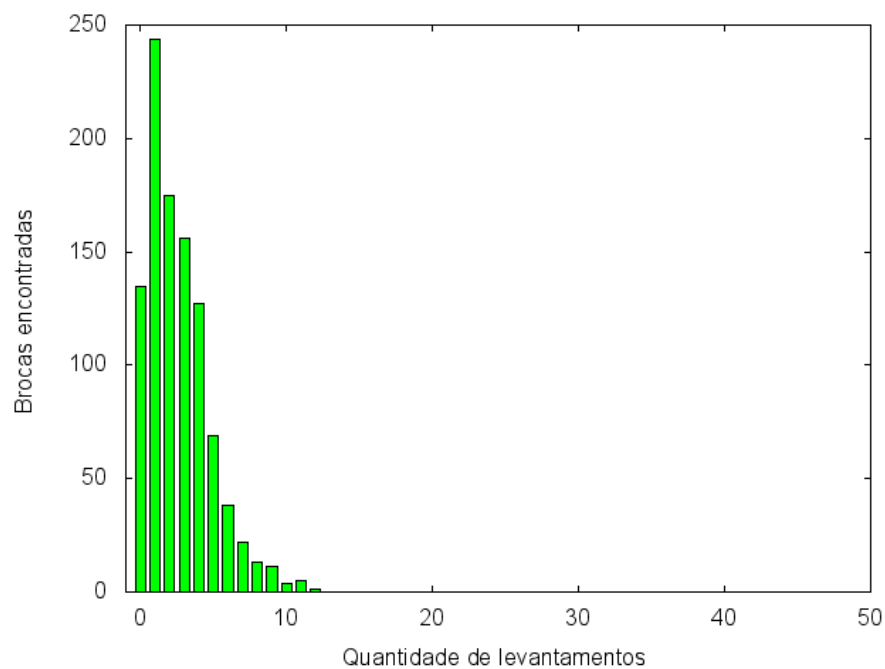


Figura 67: Histograma de 200 amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 34 com 5 repetições a partir do início da dinâmica.

Apesar de o método de amostragem aleatória com 200 canas ter apresentado pouca confiabilidade para avaliar de forma precisa a população de brocas que representava o que

seria encontrado no campo durante 200 dias, comercialmente é comum encontrar situações onde o levantamento é realizado com menos canas amostradas. Fatores como custo da mão de obra, tempo para realização do levantamento, logística, entre outros são responsáveis por uma diminuição das canas avaliadas durante o levantamento. Similarmente como feito no caso anterior, simulamos o levantamento aleatório com 50 canas amostradas por dia, num período de 200 dias com 5 repetições. O histograma retratado na figura 68 apresenta a quantidade de brocas encontradas por levantamento utilizando a mesma situação apresentada na dinâmica da figura 66. Neste caso, ao utilizar a equação 35 vemos que as populações estimadas possíveis apresentam incremento de $\Delta N_{50} = 2000$ brocas. É possível observar que mais da metade dos casos o método de levantamento aleatório permite estimar a população de brocas como inexistente. As amostras onde 1 única broca foi encontrada, o que aconteceu em cerca de 30% dos casos, fizeram com que a estimativa de brocas presentes para a maior parte dos casos não nulos fosse avaliado em 2000 brocas. É interessante notar ainda que o valor máximo estimado foi de 12000 brocas e que valores acima de 4000 brocas estavam presentes em mais de 15%.

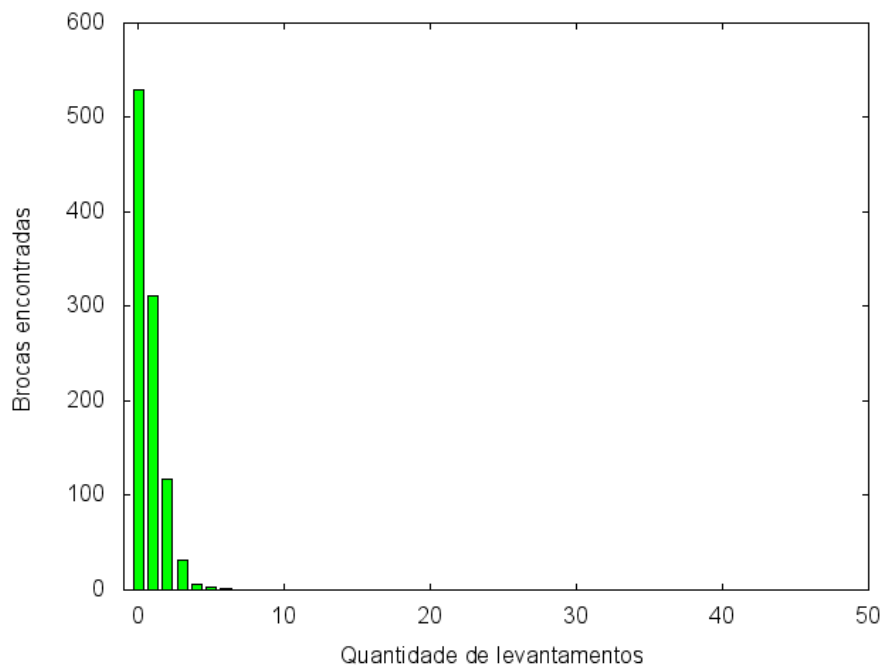


Figura 68: Histograma de 50 amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 34 com 5 repetições a partir do início da dinâmica.

Com o objetivo apenas de ilustrar o que acontece em casos reais no campo, foi construído o histograma presente na figura 69. Os dados chamados de “reais” foram doados pela empresa SmartBio

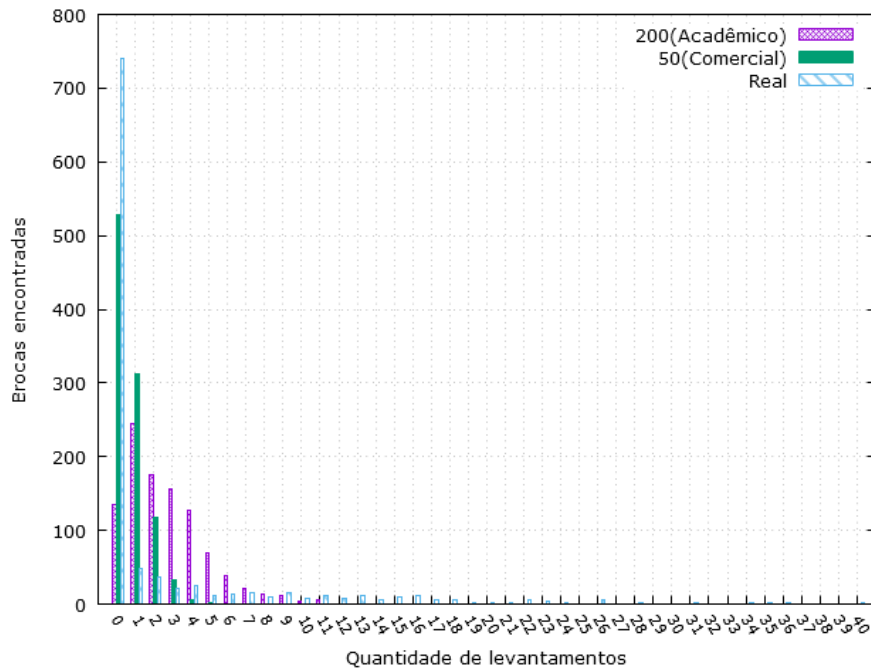


Figura 69: Histograma comparativo entre 200, 50 canas amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 34 com 5 repetições a partir do início da dinâmica e dados reais obtidos do campo

4.6 Otimização de Custo

De posse do custo do controle biológico para várias densidades de brocas e vespas, podemos combinar estes resultados com a probabilidade de uma certa densidade ser encontrada no campo dada uma quantidade de brocas n na amostra de área A . Sendo assim, esperamos encontrar o custo do controle mais provável para uma certa quantidade de brocas n encontradas em uma área A para cada uma das possíveis estratégias de liberação de uma quantidade de vespas w :

$$C(w) = \sum_{\rho} P(\rho | n, A) C(\rho, w) \quad (37)$$

onde $C(\rho, w)$ é obtido através da equação 32 e $P(\rho | n, A)$ é o teorema de Bayes, descrito na equação 33.

4.6.1 Teste de robustez dos dados do campo usados na construção do prior

Para avaliar quão robustos eram os dados obtidos no campo para a construção do prior (presente na equação 33) e quão sensível a variações era o modelo, foram testadas algumas situações. Primeiramente, de um total de 1000 amostragens no campo, 4 condições foram

testadas utilizando os 500 primeiros dados, os 300 e os 500 últimos dados, e por último os dados disponíveis foram selecionados alternadamente e então o prior construído. Isto resultaria em histogramas com grandes diferenças em caso de os dados apresentarem qualquer enviesamento. Como pode ser visto na figura 70 em todos os casos a influência dessas alterações no prior não foram muito significativas. Isto pode ainda ser notado observando como exemplo a taxa de aparição da densidade mais frequente dos dados, $\rho = 0$, que foram 0,7671, 0,7034, 0,7068 e 0,7035 respectivamente.

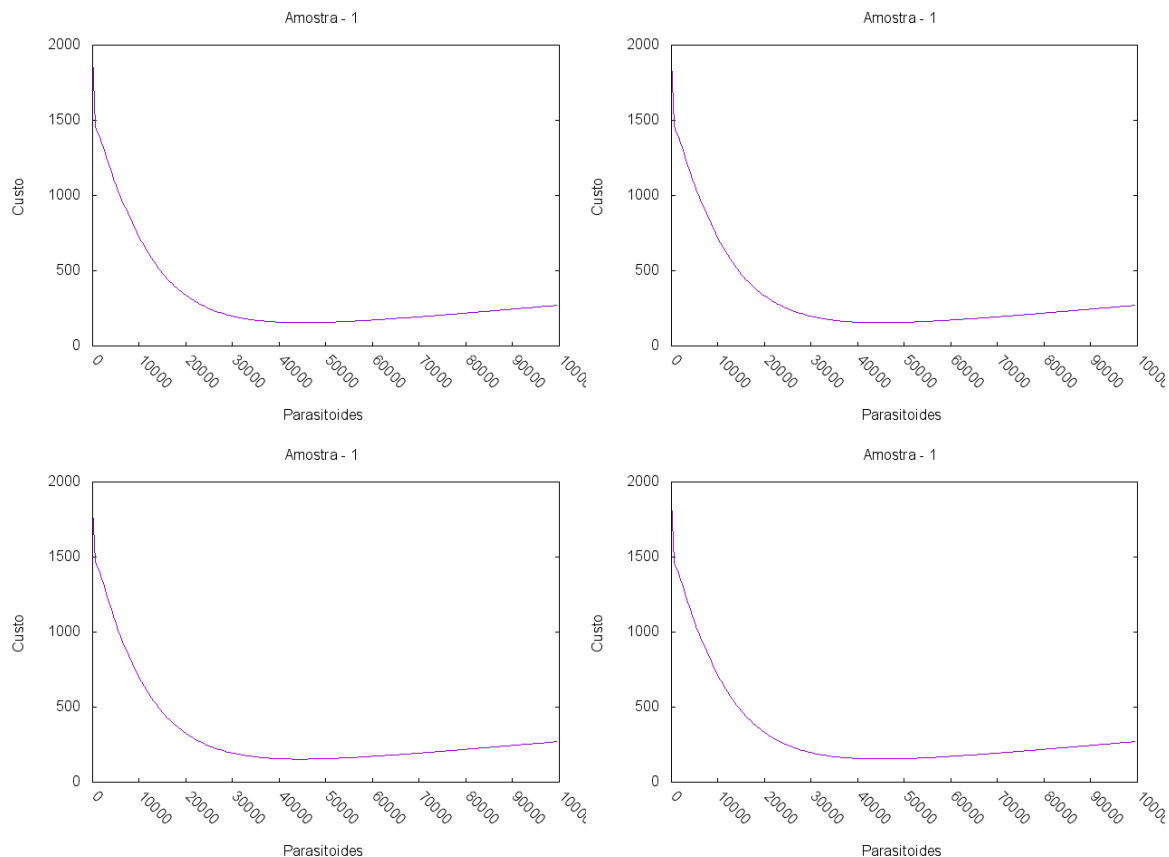


Figura 70: Custo para alguns dos levantamentos realizados no campo para 200 dias com priors diferentes. Canto superior esquerdo - 500 primeiros levantamentos eliminados, superior direito - 300 últimos levantamentos eliminados, inferior esquerdo - 500 últimos levantamentos eliminados, inferior direito - levantamentos alternados eliminados

4.6.2 Avaliação da recomendação padrão comparado com o modelo utilizando EDO

Para exemplificar o processo, alguns dos dados foram separados, eles foram escolhidos com base em apresentarem aplicações de cotesia, o que permitiria uma comparação entre a situação otimizada apresentada aqui e a estratégia adotada pelos fazendeiros. A estratégia corrente apresenta as seguintes condições para as densidades de *brocas*/ m^2

- Abaixo de uma densidade de 0,08 nenhum controle é feito

- Entre as densidades de 0,08 e 0,3, 6000 cotesias/hectare são empregadas
- Entre as densidades de 0,3 e 1,0, 2 cotesias por lagarta devem ser inseridas (algo entre 6000 e 20000 lagartas/hectare)
- Entre as densidades de 1,0 e 1,5, 3 cotesias por lagarta devem ser inseridas (algo entre 30000 e 45000 lagartas/hectare)
- Acima da densidade de 1,5, 4 cotesias por lagarta devem ser inseridas

Pela figura 71, onde as densidades 0,0083, 0,0 e 0,97 foram encontradas, para o período de 200 dias vemos que a estratégia ótima a ser adotada é diferente da recomendada. Na primeira situação a recomendação atual diria para não adotar nenhum controle, o que geraria pelo nosso modelo um prejuízo em torno de 2000 reais. Se por outro lado fosse usado o ponto ótimo, que é em torno de 45 mil vespas, o custo cairia para cerca de 250 reais, sendo necessário um investimento de cerca de 120 reais em cotesias. Os dois próximos casos, onde a densidade estimada pelos métodos tradicionais seria $\rho = 0$ apresentam ambos pontos onde o custo poderia ser reduzido em relação à recomendação de não empregar nenhum controle. O primeiro caso, onde não empregar vespas geraria uma perda de cerca de 500 reais, ao se empregar cerca de 25 mil cotesias a perda poderia ser reduzida a cerca de 150 reais. Já o próximo caso não apresenta uma grande economia ao se empregar cotesias no controle. É interessante notar que em ambos os casos nenhuma broca foi encontrada na amostra, mas a área avaliada foi muito menor no primeiro caso, o que gera mais incerteza da medida, o que nessa abordagem é levado em conta. No último caso, onde a densidade é avaliada em $\rho = 0,19$, aplicar cerca de 25 mil vespas gera no modelo o custo ótimo, que é de cerca de R\$ 250,00. Já considerando o valor recomendado de vespas a serem usadas, cerca de 6 mil vespas, geraria um custo muito próximo também. Esta última situação é interessante para apresentar um ponto muito importante - é extremamente necessário saber a escala de tempo que está sendo avaliada, que nesse primeiro caso foi de cerca de 200 dias com uma única inserção de cotesias.

Sabendo que a escala a ser avaliada é um dos pontos importante no trabalho, realizamos o estudo das amostras anteriores com um período de 550 dias, o que corresponderia à situação menos comum de ser encontrada no campo, onde as brocas são encontradas no dia que a cana começa a crescer e a cana será colhida na estratégia de 1 ano e meio. Na figura 72 as mesmas densidades da figura 71 são apresentadas, mas sendo o período muito maior, as estratégias de liberação são agora diferentes. No primeiro caso, onde a densidade é de $\rho = 0,0083$, adotar a recomendação padrão, de não inserir nenhuma cotesia, geraria um custo de cerca de 600 mil reais por hectare ao final dos 550 dias. Entretanto, utilizar 45 mil vespas, como a estratégia para os 200 dias, já não seria a melhor solução.

Para este caso a utilização de 100 mil vespas geraria a estratégia ótima, apresentando um custo total de cerca de 500 reais por hectare. Nos dois próximos casos, onde $\rho = 0$, podemos ver novamente que as estratégias ótimas são diferentes, já que as áreas avaliadas também foram. Contudo, é interessante notar que o custo total, utilizando a estratégia ótima o custo total ainda é muito próximo do apresentado na figura 71 para os mesmos casos. Por último, no caso da densidade $\rho = 0,19$, onde a recomendação padrão seria utilizar cerca de 6 mil vespas por hectare, vemos que essa estratégia já apresenta um custo total muito maior do que o ponto ótimo. Sendo que inserindo cerca de 85 mil vespas, o custo total do controle cairia a 10% aproximadamente comparado com a recomendação padrão.

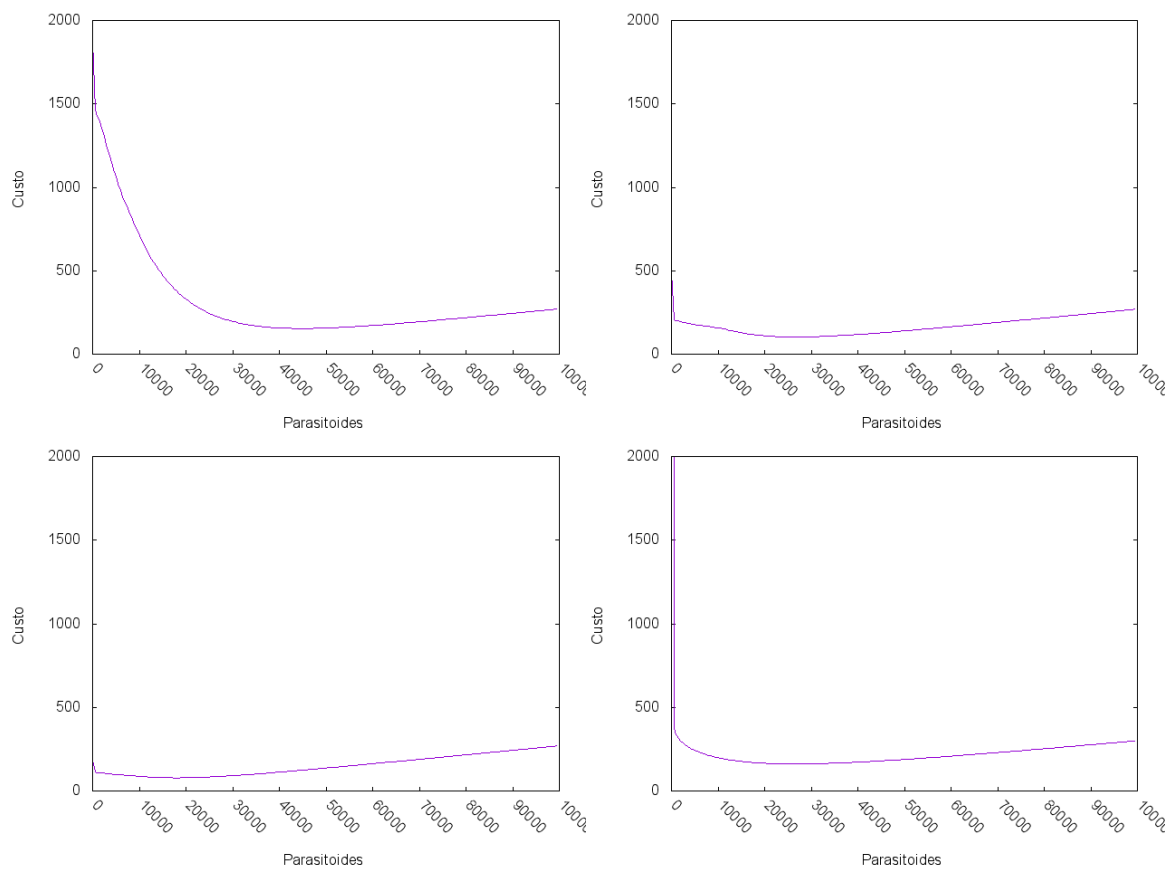


Figura 71: Custo estimado através do modelo com EDO para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 200 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$, $A = 120m^2$, $\rho = 0.0083$, superior direito - $n = 0$, $A = 14m^2$, $\rho = 0$, inferior esquerdo - $n = 0$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, inferior direito - $n = 7$, $A = 36m^2$, $\rho = 0,19$

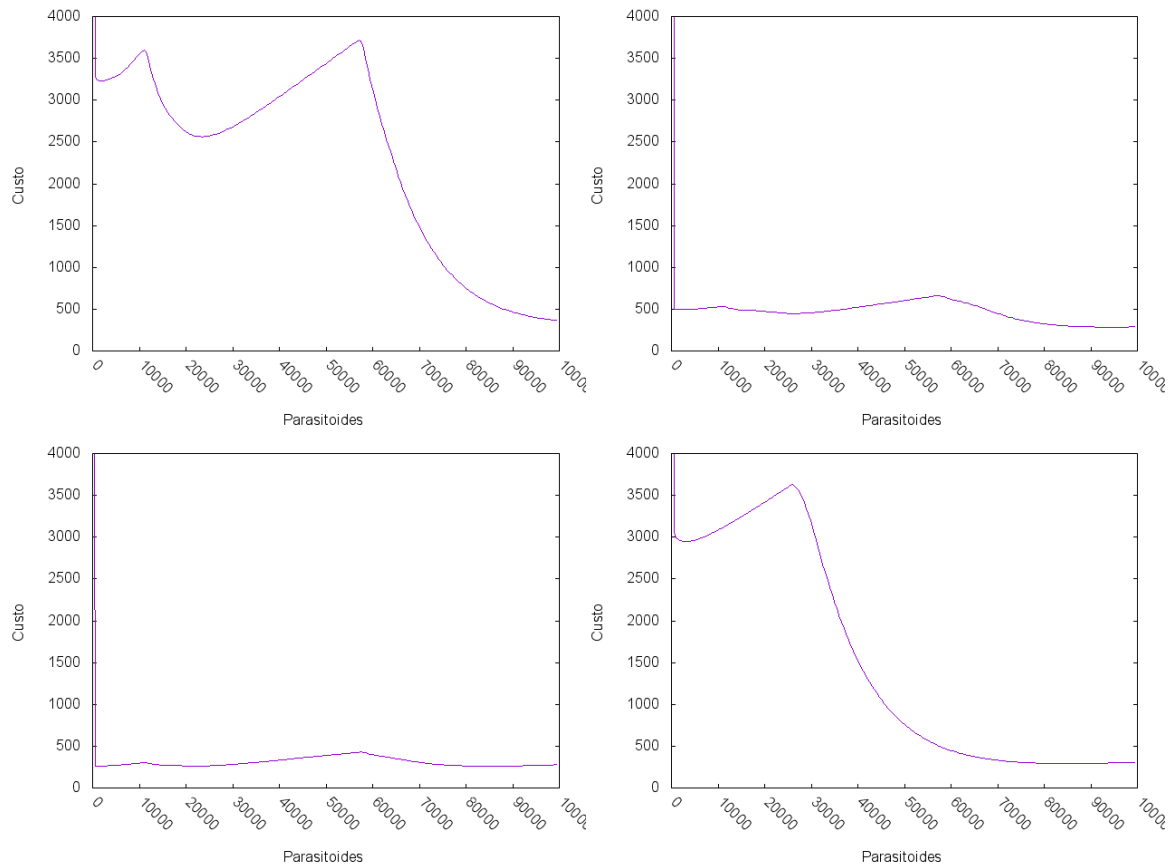


Figura 72: Custo estimado através do modelo com EDO para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 550 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$, $A = 120m^2$, $\rho = 0.0083$, superior direito - $n = 0$, $A = 14m^2$, $\rho = 0$, inferior esquerdo - $n = 0$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, inferior direito - $n = 7$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, 19

Comparação de custos EDO - campo Para poder comparar de forma mais eficaz, foi realizada uma simulação onde uma quantidade de brocas estava presente similarmente ao encontrado em 1 hectare, com índice de infestação de cerca de 1-2%. Um processo de amostragem, considerando 200 canas por amostra/hectare foi realizado, com a probabilidade de uma lagarta ser encontrada dada pela equação 36

$$P_{amostra} = \frac{N_{fixado}}{C}$$

onde:

- $P_{amostra}$ é a probabilidade de uma lagarta ser encontrada ao se avaliar uma cana
- N_{fixado} é o total de lagartas presentes no hectare
- C é o total de canas no hectare

Este processo foi realizado para o total de canas amostradas e o controle estimado através das recomendações padrão, processo descrito neste trabalho de forma otimizada e sem nenhum tipo de controle. De posse das quantidades de parasitoides, T_p , a serem utilizados para cada método, o sistema era iniciado com a quantidade de brocas N_{fixado} e de vespas T_p e o custo para cada situação era então computado através da equação 32. Exemplos dos resultados obtidos podem ser vistos na tabela 1 para uma avaliação considerando um período de 50 dias. Este processo foi repetido 200 vezes para os índices de infestação descritos. O tratamento seguindo a recomendação padrão gerou uma economia de cerca de 35% em relação à situação não tratada. Foram usadas em média 1867 vespas por situação com um máximo de 7333 vespas usadas, porém uma grande quantidade de situações não tiveram nenhuma vespa usada. Entretanto, o processo otimizado gerou uma média de 72% de economia comparado com a situação sem tratamento com uma média de 15720 e máximo de 25000 vespas usadas. O tratamento padrão foi então cerca de 57% menos eficaz na redução de prejuízos que a recomendação otimizada.

Brocas Encontradas	Quant. de brocas	Custo Otimizado	Vespas usadas	Custo da recom. pad.	Vespas usadas	Custo S/vespas
2	2488	132	19500	982	0	982
6	2211	126	25000	214	6000	872
3	2064	126	22000	215	6000	814
0	1915	756	0	756	0	756
3	1774	123	22000	215	6000	700
1	1244	123	17000	491	0	491
1	1040	117	17000	410	0	410
3	812	103	22000	167	6000	320
2	517	91	19500	204	0	204

Tabela 1: Análise de custos para quantidades de brocas diferentes comparando o processo otimizado com a recomendação padrão e sem tratamento para 50 dias.

O processo descrito anteriormente foi repetido considerando uma única inserção de vespas para o período de 200 dias. Nesta nova situação, a recomendação padrão conseguiu gerar uma economia de 43% comparada com a situação sem tratamento. No entanto as quantidades de vespas recomendadas para o tratamento são dependentes apenas da quantidade de brocas presentes no sistema e não do tempo até a próxima avaliação, o que fez com que as mesmas quantidades de vespas fossem novamente recomendadas. Como o processo aqui descrito para a otimização considera com algum nível a incerteza com relação à quantidade de praga presente no sistema e o tempo até o próximo levantamento, as quantidades de vespas a serem inseridas através desse método são completamente diferentes da situação avaliada para 50 dias. Nesta nova situação, a média de vespas recomendadas é de cerca de 41 mil vespas, com amplitude variando de um mínimo de 500 máximo

de 54500 vespas. Este processo conseguiu gerar uma economia de 96% comparado com a situação sem tratamento, sendo o valor gasto 3 vezes maior do que o obtido ao se realizar a avaliação para 50 dias. Ele foi também muito superior ao tratamento padrão, que gerou economia 93% menor que a recomendação otimizada.

4.6.3 Avaliação da recomendação padrão comparado com a simulação

O modelo usando a simulação multi-agentes apresenta uma dinâmica um pouco mais complexa que a obtida através do sistema de equações diferenciais. Por este motivo, avaliar os resultados da otimização usando a estatística bayesiana e este modelo é importante. Vemos na figura 73 a estimativa de custos para várias quantidades de *C. flavipes* no tratamento da broca para um período de 50 dias. Na primeira situação, onde 1 broca foi encontrada em $A = 120m^2$ amostrados a recomendação otimizada é que se utilize 1.500 parasitoides. No entanto qualquer quantidade de vespas abaixo de 36.000 vespas geraria uma economia maior do que não fazer nada. Contudo é importante notar que esta situação apresenta um custo muito baixo para não tomar nenhuma ação, o que deve ser levado em consideração. A mesma recomendação pode ser utilizada para as duas próximas situações, onde nenhuma broca foi encontrada. O custo estimado do dano da broca nestas situações é muito baixo pela alta eficiência do parasitoide, onde o custo estimado na primeira situação é de cerca de R\$ 8,00 e no segundo é de cerca de R\$ 5,00, pouco mais do que o custo do tratamento recomendado. A variação do custo estimado nestas duas situações se deve à área maior no segundo caso, o que gera maior confiança de que não ter encontrado nenhuma broca no levantamento retrata a situação onde não exista realmente praga presente. Porém ao considerar o histórico, a presença da broca não pode ser desconsiderado, o que faz com que a aplicação dos parasitoides entre como uma medida preventiva. No entanto, a situação onde nenhuma broca foi encontrada numa área de $36m^2$ faz com que tratamentos com mais de 3 mil vespas gere mais custo do que a não aplicação destas. Isto só ocorre na situação onde $14m^2$ foram avaliados para tratamentos com mais de 9 mil parasitoides. A última situação apresentada nesta figura, tendo sido encontradas 7 brocas numa área de $36m^2$, a recomendação otimizada é que se utilizem 4.500 parasitoides, enquanto a recomendação padrão indica que se utilize 6 mil indivíduos para o tratamento. O aumento no custo ao utilizar a recomendação padrão neste caso é praticamente nulo, já que o dano estimado é de R\$ 132,00 no caso otimizado e R\$ 137,00 neste outro. É importante lembrar que o custo de 1500 *C. flavipes* é de cerca de R\$ 4,00, sendo assim o aumento de custo para os tratamentos com vespas com quantidades maiores que o caso otimizado nesta situação é devido ao valor dos indivíduos inseridos.

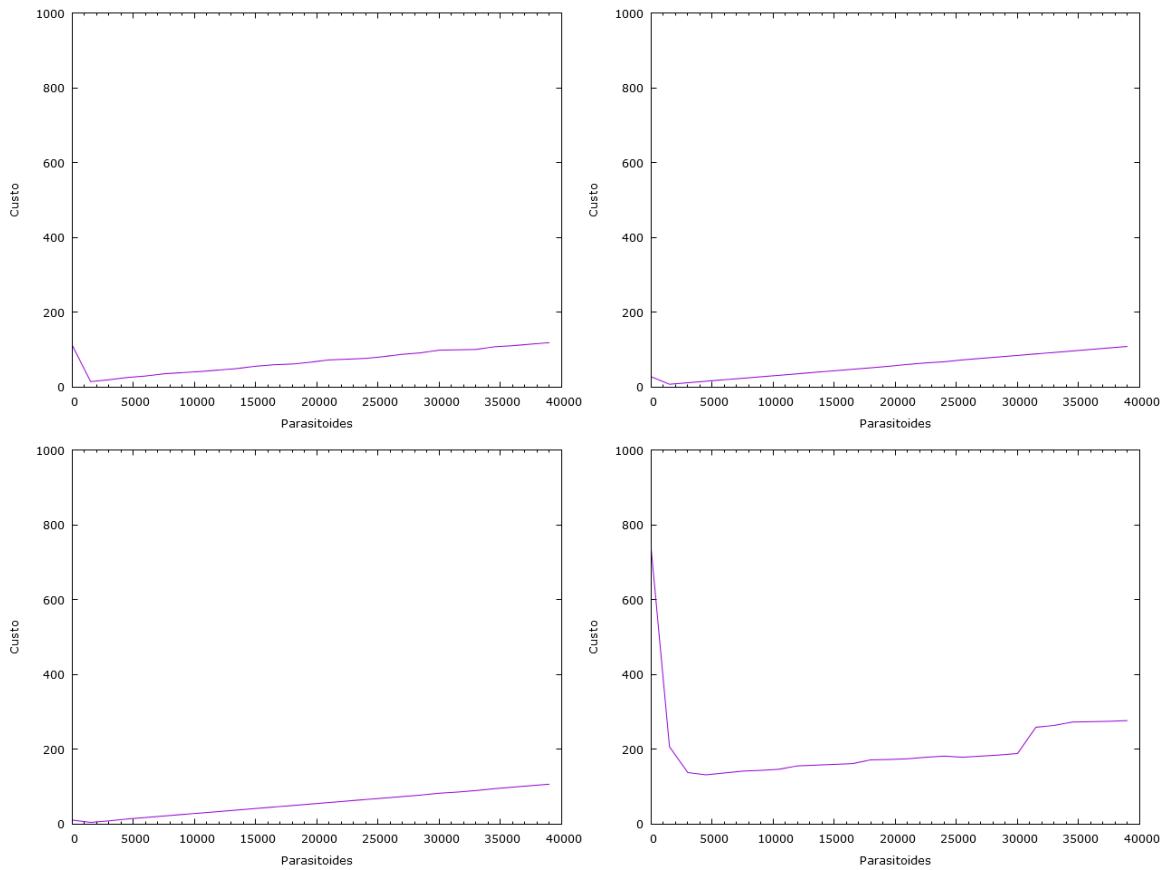


Figura 73: Custo estimado através da simulação para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 50 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$, $A = 120m^2$, $\rho = 0.0083$, superior direito - $n = 0$, $A = 14m^2$, $\rho = 0$, inferior esquerdo - $n = 0$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, inferior direito - $n = 7$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, 19

Na figura 74 vemos as mesmas situações abordadas na figura 73, porém considerando um tempo de 200 dias. Na primeira situação apresentada, onde 1 broca foi encontrada no levantamento de $120m^2$ o tratamento otimizado ainda é o uso de 1.500 indivíduos no controle. No entanto, neste período considerado, qualquer quantidade de parasitoides utilizada vai gerar mais economia do que não adotar alguma ação. Nesta situação, onde o custo estimado sem tratamento é muito alto, seria altamente recomendável alguma aplicação de parasitoides. As próximas duas situações, onde nenhuma broca foi encontrada, a recomendação otimizada ainda é a utilização de 1.500 indivíduos, porém o tratamento com qualquer uma das quantidades apresentadas gera mais economia do que nenhuma ação de controle, o que é diferente da estimativa para 50 dias. Novamente é apresentado um custo menor para o levantamento com maior área, já que existe maior certeza que esta área apresenta maior probabilidade de não haver brocas, também considerando o histórico dos levantamentos anteriores. É importante notar que a recomendação padrão para estas 3 primeiras situações seria não adotar nenhuma ação de controle, o que gera custo bem alto

nestes cenários. A última situação apresenta o controle otimizado novamente com 4.500 cotesias, porém com custo de não tomar ação alguma de tratamento sendo muito maior que o estimado para 50 dias.

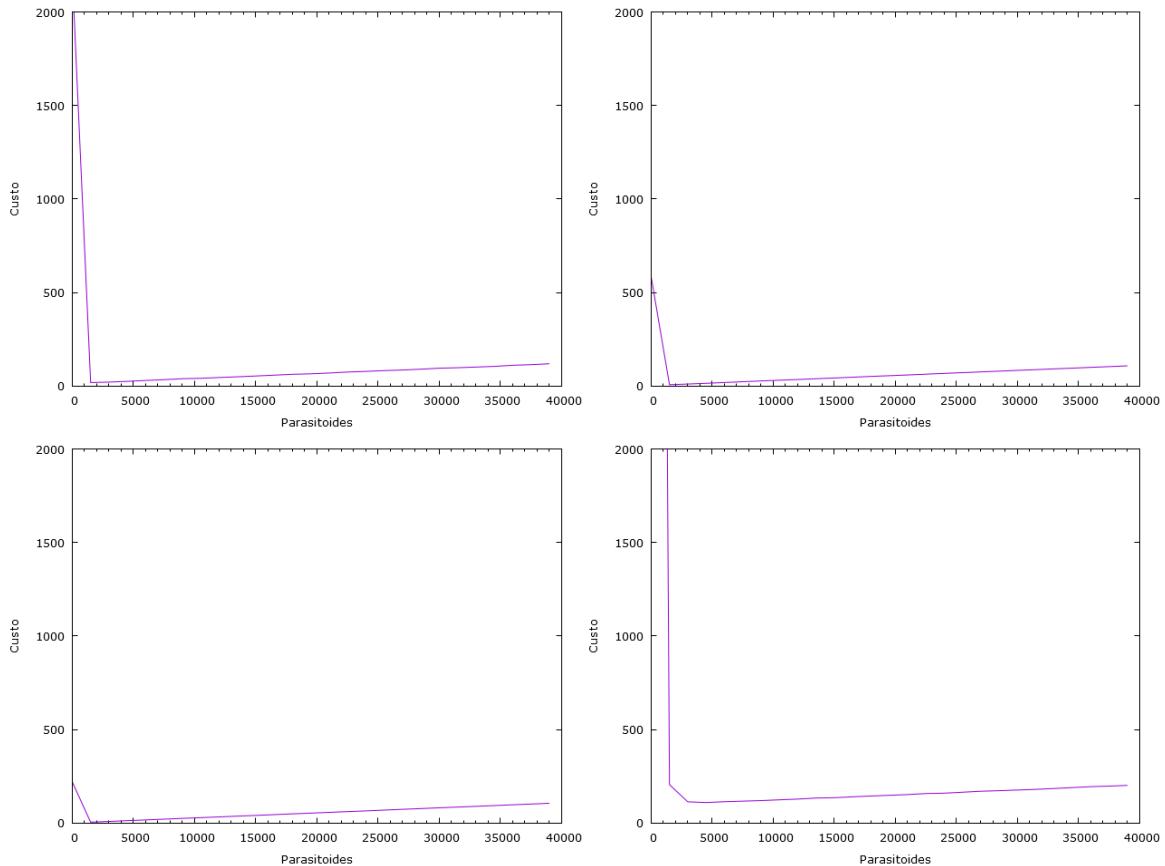


Figura 74: Custo estimado através da simulação para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 200 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$, $A = 120m^2$, $\rho = 0.0083$, superior direito - $n = 0$, $A = 14m^2$, $\rho = 0$, inferior esquerdo - $n = 0$, $A = 36m^2$, $\rho = 0$, inferior direito - $n = 7$, $A = 36m^2$, $\rho = 0, 19$

É importante notar que estas situações foram simuladas considerando parasitoides muito eficientes, onde o coeficiente de eficiência do parasitismo foi considerado como $E_C = 10$. No caso de a *C. flavipes* inserida ser menos eficiente, as recomendações aqui apresentadas sofrerão grandes alterações.

Comparação de custos simulação - campo Utilizando os mesmos dados simulados da seção anterior, foi realizada uma avaliação da eficácia da simulação multi agentes como método de previsão atrelada à estatística bayesiana. Foram utilizados as mesmas 200 condições iniciais, com processo de amostra guiado pela equação 36. No entanto, foram comparados apenas as soluções padrão e solução otimizada para 50 e 200 dias. Para 50 dias a recomendação padrão teve uma variação de parasitoides inseridos com

mínimo de 0 e máximo de 16.500 vespas, sendo o valor médio de vespas empregadas de 3500 e mediana em 6000. Por outro lado, o processo otimizado apresentou a inserção de no mínimo de 1500 e máximo de 16.500 vespas, com valor médio de 4700 e mediana em 4500 parasitoides. O custo médio do tratamento pela recomendação padrão foi de cerca de R\$ 9,00, com total de R\$ 1755,00 para todas as situações simuladas, enquanto a solução otimizada teve o custo médio um pouco maior, sendo cerca de R\$ 12,00 com total de R\$ 2320,00 para todas as situações, sendo cerca de 30% mais caro, porém apresentando uma economia global de 53%, devida à redução de prejuízos que a praga causou.

A partir da quantidade real de brocas presentes, dentro do processo anteriormente descrito, pode-se observar maior economia ao se considerar o período maior, com 200 dias. A recomendação padrão sugere que se insiram as mesmas quantidades de broca, independentemente da escala de tempo a ser considerada. Sendo assim, as quantidades apresentadas no cenário para 50 dias são as mesmas para 200 dias. No entanto, a recomendação otimizada gerou recomendações com pequenas diferenças. Os valores máximos, mínimos e mediana de brocas empregadas foram os mesmos obtidos para a situação de 50 dias, sendo que em algumas poucas situações a quantidade de parasitoides recomendada apresentou pequenas variações, o que gerou um custo de tratamento pouco superior, sendo de R\$ 2324,00. No entanto, a utilização da sugestão otimizada gerou uma economia de cerca de 90%, quando comparada com o custo gerado pelo tratamento padrão. Estes valores estão então equivalentes aos obtidos ao utilizar o modelo Lotka-Volterra como método de previsão, porém apresentando quantidades de vespas muito inferiores à este. Isto se deve em grande parte ao fato da simulação multi agentes retratar com mais detalhes a dinâmica descrita, considerando o tempo de reprodução muito maior para ambas as populações do que o modelo por equações diferenciais, que pela sua própria característica intrínseca considera todos os indivíduos aptos a reproduzir, porém com taxas constantes distribuindo o crescimento durante o ciclo de vida dos indivíduos. É importante notar que as recomendações otimizadas levam em consideração as características das populações envolvidas. Caso o parasitoide utilizado apresente variação na sua eficiência, a quantidade recomendada será diferente. O mesmo vale para as características de reprodução, resistência e ciclos de vida das populações interagentes.

5 Conclusão

A cana-de-açúcar é uma cultura muito importante para o contexto brasileiro atual. Dada sua relevância, todos os aspectos que possam contribuir para a maior competitividade desta devem ser estudados, com especial atenção às soluções com menor impacto ambiental. Neste contexto, o controle de pragas através de predadores, parasitas e parasitoides se apresenta como solução muito pertinente. No entanto, para obter maior compreensão da dinâmica, apenas os dados de observações coletados no campo podem não serem suficientes, sendo o entendimento e interpretação destes grandemente ampliados através de modelos teóricos.

Este trabalho teve como objetivos a utilização de dois modelos para aprimorar o conhecimento de como se dá a dinâmica entre a praga da cana, *D. saccharalis*, e seu parasitoide, *C. flavipes*. De posse de um melhor entendimento da dinâmica, a devolução deste conhecimento em forma de uma ferramenta útil para o agricultor era almejada. Para alcançar estes objetivos foram utilizadas duas técnicas para descrever a interação entre as populações, sendo elas o modelo Lotka-Volterra e simulação computacional através da técnica de multi agentes. A transformação do conhecimento da interação entre praga e parasitoide de forma útil ao agricultor foi obtida através da combinação das técnicas de previsão anteriores com o ferramental da estatística bayesiana, o que possibilitou retornar de forma genérica uma solução otimizada para a utilização do controle biológico da praga.

Foi possível realizar a adaptação do modelo Lotka-Volterra para a interação entre a broca-da-cana e seu parasitoide. Neste processo, os caminhos para uma reestruturação do modelo foram explicitados, dado que os fatores biológicos das populações envolvidas podem mudar com o tempo [52]. De posse do modelo, seus pontos de equilíbrio foram analisados, de onde conclui-se que nas soluções de coexistência apresentadas neste oscilam indefinidamente na presença de pequena perturbações, caracterizando soluções estáveis do tipo centro [91]. Foi possível também calcular o período de oscilação para populações próximas à condição de equilíbrio como sendo de 21,7 dias. Por fim, foram observadas as condições para as quais um certo ciclo limite poderia ser atingido através de populações inicialmente diferentes. Isto indica que tratamentos diversos podem ser aplicados em momentos diferentes de forma a manter as populações controladas em certos valores em um dado instante.

O modelo Lotka-Volterra, apesar de contribuir para o entendimento da dinâmica e apresentar grande velocidade na obtenção de resultados, apresenta muitas limitações no potencial preditivo devido a forma como é idealizado. Entre as condições que causam estas limitações vale ressaltar que este modelo considera indivíduos idênticos entre si,

sendo sexo, idade e taxas de parasitismo e morte os mesmos dentro da população. Como forma de diminuir estas limitações foi usado a técnica de simulação de multi agentes, que apesar de utilizar muito poder computacional, consegue retratar de maneira mais realista a dinâmica entre os indivíduos.

A descrição da dinâmica entre as populações através da técnica de multi agentes foi implementada, sendo as características biológicas quase todas obtidas através dos dados disponíveis da literatura. Porém, como um dos objetivos deste trabalho foi criar as ferramentas necessárias para a obtenção da otimização do uso da *C. flavipes*, estes parâmetros foram utilizados para exemplificar o comportamento qualitativo dos indivíduos. Como as populações envolvidas podem apresentar características biológicas diferentes em regiões diversas, todos os parâmetros avaliados devem ser obtidos para a situação local. Os valores de taxa de morte diária por fatores aleatórios e a eficiência do parasitoide, no entanto, tiveram de ser arbitrariamente definidos, sendo que variação no valor destes foram também estudados. Foi possível observar que a taxa de morte por fatores aleatórios desempenha um papel importante na dinâmica, onde foi observado que a população da praga apresenta ciclos equivalentes ao valor da expectativa média de vida da broca. Este comportamento foi atribuído ao fato dos indivíduos poderem ser retirados diariamente do sistema e poderem se reproduzir apenas ao completarem o ciclo de vida completo, aqui adotado como o último dia de vida do indivíduo. As oscilações no tamanho populacional da broca no período relatado, estando esta população isolada, não pode ser observado pelo modelo Lotka-Volterra, já que este considera a população podendo se reproduzir a todo instante.

Dentro da análise dos resultados da simulação multi agentes foi ainda possível avaliar a eficácia da vespa considerando as outras condições iniciais idênticas. Nos cenários avaliados o parasitismo foi identificado como decisivo para o controle da praga, porém uma grande quantidade das mortes dos indivíduos desta pôde ser atribuído ao sistema, sendo consideradas através da taxa de morte aleatória. O parasitismo, no entanto, atuou ativamente nos primeiros dias da inserção das vespas, sendo que neste período para coeficientes de eficiência do parasitoide $E_C \geq 6$ a quantidade de lagartas presentes no sistema foi muito similar, apresentando total menor do que a quantidade de adultos e ovos desta população. No entanto, como a *C. flavipes* atua apenas na fase de lagarta da broca, os adultos e ovos do sistema foram responsáveis por um segundo pico identificado cerca de 20 dias após a inserção dos parasitoides. Este segundo ponto de máximo, no entanto, pode ser um indicativo ruim caso um levantamento para atestar a eficiência da broca ocorra cerca de próximo a este. Isto porque os cenários onde o controle total ocorre, a população de brocas está quase extinta a cerca de 40 dias da inserção enquanto nos outros a população de brocas ainda apresenta quantidades significativas de indivíduos neste período. A

presença deste segundo pico a cerca de 20 dias da inserção inicial em todos os cenários avaliados, indica que uma estratégia com 2 inserções de parasitoides espaçadas podem apresentar um controle mais eficaz.

De posse dos resultados da dinâmica obtidos através do modelo Lotka-Volterra e da simulação multi agentes, uma análise do custo da praga foi realizada. Foi considerado o dano econômico que a broca pode gerar, bem como o custo do tratamento. Este resultados apresentaram ponto ótimos na redução do custo da praga, porém um alto grau de certeza do tamanho da população da praga e dos parâmetros empregados deve existir. Para contornar o problema da incerteza da quantidade de brocas presentes no campo, foi utilizada o teorema de Bayes, onde probabilidades foram atribuídas à densidades de broca arbitrariamente fixadas. De posse destas probabilidades foi possível observar que este último método é muito eficaz na estimativa populacional, porém sua eficácia depende de um bom histórico de pragas registradas. Por fim, a combinação do custo da praga com o método de levantamento empregado resultou em uma ferramenta efetiva para o controle da broca. Dentre os cenários avaliados, a média total de economia ao adotar as estratégias propostas por essa ferramenta foi sempre superior à 40% comparada com o método tradicionalmente adotado, tanto ao utilizar o modelo Lotka-Volterra quanto a simulação multi agentes para previsão dos custos. A abordagem aqui adotada se mostra como muito promissora para aprimorar as estratégias para o controle da *D. saccharalis*, sendo um passo anterior ao desenvolvido de experimentos no campo, o que pode significar redução de custos ao direcionar quais estratégias devem ser priorizadas nos testes.

Referências

- [1] D'HONT, A. et al. Determination of basic chromosome numbers in the genus *Saccharum* by physical mapping of ribosomal RNA genes. **Genome**, v. 41, n. 2, p. 221–225, abr. 1998.
- [2] KOLE, Chittaranjan (Ed.); HALL, Timothy C. (Ed.). Compendium of transgenic crop plants. **Hoboken, N.J: Wiley-Blackwell**, 2008. v.7. 248 p.
- [3] DE SOUZA, A. P.; GRANDIS, A.; LEITE, D. C. C.; BUCKERIDGE, M. S. Sugarcane as a Bioenergy Source: History, Performance, and Perspectives for Second-Generation Bioethanol. **BioEnergy Research**, v. 7, n. 1, p. 24–35, 2014.
- [4] UNICA - União da Indústria de Cana-de-açúcar, 2017. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/>>, Acesso em 19/10/2017.
- [5] MACEDO, I. C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996). **Biomass and Bioenergy**, v. 14, n. 1, p. 77–81, 1998.
- [6] DE OLIVEIRA BORDONAL, R.; DE FIGUEIREDO, E. B.; LA SCALA, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 846–858, 2012. Elsevier B.V.
- [7] GARCÍA, C. A.; FUENTES, A.; HENNECKE, A.; et al. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. **Applied Energy**, v. 88, n. 6, p. 2088–2097, 2011.
- [8] AMBROSANO, G. M. B.; STIMAC, J. L.; SILVEIRA NETO, S.; IGUE, T.; NAGAI, V. Modelo matemático para simulação do controle biológico da broca-da-cana com o parasitoide *Trichogramma galloi*: I. Modelos conceituais. **Bragantia**, v. 55, n. 2, 1996.
- [9] POTGIETER, L. Modelling the effects of the sterile insect technique applied to *El-dana saccharina* Walker in sugarcane. v. 28, n. 2, p. 59–84, 2012.
- [10] RAFIKOV, M.; LORDELO, A. D. S.; RAFIKOVA, E. Impulsive Biological Pest Control Strategies of the Sugarcane Borer. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2012, p. 1–14, 2012.

- [11] RAFIKOV, M.; DE HOLANDA LIMEIRA, E. Mathematical modelling of the biological pest control of the sugarcane borer. **International Journal of Computer Mathematics**, v. 89, n. 3, p. 390–401, 2012.
- [12] TANG, S.; CHEKE, R. A. Models for integrated pest control and their biological implications. **Mathematical biosciences**, v. 215, n. 1, p. 115–25, 2008.
- [13] RAFIKOV, M.; SILVEIRA, J. C. On dynamical behavior of the sugarcane borer – Parasitoid agroecosystem. **Ecological Complexity**, v. 18, n. 2013, p. 67–73, 2014.
- [14] SONG, Z.-G.; ZHEN, B.; XU, J. Species coexistence and chaotic behavior induced by multiple delays in a food chain system. **Ecological Complexity**, v. 19, p. 9–17, 2014.
- [15] RAFIKOV, M.; BALTHAZAR, J. M.; VON BREMEN, H. F. Mathematical modeling and control of population systems: Applications in biological pest control. **Applied Mathematics and Computation**, v. 200, n. 2, p. 557–573, 2008.
- [16] BOTELHO, P.; PARRA, J.; NETO, J.; OLIVEIRA, C. Associação do parasitoide de ovos *Trichogramma galloi* Zucchi (Hymenoptera: Trichogrammatidae) e do parasitoide larval *Cotesia flavipes* (Cam.) (Hymenoptera: Braconidae) no controle de *Diatraea saccharalis*, (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar. **An. Soc. Entomol. Bras**, v. 28, n. 3, p. 491–496, 1999.
- [17] ACEVEDO, J. P. M.; SAMUELS, R. I.; MACHADO, I. R.; DOLINSKI, C. Interactions between isolates of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* and the entomopathogenic nematode *Heterorhabditis bacteriophora* JPM4 during infection of the sugar cane borer *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Pyralidae). **Journal of invertebrate pathology**, v. 96, n. 2, p. 187–92, 2007.
- [18] CAMPOS-FARINHA, A. Biologia reprodutiva de *cotesia flavipes* (CAMERON) (HYMENOPTERA: BRACONIDAE). IV. Discriminação entre lagartas parasitadas e não parasitadas de *diatraea saccharalis fabricius* (LEPIDOPTERA: PYRALIDAE), tempo de desenvolvimento e razão sexual dos parasitoides. **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, p. 229–234, 2000.
- [19] MAHMOUD, A. Parasitism by the Endoparasitoid , *Cotesia flavipes* Induces Cellular Immunosuppression and Enhances Susceptibility of the Sugar Cane Borer , *Diatraea saccharalis* to *Bacillus thuringiensis* Parasitism by the endoparasitoid , *Cotesia flavipes* induces cellula. **Journal of Insect Science**, v. 11, n. 119, p. 1–15, 2011.

- [20] NEVES M.F.; TROMBIN, V. G. A Dimensão do setor sucroenergético - Mapeamento e quantificação da safra 2013/14. , p. 45 p., 2014.
- [21] MITCHELL, R.; SCHMER, M. Compendium of Bioenergy Plants: sugarcane.p. 2016.
- [22] COLE, Juan. Iraq and the Israeli-Palestinian Conflict in the Twentieth Century. **Macalester International**. Vol. 23, Article 8. 2009. Available at: <http://digitalcommons.macalester.edu/macintl/vol23/iss1/8/>
- [23] GALEMBECK, F.; DE ABREU FILHO, P. Perspectives for Biomass Production and Use in Brazil. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 274–293, 2017.
- [24] Decreto n 76.593, de 14 de novembro de 1975 - disponível em <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76593-14-novembro-1975-425253-norma-pe.html>>
- [25] SHOEMAKER, C. Optimization of agricultural pest management I: Biological and mathematical background. **Mathematical Biosciences**, v. 175, n. 139, p. 143–175, 1973.
- [26] GALLO, Domingos ...et Al.. Manual de entomologia agrícola. Sao Paulo, **Agronomica CERES**, 1978. 531 p.
- [27] PARRA, J. R. P. et al. Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores. São Paulo: **Manole**, 2002. 635 p. ISBN 85-204-1554-7.
- [28] RODERO, D. P. Modelagem matemática da interação populacional entre *Diatraea saccharalis* (Fabricius , 1794) e o parasitoide *Cotesia flavipes* (Cameron , 1891), 2016. UFSCar.
- [29] PLANT, R. E.; MANGEL, M. Modeling and Simulation in Agricultural Pest Management. **SIAM Review**, 29 (2): 235–261, 1987.
- [30] Agrofit. Sistema de agrotóxicos fitossanitários. Disponível em <<http://agrofit.agricultura.gov.br>>. Acesso em 16 Nov. 2017.
- [32] FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. Cana-de-açúcar e seus impactos : uma visão acadêmica. 2017.
- [33] MOTA, L. D. M. Agrotóxicos e transgênicos: solução ou problema à saúde humana e ambiental? **Saúde & Ambiente em Revista**, v. 4, n. 1, p. 36–46, 2009.

- [34] CARNEIRO, F. F.; et al. Dossiê ABRASCO, um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde. Rio de Janeiro/São Paulo: **Editora Expressão Popular**, 2015.
- [35] ROSSI, M.; FOWLER, H. Manipulation of fire ant density, *Solenopsis* spp., for short-term reduction of *Diatraea saccharalis* larval densities in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 2, p. 389–392, 2002.
- [36] POTGIETER, L.; VAN VUUREN, J. H.; CONLONG, D. E. A reaction–diffusion model for the control of *Eldana saccharina* Walker in sugarcane using the sterile insect technique. **Ecological Modelling**, v. 250, p. 319–328, fev. 2013.
- [37] NOLAN, T. et al.; Developing transgenic *Anopheles* mosquitoes for the sterile insect technique. **Genetica**, v. 139, n. 1, p. 33–9, jan. 2011.
- [39] HICKERSON, M. J. All models are wrong. **Molecular ecology**, v. 23, n. 12, p. 2887–9, 2014.
- [40] ALPHEY, L. et al.; Sterile-insect methods for control of mosquito-borne diseases: an analysis. Larchmont, N.Y.: **Vector borne and zoonotic diseases**, v. 10, n. 3, p. 295–311, abr. 2010.
- [41] ANTIGO, M. DE R.; et al.; Repelência de produtos fitossanitários usados na cana-de-açúcar e seus efeitos na emergência de *Trichogramma galloi*. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 4, p. 910–916, 2013.
- [42] COSTA, D. P.; COSTA, D. P. Distribuição Espacial de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera : Crambidae) em Cana-de-açúcar, 2009.
- [43] AMBROSANO, E. J.; et al. Infestation of *Diatraea saccharalis* (Fabr.) during Five Consecutive Cycles of Sugarcane Crop Succeeding Leguminous Crops. **Agricultural Sciences**, v. 6, n. 1, p. 14–21, 2015.
- [44] MOORE, P.; BOTHA, F. Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology. New Delhi: **Wiley Blackwell**, 2014.
- [45] LONG, W. H.; HENSLEY, S. D. Insect Pests of Sugar Cane. **Annual Review of Entomology**, v. 17, n. 1, p. 149–176, 1972.
- [46] Brasil. Lei n 11.241 de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2002/lei-11241-19.09.2002.html>> Acesso em 16 Nov. 2017.

- [47] Portal do Governo. Etanol Verde. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/>> Acesso em 16 Nov. 2017.
- [48] VEIGA, A. C. P.; et al.; Quality control of *Cotesia flavipes* (Cameron) (Hymenoptera: Braconidae) from different Brazilian bio-factories. **Biocontrol Science and Technology**, v. 23, n. 6, p. 665–673, 2013.
- [49] WIEDENMANN, R. N.; SMITH, J. W.; DARNELL, P. O. Laboratory rearing and biology of the parasite *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) using *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Pyralidae) as a host. **Environ. Entomol.**, v. 21, p. 1160–1167, 1992.
- [50] LEERDAM, M. B. VAN; SMITH, J. W.; FUCHS, T. W. Frass-mediated host-finding behavior of *Cotesia flavipes*, a braconid parasite of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Pyralidae). **Ann. Entomol. Soc. Am.**, v. 78, p. 647–650, 1985.
- [51] POTTING, R. P. J.; VET, L. E. M.; DICKE, M. Host microhabitat location by stem-borer parasitoid *Cotesia flavipes*: the role of herbivore volatiles and locally and systemically induced plant volatiles. **Journal of Chemical Ecology**, v. 21, n. 5, p. 525–539, 1995.
- [52] HAROLDO, X. L. V.; et al.; Determination of method to evaluate parasitism and cover area for studies on *Cotesia flavipes* in sugarcane. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 436–447, 2014.
- [53] VEIGA, A. C. P.; et al.; Quality control of *Cotesia flavipes* (Cameron) (Hymenoptera: Braconidae) from different Brazilian bio-factories. **Biocontrol Science and Technology**, v. 23, n. 6, p. 665–673, 2013.
- [54] VACARI, A. M.; et al.; Fonte proteica na criação de *Diatraea saccharalis* e seu reflexo na produção e no controle de qualidade de *Cotesia flavipes*. **Bragantia**, v. 71, n. 3, p. 355–361, 2012.
- [55] SIMÕES, R. A.; et al.; I. Biological and behavioral parameters of the parasitoid *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) are altered by the pathogen *Nosema* sp. (Microsporidia: Nosematidae). **Biological Control**, v. 63, n. 2, p. 164–171, 2012.
- [56] ROSSI, M. N. Evidences of non-additive effects of multiple parasitoids on *Diatraea saccharalis* Fabr. (Lep., Crambidae) populations in sugarcane fields in Brazil. **Journal of Applied Entomology**, v. 128, n. 2, p. 88–94, 2004.

- [57] MACEDO, N.; ARAÚJO, J. R. Efeitos da queima do canavial sobre parasitóides de larvas e de ovos de *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 29, n. 1, p. 79–84, 2000.
- [58] SANTOS, L. A. O.; MIHSFELDT, L. H. Capacidade de Busca e de Parasitismo de *Cotesia flavipes* Cameron (Hymenoptera: Braconidae) em Lagartas de *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae). **EntomoBrasilis**, v. 7, n. 2, p. 106–109, 2014.
- [59] ARROYO, B. M.; et al.; Predação de “massas” de *Cotesia flavipes* na técnica de liberação Por Espalhamento De Pupas No Canavial. **VI workshop Agroenergia. Anais...** . p.2–7, 2012. Ribeirão Preto, SP.
- [61] ALAM, M. M.; BENNETT, F. D.; CARL, K. P. Biological control of *Diatraea saccharalis* (F.) in Barbados by *Apanteles flavipes* Cam. and *Lixophaga Diatraeae* T. T. **Entomophaga**, v. 16, n. 2, p. 151–158, 1971.
- [62] ARAÚJO, J. R.; et al.; Influência do número de apanteles *flavipes* liberados, na eficiência de controle da broca da cana-de-açúcar, *diatraea saccharalis*. **Cad. Pl-nalsucar**, v. 3, p. 3–24, 1984.
- [63] Agrolinkfito. Bula Cotésia Biocana. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/agrolinkfito/produto/cotesia-biocana_8562.html> Acesso em: 10 Nov. 2017.
- [64] Biocontrol. Cotésia Biocontrol. Disponível em: <<http://www.biocontrol.com.br/produtos-cotesia.php>> Acesso em: 10 Nov. 2017.
- [65] SANTOS, Rafael Ferreira dos. Desenvolvimento de nova embalagem para comercialização, transporte e liberação do parasitoide *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891) (Hymenoptera: Braconidae). 2015. viii, 57 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/123709>>.
- [66] MFRURAL. Preços de *Cotesia flavipes*. 2015. Disponível em: <<http://www.mfrural.com.br/busca.aspx?palavras=cotesia+flavipes>>. Acesso em: 10 Nov. 2017.
- [67] DINARDO-MIRANDA, L.; et al. Reação de cultivares de cana-de-açúcar à broca do colmo. **Bragantia**, 2013.

- [68] LOTKA, A. J. Undamped oscillations derived from the law of mass action. **Journal of the American Chemical Society**, v. 42, n. 8, p. 1595–1599, 1920.
- [69] VOLTERRA, V. Variations and Fluctuations of the Number of Individuals in Animal Species living together. **ICES Journal of Marine Science**, v. 3, n. 1, p. 3–51, 1928.
- [70] LIANG, J.; TANG, S. Optimal dosage and economic threshold of multiple pesticide applications for pest control. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 51, n. 5-6, p. 487–503, 2010. Elsevier Ltd.
- [71] MOLTER, A.; RAFIKOV, M. Nonlinear optimal control of population systems: applications in ecosystems. **Nonlinear Dynamics**, v. 76, n. 2, p. 1141–1150, 2014.
- [72] GAO, W.; TANG, S. The effects of impulsive releasing methods of natural enemies on pest control and dynamical complexity. **Nonlinear Analysis: Hybrid Systems**, v. 5, n. 3, p. 540–553, 2011. Elsevier Ltd.
- [73] CAMPOS, J. R.; et al.; Biological control of caterpillar sugarcane (*Diatraea saccharalis*) considering interval mathematical models. **BIOMATH**, v. 5, n. 1, p. 1604232, 2016.
- [74] CAPINERA, J. L. . Sugarcane Borer, *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Insecta: Lepidoptera: Pyralidae). University of Florida. IFAS Extension. 2001. Disponível em: <http://edis.ifas.ufl.edu>. Acesso em: jan .2018.
- [75] HENSLEY, S. D. et al.; Effects of Insecticides on the Predaceous Arthropod Fauna of Louisiana Sugarcane Fields. **Journal of Economic Entomology**: 146–149, 1961.
- [76] BEUZELIN, J. M. et al.; Field assessment of novaluron for sugarcane borer, *Diatraea saccharalis* (F.) (Lepidoptera: Crambidae), management in Louisiana sugarcane. **Crop Protection**: 1168–1176, 2010.
- [77] WHITE, W. H. et al.; Re-evaluation of sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae) bioeconomics in Louisiana. **Crop Protection**: 1256–1261, 2008.
- [78] MURRAY, J. D. Mathematical Biology. **Springer-Verlag**. Berlin, 3 ed. 2002.
- [79] RAFIKOV, M.; AGELELLI, T. Optimization of Biological Pest Control of Sugarcane Borer. Saint Petersburg: **18th IEEE International Conference on Control Applications**, 2009.
- [80] RAFIKOV, M.; SILVEIRA, J. C. On dynamical behavior of the sugarcane borer – Parasitoid agroecosystem. **Ecological Complexity**, v. 18, n. 2013, p. 67–73, Elsevier B.V., 2014.

- [81] DINARDO-MIRANDA, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. A. Cana-de-açúcar. Campinas: **Instituto Biológico**: 349-404, 2008.
- [82] LV, J.; et al.; Impact of *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) as an augmentative biocontrol agent for the sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae) on rice. , v. 56, n. 2, p. 159-169, 2011
- [83] SANDOVAL, S. S.; SENÔ, K. C. A. Comportamento e controle da *Diatraea saccharalis* na cultura da cana-de-açúcar. **Nucleus**, v. 7, n. 1, p. 243–257, 2010. (in Portuguese)
- [84] SCHEXNAYDER, H. P.; REAGAN, T. E.; RING, D. R. Sampling for the Sugarcane Borer (Lepidoptera: Crambidae) on Sugarcane in Louisiana. **Journal of Economic Entomology**, v. 94, n. 3, p. 766–771, 2001.
- [85] DE BELÉM, C. de S. Q. P. Simulação da intensidade de infestação de *Diatraea saccharalis* e impactos na qualidade tecnológica e econômica da cana-de-açúcar. UFG, 2017.
- [87] DINARDO-MIRANDA, L. L.; FRACASSO, J. V.; PERECIN, D. Variabilidade espacial de populações de *Diatraea saccharalis* em canaviais e sugestão de método de amostragem. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 577–585, 2011.
- [88] GOTELLI, Nicholas J. A primer of ecology. University of Vermont. Third edition, 2001 (pgs. 26-30)
- [89] OTTO, Sarah P.. DAY, Troy. A biologist's guide to mathematical modeling in ecology and evolution. Princeton, **Princeton University Press**, c2007. x, 732 p..
- [90] HASSELL, M.; LAWTON, J.; MAY, R. Patterns of dynamical behaviour in single-species populations. **The Journal of Animal Ecology**, v. 45, n. 2, p. 471–486, 1976.
- [91] FIEDLER-FERRARA, Nelson; PRADO, Carmen P. Cintra Do. Caos: uma introdução. São Paulo: **Edgard Blucher**, 1995. 402 p.
- [92] MAY, Robert M. (ed). McLean, Angela R. (ed). Theoretical ecology principles and applications. Oxford, **Oxford University Press**, 2007 New York. ix, 257 p..
- [93] BENNETT, F. D. 1965. Tests with parasites of Asian graminaceous mothborers on *Diatraea* and allied genera in Trinidad. Commonwealth Inst. Biol. Control. Contrib., **Tech. Bull.** 5: 101-16.

- [94] GIFFORD, J. R.; MANN, G. A. Biology, Rearing, and A Trial Release of *Apanteles flavipes* in the Florida Everglades to Control the Sugarcane Borer¹². **Journal of Economic Entomology**, v. 60, n. 1, p. 44–47, 1967.
- [95] Sindiveg. Balanço 2015 - Setor de agroquímicos confirma queda de vendas. Disponível em <<http://sindiveg.org.br/balanco-2015-setor-de-agroquimicos-confirma-queda-de-vendas/>>. Acesso em 16 Nov. 2017.