

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

MODELAGEM DE PREVISÃO DE *Diatraea saccharalis*
(Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) EM CANA-DE-
AÇÚCAR (*Saccharum* spp.)

MSc. Éllen Rimkevicius Carbognin
Bióloga

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

MODELAGEM DE PREVISÃO DE *Diatraea saccharalis*
(Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) EM CANA-DE-
AÇÚCAR (*Saccharum* spp.)

Éllen Rimkevicius Carbognin

Orientador: Prof. Dr. Odair Aparecido Fernandes

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Cláudia Pio Ferreira

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Entomologia Agrícola)

2019

C264m Carbognin, Éllen Rimkevicius
Modelagem de previsão de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794)
(Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) / Éllen
Rimkevicius Carbognin. -- Jaboticabal, 2019
111 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Odair Aparecido Fernandes
Coorientadora: Cláudia Pio Ferreira

1. Modelos matemáticos. 2. Controle biológico aplicado. 3.
Dinâmica populacional. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ÉLLEN RIMKEVICIUS CARBOGNIN - Nascida em 13 de abril de 1987, na cidade de São Paulo - SP, filha de Ana Elisa Rimkevicius e Mário Carbognin. Ingressou em 2008 na Universidade Estadual Paulista - UNESP, Câmpus de Jaboticabal onde obteve os títulos de Bacharel e Licenciada em Ciências Biológicas nos anos de 2011 e 2013, respectivamente. Ingressou e atuou como estagiária em entomologia no Laboratório de Ecologia de Insetos nos anos de 2008 e 2009 sob orientação do Prof. Dr. Francisco Jorge Cividanes e Dr^a. Terezinha Monteiro dos Santos-Cividanes onde foi bolsista de iniciação científica e Treinamento Técnico I da FAPESP em projeto de controle biológico conservativo e efeito de Nim (*Azadirachta indica*) sobre inimigos naturais (Coleoptera: Coccinellidae) e pulgões da espécie *Aphis gossypii*. De 2010 a 2012 atuou como estagiária do laboratório de Biossistemática, Biologia e Ecologia Molecular de Neurópteros e monitora da disciplina "Pragas das grandes culturas", sob orientação do Prof. Dr. Sérgio de Freitas onde esteve envolvida com criação massal e taxonomia da espécie *Chrysoperla externa*. Em 2014 e 2016, ingressou, respectivamente no mestrado e doutorado em Agronomia (Entomologia Agrícola) pela mesma universidade, sob orientação do Prof. Dr. Odair Aparecido Fernandes onde desenvolveu trabalhos com o objetivo de verificar a dinâmica populacional de *Diatraea saccharalis*, os fatores climáticos responsáveis por esta, bem como desenvolver e validar modelos de previsão de ocorrência a fim de serem adotados os métodos de controle corretos no momento adequado.

“Faça algo que ame e você nunca mais precisará trabalhar na vida”

Willie Hill

DEDICO

À minha linda família!

Ao meu noivo Antonio Roveri Neto;

Aos meu pais Mário Carbognin e Ana Elisa Rimkevicius;

Aos meus irmãos Állan, Rafael, Paola e Lorenzo;

Vovó Eny Peranovich Rimkevicius

Sobrinhozinho Pietro.

OFEREÇO

Ao meu avô Pietras Rimkevicius...saudades...

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Odair Aparecido Fernandes e co-orientadora Prof.^a Cláudia Pio Ferreira, pela dedicação, amizade e compartilhamento de muitos ensinamentos ao longo desses anos. Serei sempre eternamente grata a vocês, muito obrigada;

À Sumitomo Chemical pelo suporte financeiro dispensados à realização deste trabalho;

Aos membros da banca examinadora pelas sugestões ao trabalho: Prof. Wesley A. C. Godoy, Prof^a Alessandra M. Vacari, Prof. Glauco de Souza Rolim e Prof. Ricardo A. Polanczyk;

Ao Antone dos Santos Benedito por toda ajuda e ensinamentos que foram essenciais na condução desse trabalho;

Às equipes de monitores de campo, assistentes de laboratório, técnicos e responsáveis das Usinas São Martinho, Raízen, Otávio Lage e Jalles Machado, parceiros que tornaram este trabalho possível;

Aos meus companheirinhos de quatro patas (Lica, Meg, Tião e Amiguinho), de asas (Petisco e Chiquinha) e de casinha nas costas (Pique e Nique);

Às minhas queridas: Dinha, Kátia e Luana, pelo carinho, risadas e convivência;

À Siok In Thjio De Marco, eterna gratidão por tudo que fez por mim;

Aos meus queridos amigos, anjos na minha vida: André Maurício Múscari e Amanda Jardim;

A todos os amigos do Laboratório de Ecologia Aplicada (APECOLAB), aos que foram antes de mim e aos que permanecem nesta caminhada; A convivência com vocês me trouxe muitos ensinamentos e alegrias;

Aos sempre amigos, Cecília e Wagner Mendes pelo carinho;

Aos tios Teresinha Roveri e Domingos Brefere pela dedicação e carinho;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado;

À minha querida Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, pela melhor oportunidade da minha vida e ao programa de pós-graduação em Entomologia Agrícola;

Àqueles que porventura não citei aqui e que contribuiu não somente de forma direta para a realização deste trabalho, mas que esteve presente de alguma forma na minha vida.

Muitíssimo obrigada!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1. Introdução.....	1
2. Revisão de literatura.....	3
2.1. Origem e distribuição de <i>Diatraea saccharalis</i>	3
2.2. Aspectos taxonômicos.....	3
2.3. Biologia de <i>Diatraea saccharalis</i>	4
2.3.1. Descrição das fases de vida.....	4
2.4. Ecologia de <i>Diatraea saccharalis</i>	6
2.5. <i>Diatraea saccharalis</i> e a cultura de cana-de-açúcar.....	7
2.6. Controle biológico de <i>Diatraea saccharalis</i>	8
2.7. Influência de fatores abióticos na população de <i>Diatraea saccharalis</i>	10
2.8. Modelos matemáticos.....	11
2.8.1. Modelo Graus-dia.....	11
2.8.2. Modelo Equações de diferenças.....	13
2.8.3. Modelo Equações diferenciais com retardo.....	14
3. Referências.....	15
CAPÍTULO 2. EFEITO DA TEMPERATURA NO DESENVOLVIMENTO DE <i>Diatraea saccharalis</i> (FABRICIUS, 1794) (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) E IMPLICAÇÕES PARA O MANEJO INTEGRADO DE PRAGAS.....	26
Resumo.....	26
Abstract.....	27
1. Introdução.....	28
2. Material e Métodos.....	30

3. Resultados.....	39
4. Discussão.....	48
5. Referências.....	52
CAPÍTULO 3. VALIDAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE OCORRÊNCIA DE <i>Diatraea saccharalis</i> (FABRICIUS, 1794) (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) EM CANA-DE-AÇÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.).....	
	58
Resumo.....	58
Abstract.....	59
1. Introdução.....	60
2. Material e Métodos.....	62
3. Resultados.....	66
4. Discussão.....	84
5. Referências.....	88
CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 1.	Ingredientes da dieta artificial para criação massal de <i>Diatraea saccharalis</i>	31
Tabela 2.	Teste de Kruskal-Wallis para o tempo médio de desenvolvimento (dias) ($\pm$ Desvio Padrão) de ovos, instares larvais, pupa, adulto e ciclo total (ovo-adulto) de <i>Diatraea saccharalis</i> em cinco temperaturas constantes.....	40
Tabela 3.	Mortalidade de ovos, larvas, pupas e total (ovo-adulto) (%) de <i>Diatraea saccharalis</i> em diferentes temperaturas constantes.....	41
Tabela 4.	Temperatura inferior ($T_{\min}$), constante térmica (K) e valores de R^2 para as fases imaturas de <i>Diatraea saccharalis</i> e modelos lineares.....	44
Tabela 5.	Temperaturas inferior ($T_{\min}$), superior ($T_{\max}$) e ótima (T_{opt}) ($^{\circ}\text{C}$) de imaturos de <i>Diatraea saccharalis</i> utilizando modelos não lineares e critérios de ajuste.....	44
Tabela 6.	Número médio de adultos de <i>Diatraea saccharalis</i> e parâmetros meteorológicos em diferentes localidades.....	47
Tabela 1.	Tratamentos adotados para controle de <i>Diatraea saccharalis</i> utilizando modelos matemáticos para previsão de ocorrência.....	63
Tabela 2.	Datas das previsões e número de adultos esperados e observados utilizando os modelos Graus-dia e Equações de diferenças para a safra 2016/2017 em Quirinópolis-GO.....	67
Tabela 3.	Intervalo (GD) a ser considerado nas previsões de picos para as fases de ovo, lagarta pequena na folha (1 ^o e 2 ^o instares), lagarta grande no colmo (3 ^o ao 7 ^o instares) e pupa em diferentes temperaturas constantes.....	77

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Placas de Petri contendo massas de ovos de <i>Diatraea saccharalis</i> submetidas à diferentes temperaturas constantes em câmaras climatizadas.....	30
Figura 2.	Tubos contendo larvas de <i>Diatraea saccharalis</i> submetidos a diferentes temperaturas constantes em câmaras climatizadas.....	31
Figura 3.	Localidades de avaliação (Barra Bonita - SP, Pradópolis - SP, Andradina – SP, Valparaíso – SP, Quirinópolis - GO e Goianésia – GO) do número de mariposas capturadas em armadilhas e parâmetros climáticos (temperatura do ar média, precipitação e umidade relativa média) nas safras 2013/2014 e 2014/2015.....	38
Figura 4.	Respostas dependentes da temperatura do ar: a) taxa de mortalidade juvenil ($A_d = -12076$, $d_{TR} = 0,0034$); b) taxa de mortalidade adulto ($A_d = -10478$ $d_{TR} = 0,18$); c) taxa de nascimento ($bT_{opt} = 60,92$, $s_b = 2,93$, $T_{optb} = 23,21$ °C) e d) idade na maturidade ($TR = 29,5$ °C, $a = 0,0000184$, $T_{min}^{\alpha} = 13,5^{\circ}\text{C}$, $T_{max}^{\alpha} = 36,5$ °C).....	42
Figura 5.	Modelos lineares testados para estágios de ovo, larva e pupa em diferentes temperaturas constantes: a-c) Ikemoto e Takai; d-f) Campbell.....	43
Figura 6.	Modelos não lineares testados para estágios de ovo, larva e pupa em diferentes temperaturas constantes: a-c) Brière-1; d-f) Brière-2; g-i) Harcourt e j-l) Equação-16.....	45

Figura 7.	Cladograma para análise de cluster de parâmetros climáticos (Temperatura, precipitação e umidade relativa) e captura de <i>Diatraea saccharalis</i> em diferentes localidades (Barra Bonita - SP, Goianésia - GO (Jalles Machado), Goianésia - GO (Otávio Lage), Quirinópolis - GO, Pradópolis - SP, Andradina - SP e Valparaíso - SP).....	46
Figura 8.	Taxa intrínseca de crescimento (r_m) em função da temperatura do ar em um ambiente térmico constante e respectivas posições térmicas de áreas de cana-de-açúcar no Brasil (Barra Bonita - SP, Valparaíso - SP e Pradópolis - SP). Este parâmetro foi calculado usando a equação de Euler-Lotka (1). As setas representam a distância média da temperatura das localidades até a temperatura ideal (T_{opt}).....	47
Figura 9.	Estimação da intensidade da infestação de acordo com os níveis de temperatura e umidade relativa em áreas de cana-de-açúcar.....	51
Figura 1.	Distribuição espacial dos tratamentos adotados. A numeração é correspondente aos tratamentos observados na Tabela 1. Os triângulos correspondem às armadilhas delta instaladas para a captura de adultos.....	63
Figura 2.	Intensidade de infestação e flutuação populacional de adultos (média/quatro armadilhas) em cana-de-açúcar. a) Setas (cinza) no tratamento 1 indicam as datas previstas para a ocorrência de picos de adultos. b) Setas (amarelo) indicam os momentos de liberação de <i>Trichogramma galloi</i> para o tratamento 2. As linhas contínuas F1, F2 e F3 indicam o intervalo de tempo em que é esperado o efeito do tratamento realizado. NDE: refere-se ao nível de dano econômico suportado para cana-de-açúcar (3%).....	69

- Figura 3.** Intensidade de infestação e flutuação populacional de adultos (média/quatro armadilhas) em cana-de-açúcar. a) Setas (cinza) no tratamento 1 indicam as datas previstas para a ocorrência de picos de adultos. b) Setas (verde) indicam, os momentos de aplicação de *Bacillus thuringiensis* para o tratamento 3. As linhas contínuas F1, F2 e F3 indicam o intervalo de tempo em que é esperado o efeito do tratamento realizado. NDE: refere-se ao nível de dano econômico suportado para cana-de-açúcar (3%)..... 71
- Figura 4.** Intensidade de infestação e flutuação populacional de adultos (média/quatro armadilhas) em cana-de-açúcar. a) Setas (cinza) no tratamento 1 indicam as datas previstas para a ocorrência de picos de adultos. b) Setas (verde e amarela) indicam os momentos de aplicação de *B. thuringiensis* e liberação de *T. galloi* para o tratamento 4. As linhas contínuas F1, F2 e F3 indicam o intervalo de tempo em que é esperado o efeito do tratamento realizado. NDE: refere-se ao nível de dano econômico suportado para cana-de-açúcar (3%)..... 73
- Figura 5.** Intensidade de infestação e flutuação populacional de adultos (média/quatro armadilhas) em cana-de-açúcar. a) Setas (cinza) no tratamento 1 indicam as datas previstas para a ocorrência de picos de adultos. b) Setas (azul) indicam os momentos de liberação de *C. flavipes* para o tratamento 5. As linhas contínuas F1, F2 e F3 indicam o intervalo de tempo em que é esperado o efeito do tratamento realizado. NDE: refere-se ao nível de dano econômico suportado para cana-de-açúcar (3%)..... 75
- Figura 6.** Tempo de desenvolvimento ($\pm$ Desvio Padrão) de ovo, larva (1º e 2º ínstaes), larva (3º a 7º ínstaes), pupa e adulto de *Diatraea saccharalis* em diferentes temperaturas constantes..... 76

Figura 7.	Número de insetos imaturos e adultos em função da temperatura. Linha verde tracejada representa a temperatura ótima para insetos imaturos (em torno de 22 °C) e adultos (25 °C).....	78
Figura 8.	Número de insetos adultos a temperatura constante de 25 °C (linha vermelha) e a temperatura de 25±3 °C (linha roxa).....	79
Figura 9.	Número de insetos adultos nas temperaturas de 18 °C, 22 °C, 25 °C, 28 °C e 32 °C (±3 °C) ao longo de cinco anos de simulação. O início da simulação na abcissa corresponde à temperatura máxima considerando a temperatura média estudada somada à variação de 3 °C, o ponto médio dentro do intervalo de um ano corresponde a temperatura média e o período final dentro do intervalo de um ano representa a temperatura média estudada subtraída a variação de 3 °C.....	81
Figura 10.	Número de insetos adultos nas temperaturas de 25±3 °C, 25±5 °C e 25±7 °C.....	82
Figura 11.	Simulação por Equações diferenciais com retardo. a) Projeção dos dados reais de temperatura em Quirinópolis-GO e; b) Simulação de previsão de picos de insetos adultos em campo. As setas indicam as previsões de campo realizadas pelos modelos Graus-dia e Equações de diferenças.....	83

**MODELAGEM DE PREVISÃO DE *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794)
(Lepidoptera: Crambidae) EM CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp.)**

RESUMO - A espécie *Diatraea saccharalis*, conhecida popularmente como broca-da-cana, é considerada uma das principais pragas da cultura de cana-de-açúcar. Agentes de controle biológico para ovos e larvas são promissores, no entanto, estas fases são difíceis de serem amostradas e ferramentas precisas para liberação e aplicação desses agentes são necessárias. A temperatura é um dos principais fatores abióticos que influenciam o desenvolvimento dos insetos. Desta forma, este trabalho objetivou: a) determinar as exigências térmicas de *D. saccharalis* e o modelo matemático mais adequado para expressar a relação entre taxa de desenvolvimento e temperatura; b) aprimorar e avaliar os modelos matemáticos Graus-dia e Equações de diferenças na previsão de picos populacionais da praga e c) validar as previsões de campo por meio de modelo de equações diferenciais com retardo e dados obtidos em laboratório. A temperatura de 18 °C causou 78,16% de mortalidade. A temperatura ótima para o desenvolvimento foi de 28 °C e a temperatura de 36 °C foi letal para todas as fases de *D. saccharalis*. O ciclo total de vida (ovo-adulto) variou, em média, de 39 a 137 dias. A constante térmica obtida pelo modelo linear Ikemoto e Takai foi o de melhor ajuste, com valores para ovo, larva e pupa, respectivamente de: 68,25, 354,24 e 125,20 graus dia (GD). O modelo Brière-1 foi considerado o mais adequado para todas as fases. Embora os modelos de Harcourt e Equação-16 tenham mostrado, respectivamente, bons ajustes para ovos e pupas, eles superestimaram T_{max} . Assim, as temperaturas mínima, ótima e superior foram, respectivamente: 12,8, 31,1 e 36,8 °C para ovos; 14,3, 30,8 e 36,3 °C para larvas e 13,0, 30,8 e 36,4 °C para pupas. A taxa intrínseca de crescimento mostrou que *D. saccharalis* pode persistir em temperaturas entre 15,5 °C e 33,7 °C. Assim, o aumento da temperatura pode resultar em aumento da infestação em importantes localidades produtoras de cana-de-açúcar. A partir dos dados obtidos em laboratório e campo foi proposto, respectivamente, o aprimoramento do modelo Graus-dia a fim de considerar um intervalo de controle e uma árvore preditiva da intensidade de infestação considerando as condições de temperatura do ar e umidade relativa. Os requerimentos térmicos obtidos em laboratório e os dados reais de campo serviram de base para o modelo de equações diferenciais com retardo. Este modelo previu quatro picos de adultos, o que foi compatível com as observações de campo. Em campo, verificou-se redução da infestação da praga após as medidas de controle baseadas nas previsões dos modelos.

Palavras-chave: broca-da-cana, modelos matemáticos, regulação populacional

**FORECASTING MODELING OF *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794)
(Lepidoptera: Crambidae) IN SUGARCANE (*Saccharum* spp.)**

ABSTRACT – The species *Diatraea saccharalis*, popularly known as sugarcane borer, is considered one of the main pests of sugarcane crop. Biological control agents to control eggs and larvae are promising, but eggs and small larvae are difficult to scout and tools for precise release or application are necessary. Temperature is one of the major abiotic factors that influence insect development. Thus, this work aimed to: a) determine the thermal requirements of *D. saccharalis* and the most appropriate mathematical model to show the relationship between development rate and temperature; b) improve and evaluate Degree-day and Equations of differences mathematical models in the prediction of pest population and c) validate insect outbreak forecast through Delay differential equation model and laboratory data. The temperature of 18 °C caused 78.16% of mortality. The optimum temperature for development was 28 °C and the temperature of 36 °C was lethal for all *D. saccharalis* stages. The total life cycle (egg-adult) varied, on average, from 39 to 137 days. The thermal constant used by the linear model Ikemoto and Takai presented the best fit, with values for egg, larva and pupa, respectively: 68.25, 354.24 and 125.20 degree days (DD). The Brière-1 model presented the best fit for all stages. Although the Harcourt and Equation-16 models showed, respectively, good adjustments for eggs and pupae, they overestimated T_{max} . Thus, the minimum, optimal and higher temperatures were, respectively: 12.8, 31.1 and 36.8 °C for eggs; 14.3, 30.8 and 36.3 °C for larvae and 13.0, 30.8 and 36.4 °C for pupae. The intrinsic growth rate showed that *D. saccharalis* can persist at temperatures between 15.5 °C and 33.7 °C. Thus, the temperature increase may result in increased infestation in important sugarcane producing locations. Based on laboratory and field data, it was proposed, respectively, to improve the Degree-day model in order to consider a control interval and a predictive tree of infestation intensity considering both air temperature and relative humidity conditions. The thermal requirements used in the laboratory and the actual field data served as the basis for the delayed differential equation model. In the field was verified that the pest infestation decreased after applying control measures based upon the forecast models.

Key-words: sugarcane borer, mathematical models, population regulation

CAPÍTULO 1 - Aspectos gerais

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que o Brasil perde anualmente cerca de 61 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) devido ao ataque de pragas. Levando em consideração somente o que é destinado à produção de açúcar e etanol, isso corresponde a um prejuízo de aproximadamente 4,6 milhões de dólares (US\$541,00 ha⁻¹) (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Uma das principais pragas responsáveis por parte desse prejuízo econômico é a espécie *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae), conhecida popularmente como broca-da-cana. A fase jovem deste inseto acarreta danos à planta ao se alimentar e abrir galerias no colmo. Com isso, além da perda quantitativa de matéria prima ocasionada pela alimentação favorece, também, a instalação de microrganismos como fungos e bactérias por meio dos orifícios que fazem ao entrar na planta. Estes patógenos refletem negativamente na qualidade dos produtos finais como o açúcar e etanol (DINARDO-MIRANDA, 2008; ROSSATO JÚNIOR *et al.*, 2013).

Devido a longa permanência de *D. saccharalis* no interior do colmo, o controle desta espécie por meio de inseticidas é ineficaz, devendo-se, portanto, dar preferência ao uso de agentes de controle biológico (CRUZ, 2007), tal como o parasitoide larval *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891) (Hymenoptera: Braconidae) (LIMA *et al.*, 2011). Para a liberação desse agente de controle biológico é necessária a realização do monitoramento de lagartas presentes no interior da planta, a fim de se determinar o nível de infestação (DINARDO-MIRANDA, 2008). Embora este método de monitoramento seja eficiente, trata-se de um procedimento demorado, reconhecido pela dificuldade e riscos de acidentes para a equipe de campo (SILVA, 2008; VILELA *et al.*, 2014). Além disto, este agente de controle parasita somente as larvas de *D. saccharalis* que estão presentes no interior do colmo (a partir do terceiro instar), ou seja, quando parte da planta já foi danificada (BOTELHO, 1992; CRUZ *et al.*, 2011).

Portanto, realizar o controle do inseto ainda nas folhas seria o ideal para evitar o dano no colmo. Os agentes *Trichogramma galloi* Zucchi, 1988 (Hymenoptera:

Trichogrammatidae) e a bactéria *Bacillus thuringiensis* Berliner, 1911 (Eubacteriales: Bacillaceae) podem ser utilizados com esta finalidade, pois possuem como alvos ovos e lagartas pequenas (MACEDO *et al.*, 2012; PARRA *et al.*, 2002) que são encontrados, respectivamente, na folha e bainha das plantas.

Estes agentes, no entanto, são pouco utilizados devido à dificuldade de se amostrar ovos e larvas pequenas (1º e 2º instares) nos levantamentos de campo e, assim, determinar o momento de liberação e/ou aplicação destes agentes. Desta forma, estratégias para o monitoramento e previsão de ocorrência das fases-alvo tornam-se necessárias para a implantação de métodos de controle.

Dentre estas estratégias, estão o uso de modelos matemáticos que permitem prever eventos biológicos, tais como, eclosão ou emergência de insetos e surtos populacionais. A utilização de modelos para prever a ocorrência de insetos é mais comum em países de clima temperado. Em países tropicais a sua utilização ainda é um desafio pois não há estações tão bem definidas (CARBOGNIN *et al.*, 2018), além de haver sobreposição de gerações, o que pode dificultar a previsão.

Os insetos são organismos ectotérmicos e, dessa forma, possuem o desenvolvimento influenciado pela temperatura externa, ou seja, do ambiente (RODRIGUES, 2004). Por isso, este parâmetro abiótico é largamente utilizado como base para muitos dos modelos de previsão existentes (AINSEBA *et al.*, 2011; PICART *et al.*, 2011). Desta forma, procurou-se neste trabalho: a) determinar as exigências térmicas de *D. saccharalis*; b) escolher o modelo matemático mais adequado para expressar a relação entre taxa de desenvolvimento e temperatura do ar e; c) aprimorar e verificar a previsão feita pelos modelos fenológicos Graus-dia e Equações de diferenças na determinação, respectivamente, dos picos dos estágios da praga e quantidade de insetos adultos. E, por fim, realizar simulação teórica com modelo de equações diferenciais com retardo, utilizando dados de laboratório e de temperatura do ar real, obtida na região produtora de Quirinópolis-GO, a fim de verificar se a dinâmica populacional prevista pelo modelo foi semelhante à observada em campo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Origem e distribuição de *Diatraea saccharalis*

A espécie *Diatraea saccharalis*, conhecida popularmente como broca da cana-de-açúcar, possui provável origem nas Américas do Sul e Central e é encontrada em todo hemisfério ocidental, dos Estados Unidos até a Argentina (CAPINERA, 2001; FRANCISCHINI *et al.*, 2019). No Brasil ocorrem apenas três espécies: *D. saccharalis*, comumente encontrada no centro-oeste, sudeste e sul do país, *Diatraea flavipennella* (Box, 1931) no Nordeste e *Diatraea indigenella* Dyar & Heinrich, 1927 na região norte. No entanto, somente *D. saccharalis* e *D. flavipennella* são importantes para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil (BOX, 1956; LESLIE, 2004; PINTO *et al.*, 2009).

2.2. Aspectos taxômicos

A espécie hoje conhecida por *Diatraea saccharalis* foi descrita inicialmente por Fabricius em 1794 como *Phalaena saccharalis*. Esse mesmo autor fez a correção do epíteto específico alguns anos mais tarde (1798) e modificou o nome da espécie para *Phalaena sacchari*. Posteriormente, várias sinonímias surgiram para designar a broca-da-cana tais como: *Chilo obliteratellus* Zeller 1863, *Crambus leucaniellus* Walker 1863, *Crambus lineosellus* Walker 1863, *Diatraea continens* Dyar 1911, *Diatraea pedidocla* Dyar 1911, *Diatraea brasiliensis* Gorkum & Waal 1913, *Diatraea incomparella* Dyar & Heinrich 1927, e *Diatraea saccharalis* var. *grenadensis* Dyar 1911.

O gênero *Diatraea* inicialmente pertencia à família Pyralidae. Börner em 1925 dividiu o grupo entre piraliformes e crambidiformes. Anos mais tarde, na década de 1980, Minet realocou subfamílias de Pyraloidea dentro de Pyralidae e Crambidae (LANGE *et al.*, 2004). Mas somente em 1999, depois de ampla revisão taxonômica, o gênero *Diatraea* foi transferido de Pyralidae para Crambidae (subfamília Crambinae), considerada a maior dentre a superfamília Pyraloidea (9.437 espécies) (MUNROE; SOLIS, 1999; DUARTE *et al.*, 2012).

A família Crambidae se diferencia das demais devido a larva possuir uma ou duas cerdas localizadas lateralmente no nono segmento abdominal. Os adultos

apresentam um órgão timpânico que se estende no abdômen e o tímpano se dispõe em plano diferente ao da conjuntiva (DUARTE *et al.*, 2012).

A separação da família Pyralidae de outros crambídeos é um assunto bastante controverso e análises moleculares têm contribuído para resolver essa questão. Análises filogenéticas usando genes mitocondriais (COII e 16S) mostraram que o gênero *Diatraea* é monofilético (LANGE *et al.*, 2004) e abrange 41 espécies, com base na genitália de machos (SOLIS; METZ, 2016).

2.3. Biologia de *Diatraea saccharalis*

2.3.1. Descrição das fases de vida

a) Ovos

Os ovos são depositados em massas de ovos de camada única, que podem ter de 5 a 50 ovos. Uma fêmea pode colocar até 600 ovos durante a sua vida. Os ovos são achatados, se sobrepõem como escamas de peixes e são mantidos unidos devido à presença de substância adesiva produzida pelas glândulas acessórias. São amarelados e se tornam escuros, de acordo com o desenvolvimento embrionário que varia entre 4 e 12 dias (LINARES; BASTIDAS, 1996; PINTO *et al.*, 2006a; PINTO *et al.*, 2009; CARBOGNIN; SANTOS, 2015).

b) Larvas

O protórax é marrom, já o mesotórax e o metatórax bem como os segmentos do abdômen são esbranquiçados e possuem pináculos circundados por áreas amarronzadas (HOLLOWAY *et al.*, 1928; STEHR, 1987, PARADA, 2007). Normalmente as larvas alcançam o quinto e sexto instares (MELO; PARRA, 1988).

A cápsula cefálica é esférica, ligeiramente trapezoidal ou próximo a um formato quadrangular. Possui coloração amarelo-acastanhada tornando-se de cor marrom escuro quando próximos às mandíbulas. As mandíbulas apresentam cinco dentículos sendo o mais externo menor que os demais. A fronte é mais alongada que larga e não

atinge o meio da cabeça. Diversas setas podem ser encontradas no epistoma, fronte, labro e epifaringe. Há ainda seis ocelos os quais detectam variações de luminosidade. As pernas abdominais dos segmentos de 3 a 6 apresentam colchetes triordinais que formam um círculo completo. Na perna anal ocorre uma penelipse tri ou biordinal. Os espiráculos são ovalados sendo o espiráculo do protórax de tamanho duas vezes maior em comparação àqueles presentes nos segmentos abdominais de 1 a 7. O espiráculo do segmento abdominal de número 8 é maior que o protorácico e localizado mais dorsalmente ao corpo do inseto em relação aos demais espiráculos do abdômen (PARADA, 2007).

c) Pupas

As pupas possuem coloração que varia de amarelado a marrom escuro e podem atingir até 20 mm de comprimento. Uma maneira de diferenciar pupas de *D. saccharalis* de outras espécies é observar projeções terminais que se assemelham a pequenos chifres e que estão voltadas para fora, enquanto em outras espécies esses lobos são arredondados (VARGAS *et al.*, 2018). O estágio pupal dura em média 8 dias, mas pode se estender até 22 dias quando em baixas temperaturas do ar (MELO; PARRA, 1988).

d) Adultos

Os adultos possuem asas anteriores de coloração amarelo-palha e posteriores de cor branca. De modo geral, os machos possuem asas mais pigmentadas do que as fêmeas, porém de menor envergadura. A envergadura varia entre 18 a 28 mm para os machos e entre 27 a 39 mm para as fêmeas (HOLLOWAY *et al.*, 1928; CRUZ, 2007). As fêmeas, normalmente são maiores com abdômen mais volumoso (DINARDO-MIRANDA, 2008).

A cabeça é uma cápsula subglobular hipognática, composta por poucos escleritos e coberta com muitas escamas. O aparelho bucal é do tipo sugador-maxilar, com os palpos labiais voltados para a frente (DUARTE *et al.*, 2012). A tíbia posterior

da perna dos machos possui tufo de cerdas esbranquiçadas que diferem morfologicamente dos tufo de outras espécies machos (VARGAS *et al.*, 2018).

Os adultos também podem ser diferenciados pela análise de genitália externa, pois possuem lobos laterais arredondados que se estendem acima da base de tégmen (SOLIS; METZ, 2016). A genitália feminina apresenta uma pequena depressão quitinosa em ambos os lados da abertura genital. Há também uma rugosidade acima e abaixo da fissura, formando um centro irregular como um escudo na frente da abertura genital. A genitália também apresenta uma bursa ampla e quitinizada, considerada tão larga quanto comprida (HOLLOWAY *et al.*, 1928). Os insetos adultos vivem entre 3 a 8 dias (CRUZ, 2007).

2.4. Ecologia de *Diatraea saccharalis*

Os adultos são auxiliados pelo vento e podem se dispersar até aproximadamente 800 m (CAIXETA, 2010). Os ovos são postos à noite, tanto na parte inferior quanto na parte superior das folhas, e de forma imbricada, ou seja, sobrepostos (CAPINERA, 2001). As larvas quando eclodem se deslocam até à bainha. A maior parte se desloca diretamente, enquanto outras (cerca de 30%) fazem pequenas pausas durante o percurso. Sua alimentação inicial é do parênquima foliar e quando atingem o 2º ou 3º instar, as larvas perfuram o colmo e formam galerias dentro da planta. Quando as galerias são feitas de forma circular, ocorre um maior enfraquecimento do internódio, o que facilita a quebra do colmo (BOTELHO; MACEDO, 2002; CRUZ, 2007; DINARDO-MIRANDA, 2008; LOPES, 2017).

Caso a galeria em que a larva está presente seja submersa com água da chuva, a lagarta sai do colmo e faz um novo orifício em outro internódio localizado mais abaixo (MACEDO; MACEDO, 2004). Contudo, a lagarta passa toda sua fase protegida dentro da planta e a permanência no colmo varia entre 20 a 79 dias (MELO; PARRA, 1988; PINTO *et al.*, 2009). Quando a larva atinge o último instar (2,2 a 2,5 cm de comprimento), faz um orifício de saída para preparar o local para o estágio de pupa e saída após a emergência do adulto. Este local é protegido pela larva por seda e serragem (GALLO *et al.*, 2002).

2.5. *Diatraea saccharalis* e a cultura de cana-de-açúcar

A espécie *D. saccharalis* é uma das principais pragas da cana-de-açúcar. Com o ataque desta espécie durante a fase larval, ocorre redução no peso do colmo, redução do teor de sacarose, aumento de perfilhos, quebra do colmo pelo vento por serem mais frágeis e enraizamento aéreo. No início do desenvolvimento das plantas, as larvas podem causar a destruição do meristema apical, cujo sintoma é conhecido como “coração morto”. Ainda, a infestação da broca-da-cana pode aumentar, também, o risco de contaminação por patógenos como bactérias e fungos, que se instalam através dos orifícios de entrada. Entre estes microrganismos, os fungos *Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg, 1976 (Hypocreales: Nectriaceae) e *Colletotrichum falcatum* Went 1893 (Glomerellales: Glomerellaceae) são responsáveis pela podridão do colmo, que agravam ainda mais as perdas causadas pela praga (BOTELHO; MACEDO, 2002; DINARDO-MIRANDA, 2008; WALKER et al., 2016).

O nível de ataque da praga é estimado pela intensidade de infestação (GALLO et al., 2002). Para isto, considera-se o número de internódios brocados em relação ao número total de internódios avaliados na amostragem, como segue:

$$\text{Intensidade de infestação (II\%)} = \frac{100 \times (\text{nº internódios brocados})}{\text{nº internódios}}$$

Rossato Júnior (2012) verificou que intensidades de infestação elevadas de 19,01% e 25,77% provocaram considerável aumento no teor de fibras e compostos fenólicos no suco extraído da planta. Alguns autores procuraram verificar as perdas na produção de açúcar e etanol com base na intensidade da infestação. Precetti et al. (1988) verificaram que para cada 1% de I.I, as perdas foram de 0,77% no peso de colmos (TCH), 0,25% na produção de açúcar e 0,20% na produção de álcool. Por outro lado, Arrigoni (2002) afirma que as perdas podem ser ainda maiores e chegar a 1,50% no peso de colmos, 0,49% na produção de açúcar e 0,28% na produção de etanol.

2.6. Controle biológico de *Diatraea saccharalis*

O controle biológico é uma ação natural em que as espécies são reguladas por seus inimigos naturais. Espécies controladas podem ser plantas invasoras, patógenos e insetos pragas (VAN LENTEREN, 2000). Como exemplo no Brasil, destaca-se o uso do parasitoide larval *C. flavipes* para o controle de *D. saccharalis*. Este programa de controle biológico é reconhecido como um dos mais importantes e eficientes já implementados no país (LIMA *et al.*, 2011, PARRA, 2014). Este agente de controle, com origem indiana e paquistanesa, parasita larvas de *D. saccharalis*. Trata-se de um parasitoide coinobionte que oviposita diretamente nas larvas de *D. saccharalis* que atingiram pelo menos o 3º instar. As larvas do parasitoide, após a eclosão, se alimentam dos tecidos internos de *D. saccharalis*. Quando estão prestes a empupar, as larvas abandonam o corpo de seu hospedeiro, tecem casulos (PINTO, 2006b; MACEDO *et al.*, 2012) e os adultos emergem cerca de cinco dias após a empupação (HERNÁNDES, 2010).

A espécie *C. flavipes* começou a ser liberada no ano de 1977 no estado de São Paulo. Cerca de 80% do parasitismo que ocorre em *D. saccharalis* é proveniente deste parasitoide. Apesar deste himenóptero atingir larvas já no interior do colmo quando algum dano já foi provocado, ainda sim, é um método alternativo ao uso de inseticidas químicos sintéticos que não conseguem atingir o inseto-alvo dentro da planta (BOTELHO, 1992; CRUZ *et al.*, 2011).

A liberação de *C. flavipes* ocorre quando é verificado o nível de 800 a 1.000 lagartas ha⁻¹ ou cerca de 10 lagartas/hora/homem. A quantidade a ser liberada é de 6.000 parasitoides/ha, que devem ser distribuídos em pelo menos quatro pontos em cada ha para garantir dispersão adequada dos insetos. Entre 10 e 15 dias após a liberação deste agente, é realizada uma amostragem para a confirmação da ocorrência do parasitismo (PINTO *et al.*, 2006a).

Além de *C. flavipes* outro importante grupo de parasitoides são aqueles pertencentes ao gênero *Trichogramma* (PARRA *et al.*, 2002). Estes parasitoides medem entre 0,2 e 1,5 mm e ovipositam cerca de 2 a 3 ovos no hospedeiro (PINTO, 1997; PINTO *et al.*, 2006a). Este gênero é reconhecido como um dos mais promissores no controle biológico devido a preferência por uma série de hospedeiros

(HASSAN *et al.*, 1997), fácil criação e eficiência que, segundo estudo realizado por Lima Filho e Lima (2001), alcança 93,3% para a espécie *D. saccharalis* em cana-de-açúcar. Portanto, encontra-se entre os mais estudados e empregados no mundo para o controle de ovos (PARRA; ZUCCHI *et al.*, 1997), fase chave no crescimento populacional de insetos.

Outro inimigo natural estudado mais recentemente, é o parasitoide *Tetrastichus howardi* (Olliff, 1893) (Hymenoptera: Eulophidae). Trata-se de um parasitoide de larvas e pupas de *D. saccharalis* (VARGAS *et al.*, 2011; CANA ONLINE, 2015) com alta capacidade de parasitismo, prolongada longevidade e facilidade de multiplicação. Quando avaliado sozinho, o parasitismo em larvas de 3º instar de *D. saccharalis* foi de 67%. Quando em interação com *C. flavipes*, o índice de parasitismo se elevou para 99%. Deste modo, Costa (2013) recomenda a sua utilização de forma concomitante ao do parasitoide *C. flavipes*.

Embora não sejam destaque comercial como os parasitoides, os predadores naturais tais como as formigas são vistos como os principais agentes responsáveis pela eliminação de ovos de *D. saccharalis* em campo (DEGASPARI *et al.*, 1987) contribuindo em cerca de 70 a 80% na predação de ovos (MACEDO *et al.*, 2012).

Os entomopatógenos (fungos e bactérias) também são importantes agentes naturais de controle e causam epizootias em broqueadores (TERAN, 2009). Dentre eles, a bactéria *Bacillus thuringiensis* (e suas variedades: *B. thuringiensis kurstaki*, *B. thuringiensis israelenses*, *B. thuringiensis japonensis*, *B. thuringiensis sandiego*) possui grande destaque. Esta bactéria possui um cristal proteico que ao ser dissolvido no ambiente alcalino do intestino médio do inseto, libera protoxinas. Uma vez liberadas, estas protoxinas são ativadas pelas proteases presentes no próprio trato digestivo e causam lise e formação de poros na membrana peritrófica. Inicialmente, os insetos cessam a alimentação e logo após apresentam outros sintomas de intoxicação como regurgitação, diarreia, paralisia e morte. (DEQUECH, 2000; GONZÁLEZ-CABRERA *et al.*, 2001; GALLO *et al.*, 2002; BRAVO *et al.*, 2007; GULLAN; CRANSTON, 2012).

Comercialmente, as formulações mais conhecidas são o Dipel® (Sumitomo Chemical do Brasil, São Paulo-SP) e o Thuricide® (Mitsui & CO. Brasil, São Paulo-SP). Esses produtos possuem cerca de 25 bilhões de esporos em cada grama. A

aplicação deve proporcionar uma distribuição uniforme do produto sobre todas as partes das folhas aonde as lagartas irão se alimentar. O Bt isolado é comercializado há muitos anos para controlar lepidópteros, mas pode ser utilizado para outros organismos, dependendo da variedade (subespécie) utilizada (DEQUECH, 2000; GALLO *et al.*, 2002; BRAVO *et al.*, 2007).

2.7. Influência de fatores abióticos na população de *Diatraea saccharalis*

Os fatores abióticos são primordiais no controle e flutuação populacional de insetos. Botelho *et al.* (1977) observaram que o clima é responsável por cerca de 41.3% da influência sobre a população de *D. saccharalis*. Essa influência incide especialmente nas fases mais sensíveis de desenvolvimento, ou seja, em ovos que podem se tornar facilmente inviáveis em condições inadequadas de umidade relativa e temperatura do ar (BOTELHO; MACEDO, 2002).

Sabe-se, também, que o desenvolvimento dos insetos está extremamente relacionado a temperatura do ar por se tratarem de organismos ectotérmicos, portanto, sensíveis às mudanças de temperatura do ambiente em que vivem. A temperatura interfere na taxa metabólica, impactando o desenvolvimento, comportamento e sobrevivência. Em temperaturas ótimas para o inseto, têm-se atividade respiratória e circulatória mais eficiente, além de melhor aproveitamento dos recursos alimentares (BECK, 1983; CARVALHO, 1996). Excepcionalmente, algumas espécies que habitam ambientes de condições extremas são capazes, por meio de estímulos e respostas fisiológicas e comportamentais, de regular a temperatura corpórea em alguns graus (SCHOWALTER, 2006).

Os ovos de *D. saccharalis* quando em umidade relativa inferior a 70% se ressecam facilmente (PINTO *et al.*, 2006), pois são dotados de aerópilas que os expõem à perda de água enquanto obtém o oxigênio do ar (PARRA *et al.*, 1999). Carbognin (2016) observou durante dois anos consecutivos em três localidades (Valparaíso-SP, Pradópolis-SP e Quirinópolis-GO) que a ocorrência de adultos desta espécie se concentra na faixa de 60 a 90% de umidade relativa. Abaixo desta faixa o número de insetos encontrados no campo é significativamente reduzido. Isto indica

que a umidade relativa é, de fato, um importante componente na regulação populacional desta espécie, como observado por Parra *et al.* (1999).

2.8. Modelos matemáticos

Nas décadas de 1950 e 1960, com o destaque de alguns trabalhos realizados por ecologistas, matemáticos e físicos, iniciou-se a junção de modelos matemáticos aos estudos de ecologia (ALMEIDA; VIEIRA, 2012). Os modelos matemáticos são uma simplificação de um sistema real, ou ainda segundo Hannon e Ruth (2001), são abstrações da realidade. Entende-se por sistema um objeto qualquer de interesse, seja de cunho ecológico, social ou econômico (HALL; DAY-JR, 1977; RAVINDRAN *et al.*, 1987). Um modelo matemático é uma representação de um ambiente cotidiano por meio de equações matemáticas (SMERAGE, 1992). Tais abstrações procuram analisar o ambiente, extrair a essência dele para assim representá-lo por meio de fórmulas matemáticas (LIMA *et al.*, 2009).

Devido à sua importância como vetores de doenças e relevância na atividade econômica humana, os insetos têm sido alvo de estudos há alguns anos a fim de serem desenvolvidos modelos matemáticos que expliquem sua distribuição espaço-temporal (JONES, 1989; SCHOWALTER, 2006). Os modelos são utilizados também na agricultura para auxiliar na compreensão da dinâmica populacional de insetos-praga e inimigos naturais (SMERAGE, 1992, GUTIERREZ, 1996), e a partir disso serem utilizados como uma ferramenta para tomada de decisão no manejo desses organismos (JONES, 1989). Quando as respostas dos agentes de controle perante o clima são conhecidas, principalmente de temperatura, facilita-se o uso do controle biológico (KONTODIMAS *et al.*, 2004). Assim, com a preocupação acerca das mudanças climáticas alguns trabalhos tem sido dedicados visando modelar o impacto do clima sobre esses organismos (HARRINGTON *et al.*, 2001).

2.8.1. Modelo Graus-dia

A temperatura do ar, por ser um fator primordial para o desenvolvimento dos insetos, é muito utilizada em modelagem matemática para entender a dinâmica

populacional destes organismos ectotérmicos (HADDAD; PARRA, 1984). Sharpe e Demichele (1977) citam que em decorrência do uso do computador e o avanço das ciências aplicadas, houve aumento do interesse em modelos matemáticos para o estudo do crescimento de organismos em função da temperatura do ar.

Um modelo que relaciona o desenvolvimento dos insetos com este fator abiótico é o modelo denominado “Graus-dia”. É muito utilizado em estudos de manejo integrado de pragas, a fim de prever a ocorrência de insetos pragas bem como na fenologia de plantas (HIGLEY *et al.*, 1986) para se determinar, por exemplo, emergência, desenvolvimento de folhas e caule, floração, entre outros (MILLER *et al.*, 2018).

Graus-dia (GD) é definido como a quantidade de calor acumulada diariamente, necessária ao desenvolvimento do organismo. Pressupõem-se que o inseto necessite dessa energia acumulada em forma de calor para que passe de uma fase à outra. Este acúmulo térmico é denominado constante térmica. Esse total de energia (ou GD) pode ser calculado pela média de temperatura do ar diária subtraída da temperatura base de desenvolvimento. A temperatura base é aquela abaixo do qual o inseto não se desenvolve. Entretanto, o desenvolvimento também pode ser limitado em temperaturas do ar elevadas. Em razão do desenvolvimento dos insetos estar diretamente relacionado à temperatura do ar, é imprescindível que os limites térmicos superiores e inferiores sejam determinados. Isso é invariavelmente realizado em laboratório avaliando-se o desenvolvimento dos insetos em diferentes temperaturas constantes (BRUNINI *et al.*, 1976; HADDAD *et al.*, 1999). Com isso, é possível, então, se determinar a constante térmica (K), proposta por Réaumur (1735) e é expressa em graus-dia (GD). Para tanto, assume-se que o tempo de desenvolvimento está relacionado à temperatura do ar de forma linear.

Desta forma, quando a temperatura do ar aumenta, os insetos se desenvolvem mais rapidamente enquanto que, de forma contrária, quando a temperatura do ar diminui, os insetos demoram mais para se desenvolverem (SILVEIRA-NETO *et al.*, 1976):

$$K = D \cdot (T - T_b)$$

em que:

K = constante térmica (GD);

D = duração do tempo de desenvolvimento (dia);

T = temperatura do ar;

T_b = temperatura base

Para o cálculo de Graus-dia obtido, diariamente, temos:

$$GD = \frac{(T_{\min} + T_{\max})}{2} - T_b$$

T_{min} = temperatura mínima do ar;

T_{max} = temperatura máxima do ar;

T_b = temperatura base (limiar térmico inferior).

2.8.2. Modelo Equações de Diferenças

Modelos de Equações de diferenças são muito utilizados em estudos de organismos que possuem ciclos de vida discretos. Eles expressam, portanto, a relação entre a densidade de uma população em uma determinada geração e gerações precedentes (EDELSTEIN-KESHET, 1988).

Estes modelos são comumente utilizados para insetos de regiões temperadas pois nestas localidades, devido a sazonalidade, os organismos exibem gerações mais bem definidas. Todavia, muitos organismos em países tropicais, também, exibem tal dinâmica. O entendimento da dinâmica de organismos é uma ferramenta útil que pode auxiliar para o sucesso do controle biológico de pragas. (GODFRAY; HASSEL, 1987; TONNANG *et al.*, 2017).

Como exemplo da utilização deste modelo, Carbognin (2016) quantificou a população de adultos de *D. saccharalis* em $t+1$, a partir de um valor observado nas armadilhas em campo em um tempo t . Ressalta-se que neste tipo de modelo os parâmetros de mortalidade, oviposição e desenvolvimento são constantes. Desta forma, é necessário que semanalmente seja acrescentado no modelo o número de insetos coletados nas armadilhas para que as previsões sejam realizadas.

2.8.3. Modelo Equações diferenciais com retardo

O modelo de equações diferenciais com retardo permite modelar diversos fenômenos nas mais diversas áreas do conhecimento, tais como: engenharia, física, química, medicina, economia (FURTADO, 2012) e ecologia, na dinâmica populacional de organismos (COUTINHO, 2010). Normalmente, para tratar e modelar fenômenos em que um determinado processo depende somente de seu estado em cada instante t , utiliza-se equações diferenciais ordinárias e parciais. No entanto, quando um fenômeno para ser modelado necessita de seu estado não somente naquele instante t como também de seu histórico de estados passados, utiliza-se o modelo de equações diferenciais com retardo (ALVES, 2013). Portanto, os parâmetros sofrem variação. Como exemplo disto, Johnson *et al.*, (2016) estudaram como os processos dependentes de densidade tal como competição intraespecífica e as variações sazonais do ambiente afetam a dinâmica populacional do percevejo *Largus californicus* (Van Duzee, 1923) (Hemiptera: Largidae). Os resultados mostraram a complexa relação entre a variabilidade ambiental e a resposta na dependência de densidade conduzindo a dinâmica populacional deste inseto.

Zheng *et al.* (2014) desenvolveram um modelo de equações diferenciais com retardo a fim de estudar a infecção pela bactéria *Wolbachia* em mosquitos da espécie *Aedes aegypti* Linnaeus, 1762 (Diptera: Culicidae), com a finalidade de reduzir a transmissão de dengue. Os dados revelaram que as simulações experimentais se ajustaram às previsões do modelo. Outros autores como Tapi *et al.* (2017), também, utilizaram modelo de equações diferenciais com retardo a fim de simular a dinâmica de *Sahlbergella singularis* Haglund, 1895 (Hemiptera: Miridae), importante praga de cacau. Para as simulações da dinâmica deste inseto, os dados foram compartimentados levando em consideração o tempo de desenvolvimento de ovos e o tempo de maturação de fêmeas. Dados reais de dinâmica foram comparados com dados simulados a fim de avaliar a eficiência entre o método tradicional de controle químico, único meio de controle utilizado na África, e o controle biológico, a fim de implementá-lo no controle deste inseto.

3. REFERÊNCIAS

AINSEBA, B.; PICART, D.; THIERY, D. An innovative multistage, physiologically structured, population model to understand the European grapevine moth dynamics. **Journal of Mathematical Analysis and Applications**, Maryland Heights, v. 382, n. 1, p. 34–46, 2011.

ALMEIDA, P. J. A. L.; VIEIRA, M. V. Mathematical models in ecological theory: a review by brazilian researchers on its current status and perspectives. **Oecologia Australis**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 9-12, 2012.

ALVES, M. G. **Equações diferenciais com retardamento**. 2013. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Matemática) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

ARRIGONI, E. B. Broca da cana-de-açúcar: Importância econômica e situação atual. In: ARRIGONI, E.B.; DINARDO-MIRANDA, L.L.; ROSSETTO, R. **Pragas da Cana-de-Açúcar - Importância Econômica e Enfoques Atuais**. Piracicaba: STAB, 2002.

BECK, S. D. Insect thermoperiodism. **Annual Review of Entomology**, Palo Alto, n. 28, p. 91-108, 1983.

BOTELHO, P. S. M.; MACEDO, N. *Cotesia flavipes* para o controle de *Diatraea saccharalis*. In: PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. (ed.). **Controle Biológico no Brasil: parasitóides e predadores**. São Paulo: Manole, 2002. cap. 25, p. 409-425.

BOTELHO, P. S. M. Quinze anos de controle biológico da *Diatraea saccharalis* utilizando parasitóides. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, p. 255-262, 1992.

BOTELHO, P. S. M.; MENDES, C. A.; MACEDO, N.; SILVEIRA-NETO, S. Influences of climatic factors on the population fluctuations of the sugarcane moth borer, *Diatraea saccharalis* (Fabr., 1794) (Lep. Crambidae). In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16., 1977, S.I. **Proceedings** [...]. Maritius: International Society of Sugar Cane Technologists, 1977. p. 643–655.

BOX, H. New species and records of *Diatraea* and *Xanthopherme* (Lep: Pyralidae). **Bulletin of Entomological Research**, Cambridge, v. 22, p. 1-50, 1956.

BRAVO, A.; GILL, S. S.; SOBERÓN, M. Mode of action of *Bacillus thuringiensis* Cry and Cyt toxins and their potential for insect control. **Toxicon**, Oxford, v. 49, p. 423–435, 2007.

BRUNINI, O.; LISBÃO, R. S.; BERNARDI, J. B.; FORNASIER, J. B.; PEDRO JUNIOR, M. J. Temperatura-base para alface cultivar “White-Boston”, em um Sistema de unidades térmicas. **Bragantia**, Campinas, v. 35, n. 19, 1976.

CAIXETA, D. F. **Dispersão de machos de *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar**. 2010. 48 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia Agrícola) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal-SP.

CANA ONLINE. **Novo inimigo biológico da broca-da-cana é encontrado nos canaviais do Mato Grosso do Sul**. Ribeirão Preto, 2015. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/novo-inimigo-biologico-da-broca-da-cana-e-encontrado-nos-canaviais-do-mato-grosso-do-sul.html#.VZwT0vIViko>. Acesso em: 7 jul. 2015.

CAPINERA, J. L. **Sugarcane borer, *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Insecta: Lepidoptera: Pyralidae)**. Gainesville: University of Florida; Institute of Food and Agricultural Sciences, 2001. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/ab3d/01c62d1be2899ba9d58322db295fe9986555.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.

CARBOGNIN, E. R. **Modelos de previsão de ocorrência de adultos de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**. 2016. 53 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia Agrícola) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal-SP.

CARBOGNIN, E. R.; SANTOS, J. M. Morfologia comparada de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) e *Diatraea flavipennella* (Box, 1931) (Lepidoptera: Crambidae) ao microscópio eletrônico de varredura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOSSANIDADE, 3., 2015, Águas de Lindóia. **Resumos** [...]. Águas de Lindóia: [s.n.].

CARBOGNIN, E. R.; ÁLVARO, J. C.; PINTO, J. R. L.; CONCEIÇÃO, L. S.; FERNANDES, O. A. Ecologia aplicada à entomologia agrícola. *In*: CASTILHO, R. de C.; TRUZI, C. C.; PINTO, C. P. G. **Tópicos em entomologia agrícola XI**. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda, 2018. cap. 3, p. 52-69.

CARVALHO, J. P. **Introdução à entomologia agrícola**. Lisboa: Fundação Calous- te Gulbenkian, 1996. 361 p.

COSTA, D. P. **Interações biológicas entre *Tetrastichus howardi* (Hymenoptera: Eulophidae) e *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) no parasitismo de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar**. 2013. 82 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Grande Dourados, Dourados.

COUTINHO, R. M. **Equações diferenciais com retardo em biologia de populações**. 2010. 52 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física Teórica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo.

CRUZ, I. **A Broca da cana-de-açúcar, *Diatraea saccharalis*, em milho, no Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. (Circular Técnica 90).

CRUZ, I.; REDOAN, A. C.; SILVA, R. B.; FIGUEIREDO, M. L. C.; PENTEADO-DIAS, A. M. New record of *Tetrastichus howardi* (Olliff) as a parasitoid of *Diatraea saccharalis* (Fabr.) on maize. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68 n. 2, p. 252-254, 2011.

DEGASPARI, N.; MACEDO, N.; BOTELHO, P. S. M.; ARAÚJO, J. R.; ALMEIDA, L. C. Predadores e parasitos de ovos da *Diatraea saccharalis* em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 22, n. 8, p. 785-792, 1987.

DEQUECH, S. T. B. Controle microbiano. *In*: GUEDES, J. C.; COSTA, I. D.; CASTIGLIONI, E. (ed.). **Bases e técnicas do manejo de insetos**. Santa Maria: UFSM/CCR/DFS; Pallotti, 2000. cap. 5.

DINARDO-MIRANDA, L. L. Pragas. *In*: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A de. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. cap.17, 882 p.

DUARTE, M.; MARCONATO, G.; SPECHT, A.; CASAGRANDE, M. M. Lepidoptera Linnaeus, 1758. *In*: RAFAEL, J. A.; MELO, G. A. R.; CARVALHO, C. J. B.; CASARI, S. A.; CONSTANTINO, R. (ed.). **Insetos do Brasil**: diversidade e taxonomia. Ribeirão Preto: Holos Editora, 2012. p. 626-682.

EDELSTEIN-KESHET, L. The theory of linear difference equations applied to population growth. *In*: EDELSTEIN-KESHET, L. **Mathematical models in biology**. Vancouver: Random House, 1988. 586 p.

FRANCISCHINI, F. J. B.; CORDEIRO, E. M. G.; CAMPOS, J. B.; ALVES-PEREIRA, A.; VIANA, J. P. G.; WU, X.; WEI, W.; BROWN, P.; JOYCE, A.; MURUA, G.; FOGLIATA, S.; CLOUGH, S. J.; ZUCCHI, M. I. *Diatraea saccharalis* history of colonization in the Americas. The case for human-mediated dispersal. **Plos One**, San Francisco, v. 14, n. 7, p. 1-16, 2019.

FURTADO, A. L. **Sobre soluções periódicas de equações diferenciais com retardo e impulso**. 2012. 92 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GALLO, D.; NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R. P. L.; BAPTISTA, G. C. de.; BERTI FILHO, E.; PARRA, J. R. P.; ZUCCHI, R. A.; ALVES, S. B.; VENDRAMIM, J. D.; MARCHINI, L. C.; LOPES, J. R. S.; OMOTO, C. **Entomologia Agrícola**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 920 p.

GODFRAY, H. C. J.; HASSEL, M. P. Natural enemies may be a cause of discrete generations in tropical insects. **Nature**, New York, v. 327, n. 14, p. 144-147, 1987.

GONZÁLEZ-CABRERA, J.; HERRERO, S.; SAYYED, A. H.; ESCRICHE, B.; LIU, Y. B.; MEYER, S. K.; WRIGHT, D. J.; TABASHNIK, B. E.; FERRE J. Variation in susceptibility to *Bacillus thuringiensis* toxins among unselected strains of *Plutella xylostella*. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, DC, v. 67, p. 4610-4613, 2001.

GULLAN, P. J.; CRANSTON, P. S. **Os insetos**: um resumo de entomologia. São Paulo: Roca, 2012. 480 p.

GUTIERREZ, A. P. **Applied population ecology**: a supply-demand approach. Hoboken: John Wiley & Sons, 1996. 300 p.

HADDAD, J. R.; PARRA, J. R. P. **Métodos para estimar os limites térmicos e a faixa ótima de desenvolvimento das diferentes fases do ciclo evolutivo dos insetos**. Piracicaba: Fundação Luiz de Queiroz, 1984. 12 p.

HADDAD, J. R.; PARRA, J. R. P.; MORAES, R. C. B. **Métodos para estimar os limites térmicos inferior e superior de desenvolvimento de insetos**. Piracicaba: Fundação Luiz de Queiroz, 1999. 15 p.

HALL, C. A. S.; DAY-JR, J. W. **Ecosystem modeling in theory and practice: an introduction with case histories**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1977. 684 p.

HARRINGTON, R.; FLEMING, R. A.; WOIWOD, I. P. Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted? **Agricultural and Forest Entomology**, Chichester, v. 3, p. 233-240, 2001.

HASSAN, S. A. Seleção de espécies de *Trichogramma* para o uso em programas de controle biológico. In: **Trichogramma e o Controle Biológico Aplicado**. 1.ed. Piracicaba: FEALQ, cap. 7, p. 183-205, 1997.

HANNON, B.; RUTH, M. **Dynamic modeling**. 2. ed. New York: Springer, 2001. 409 p.

HIGLEY, L. G.; PEDIGO, L. P.; OSTLIE, K. R. DEGDAY: a program for calculating degree-days, and assumptions behind the degree-day approach. **Environmental Entomology**, Cary, v. 15, n. 5, p. 999-1016, 1986.

HERNÁNDEZ, D. Estudio de algunos aspectos biológicos de *Cotesia flavipes* Cameron (Hymenoptera: Braconidae) parasitoide de *Diatraea saccharalis* Fabricius (Lepidoptera: Crambidae). **Entomotropica**, Maracay, v. 25, n. 2, p. 69-81, 2010.

HIGLEY, L. G.; PEDIGO, L. P.; OSTLIE, K. R. DEGDAY: a program for calculating degree-days, and assumptions behind the degree-day approach. **Environmental Entomology**, Cary, v. 15, n. 5, p. 999-1016, 1986.

HOLLOWAY, T. E.; HALEY, W. E.; LOFTIN, U. C. **The sugar-cane moth borer in the United States**. Washington D.C.: United States Department of Agriculture, march 1928. 80 p. (Technical Bulletin, 41).

JONES, J. W. Integrating models with expert systems and data bases for decision making. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 71, n. 9, p. 194-211, 1989.

JOHNSON, C. A.; COUTINHO, R. M.; BERLIN, E.; DOLPHIN, K. E.; HEYER, J.; KIM, B.; LEUNG, A.; SABELLON, J. L.; AMARASEKARE, P. Effects of temperature and resource variation on insect population dynamics: the bordered plant bug as a case study. **Functional Ecology**, West Sussex, v. 30, p. 1122–1131, 2016.

KONTODIMAS, D. C.; ELIOPOULOS, P. A.; STATHAS, G. J.; ECONOMOU, L. P. Comparative temperature-dependent development of *Nephus includens* (Kirsch) and *Nephus bisignatus* (Boheman) (Coleoptera: Coccinellidae) preying on *Planococcus citri* (Risso) (Homoptera: Pseudococcidae): evaluation of a linear and various nonlinear models using specific criteria. **Environmental Entomology**, Cary, v. 33, n. 11, p. 1-11, 2004.

LANGE, C. L.; SCOTT, K. D.; GRAHAM, G. C.; SALLAM, M. N.; ALLSOPP, P. G. Sugarcane moth borers (Lepidoptera: Noctuidae and Pyraloidea): phylogenetics constructed using COII and 16S mitochondrial partial gene sequences. **Bulletin of Entomological Research**, Cambridge, v. 94, p. 457–464, 2004.

LESLIE, G. Pest of sugarcane. In: GLYN, J. (ed.). **Sugarcane**. 2. ed. Ames: Blackwell Science, 2004. 216 p. (World Agriculture Series).

LIMA, A. A.; COSTA, V. A.; PINTO, A. S.; ZÉRIO, N. G.; PARRA, J. R. P. Controle de qualidade de *Cotesia flavipes* Cameron (Hymenoptera: Braconidae) para criações massais em laboratório. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 12., São Paulo, 2011. **Anais** [...]. São Paulo: Instituto Biológico de São Paulo, 2011.

LIMA, E. A. B. F.; FERREIRA, C. P.; GODOY, W. A. Ecological modeling and pest population management: a possible and necessary connection in a changing world. **Neotropical Entomology**, Dordrecht, v. 38, n. 6, p. 699-707, 2009.

LIMA FILHO, M.; LIMA, J. O. G. de. Massas de ovos de *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Pyralidae) em cana-de-Açúcar: número de ovos e porcentagem de parasitismo por *Trichogramma* spp. (Hymenoptera: Trichogrammatidae) em condições naturais. **Neotropical Entomology**, Dordrecht, v. 3, n. 30, p. 483-488, 2001.

LINARES, B. A.; BASTIDAS, R. **Descripción comparativa de las especies del género *Diatraea* Guilding (Lepidoptera: Pyralidae) que atacan la caña de azúcar en Venezuela**. Maracay: FONAIAP, 1996. 91 p. (Série, 11).

LOPES, J. V. C. **Fatores de mortalidade larval de *Diatraea saccharalis* (Fabrícus, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) em cultivo orgânico de cana-de-açúcar**. 2017. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Jaboticabal.

MACEDO, N.; MACEDO, D. As pragas de maior incidência nos canaviais e seus controles. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 1, p. 34-46, 2004.

MACEDO, N.; MACEDO, D.; CAMPOS, M. B. S.; NOVARETTI, W. R. T.; FERRAZ, L. C. B. Manejo de pragas e nematoides. *In*: SANTOS, F.; BOREM, A.; CALDAS, C. (ed.). **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol – tecnologias e perspectivas**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora Folha de Viçosa Ltda, 2012. cap. 5, p. 119-159.

MELO, A. B. P de.; PARRA, J. R. P. Exigências térmicas e estimativa do número de gerações anuais de broca da cana-de-açúcar em quatro localidades canavieiras de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 23, n. 7, p. 691-696, 1988.

MILLER, P.; LANIER, W.; BRANDT, S. **Using growing degree days to predict plant stages**. Bozeman: Montana State University, Extension, 2018. p. 1-7. Disponível em: <http://www.msuextension.org/publications/agandnaturalresources/mt200103ag.pdf>. Acesso em: 20 set. 2018.

MUNROE, E.; SOLIS, M. A. Pyraloidea. *In*: KRISTENSEN, N. (ed.). **Lepidoptera, moths and butterflies**. Berlin: Handbook of Zoology Walter de Gruyter & Co, 1999. p. 233-256.

OLIVEIRA, C. M.; AUAD, A. M.; MENDES, S. M.; FRIZZAS, M. R. Crop losses and the economic impact of insect pests on Brazilian agriculture. **Crop Protection**, Amsterdam, v. 56, p. 50-54, 2014.

PARADA, S.; EBRATT, E.; BENAVIDES, M. A. Diferenciación de especies *Diatraea* spp. que afectan los cultivo de caña en la región del Gualiva. **Revista Inventum**, Bogotá, v. 2, n. 3, p. 70-79, 2007.

PARRA, J. R. P. Biological control in Brazil: an overview. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, n. 5, 2014.

PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. Controle Biológico: uma visão inter e multidisciplinar. *In*: PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. (ed.). **Controle biológico no Brasil: parasitóides e predadores**. São Paulo: Manole, 2002. cap. 8, p. 125-142.

PARRA, J. R. P.; ZUCCHI, R. A. Prefácio. *In*: PARRA, J. R. P.; ZUCCHI, R. A. **Trichogramma e o controle biológico aplicado**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 324 p.

PICART, D.; AINSEBA, B.; MILNER, F. Optimal control problem on insect pest populations. **Applied Mathematics Letters**, Langfor Lane, n. 24, p. 1160–1164, 2011.

PINTO, J. D. Taxonomia de Trichogrammatidae (Hymenoptera) com ênfase nos gêneros que parasitam Lepidoptera. *In*: PARRA, J. R. P.; ZUCCHI, R. A. **Trichogramma e o controle biológico aplicado**. Piracicaba: FEALQ, 1997. cap. 1, p. 13-39.

PINTO, A. de S.; BOTELHO, P. S. M.; OLIVEIRA, H. N. **Guia ilustrado de pragas e insetos benéficos da cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2009. 160 p.

PINTO, A. S.; CANO, M. A. V.; SANTOS, E. M. A broca-da-cana, *Diatraea saccharalis*. *In*: PINTO, A. S. (ed.). **Controle de pragas da cana-de-açúcar**. Sertãozinho: Biocontrol, 2006a. cap. 2, p. 15-20. (Boletim Técnico Biocontrol, 1).

PINTO, A. S.; CANO, M. A. V.; SANTOS, E. M. O controle biológico de pragas da cana-de-açúcar. *In*: **Controle de pragas da cana-de-açúcar**. Sertãozinho: Biocontrol, 2006b. cap. 1, p. 1-14 (Boletim Técnico Biocontrol, 1).

PRECETTI, A. A. C. M.; TERAN, F. O.; SANCHEZ, A. G. Alterações nas características tecnológicas de algumas variedades de cana-de-açúcar, devidas ao dano da broca *Diatraea saccharalis*. **Boletim Técnico Copersucar**, [S.l.], v. 41, p. 3-8, 1988.

RAVINDRAN, A., PHILLIPS, D. T., SOLBERG, J. J. **Operations research principles and practice**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1987. 656 p.

RÉAUMUR, M. Observations du thermometre, faites à Paris pendant l'année - Comparées avec celles qui ont été faites sous la ligne; à l' Ile de France, à Alger et en quelques-unes de nos îles de l' Amérique. **Académie Royale des Sciences**, Paris, p.545-576, 1735.

RODRIGUES, W. C. Fatores que influenciam no desenvolvimento dos insetos. **Info Insetos: Informativo dos Entomologistas do Brasil**, [S.l.], v. 1, n. 4, p.1-4, 2004. Disponível em: <http://www.ebras.bio.br/infoinsetos/pdf/art0104-01.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2014.

ROSSATO JÚNIOR, J. A. S. ***Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae) e *Mahanarva fimbriolata* (Stal) (Hemiptera: Cercopidae) em cana-de-açúcar: impacto na qualidade da matéria-prima, açúcar e etanol.** 2012. 97f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal-SP.

ROSSATO JÚNIOR, J. A. S., COSTA, G. H. G., MADALENO, L. L., MUTTON, M. J. R., HIGLEY, L. G., FERNANDES, O. A. Characterization and impact of the sugarcane borer on sugarcane yield and quality. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 643–648, 2013.

SCHOWALTER, T. D. **Insect ecology: an ecosystem approach.** San Diego: Elsevier, 2006. 572 p.

SHARPE, P. J. H.; DEMICHELE, D. W. Reaction kinetics of poikilotherm development, **Journal of Theoretical Biology**, London, v. 64, p. 649-670, 1977.

SILVA, M. A. M. Mortes e acidentes nas profundezas do 'mar de cana' e dos laranjais paulistas. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente** v. 3, n. 2, 2008.

SILVEIRA-NETO, S.; NAKANO, O.; BARBIN, D.; VILLA NOVA, N. A. **Manual de Ecologia dos insetos.** São Paulo: Ed. Ceres, 1976. 419 p.

SMERAGE, G. H. Representation of development in insect population models. In: GOODENOUGH, J. L.; MCKINION, J. M. (ed.). **Basics of insect modeling**, 1992. cap. 8.

SOLIS, M. A.; METZ, M. An illustrated guide to the identification of the known species of *Diatraea* Guilding (Lepidoptera, Crambidae, Crambinae) based on genitalia. **ZooKeys**, Sofia, v. 565, p. 73-121, 2016.

STEHR, F. W. Order Lepidoptera. *In*: STEHR, Frederick W. (ed.). **Immature insects**. Dubuque: Kendall/Hunt, 1987. p. 287-596.

TAPI, M. D.; L.; BEILHE, B.; BOWONG, S.; DUMONT, Y. Models for Miridae, a cocoa insect pest: Application in control strategies. **Mathematical Methods in the Applied Sciences**, United States, v. 41, p. 8673–8696, 2018.

TERAN, F. O. Barrenadores (Lepidoptera: Crambidae). *In*: **Manejo ecológico de plagas de la caña de azúcar**, 2009. cap. 3, p. 23-48.

TONNANG, H. E. Z.; HERVÉ, B. D. B.; BIBER-FREUDENBERGER, L.; SALIFU, D.; SUBRAMANIAN, S.; NGOWI, V. B.; GUIMAPI, R. Y. A.; ANANI, B.; KAKMENI, F. M. M.; AFFOIGNON, H.; NIASSY, S.; LANDMANN, T.; NDJOMATCHOUA, F. T.; PEDRO, S. A.; JOHANSSON, T.; TANGA, C. M.; NANA, P.; FIABOE, K. M.; BORGEMEISTER, C. Advances in crop insect modelling methods – towards a whole system approach. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 354, n. 24, p. 88-103, 2017.

VAN LENTEREN, J. C. Critérios de seleção de inimigos naturais a serem usados em programas de controle biológico. *In*: **Controle Biológico de Pragas: produção massal e controle de qualidade**. Lavras: UFLA, 2000. cap. 1, p. 1-19.

VARGAS, E. L.; PEREIRA, F. F.; TAVARES, M. T.; PASTORI, P. L. Record of *Tetrastichus howardi* (Hymenoptera: Eulophidae) parasitizing *Diatraea* sp. (Lepidoptera: Crambidae) in sugarcane crop in Brazil. **Entomotropica**, Maracay, v. 26, n. 3, p. 143-146, 2011.

VARGAS, G.; LASTRA, L. A.; RAMIREZ, G. D.; SOLIS, M. A. The *Diatraea* complex (Lepidoptera: Crambidae) in colombia's cauca river valley: making a case for the geographically localized approach. **Neotropical Entomology**, Dordrecht, v. 47, p. 395–402, 2018.

VILELA, R. A. G.; SANTOS, S. A.; SILVA, A. J. N.; ALMEIDA, I. M. Experiência de vigilância no setor canavieiro: desafios para interromper a “maratona” perigosa dos canaviais. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 12, p. 4659-4668, 2014.

ZHENG, B., TANG, M.; YU, J. Modeling Wolbachia spread in mosquitoes through delay differential equations. **Journal on Applied Mathematics**, London, v. 74, n. 3, p. 743–770, 2014.

WALKER, C.; MACIEL, C. G.; MILANESI, P. M.; MUNIZ, M. F. B.; MEZZOMO, R.; POLLET, C. S. Caracterização morfológica, molecular e patogenicidade de *Fusarium acuminatum* e *Fusarium verticillioides* a *Cordia americana*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 463-473, 2016.

CAPÍTULO 2 – Efeito da temperatura no desenvolvimento de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) e implicações para o manejo integrado de pragas

RESUMO – A temperatura do ar é um dos principais fatores abióticos que influenciam o desenvolvimento de organismos ectotérmicos e, portanto, que interfere na dinâmica de *Diatraea saccharalis*, importante praga da cana-de-açúcar. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi estimar os requerimentos térmicos desta espécie. Para isto, temperaturas constantes (18, 22, 25, 28, 32 e 36 °C) foram adotadas. Parâmetros como taxa de nascimento, taxa de desenvolvimento, mortalidade e taxa intrínseca de crescimento foram estimados e modelos lineares e não lineares foram testados, a fim de verificar o melhor ajuste para desenvolvimento, determinação da constante térmica (K), temperatura ótima e dos limiares térmicos inferior (Temperatura base) e superior (Temperatura máxima) desta espécie. Por fim, discutiu-se a influência da temperatura na intensidade de infestação em um possível cenário de mudanças térmicas em áreas comerciais de cana-de-açúcar. Verificou-se que, a temperatura de 18 °C permitiu o desenvolvimento dos insetos, mas causou 78,16% de mortalidade. A temperatura ótima para o desenvolvimento foi de 28 °C e a temperatura de 36 °C foi letal para todas as fases de *D. saccharalis*. O ciclo total (ovo-adulto) variou entre 39,21±4,84 (32 °C) e 137,10±7,47 (18 °C) dias. A constante térmica obtida pelo modelo linear de Ikemoto e Takai apresentou maior coeficiente de determinação e exibiu os seguintes valores para ovo, larva e pupa, respectivamente: 68,25 ($R^2=0,98$), 354,24 ($R^2=0,94$) e 125,20 ($R^2=0,89$) graus dia (GD). Embora os modelos não lineares Harcourt e Equação-16 tenham apresentado, respectivamente, bons ajustes para ovos e pupas, superestimaram T_{max} . Com isso, o modelo Brière-1 foi considerado o de melhor ajuste para todas as fases ($R^2=0,99$). As temperaturas inferior, ótima e superior para este modelo foram de: 12,8, 31,1 e 36,8 °C para ovos; 14,3, 30,8 e 36,3 °C para larvas e 13,0, 30,8 e 36,4 °C para pupas. A taxa intrínseca de crescimento mostrou que esta espécie pode persistir em temperaturas entre 15,5 e 33,7 °C. Assim, caso ocorra aumento da temperatura do ambiente, esta elevação deverá proporcionar à espécie uma condição térmica próxima àquela considerada ótima para o seu desenvolvimento, o que poderá resultar em aumento da infestação em importantes regiões produtoras de cana-de-açúcar. Por fim, estes resultados devem ser incorporados a modelos de previsão a fim de torná-los mais acurados e auxiliar no manejo integrado desta praga.

Palavras-chave: broca da cana-de-açúcar, ectotérmicos, taxa de desenvolvimento, modelos matemáticos lineares e não lineares, previsão de ocorrência, mudanças climáticas

CHAPTER 2 - Effect of temperature on *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) development and implications for integrated pest management

ABSTRACT - Temperature is one of the main abiotic factors that influence the development of ectothermic organisms and, therefore, interferes in the dynamics of *Diatraea saccharalis*, an important sugarcane pest. Thus, the objective of this work was to estimate the thermal requirements of this species. For this, constant temperatures (18, 22, 25, 28, 32 and 36 °C) were adopted. Parameters such as birth rate, developmental rate, mortality and intrinsic growth rate were estimated and linear and nonlinear models were tested to verify the best fit for the development, determination of the thermal constant (K), optimal temperature and the lower (Base temperature) and upper (Maximum temperature) thermal thresholds of this species. Finally, the influence of temperature on the intensity of infestation in a possible scenario of thermal changes in commercial sugarcane areas was discussed. It was found that the temperature of 18 °C allowed the development of insects, but caused 78.16% mortality. The optimal temperature for development was 28 °C and the temperature of 36 °C was lethal for all *D. saccharalis* stages. The total life cycle (egg-adult) ranged from 39.21 ± 4.84 (32 °C) to 137.10 ± 7.47 (18 °C) days. The thermal constant obtained by the linear model of Ikemoto and Takai presented the highest coefficient of determination (R^2) and showed the following values for egg, larva and pupa, respectively: 68.25 ($R^2=0.98$), 354.24 ($R^2=0.94$) and 125.20 ($R^2=0.89$) degree-day (DD). Although the Harcourt and Equation-16 nonlinear models showed, respectively, good adjustments for eggs and pupae, they overestimated T_{max} . Thus, the Brière-1 model was considered the best fit for all stages ($R^2=0.99$). The lower, optimal and higher temperatures were, respectively: 12.8, 31.1 and 36.8 °C for eggs; 14.3, 30.8 and 36.3 °C for larvae and 13.0, 30.8 and 36.4 °C for pupae. The intrinsic growth rate showed that this species can persist at temperatures between 15.5 °C and 33.7 °C. Thus, if the expected ambient temperature rises, this increase should provide the species with a thermal condition close to that considered optimal for its development, which may result in increased infestation in important sugarcane producing regions. Finally, these results should be incorporated into forecast models in order to make them more accurate and to assist in the integrated management of this pest.

Key words: sugarcane borer, ectothermic, development rate, linear and nonlinear mathematical models, occurrence prediction, climate changes

1. INTRODUÇÃO

A espécie *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) é considerada uma das principais pragas da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) (Família: Poaceae). Estima-se que o prejuízo anual causado por este inseto, somente no Brasil, atinja cerca de 61 milhões de toneladas (541US\$ ha⁻¹) (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Trata-se de um organismo holometábolo, com duração do ciclo de vida que pode variar entre 40 e 70 dias, dependendo da temperatura do ambiente. O adulto se alimenta de água e açúcares, enquanto que a larva se alimenta do colmo da planta e, com isso, causa perda de matéria-prima e favorece a instalação de fungos e bactérias, as quais são prejudiciais à produção de açúcar e etanol (PARRA *et al.*, 1999; DINARDO-MIRANDA, 2008; OLIVEIRA; ANDRADE, 2009; ROSSATO-JÚNIOR *et al.*, 2013).

Para a tomada de decisão de controle desta praga, é necessário avaliar a sua presença em campo por meio de levantamentos de massas de ovos, larvas pequenas nas folhas e larvas grandes dentro do colmo. No entanto a visualização, principalmente das duas primeiras fases, é muito difícil e extremamente trabalhosa (SILVA *et al.*, 2018). Nesse contexto, o desenvolvimento de modelos matemáticos para *D. saccharalis*, capazes de prever a ocorrência deste inseto em campo e, portanto, indicar o momento exato para a realização do controle pode trazer um enorme benefício.

Sabe-se que um dos principais fatores que influenciam o desenvolvimento de insetos, organismos ectotérmicos, é a temperatura (JAROSIK *et al.*, 2004). Esse fator abiótico afeta diretamente os processos metabólicos, a reprodução e a mortalidade (BOMMIREDDY *et al.*, 2004; DE CONTI *et al.*, 2010; AMARASEKARE; SIFUENTES, 2012). A relação entre desenvolvimento e temperatura pode ser estimada através de alguns parâmetros obtidos a partir de modelos matemáticos lineares e não lineares ajustados a dados laboratoriais. Entre esses parâmetros estão a taxa de desenvolvimento (dias⁻¹), a constante térmica (NAVA *et al.*, 2005; YUKAWA *et al.*, 2016), os limiares térmicos inferior (Temperatura base) e superior (Temperatura máxima) e a taxa intrínseca de crescimento. A taxa intrínseca de crescimento permite determinar a faixa térmica favorável à espécie, ou seja, estipular os limiares de

temperatura em que a população é capaz de se recuperar de baixas densidades e manter a população viável (AMARASEKARE; COUTINHO, 2013).

Alguns desses parâmetros já foram estimados em trabalho realizado anteriormente (MELO; PARRA, 1988; GEREMIAS, 2013), no entanto, dados de desenvolvimento de *D. saccharalis* em uma faixa de temperatura mais extrema (2 °C inferior e 4 °C superior), bem como a temperatura limiar superior, não foram ainda estimados. Conhecer a faixa térmica favorável à espécie é particularmente importante pois, devido a variabilidade climática anual e um cenário de aquecimento global podemos calcular o risco de extinção e mudanças no padrão de distribuição de espécies (WALTHER *et al.*, 2002; SINERVO *et al.*, 2010). Além disso, estima-se que os organismos ectotérmicos terrestres que vivem nas regiões tropicais serão mais prejudicados do que os ectotérmicos que vivem em regiões de clima temperado. Isso porque os organismos de clima tropical vivem mais próximos de sua temperatura ótima, enquanto que um pequeno aumento de temperatura pode favorecer e até melhorar a aptidão dos organismos de clima temperado (DEUTSCH *et al.*, 2008). Isto pode ter reflexo na agricultura, pois pode afetar profundamente o status das pragas (ESTAY *et al.*, 2009) e, provavelmente, aumentar ainda mais a pressão delas em certas regiões agrícolas (HAMADA; GHINI, 2017).

Assim, o objetivo deste trabalho foi estimar as exigências térmicas dessa espécie e avaliar o desenvolvimento e a sobrevivência deste inseto em função da temperatura através de modelos lineares e não-lineares. Por fim, dados obtidos em campo do número de insetos adultos bem como os dados climáticos (temperatura do ar, precipitação e umidade relativa) foram utilizados para discutir a influência das mudanças climáticas, segundo cenários propostos pelo IPCC (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2015) na infestação de importantes áreas comerciais de cana-de-açúcar no Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta de dados

2.1.1. Fase de ovo

Massas de ovos foram obtidas da criação massal da Usina São Martinho, Pradópolis-SP. Estas posturas foram individualizadas e os ovos foram contabilizados com auxílio de lupa estereoscópica (Quimis Aparelhos Científicos Ltda, Diadema, Brasil). Após contagem, as posturas foram transferidas para placas de Petri (1,5 cm de altura x 5,0 cm de diâmetro) contendo papel filtro, umedecido diariamente com água destilada (Figura 1). Cada repetição constou de uma postura, contendo, em média, 60 ovos. Foram adotados seis tratamentos, que corresponderam às temperaturas constantes de: 18, 22, 25, 28, 32 e 36 °C com dezoito repetições. A umidade relativa e fotofase foram mantidos em $70\pm 10\%$ e 12 h, respectivamente.



Figura 1. Placas de Petri contendo massas de ovos de *Diatraea saccharalis* submetidas à diferentes temperaturas do ar constantes em câmaras climatizadas.

2.1.2. Fases de larva, pupa e adulto

Foram obtidas posturas da criação da Usina São Martinho e mantidas em condições controladas ($25\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, $70\pm 10\%$ U.R, fotofase de 12 h). Após a eclosão, as larvas foram transferidas para tubos de fundo chato (8,5 cm altura x 2,5 cm de diâmetro), previamente esterilizados e contendo cerca de 10 mL de dieta (HENSLEY; HAMMOND, 1968) (Tabela 1).

Tabela 1. Ingredientes da dieta artificial para criação massal de *Diatraea saccharalis*.

Ingredientes	Quantidade	Ingredientes	Quantidade
Açúcar	85 g	Cloreto de colina	3 g
Farelo de soja	450 g	Flagyl	1,5*
Germe de trigo	200 g	Ampicilina	1,5*
Levedura	800 g	Vita gold	3 ml
Sais de Wesson	20 g	Formol	9 ml
Nipagin	30 g	Solução vitamínica	60 ml
Ácido Ascórbico	20 g	Ácido Acético	12 ml
Ácido Sórbico	10 g	Caragenato	95 g
Água no Liquidificador	9 litros	-	-

*unidade

Cada tubo (repetição) recebeu uma larva e foi fechado com algodão hidrofóbico. Um total de 30 tubos foi adotado para cada tratamento (temperatura). Os tubos foram submetidos às mesmas temperaturas constantes adotadas para o estágio de ovo e as larvas também foram observadas diariamente (Figura 2), para registro do desenvolvimento.

As pupas dessas larvas foram mantidas nos mesmos tubos para observação. Elas foram acompanhadas até a emergência do adulto. Os adultos foram mantidos nos próprios tubos ou em gaiolas de PVC para observação da longevidade.

**Figura 2.** Tubos contendo larvas de *Diatraea saccharalis* submetidos a diferentes temperaturas do ar constantes em câmaras climatizadas.

2.2. Análise do desenvolvimento e mortalidade de *Diatraea saccharalis*

As massas de ovos foram observadas diariamente até a eclosão para obtenção do período de incubação. Para as larvas, o tempo de desenvolvimento foi registrado para cada instar (dias). A mudança de instar foi confirmada pela observação da exúvia. Para viabilidade (inverso da mortalidade) foram considerados os insetos que alcançaram a fase seguinte. Para adultos foi avaliada a longevidade (dias). A taxa de desenvolvimento (dias⁻¹) e a mortalidade foram calculadas para todas as fases de *D. saccharalis* (ovo, larva, pupa e adulto).

A taxa intrínseca de crescimento (r_m) e seu erro foram estimados conforme Amarasekare e Savage (2012):

$$r_m(T) = -d(T) + \frac{1}{\alpha(T)} W(f(T)\alpha(T)e^{(d(T)-\underline{d}(T))\alpha(T)}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{r_m} = \frac{\partial r_m}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial r_m}{\partial \underline{d}} \Delta \underline{d} + \frac{\partial r_m}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial r_m}{\partial \alpha} \Delta \alpha \quad (2)$$

em que, W é a função de Lambert. As funções $f(T)$, $d(T)$, $\underline{d}(T)$ e $\alpha(T)$ correspondem a taxa de nascimento per capita, taxa de mortalidade média adulta, taxa de mortalidade média juvenil e idade na maturidade. Os valores Δd , $\Delta \underline{d}$, Δb e $\Delta \alpha$ são as distâncias médias dos valores (erro padrão residual) em relação aos dados de $d(T)$, $\underline{d}(T)$, $b(T)$ e $\alpha(T)$.

A taxa de mortalidade juvenil foi estimada em cada temperatura a partir dos dados por:

$$\underline{d}(T) = \frac{-\ln(s)}{\tau} \quad (3)$$

em que, s é a taxa de sobrevivência da fase juvenil. Já, τ é a média (em dias) do tempo de desenvolvimento da fase juvenil. A média de longevidade do adulto foi estimada pelo tempo de sobrevivência dele e a taxa de mortalidade como sendo o seu inverso.

A taxa de nascimento per capita, foi ajustada por uma função Gaussiana:

$$f(T) = b_{T_{opt}} e^{-\frac{(T-T_{opt})^2}{2\sigma_f^2}} \quad (4)$$

em que, T é a temperatura (dada em Kelvin), $b_{T_{opt}}$ é a taxa de nascimento per capita em temperatura ótima (T_{opt}) e σ_f representa a variância em torno da temperatura ótima. Os parâmetros do modelo são $b_{T_{opt}}$, T_{opt} e σ_f^2 .

A taxa de mortalidade per capita (juvenil e adulto) foi ajustada pelo polinômio de segundo grau:

$$x(T) = aT^2 + bT + c \quad (5)$$

em que T é a temperatura em Kelvin. Os parâmetros do modelo são a, b e c.

O inverso da idade na maturidade ($\frac{1}{\alpha(T)}$) foi ajustado pelo modelo Brière-1 (BRIÈRE *et al.*, 1999).

$$\frac{1}{\alpha(T)} = aT(T - T_{min}^\alpha) \sqrt{T_{max}^\alpha - T} \quad (6)$$

Esse parâmetro considera o tempo de desenvolvimento do ovo até o adulto maduro sexualmente. Porém neste trabalho foi considerado apenas de ovo até a emergência do adulto. Esta escolha foi feita pois, os tratamentos com temperaturas extremas (18 °C e 32 °C) foram afetados pela temperatura na formação de casais e acompanhamento do período reprodutivo. Isto não permitiu, portanto, avaliar com precisão o início da maturidade sexual de todos os adultos. Já T_{min}^α e T_{max}^α referem-se às temperaturas mínima e máxima, respectivamente, correspondentes à idade na maturidade. Os parâmetros do modelo são a , T_{min}^α e T_{max}^α .

2.3. Determinação de parâmetros térmicos

Neste trabalho foram utilizados modelos matemáticos para determinar a relação da taxa de desenvolvimento em função da temperatura. Dois modelos lineares foram utilizados para determinar os parâmetros $T_{\min}$ e K (Limiar térmico inferior e constante térmica) e quatro modelos não lineares para determinar a temperatura ótima (T_{opt}) e os limiares térmicos inferior ($T_{\min}$) e superior ($T_{\max}$). A temperatura ótima é aquela em que a taxa de desenvolvimento atinge o valor máximo, já as temperaturas inferior e superior correspondem às temperaturas em que o desenvolvimento do inseto cessa.

2.3.1. Modelos lineares

O primeiro modelo avaliado foi o modelo proposto por Campbell *et al.* (1974), o qual é dado por:

$$r(T) = \sigma + \beta T \quad (7)$$

em que, $r(T)$ expressa a taxa de desenvolvimento (dias^{-1}) em temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$). O σ é o intercepto no eixo y e β é o coeficiente angular (inclinação da reta). Para obter a temperatura base ($^{\circ}\text{C}$), considerou-se $r(T)=0$ (JAROSIK *et al.*, 2004). A constante térmica é obtida a partir de $K=1/\beta$, em que K é a constante térmica (graus-dia, GD). O valor obtido corresponde ao somatório térmico necessário para que o inseto passe de uma fase à outra (BRUNINI *et al.* 1976; HADDAD *et al.*, 1999), segundo o conceito de “Graus-dia” proposto por Réaumur (1735).

Para o cáculo do erro padrão da temperatura inferior ($T_{\min}$) e do erro da constante térmica, respectivamente, temos as seguintes equa  es de acordo com Campbell *et al.* (1974):

$$SE_{T_{\min}} = \frac{\bar{r}}{b} \sqrt{\frac{s^2}{N\bar{r}^2} + \left(\frac{SE_b}{b}\right)^2} \quad (8)$$

$$SE_k = \frac{SE_b}{b^2} \quad (9)$$

em que, N é o tamanho da amostra, $\bar{r}$ é a média da amostra, s^2 é a média do quadrado do resíduo de r , b corresponde à inclinação da linha reta ajustada e por fim, SE_b é o erro de b .

Outro ajuste linear testado neste trabalho, foi proposto por Ikemoto e Takai (2000), o qual é dado por:

$$TD = K + T_{min}D \quad (10)$$

em que T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), D corresponde à duração do tempo de desenvolvimento (dias), K é a constante térmica, e T_{min} é a temperatura mínima.

2.3.2. Modelos não lineares

O primeiro modelo não linear testado foi Brière-1 (BRIÈRE *et al.*, 1999), dado por:

$$r(T) = aT(T - T_{min})\sqrt{T_{max} - T} \quad (11)$$

em que, r é a taxa de desenvolvimento em função da temperatura (T), a é uma constante empírica e corresponde a amplitude dos dados de $r(T)$ e, T_{min} e T_{max} são, respectivamente, a temperatura mínima e a máxima.

O segundo modelo testado foi Brière-2. Este modelo, derivado de Brière-1, e possui parâmetro adicional m .

$$r(T) = aT(T - T_{min})(T_{max} - T)^{1/m} \quad (12)$$

A temperatura ótima nos modelos Brière-1 e Brière-2, é dada por:

$$T_{opt} = \frac{2mT_{max} + (m+1)T_{min}}{(4m+2)} + \sqrt{\frac{4m^2T_{max}^2 + (m+1)^2T_{min}^2 - 4m^2T_{min}T_{max}}{(4m+2)}} \quad (13)$$

O terceiro modelo não linear testado foi Harcourt (HARCOURT; YEE, 1982).

$$r(T) = aT^3 + bT^2 + cT + d \quad (14)$$

em que, T é a temperatura e a , b , c e d são os parâmetros do modelo.

O último modelo testado foi Equação-16 (KONTODIMAS *et al.*, 2004).

$$r(T) = a(T - T_{min})^2(T_{max} - T) \quad (15)$$

em que, T é a temperatura, T_{min} e T_{max} são, respectivamente, as temperaturas mínima e máxima e o T_{opt} é obtido através do método gráfico. Nesta equação, a , T_{min} e T_{max} representam os parâmetros do modelo.

2.4. Análise de dados

2.4.1. Desenvolvimento em função da temperatura e ajuste de modelos lineares e não lineares

Análise de variância (ANOVA) e teste de Kruskal- Wallis foram realizados com o software RStudio (2018) para avaliar o efeito da temperatura no tempo de desenvolvimento das fases imaturas de *D. saccharalis*. Os melhores ajustes foram escolhidos de acordo com os maiores valores dos coeficientes de determinação (R^2) e menores valores do critério de informação de Akaike (AIC) e da soma dos quadrados dos resíduos (RSS). Para ajuste dos coeficientes foi utilizado o algoritmo de Gauss-Newton. O teste não paramétrico de Wilcoxon foi realizado para verificar a diferença entre os modelos lineares. A temperatura de 36 °C foi omitida das análises pois não houve desenvolvimento nesta temperatura.

2.4.2. Análise da influência de fatores abióticos em áreas de cana-de-açúcar

Foi realizada análise de cluster entre parâmetros climáticos (temperatura média, precipitação e umidade relativa média) e número de mariposas capturadas em sete localidades (Barra Bonita - SP, Pradópolis - SP, Andradina - SP, Valparaíso - SP, Quirinópolis - GO e Goianésia - GO (Usinas - Otávio Lage e Jalles Machado) (Figura 3), nas safras 2013/2014 e 2014/2015, de acordo com o trabalho de Carbognin (2016) em que foram utilizados dois talhões de aproximadamente 25 ha cada. Em

cada talhão uma área entre 1 e 1,5 ha na parte central foi utilizada para a instalação das armadilhas. Os talhões estavam localizados próximos (< 2 km) de estações climáticas para obtenção dos dados meteorológicos.

Quatro armadilhas do tipo delta com piso colante (Biocontrole®, Indaiatuba-SP) foram instaladas no entorno de cada área experimental. As armadilhas foram mantidas presas em suportes e ajustadas na altura do ponto de crescimento das plantas. Devido à inexistência de feromônios sexuais comerciais para *D. saccharalis*, gaiolas plásticas cilíndricas contendo fêmeas virgens foram utilizadas para atração de machos. Estas gaiolas foram confeccionadas com rolo de cabelo (Bob) envolto por tecido fino (tule) e presas no centro da armadilha delta. Cada gaiola conteve cinco fêmeas adultas virgens e três pupas para eventual reposição de fêmeas adultas mortas. Os insetos presentes na gaiola foram substituídos a cada 2-3 dias, a fim de garantir a máxima eficiência de liberação de feromônio pelas fêmeas que normalmente não ultrapassa 3 dias após a emergência (CORTES, 2010; SANDOVAL, 2010). Os pisos colantes foram trocados a cada 7-15 dias.

A análise serviu de base para que localidades agrupadas no cladograma fossem selecionadas segundo os seguintes critérios: a) duas localidades com temperaturas diferentes, mas com umidade relativa semelhante; b) duas localidades com temperaturas semelhantes, mas umidades relativas diferentes. O objetivo foi discutir uma possível mudança de infestação nessas localidades, baseando-se na taxa intrínseca de crescimento obtida para *D. saccharalis* e mudanças climáticas projetadas pelo IPCC (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2015). Por fim, com estas informações, elaborou-se uma árvore preditiva sobre a ocorrência de *D. saccharalis* em função dos parâmetros meteorológicos.



Figura 3. Localidades de avaliação (Barra Bonita - SP, Pradópolis - SP, Andradina – SP, Valparaíso – SP, Quirinópolis - GO e Goianésia – GO) do número de mariposas capturadas em armadilhas e parâmetros climáticos (temperatura do ar média, precipitação e umidade relativa média) nas safras 2013/2014 e 2014/2015 (FONTE: GOOGLE MAPS, 2016).

3. RESULTADOS

3.1. Desenvolvimento e mortalidade de *Diatraea saccharalis*

O tempo de desenvolvimento e o ciclo total (em dias) de *D. saccharalis* foram influenciados pela temperatura do ar (T). Verificou-se que, em geral, o tempo de desenvolvimento diminui com o aumento da temperatura. O tempo médio de desenvolvimento de ovo-adulto variou de $39,21 \pm 4,84$ (32 °C) a $137,10 \pm 7,47$ (18 °C) dias. Não houve desenvolvimento na temperatura de 36 °C.

O período de incubação diminuiu com o aumento da temperatura e o número de instares foi influenciado pela temperatura e variou de 4 a 7. Somente os insetos que se desenvolveram nas temperaturas de 18 °C e 22 °C alcançaram o sétimo instar enquanto que alguns insetos na temperatura de 32 °C empuparam a partir do quarto instar. Observou-se maior tempo de desenvolvimento para o 5º e 6º instares em relação aos estádios anteriores.

O tempo de desenvolvimento de pupas diminui com o aumento da temperatura até 28 °C, sendo que as temperaturas de 28 °C e 32 °C não apresentaram diferença em relação a este parâmetro. A longevidade dos adultos também foi afetada e menor nas temperaturas extremas de 18 °C e 32 °C (Tabela 2).

Tabela 2. Teste de Kruskal-Wallis para o tempo médio de desenvolvimento (dias) ($\pm$ Desvio Padrão) dos diversos estágios e ciclo total (ovo-adulto) de *Diatraea saccharalis* em cinco temperaturas constantes.

Temperatura (°C)	Ovo	Instares larvais							Pupa	Adulto	Ciclo ovo-adulto
		1	2	3	4	5	6	7			
18	12,94 $\pm$ 0,41a	13,51 $\pm$ 2,86a	10,28 $\pm$ 1,90a	12,31 $\pm$ 4,77a	13,28 $\pm$ 3,58a	17,38 $\pm$ 9,22a	19,20 $\pm$ 9,72a	26,33 $\pm$ 2,30a	28,60 $\pm$ 4,56a	2,66 $\pm$ 1,47b	137,10 $\pm$ 7,47a
22	7,33 $\pm$ 0,48b	7,70 $\pm$ 1,23b	5,46 $\pm$ 2,37b	5,6 $\pm$ 0,85b	6,26 $\pm$ 1,25b	9,86 $\pm$ 6,45c	12,63 $\pm$ 4,12ab	8,0 $\pm$ 1,41b	13,96 $\pm$ 1,24b	5,73 $\pm$ 0,70a	69,10 $\pm$ 8,35b
25	5,00 $\pm$ 0,00c	6,00 $\pm$ 0,70c	3,68 $\pm$ 0,54c	3,79 $\pm$ 1,04c	4,89 $\pm$ 1,04c	11,62 $\pm$ 6,07b	8,80 $\pm$ 4,38b	-	10,04 $\pm$ 0,61c	5,56 $\pm$ 0,56a	51,12 $\pm$ 4,52c
28	4,35 $\pm$ 0,49d	5,06 $\pm$ 0,73d	2,96 $\pm$ 0,80d	3,30 $\pm$ 1,14d	4,27 $\pm$ 0,52d	8,42 $\pm$ 2,74c	9,25 $\pm$ 2,98b	-	8,65 $\pm$ 0,69d	5,25 $\pm$ 0,40a	43,42 $\pm$ 3,80d
32	4,00 $\pm$ 0,00e	5,33 $\pm$ 0,92d	2,96 $\pm$ 0,66d	2,96 $\pm$ 0,77d	4,35 $\pm$ 1,02d	8,75 $\pm$ 3,36c	6,00b	-	8,35 $\pm$ 1,85d	3,04 $\pm$ 0,36b	39,21 $\pm$ 4,84e

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente para $\alpha = 0,05$ (teste de Kruskal-Wallis) dentro da mesma fase ou ciclo.

Especialmente para ovos, e diferentemente de outras fases, as temperaturas de 18 e 22 °C não afetaram drasticamente a viabilidade. Em geral, a mortalidade aumentou com o aumento da temperatura. Nas temperaturas de 18 e 22 °C, as larvas alcançaram o sétimo instar, enquanto que cerca de 3% das larvas empuparam à 28 e 32 °C, quando ainda estavam no quarto instar.

As temperaturas de 22 °C e 25 °C causaram a maior mortalidade de pupas. A temperatura favorável, considerando todas as fases, foi de 28 °C, com a menor mortalidade (9,5%). Já, de modo geral, a temperatura desfavorável foi de 18 °C com alta mortalidade de ovo a adulto (78,2%). A temperatura de 36 °C foi letal para todas as fases de *D. saccharalis* (100% de mortalidade) (Tabela 3).

Tabela 3. Mortalidade de ovos, larvas, pupas e total (ovo-adulto) (%) de *Diatraea saccharalis* em diferentes temperaturas constantes.

Temperatura (°C)	Ovo (%)	Instares larvais (%)							Pupa (%)	Mortalidade total (%)
		1	2	3	4	5	6	7		
18	2,3	3,3	13,3	20,0	16,7	3,3	6,7	13,3	3,3	78,2
22	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	10,3	13,1
25	9,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	13,8	15,2
28	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	-	6,9	9,5
32	19,6	0,0	0,0	3,3	0,0	13,3	0,0	-	8,0	18,8
36	100	90,0	10,0	-	-	-	-	-	-	100,00

Em geral, o intervalo ótimo de temperatura com baixa mortalidade de ovos, larvas e pupas (isto é, considerando todos os estágios juvenis) está entre 22 e 28 °C (Figura 4a) (equação 3).

A temperatura afetou a longevidade do adulto. A emergência de adultos a 18 °C foi baixa (viabilidade de 20%) e não ocorreu de forma sincronizada. As temperaturas mais adequadas para os adultos foram semelhantes às dos estágios juvenis, que são entre 22 e 28 °C (Figura 4b) (equação 5).

A taxa de natalidade ótima foi obtida na temperatura de 23,21 °C (Figura 4c) (equação 4). A idade na maturidade aumenta em temperatura extremas. Como o tempo de desenvolvimento medido é o inverso da idade na maturidade, verificou-se que de modo geral, o tempo de desenvolvimento diminui com o aumento da temperatura (Figura 4d) (equação 6).

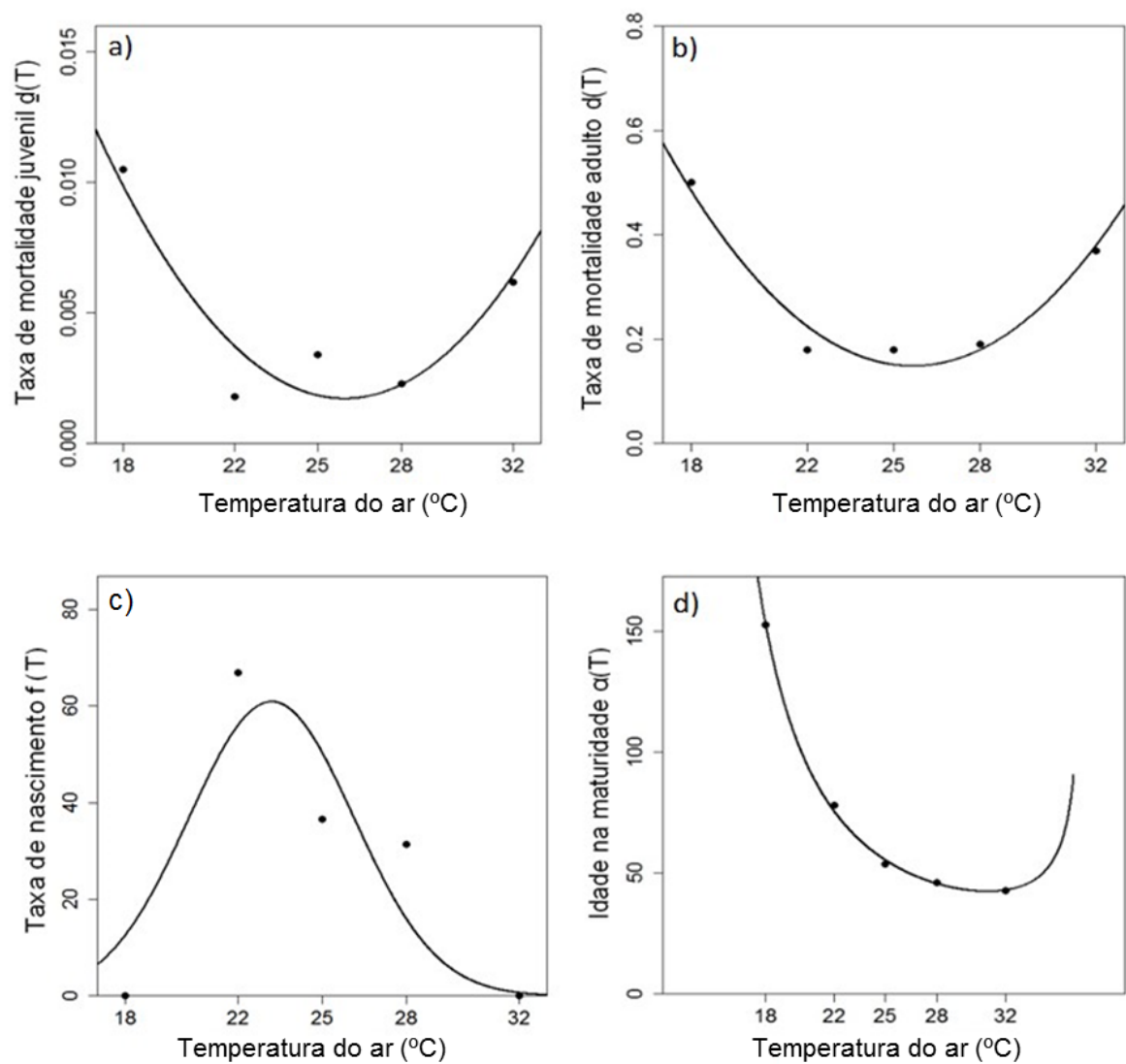


Figura 4. Respostas dependentes da temperatura do ar: a) taxa de mortalidade juvenil ($A_d = -12076$, $dTR = 0,0034$); b) taxa de mortalidade adulto ($A_d = -10478$, $dTR = 0,18$); c) taxa de nascimento ($bT_{opt} = 60,92$, $sb = 2,93$, $T_{optb} = 23,21$ °C) e d) idade na maturidade ($TR = 29,5$ °C, $a = 0,0000184$, $T_{min}^{\alpha} = 13,5$ °C, $T_{max}^{\alpha} = 36,5$ °C).

3.2. Determinação de parâmetros térmicos

3.2.1. Modelos lineares

O modelo linear Ikemoto e Takai, resultou no melhor ajuste do tempo de desenvolvimento para todas as fases imaturas em função da temperatura do ar (T) versus tempo de desenvolvimento (TD) com $R^2 > 0,88$.

Os valores da temperatura base ($T_{\min}$), abaixo da qual não ocorre desenvolvimento, variaram entre as fases do inseto: 12,71 °C ($TD = 12,71T + 68,25$; $F_{1,86} = 3853$; $p < 2,2e^{-16}$), 14,48 °C ($TD = 14,48T + 354,24$; $F_{1,117} = 1987$; $p < 2,2e^{-16}$) e 13,74 °C ($TD = 13,74T + 125,20$; $F_{1,103} = 802,4$; $p < 2,2e^{-16}$) para ovo, larva e pupa, respectivamente (Figura 5; Tabela 4). A constante térmica total (ovo-adulto) foi de 547,69 graus-dia (GD) e temperatura base média de 13,64 °C.

Já, para o modelo de Campbell, as temperaturas base obtidas foram de 11,3 °C ($y = 0,0129T - 0,1440$; $F_{1,86} = 925,8$; $p < 2,2e^{-16}$), 10,93 °C ($y = 0,0022T - 0,0236$; $F_{1,117} = 368,9$; $p < 2,2e^{-16}$) e 8,82 °C ($y = 0,057T - 0,0504$; $F_{1,103} = 286,2$; $p < 2,2e^{-16}$), respectivamente para ovo, larva e pupa. A constante térmica do ciclo total (ovo-adulto) foi de 714,82 graus-dia (GD) (Figura 5; Tabela 4).

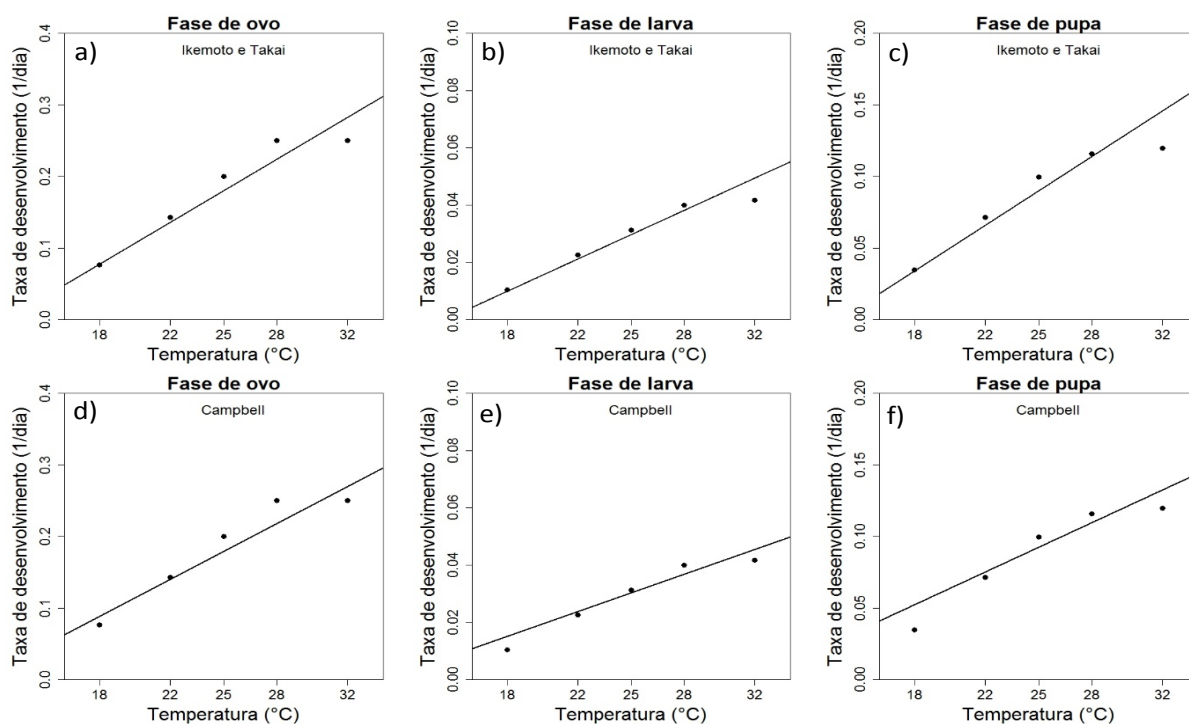


Figura 5. Modelos lineares testados para estágios de ovo, larva e pupa em diferentes temperaturas: a-c) Ikemoto e Takai; d-f) Campbell.

Tabela 4. Temperatura base ($T_{\min}$), constante térmica (K) e valores de R^2 para as fases imaturas de *Diatraea saccharalis* e modelos lineares.

Modelo linear	Fase	$T_{\min} \pm \text{E.P.M (}^{\circ}\text{C)}$	$K \pm \text{E.P.M (GD)}$	R^2
Ikemoto e Takai	Ovo	12,71±0,20	68,25±1,55	0,9782
	Larva	14,48±0,32	354,24±12,82	0,9444
	Pupa	13,74±0,48	125,20±5,88	0,8862
Campbell	Ovo	11,13±0,48	77,31±2,54	0,9150
	Larva	10,93±0,81	462,60±24,08	0,7592
	Pupa	8,82±1,05	174,91±10,34	0,7354

GD=Graus-dia; E.P.M=erro padrão da média.

3.2.2. Modelos não lineares

Os modelos apresentaram valores iguais de coeficiente de determinação (R^2). Embora os modelos não lineares Harcourt e Equação-16 tenham apresentado os melhores ajustes de temperatura versus taxa de desenvolvimento para ovos e pupas (considerando seus menores valores de AIC e RSS), eles superestimaram os valores extremos superiores de temperatura para estas duas fases, já que os dados indicaram que a temperatura de 36 °C foi letal para todas as fases do inseto. Assim, Brière-1 (equação 11), considerado o melhor ajuste para larvas, foi considerado o próximo modelo com melhor valor de AIC para ovos e pupas. Os valores para ovo, larva e pupa para Brière-1 foram: 12,8 °C, 14,3 °C e 13,0 °C para $T_{\min}$; 36,8 °C, 36,3 °C e 36,4 °C para $T_{\max}$ e 31,1 °C, 30,8 °C e 30,8 °C para T_{opt} (Tabela 5; Figura 6).

Tabela 5. Temperaturas inferior ($T_{\min}$), superior ($T_{\max}$) e ótima (T_{opt}) (°C) de imaturos de *Diatraea saccharalis* utilizando modelos não lineares e critérios de ajuste.

Modelo	Fase	$T_{\min}$	$T_{\max}$	T_{opt}	R^2	AIC	RSS
Brière-1	Ovo	12,8	36,8	31,1	0,99	-519,76	0,0128
	Larva	14,3	36,3	30,8	0,99	-958,15	0,0020
	Pupa	13,0	36,4	30,8	0,99	-629,09	0,0142
Brière-2	Ovo	12,4	35,4	30,9	0,99	-518,23	0,0127
	Larva	14,1	35,7	30,8	0,99	-956,18	0,0020
	Pupa	14,3	41,7	31,2	0,99	-627,76	0,0141
Harcourt	Ovo	12,8	39,9	30,8	0,99	-521,83	0,0122
	Larva	12,9	40,2	30,9	0,99	-956,21	0,0020
	Pupa	13,9	41,7	31,1	0,99	-627,79	0,0141
Equação-16	Ovo	10,5	41,9	31,4	0,99	-519,69	0,0128
	Larva	11,9	40,6	31,0	0,99	-958,12	0,0020
	Pupa	10,8	41,1	31,0	0,99	-629,66	0,0141

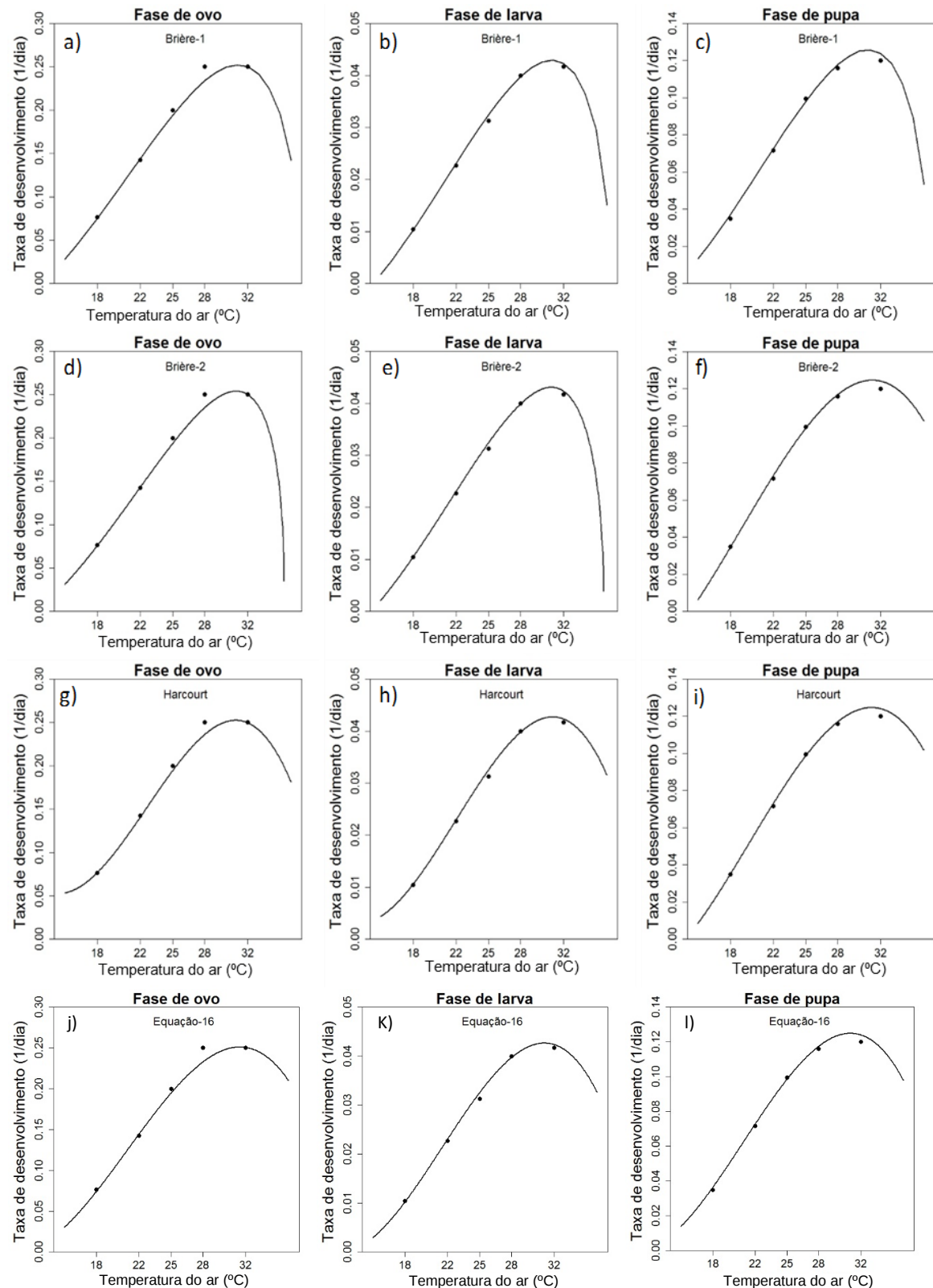


Figura 6. Modelos não lineares testados para estágios de ovo, larva e pupa em diferentes temperaturas constantes: a-c) Brière-1; d-f) Brière-2; g-i) Harcourt e j-l) Equação-16.

3.3. Influência de fatores abióticos em áreas de cana-de-açúcar

A análise resultou no cladograma abaixo em que se pode observar através do corte na distância Euclidiana de aproximadamente 1,9, a distribuição dos locais em três grandes grupos (Figura 7).

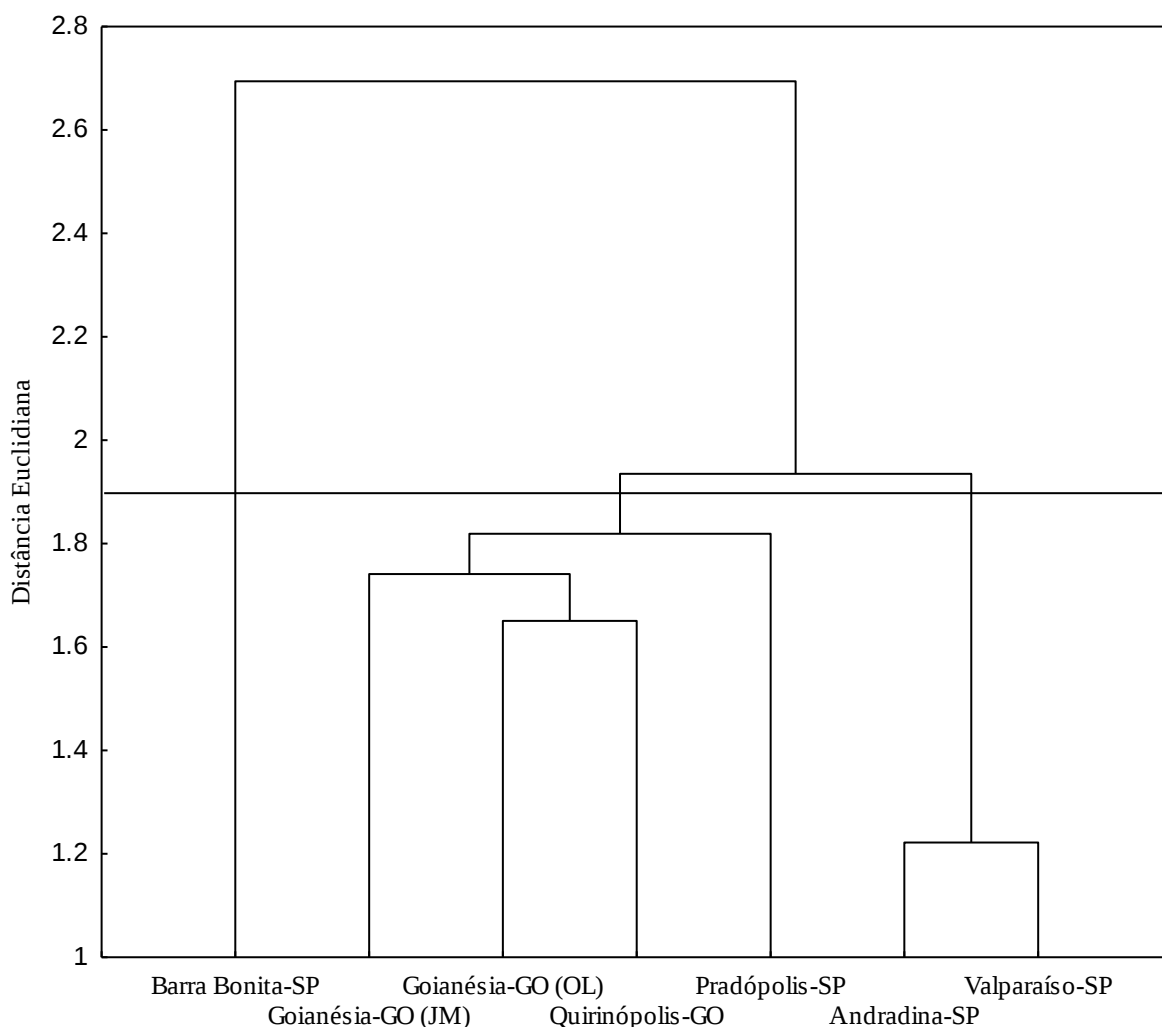


Figura 7. Cladograma para análise de cluster de parâmetros climáticos (Temperatura do ar, precipitação e umidade relativa) e captura de *Diatraea saccharalis* em diferentes localidades (Barra Bonita - SP, Goianésia - GO (Jalles Machado), Goianésia - GO (Otávio Lage), Quirinópolis - GO, Pradópolis - SP, Andradina - SP e Valparaíso - SP).

Dentre estes três grupos, foram selecionadas três localidades: Barra Bonita - SP, Pradópolis - SP e Valparaíso - SP. Estas localidades foram selecionadas por apresentarem mesma precipitação média (mm), mas diferenças de temperatura e

umidade médias. Barra Bonita – SP é a cidade com temperatura média mais baixa, já as demais estão cerca de 3 °C de temperatura acima desta. A umidade relativa média em Pradópolis - SP é a mais baixa (<70%) (Tabela 6).

Tabela 6. Coleta semanal média de adultos de *Diatraea saccharalis* e parâmetros meteorológicos em diferentes localidades.

Localidades	Nº Adultos	Precipitação (mm)	Temperatura Média (°C)	Umidade Relativa Média (%)
Barra Bonita – SP	13.01c	23.14a	22.74b	77.99a
Pradópolis – SP	37.73b	19.67a	25.46a	68.21b
Valparaíso – SP	196.91a	19.09a	25.17a	77.39a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

A taxa intrínseca de crescimento inclui a faixa de temperatura na qual ocorre o desenvolvimento de *D. saccharalis*. Foi possível observar que este desenvolvimento ocorre entre 15 °C (temperatura crítica mais baixa) e 34 °C (temperatura crítica mais alta), com temperatura ótima em 28 °C (Figura 8) (equação 1).

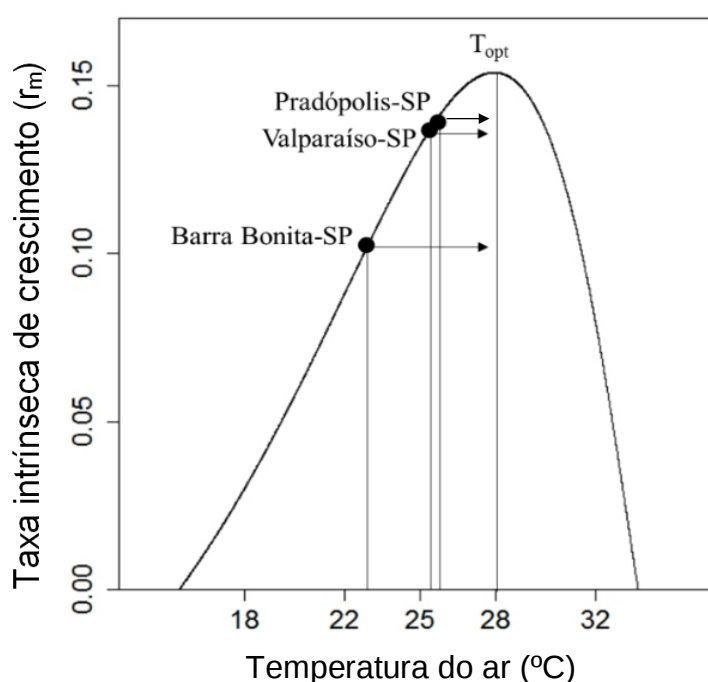


Figura 8. Taxa intrínseca de crescimento (r_m) em função da temperatura do ar em um ambiente térmico constante e respectivas posições térmicas de áreas de cana-de-açúcar no Brasil (Barra Bonita - SP, Valparaíso - SP e Pradópolis - SP). Este parâmetro foi calculado usando a equação de Euler-Lotka (1). As setas representam a distância média da temperatura das localidades até a temperatura ideal (T_{opt}).

4. DISCUSSÃO

A broca da cana-de-açúcar, como os demais insetos, possui diferentes fases de vida e cada uma dessas fases é afetada diferentemente pela temperatura do ambiente. A temperatura pode afetar o tempo fisiológico (PRITCHARD *et al.*, 1996) e taxa de desenvolvimento dos insetos (GARRARD *et al.*, 2016). Neste trabalho, foi possível observar a influência deste fator abiótico no desenvolvimento e sobrevivência da espécie *D. saccharalis*.

Desta forma, confirmou-se que houve relação negativa entre a viabilidade do ovo e o aumento da temperatura. Assim, embora o período de incubação tenha sido mais longo, essa fase foi favorecida pelas temperaturas baixas de 18 °C e 22 °C, nas quais apresentou maior viabilidade e refletiu na curva da taxa de nascimento, cuja taxa ótima é observada a 23,21 °C.

A alta viabilidade do ovo em baixas temperaturas pode estar relacionada à sua composição estrutural, que o favorece na redução da perda de água e, conseqüentemente, no seu desenvolvimento embrionário (KREBS, 1994). A alta viabilidade em temperaturas baixas parece ser uma forma de compensação em número de indivíduos já que as fases de larva, pupa e adulto não possuem alta viabilidade e longevidade em ambientes desfavoráveis, o que reduz muito as suas chances de sobrevivência. Ou ainda, estas populações trazidas de laboratório podem ter sofrido aclimação, já que a fase de ovo é criada em temperaturas baixas e sabe-se que este evento ocorre, com frequência, como uma resposta ao ambiente de criação que é diferente de seu habitat natural (GULLAN; CRANSTON, 2012).

Temperaturas extremas (18 e 36 °C) foram prejudiciais para as larvas de *D. saccharalis*. Ainda, foi verificada a influência da temperatura no número de instares larvais. Diferentemente do estudo conduzido por Melo e Parra (1988), no qual as larvas mantidas entre 20 °C e 32 °C apresentavam apenas cinco ou seis instares, neste estudo, verificou-se variação entre quatro e sete instares. Há um número considerável de espécies nas quais o número de instares varia intraespecificamente. Normalmente, o número de instares tende a aumentar sob condições adversas (ESPERK *et al.*, 2007). Possivelmente, é um mecanismo compensatório quando a larva não atinge o tamanho ideal por um número normal de instares (NIJHOUT, 1994).

A fase adulta é o resultado do desenvolvimento do imaturo e, conseqüentemente, dos recursos alimentares e ambientais como temperatura e umidade relativa os quais confrontou ao longo da vida. As temperaturas extremas reduziram a longevidade, afetando, conseqüentemente, as chances de encontrar parceiros e oviposição. Devido a temperatura de 36 °C ter sido letal para as outras fases, não foi possível obter adultos. Verificou-se também, que apenas 21,84% dos insetos atingem a idade adulta na temperatura de 18 °C e a temperatura de 28 °C foi considerada a melhor. Com isso, destaca-se o comportamento típico de mortalidade em temperaturas extremas para insetos, ou seja, aquele em que é gerado um gráfico em forma de U.

Os modelos não lineares, de modo geral, apresentaram bons ajustes na determinação de T_{min} , T_{opt} e T_{max} (alto valor de R^2). Os modelos Harcourt e Equação-16 geraram valores ótimos de T_{min} e T_{opt} para ovos e pupas; no entanto, foi considerado o modelo Brière-1, a fim de minimizar a superestimativa ocorrida para T_{max} . O limite térmico superior deve ser cuidadosamente considerado pois, em condições de campo as temperaturas altas são facilmente encontradas, o que implica em um importante fator de mortalidade (GOT *et al.*, 1996). Teoricamente, o aumento da temperatura pode produzir linearmente uma diminuição na duração das fases dos organismos (ALLEN, 1976; SETO; SHELTON, 2016); no entanto, alguns estudos mostraram que respostas não lineares podem representar adaptações importantes às temperaturas ambientais (MENDONÇA *et al.*, 2018).

Destaca-se a importância dos modelos lineares para se determinar a constante térmica. O modelo de Ikemoto e Takai apresentou valores maiores de R^2 . Embora os valores da constante térmica tenham sido menores para o modelo Ikemoto e Takai em comparação ao modelo Campbell, os valores de T_{min} foram maiores. Assim, no cálculo de acúmulo térmico, os modelos não diferem entre si nas previsões feitas.

O conhecimento dos limites térmicos os quais permitem sobrevivência, é fundamental para prever a distribuição dos insetos. Esta informação é ainda mais importante no atual cenário de mudanças climáticas e aquecimento global, em que não se sabe o impacto das alterações de temperatura para a vida dos organismos (SHELDON *et al.*, 2011). Esse tipo de informação é essencial para se traçar estratégias e obter sucesso nos programas de manejo de pragas (NYLIN, 2001).

Ao analisar a taxa de crescimento intrínseca (r_m), se obteve a faixa de temperatura na qual a espécie *D. saccharalis* pode persistir, considerando possíveis condições adversas que a podem levar a uma baixa densidade (15,47 °C a 33,73 °C).

Barra Bonita - SP possui temperatura média mais baixa que as demais localidades (22,74 °C) e da temperatura ótima observada ($T_{opt}=28$ °C) para o desenvolvimento de *D. saccharalis* (Figura 8). Neste caso, considerando que é uma localidade de baixa infestação, baixa temperatura e alta umidade relativa, um possível aumento de temperatura, teoricamente poderia propiciar condições térmicas mais próximas do ótimo o que poderia aumentar a taxa de desenvolvimento, número de gerações e possivelmente aumentar também os níveis de infestação nessa localidade.

Valparaíso - SP e Pradópolis - SP, possuem temperaturas semelhantes, mais próximas de T_{opt} , mas com níveis de umidade relativa diferentes. Possivelmente o fator umidade relativa interferiu substancialmente para o nível de infestação nestas áreas. A baixa umidade relativa afeta a disponibilidade de água e retarda o desenvolvimento dos insetos (GULLAN; CRANSTON, 2012). Nesse caso, pode-se inferir que, se o nível de umidade relativa permanecer alto ($\geq 70\%$), o aumento da temperatura pode elevar o nível de infestação. Se a umidade relativa diminuir ($< 70\%$) com o aumento da temperatura, a infestação pode ser controlada ou, mais provavelmente, reduzida. Projeções de mudanças climáticas realizadas para outros insetos, como por exemplo, para a espécie *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) (Lepidoptera: Noctuidae) revelaram o mesmo comportamento, ou seja, locais de alta umidade relativa e temperatura devem sofrer maior pressão populacional nas culturas hospedeiras desta praga. Enquanto que a baixa umidade relativa afeta o tempo de duração da fase larval e a longevidade do adulto (KUNJUN *et al.*, 1993; BUENO *et al.*, 2017).

Destaca-se que a infestação é resultado de dois fatores principais, temperatura e umidade relativa. Assim, aparentemente, altas infestações ocorrem em locais com alta temperatura e umidade relativa. E quando um dos dois fatores abióticos é reduzido, há controle sobre estes níveis de infestação. A umidade relativa é um fator pouco explorado em trabalhos (BUENO *et al.*, 2017) que deve ser considerada e pode ser incorporada nos modelos de previsão (Figura 9). Assim, uma proposição segue:

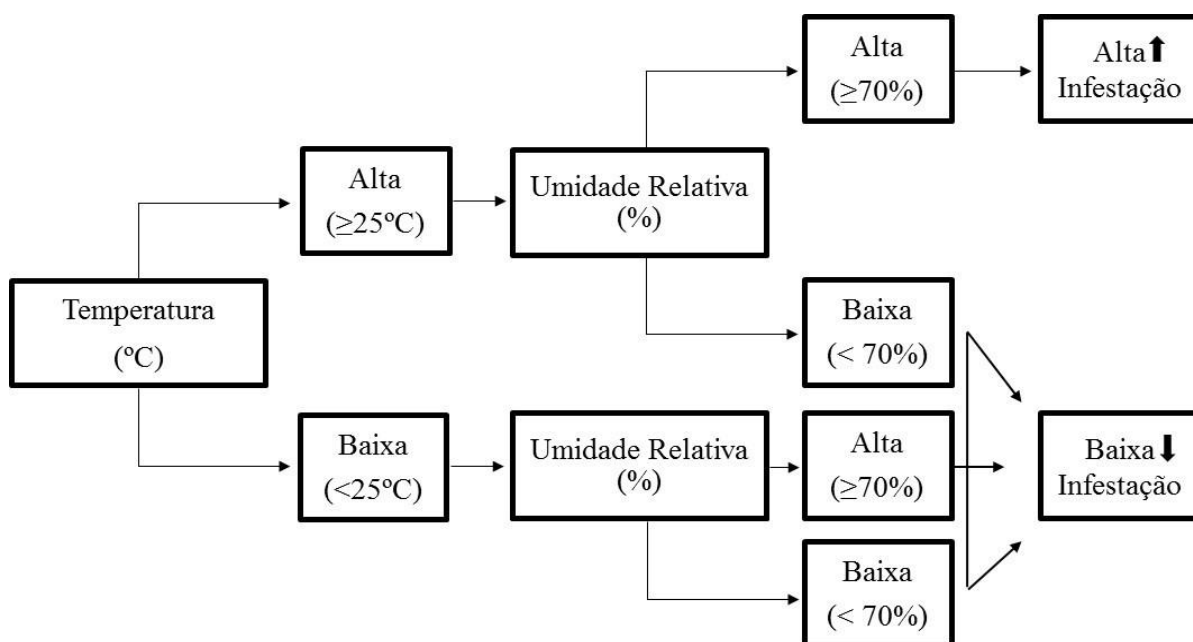


Figura 9. Estimação da intensidade da infestação de acordo com os níveis de temperatura e umidade relativa em áreas de cana-de-açúcar.

Concluindo, a influência de fatores abióticos sobre o desenvolvimento e a sobrevivência do inseto-praga são muito importantes e devem ser incorporadas em modelos fenológicos para ajudar a prever os surtos de broca-da-cana e, portanto, auxiliar na tomada de decisão.

5. REFERÊNCIAS

ALLEN, J. C. A modified sine wave method for calculating Degree days. **Environmental Entomology**, Cary, v. 5, n. 3, p. 388-396, 1976.

AMARASEKARE, P.; SAVAGE, V. A framework for elucidating the temperature dependence of fitness. **The American Naturalist**, Chicago, v. 179, n. 2, p. 178–191. 2012.

AMARASEKARE, P.; SIFUENTES, R. Elucidating the temperature response of survivorship in insects. **Functional Ecology**, West Sussex, v. 26, p. 959-968, 2012.

AMARASEKARE, P.; COUTINHO, R. M. The intrinsic growth rate as a predictor of population viability under climate warming. **Journal of Animal Ecology**, United Kingdom, v. 82, p. 1240–1253, 2013.

BOMMIREDDY, P. L.; PARAJULEE, M. N.; PORTER, D. O. Influence of constant temperatures on life history of immature *Lygus elisus* (Hemiptera: Miridae). **Environmental Entomology**, Cary, v. 33, p. 1549–1553, 2004.

BRIÈRE, J. F.; PRACROS, P.; LE ROUX, A. Y.; PIERRE, J. S. A novel rate model of temperature dependent development for arthropods. **Environmental Entomology**, Cary, v. 28, p. 22-29, 1999.

BRUNINI, O.; LISBÃO, R. S.; BERNARDI, J. B.; FORNASIER, J. B.; PEDRO JUNIOR, M. J. Temperatura-base para alface cultivar “White-Boston”, em um Sistema de unidades térmicas. **Bragantia**, Campinas, v. 35, n. 19, 1976.

BUENO, A. F.; BORTOLOTTI, O. C.; BUENO, R. C. O. F.; HAMADA, E.; GHINI, R.; FAVETTI, B. M.; SILVA, G. V. Efeitos do aquecimento global sobre pragas de oleaginosas. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; MACHADO, A.; GHINI, A. R. (ed.). **Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários**. Brasília: Embrapa Meio Ambiente, 2017, cap. 14, 488p.

CAMPBELL, A.; FRAZER, B.; GILBERT, N.; GUTIERREZ, A.; MACKAUER, M. Temperature requirements of some aphids and their parasites. **Journal of Applied Ecology**, United Kingdom, v. 11, n. 2, p. 431-438, 1974.

CARBOGNIN, E. R. **Modelos de previsão de ocorrência de adultos de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.).** 2016. 53 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia Agrícola) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal-SP.

CORTES, A. M. P. **Feromônio sexual, ADN mitocondrial e expressão das proteínas ligantes do feromônio de *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae) e avanços na identificação do feromônio sexual de *Diatraea indiginella* Dyar & Heinrich, (Lepidoptera: Crambidae).** 2010. 111 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba-PR.

DE CONTI, B. F.; BUENO, V. H. P.; SAMPAIO, M. V.; SIDNEY, L. A. Reproduction and fertility life table of three aphid species (*Macrosiphini*) at different temperatures. **Revista Brasileira de Entomologia**, São Paulo, v. 54, p. 654–660, 2010.

DEUTSCH, C. A.; TEWKSBURY, J. J.; HUEY, R. B.; SHELDON, K. S.; GHALAMBOR, C. K.; HAAK, D. C.; MARTIN, P. R. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, United States, v. 105, n. 18, p. 6668–6672, 2008.

DINARDO-MIRANDA, L. L. Pragas. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A de. (ed.) **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008, cap.17, 882p.

ESPERK, T.; TAMMARU, T.; NYLIN, S. Intraspecific variability in number of larval instars in insects. **Journal of Economic Entomology**, United Kingdom, v. 100, n. 3, p. 627-645, 2007.

ESTAY, S. A.; LIMA, M.; LABRA, F. A. Predicting insect pest status under climate change scenarios: combining experimental data and population dynamics modelling. **Journal of Applied Entomology**, v. 133, p. 491–499, 2009.

GARRARD, r.; BOOTH, D. T.; FURLONG, M. J. The effect of rearing temperature on development, body size, energetics and fecundity of the diamondback moth. **Bulletin of Entomological Research**, v. 106, n. 2, p. 175-181, 2016.

GEREMIAS, L. D. **Exigências térmicas e danos de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) em milho e base para seu controle com *Trichogramma galloi* Zucchi, 1988 (Hymenoptera: Trichogrammatidae).** 2013. 91 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- ESALQ, Universidade Estadual de São Paulo – USP, Piracicaba-SP.

GOT, B.; LABATTE, J. M.; PIRY, S. European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) development time model. **Environmental Entomology**, Cary, v. 25, n. 2, 1996.
GULLAN, P. J.; CRANSTON, P. S. **Os insetos: um resumo de entomologia.** São Paulo: Roca, 2012. 480 p.

HADDAD, J. R.; PARRA, J. R. P.; MORAES, R. C. B. **Métodos para estimar os limites térmicos inferior e superior de desenvolvimento de insetos.** Piracicaba: Fundação Luiz de Queiroz, 1999. 15 p.

HAMADA, E.; GHINI, R. Metodologia de mapeamento para avaliação de impactos das mudanças climáticas sobre problemas fitossanitários. In: **Aquecimento Global e Problemas Fitosanitários** (Ed.) BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; MACHADO, A.; GHINI, A. R. Brasília, DF: Embrapa Meio Ambiente, 2017, cap. 3, 488p.

HARCOURT, D. G.; YEE, J. M. Polynomial algorithm for predicting the duration of insect life stages. **Environmental Entomology**, Cary, v. 11, n. 3, p. 581–584, 1982.

HENSLEY, S. D.; HAMMOND, A. H. Laboratory techniques for rearing the sugar cane borer on an artificial diet. **Journal of Economic Entomology**, United Kingdom, v. 61, n. 6, p. 1742-1743, 1968.

IKEMOTO, T.; TAKAI, K. A new linearized formula for the law of total effective temperature and the evaluation of line-fitting methods with both variables subject to error. **Environmental Entomology**, Cary, v.19, n. 4, p. 671-682, 2000.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. 2015. **Climate change 2014 – Synthesis report.** Genebra, 2019. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf>. Acesso em: 1 set. 2019.

JAROSIK, V.; KRATOCHVIL, L.; HONÉK, A.; DIXON, A. F. G. A general rule for the dependence of developmental rate on temperature in ectothermic animals. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. 271, p. 219-221, 2004.

KONTODIMAS, D. C.; ELIOPOULOS, P. A.; STATHAS, G. J.; ECONOMOU, L. P. Comparative temperature-dependent development of *Nephus includens* (Kirsch) and *Nephus bisignatus* (Boheman) (Coleoptera: Coccinellidae) preying on *Planococcus citri* (Risso) (Homoptera: Pseudococcidae): evaluation of a linear and various nonlinear models using specific criteria. **Environmental Entomology**, Cary, v. 33, n. 1, p.1-11, 2004.

KREBS, C. J. **Ecology – The experimental analysis of distribution and abundance**. New York, NY: HarperCollins College Publishers. p. 714-775, 1994.

KUNJUN, W.; YUPING, C.; MINGHUI, L. Performances of bollworm cotton *Heliothis armigera* (Hubner) at different temperatures and relative humidities. **Journal of Environmental Sciences**, Netherlands, v. 5, n. 2, p. 158-168, 1993.

MELO, A. B. P.; PARRA, J. R. P. Biologia de *Diatraea saccharalis* em diferentes temperaturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, p. 663-680, 1988.

MENDONÇA, F. Z.; BERNARDY, J. V.; OLIVEIRA, C. E. K.; OLIVEIRA, P. B. G.; DE MARCO, P. Temperature effect on the development of tropical dragonfly eggs. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 47, p. 484-491, 2018.

NAVA, D. E.; HADDAD, M. L.; PARRA, J. R. P. Exigências térmicas, estimativa do número de gerações de *Stenoma catenifer* e comprovação do modelo em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 961-967, 2005.

NIJHOUT, H. F. **Insect Hormones**, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998. 260 p.

NYLIN, S. Life history perspectives on pest insects: What's the use?. **Austral Ecology**, Austrália, v. 26, p. 507–517, 2001.

OLIVEIRA, C. M.; AUAD, A. M.; MENDES, S. M.; FRIZZAS, M. R. Crop losses and the economic impact of insect pests on Brazilian agriculture. **Crop Protection**, Amsterdam, v. 56, p. 50-54, 2014.

OLIVEIRA, F. G. L.; ANDRADE, C. F. S. Ocorrência de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera; Pyralidae) em plantações de cana-de-açúcar (Magnoliophyta; Poaceae) em diferentes localidades, no município de Paraty (RJ). **Ciência et Praxis**, Passos, v. 2, n. 4, 2009.

PARRA, J. R. P.; MILANO, P.; CONSOLI, F. L.; ZERIO, N. G.; HADDAD, M. L. Efeito da nutrição de adultos e da umidade na fecundidade de *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 49-57, 1999.

PRITCHARD, G.; HARDER, L. D.; MUTCH, R. A. Development of aquatic insect eggs in relation to temperature and strategies for dealing with different thermal environments. **Biological Journal of the Linnean Society**, London, v. 58, p. 221-244, 1996.

RÉAUMUR, M. Observations du thermometre, faites à Paris pendant l'année - Comparées avec celles qui ont été faites sous la ligne; à l' Ile de France, à Alger et en quelques-unes de nos îles de l' Amérique. **Académie Royale des Sciences**, Paris, p.545-576, 1735.

ROSSATO JÚNIOR, J. A. S., COSTA, G. H. G., MADALENO, L. L., MUTTON, M. J. R., HIGLEY, L. G., FERNANDES, O. A. Characterization and impact of the sugarcane borer on sugarcane yield and quality. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 643-648, 2013.

RSTUDIO TEAM (2018). R: **A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing**. Vienna, 2018. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 13 set. 2018.

SANDOVAL, S. S.; SENÔ, K. C. A. Comportamento e controle da *Diatraea saccharalis* na cultura da cana-de-açúcar. **Nucleus**, Ituverava, v. 7, n. 1, p. 243-258, 2010.

SETO, M.; SHELTON, A. M. Development and evaluation of Degree-day models for *Acrolepiopsis assectella* (Lepidoptera: Acrolepiidae) based on hosts and flight patterns. **Journal of Economic Entomology**, United Kingdom, v. 109, n. 2, p. 613-621, 2016.

SHELDON, K. S.; YANG, S.; TEWKSBURY, J. J. Climate change and community disassembly: impacts of warming on tropical and temperate montane community structure. **Ecology Letters**, v. 14, p. 1191-1200, 2011.

SILVA, L. M.; SILVA, M. C.; SILVA, S. M. F. A.; ALVES, R. C.; SIQUEIRA, H. A. A.; MARQUES, E. J. Toxin gene contents and activity of *Bacillus thuringiensis* strains against two sugarcane borer species, *Diatraea saccharalis* (F.) and *Diatraea flavipennella* (Box). **Neotropical entomology**, Londrina, v. 47, p. 292-301, 2018.

SINERVO, B.; CRUZ, F. M. de la.; MILES, D. B.; HEULIN, B.; BASTIAANS, E.; SANTA CRUZ, M. V.; RESENDIZ, R. L.; MÉNDEZ, N. M.; ESPINOSA, M. L. C.; LÁZARO, R. N. M.; GADSDEN, H.; AVILA, L. J.; MORANDO, M.; RIVA, I. J. de la.; SEPULVEDA, P. V.; ROCHA, C. F. D.; IBARGÜENGOYTÍA, N.; PUNTRIANO, C. A.; MASSOT, M.; LEPETZ, V.; OKSANEN, T. A.; CHAPPLE, D. G.; BAUER, A. M.; BRANCH, W. R.; CLOBERT, J.; SITES-JR, J. W. Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. **Science**, Washington, v. 328, n. 894, 2010.

YUKAWA, J.; ICHINOSE, M.; KIM, W.; UECHI, N.; GYOUTOKU, N.; FUJII, T. Lower development threshold temperatures and thermal constants for four species of *Asphondylia* (Diptera: Cecidomyiidae) in Japan and their larval developmental delay caused by heat stress. **Applied Entomology and Zoology**, Japan, v. 51, n.1, p. 71-80, 2016.

WALTHER, G. R.; POST, E.; CONVEY, P.; MENZEL, A.; PARMESAN, C.; BEEBEE, T. J. C.; FROMENTIN, J. M.; HOEGH-GULDBERG, O.; BAIRLEIN, F. Ecological responses to recent climate change. **Nature**, London, v. 416, p. 389-395, 2002.

CAPÍTULO 3 – Validação de modelos matemáticos de previsão de ocorrência de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)

RESUMO – A espécie *Diatraea saccharalis* é uma das principais pragas da cultura da cana-de-açúcar, cujo controle é realizado principalmente pela liberação do parasitoide *C. flavipes*. Visando aprimorar a tomada de decisão de controle utilizando parasitoides de ovos e entomopatógenos para larvas nos primeiros instares, este presente trabalho teve por objetivo validar modelos matemáticos (Graus-dia e Equações de diferenças) previamente desenvolvidos nas safras 2013/2014 e 2014/2015. Foi realizada análise qualitativa das previsões e do controle biológico pelos organismos e comparada com as simulações teóricas através de um modelo de equações diferenciais com retardo. Ainda, foi realizada uma proposta de aprimoramento do modelo Graus-dia, a fim de considerar um intervalo de controle na tomada de decisão. A validação de campo foi conduzida em Quirinópolis-GO durante a safra 2016/2017. Para isso, foram utilizados cinco talhões de 25 ha, próximos (< 2 km) a estações climáticas. Em cada talhão foi demarcado uma área central (1 a 1,5 ha) para o monitoramento dos tratamentos. O monitoramento foi realizado semanalmente. A captura de adultos foi realizada por meio de quatro armadilhas delta no entorno desta área central, contendo piso colante e fêmeas virgens. A observação de ovos e larvas foi feita em 100 colmos/parcela. As aplicações de *B. thuringiensis* e liberações dos agentes de controle *T. galloi* e *C. flavipes* foram realizadas de acordo com o momento estabelecido pelos modelos e com base na flutuação populacional observada no tratamento testemunha. Constatou-se que após as previsões pelos modelos e posterior liberação/aplicação dos agentes biológicos houve alteração na dinâmica populacional de *D. saccharalis* em campo. O tratamento em que houve aplicação de *B. thuringiensis* (Dipel®) foi o que apresentou menor intensidade de infestação (%). A simulação teórica foi compatível com as previsões e a dinâmica populacional observada em campo em que foram observados quatro picos de adultos.

Palavras-chave: broca da cana-de-açúcar, regulação populacional, parâmetros meteorológicos, Graus-dia, modelos matemáticos.

CHAPTER 3. Enhancement and validation of forecasting models for *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) outbreaks in sugarcane (*Saccharum* spp.)

ABSTRACT - The species *Diatraea saccharalis* is one of the main pests of sugarcane crop, whose control is mainly carried out by the release of the parasitoid *Cotesia flavipes*. Aiming to improve control decision making using egg parasitoids and entomopathogens for larvae in the first instars, this study presented the objective of validating mathematical models (Degree-day and Equation of differences) previously developed in the 2013/2014 and 2014/2015 season. The qualitative analysis of the predictions as well as the effect of biological control strategies were performed and compared with the theoretical simulations through a Delay differential equation model. Also, a proposal was made to improve the Degree-day model in order to consider a control interval in decision making. Field validation was conducted in Quirinópolis-GO during the 2016/2017 crop. For this, five plots of 25 ha were used, near (<2 km) to climatic stations. In each field, a central area (1 to 1.5 ha) was established for monitoring the treatments. Monitoring was performed weekly. Adult capture was performed using four delta traps around this central area, containing adhesive floor and virgin females. The observation of eggs and larvae was made in 100 stalks/plot. The applications of *B. thuringiensis* and releases of *T. galloi* and *C. flavipes* control agents were performed according to the time established by the models and based on the population fluctuation observed in the control treatment. It was found that after the predictions by the models and subsequent release/application of biological agents, population dynamics of *D. saccharalis* in the field changed. The treatment in which *B. thuringiensis* (Dipel®) was applied showed the lowest infestation intensity (%). The theoretical simulation was compatible with the predictions and the population dynamics observed in the field in which four adult peaks were observed.

Key-words: sugarcane borer, population regulation, meteorological parameters, Degree-day, mathematical models.

1. INTRODUÇÃO

A espécie *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) é considerada uma das principais pragas da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) (Família: Poaceae). O dano é causado pela fase jovem que forma galerias no colmo da planta ao se alimentar. Com isso, há perda de matéria prima e o favorecimento para que haja a instalação de fungos e bactérias, os quais são prejudiciais à produção de açúcar e etanol (DINARDO-MIRANDA, 2008; ROSSATO JÚNIOR *et al.*, 2013).

O controle químico não é eficiente para esta praga pois não atinge as fases presentes no interior da planta. Assim, comumente, o controle é realizado pela liberação do parasitoide larval *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891) (Hymenoptera: Braconidae) (LIMA *et al.*, 2011). A oviposição deste parasitoide ocorre somente em larvas do terceiro instar em diante, ou seja, larvas que já se alimentaram do colmo, portanto, parte da produção já foi comprometida. Outros agentes de controle biológico também são utilizados tais como a bactéria *Bacillus thuringiensis* Berliner, 1911 (Eubacteriales: Bacillaceae) e o parasitoide *Trichogramma galloi* Zucchi, 1988 (Hymenoptera: Trichogrammatidae) para o controle de larvas pequenas e ovos, respectivamente. Tais agentes são capazes de controlar este inseto quando este ainda não adentrou o interior do colmo, porém, são utilizados em menor escala uma vez que a amostragem e observação de ovos e larvas pequenas é extremamente difícil (MACEDO *et al.*, 2012; PARRA *et al.*, 2002) e a liberação ou aplicação de qualquer agente de controle deve estar lastreada por informações precisas da ocorrência da praga no campo. Assim, estratégias para o monitoramento das fases-alvo tornam-se necessárias.

Dentre estas estratégias estão inseridos os modelos matemáticos. O uso deste tipo de ferramenta, já promissor décadas atrás (SMERAGE, 1985, GUTIERREZ, 1996) têm crescido continuamente, especialmente na área de entomologia. Os modelos matemáticos têm promovido um melhor entendimento da relação pragas x inimigos naturais (AMARASEKARE; COUTINHO, 2014), pragas x fatores ambientais (SAHINER *et al.*, 2014), além de prever a ocorrência de pragas com base em sua dinâmica populacional e fatores ambientais (FREIRE *et al.*, 2005; CARBOGNIN, 2016).

Modelos de previsão de ocorrência de inseto-pragas têm sido utilizados com frequência em países de clima temperado por terem estações mais definidas e um inverno mais rigoroso comparado ao Brasil. Assim, os insetos nestas localidades comumente sofrem diapausa, com um período nítido de baixa infestação e fácil percepção de aumento da população quando a temperatura se eleva no início da primavera (CARBOGNIN *et al.*, 2018).

Apesar dos desafios enfrentados pelos países tropicais para lidar com surtos populacionais de insetos-praga devido as altas temperaturas, muitos trabalhos realizados nos últimos anos têm contribuído para resolver as mais diferentes questões, como a de surtos de vetores de doenças como *A. aegypti* (DONALÍSIO; GLASSER, 2002; GOMES; THOMÉ, 2015; CORDEIRO *et al.*, 2018) e manejo de pragas agrícolas (REIS-JÚNIOR *et al.*, 2005; SILVEIRA, 2014).

Modelos matemáticos como Graus-dia e equações de diferenças surgem como mais um recurso capaz de simular, respectivamente, quando uma determinada fase da praga irá ocorrer bem como estimar quantos insetos serão encontrados nas coletas por meio de simulações que consideram dados abióticos (temperatura) e bióticos (flutuação populacional) (BRUNINI *et al.* 1976; HIGLEY *et al.*, 1986; CARBOGNIN, 2016). Outro modelo, o de equações diferenciais com retardo, é capaz de avaliar a dinâmica populacional levando em consideração o histórico de atributos que podem interferir na dinâmica.

Desta forma, diante da necessidade de aprimoramento dos atuais sistemas de amostragem bem como de desenvolver um modelo para as condições tropicais, que o presente trabalho teve por objetivo avaliar as previsões realizadas pelos modelos matemáticos Graus-dia e Equações de diferenças desenvolvidos previamente, validar através de simulação teórica, a dinâmica e as previsões feitas, bem como, a eficiência de diferentes agentes de controle biológico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Modelos matemáticos

Foram utilizados três modelos matemáticos neste trabalho. Dois desses modelos, Graus-dia e Equações de diferenças, foram desenvolvidos anteriormente inspirados nos dados coletados sobre a dinâmica temporal de *D. saccharalis* durante as safras de 2013/2014 e 2014/2015 (CARBOGNIN, 2016), e utilizados para previsão de ocorrência da praga no campo e controle desta a partir da liberação/aplicação de agentes de controle biológico. Os valores utilizados de constante térmica (K) foram baseados em Melo e Parra (1988), e calculados pelo programa Excel (Microsoft Office, 2016). Já o modelo Equações de diferenças foi programado em linguagem C e fundamentado conforme, Dennis e Taper (1994), Dennis *et al.* (1998) e Iannelli e Pugliese (2014).

O terceiro modelo é um modelo de equações diferenciais com retardo, empregado para simular a dinâmica temporal de *D. saccharalis* no campo e estudar o efeito da temperatura do ar sobre esta dinâmica populacional. Para isto, utilizou-se os seguintes dados obtidos em laboratório (capítulo 2) para este inseto: Taxa de natalidade (número de oviposição por fêmea/dia), taxa de desenvolvimento e taxas de mortalidade do imaturo e adulto. Este modelo considerou duas fases do inseto que foram imaturos (ovos, larvas e pupas) e adultos.

Inicialmente observou-se a dinâmica populacional do inseto sujeita a uma temperatura do ar constante. Posteriormente, variou-se esta temperatura ao longo do tempo e observou-se como alterava a dinâmica temporal da população. Finalmente utilizou-se dados reais de temperatura coletada no campo para validar a previsão do modelo matemático com os dados coletados sujeitos as mesmas temperaturas.

2.2. Tomada de decisão de controle baseada nos modelos matemáticos

Para a realização do controle dos insetos no campo foram adotadas áreas comerciais de cana-de-açúcar, variedade CTC4, localizada em Quirinópolis-GO na safra 2016/2017. Para isso, foram estabelecidos cinco talhões de 25 ha cada. Em

cada um destes talhões, uma área central de um hectare (parcela útil) foi utilizada para a coleta de informações e evitar efeito de borda dos tratamentos.

Foram adotados cinco tratamentos (Tabela 1). Os dados de coleta de adultos no tratamento testemunha (sem aplicação ou liberação de agente de controle biológico) serviram de parâmetro para os dois modelos matemáticos (Graus-dia e Equações de diferenças). E, desta forma, quando os modelos previram os picos de adultos, fez-se o somatório térmico, também, para ovos, larvas pequenas e grandes, para realização da liberação e/ou aplicação do agente de controle biológico designado (Tabela 1).

Tabela 1. Tratamentos adotados para controle de *Diatraea saccharalis* utilizando modelos matemáticos para previsão de ocorrência

Nº	Tratamentos	Recomendação (ha)
1	Testemunha	-
2	<i>Trichogramma galloi</i>	150.000*
3	<i>Bacillus thuringiensis</i>	1L
4	<i>Trichogramma galloi</i> + <i>Bacillus thuringiensis</i>	150.000* + 1L p.c
5	<i>Cotesia flavipes</i>	6.000 a 8.000*

*parasitoides

As parcelas de controle estiveram dispostas no entorno da parcela testemunha (sem controle). As parcelas úteis, localizadas no centro dos talhões, estiveram distantes pelo menos 100 m para evitar interferência entre os controles realizados nos diferentes tratamentos (Figura 1).

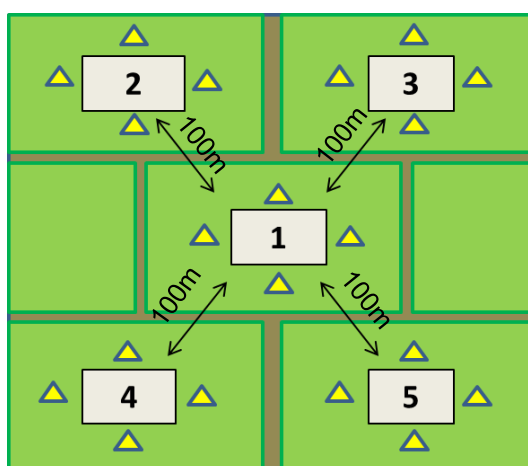


Figura 1. Distribuição espacial dos tratamentos adotados para controle de *D. saccharalis*. A numeração é correspondente aos tratamentos descritos na Tabela 1. Os triângulos correspondem às armadilhas delta instaladas para captura de adultos.

As aplicações de *B. thuringiensis* (Dipel®) e liberações de *T. galloi* e *C. flavipes* foram realizadas de acordo com a recomendação comercial (Tabela 1). O Dipel® foi aplicado de forma tratorizada ou aérea (quando não foi possível adentrar o canavial) e o parasitoide *T. galloi* foi liberado durante três semanas consecutivas. Estabeleceu-se que as liberações de *T. galloi* aconteceriam na semana anterior, durante e após o pico populacional de adultos. A determinação dos picos foi embasada no aumento do número de mariposas e acúmulo de graus-dia.

2.3. Coleta de dados

2.3.1. Parâmetros climáticos

As áreas adotadas situavam-se próximas à estação meteorológica (distância menor que 2 km). Os dados de temperatura, precipitação e umidade relativa, registrados a cada hora foram enviados semanalmente. Os valores de temperatura do ar máxima e mínima diária foram utilizados no modelo Graus-dia para cálculo de acúmulo térmico.

2.3.2. Avaliação da infestação por *Diatraea saccharalis*

Na parcela útil (1 ha) foram demarcados cinco linhas de cultivo e em cada linha 10 pontos, ou seja, 50 pontos de amostragem, espaçados em 10 m cada. Em cada ponto foram amostrados dois colmos para verificação da infestação, totalizando 100 colmos por área.

Para cada colmo foram registrados a presença de ovos, larvas (fora e dentro do colmo), pupas e parasitoides. Em torno de cada área foram instaladas quatro armadilhas do tipo delta (Biocontrole, Indaiatuba-SP) com piso colante para o monitoramento de adultos. Dentro de cada armadilha foram fixadas gaiolas plásticas feitas de rolo de cabelo (bob), envolto por tecido fino (tule) contendo cinco fêmeas virgens e três pupas para liberação contínua de feromônio sexual. Estas fêmeas foram trocadas a cada três dias para garantir a liberação contínua dos feromônios no campo e atratividade dos machos de *D. saccharalis* para as armadilhas (CORTES, 2010; SANDOVAL; SENÔ, 2010), os quais foram avaliados semanalmente.

2.4. Análise qualitativa e aprimoramento do modelo Graus-dia

A previsão dos picos populacionais de *D. saccharalis* pelos modelos matemáticos e avaliação de alteração na dinâmica populacional indicando efeito dos tratamentos realizados por meio das liberações ou aplicações dos agentes biológicos foram analisadas qualitativamente. A validação dos dados de campo foi feita por meio de simulação teórica utilizando modelo de equações diferenciais com retardo com base nos dados de exigências térmicas obtidos para *D. saccharalis* em laboratório (capítulo 2).

Adicionalmente, fez-se uma proposta de aprimoramento do modelo Graus-dia, estipulando-se um intervalo em unidade graus-dia (G.D), a fim de ser considerado no somatório térmico quando as previsões forem realizadas. Para isto, levou-se em consideração a sobreposição das fases observada pelo efeito das diferentes temperaturas constantes no tempo de desenvolvimento de *D. saccharalis* (experimento de laboratório - capítulo 2), representado pelo desvio padrão. Para esta análise considerou-se a porcentagem de representação do desvio padrão sobre o tempo de desenvolvimento e esta porcentagem sobre a constante térmica ($\text{Desvio Padrão} \times 100 / \text{Tempo de desenvolvimento (\%)}; K \pm [\%]$). Com isto, propõe-se que este modelo seja visualizado não apenas pontualmente, mas considerando um intervalo de controle.

4. RESULTADOS

3.1. Análise qualitativa da previsão dos modelos matemáticos

O modelo Graus-dia foi eficiente nas quatro previsões de picos de adultos realizadas, já que o erro foi inferior a 7 dias entre as datas previstas e as datas observadas. A diferença entre a quantidade de insetos previstos e aqueles obtidos em campo corresponde ao erro do modelo. E, para a previsão do pico, o erro considerado ótimo é aquele abaixo de sete dias, já que os dados de campo possuem este intervalo de tempo. O número de mariposas previstas pelo modelo Equações de diferenças na previsão 1 foi subestimado (-44), possivelmente pela necessidade do modelo em ter um número ótimo de coletas anteriores. Posteriormente verificou-se o ajuste dos valores e uma previsão mais precisa (Tabela 2).

Tabela 2. Datas das previsões e número de adultos esperados e observados utilizando os modelos Graus-dia e Equações de diferenças para a safra 2016/2017 em Quirinópolis-GO

Previsão	Datas de picos de adultos ¹			Quantidade de adultos ²			Data da realização do tratamento ³			
	Esperada	Observada	Erro	Esperado	Observado	Erro	<i>T. galloi</i> (T2)	<i>Bt</i> (T3)	<i>T. galloi x Bt</i> (T4)	<i>C. flavipes</i> (T5)
1	27/02 a 03/03/17	28/02/17	0	31	75	-44	20/02/17 27/02/17 06/03/17 03/04/17	01/03/17	Datas (T2 e T3)	20/03/17
2	*09/04 a 14/04/17	08/04/17	-1	58	49	9	10/04/17 17/04/17	12/04/17	Datas (T2 e T3)	28/04/17
3	22/04 a 28/04/17	22/04/17	0	48	38	10	**1/05/17	28/04/17	Datas (T2 e T3)	28/04/17
4	27/05 a 31/05/17	03/06/17	+3	48	36	12	29/05/17 05/06/17 12/06/17	29/05/17	Datas (T2 e T3)	19/06/17

¹ Data esperada e observada após simulação pelo modelo Graus-dia.

² Número esperado e observado após simulação pelo Equações de diferenças.

³ Datas estipuladas para aplicação/liberação dos agentes de controle biológico nos tratamentos.

* Tratamento não realizado na data estipulada

**Liberação única

Verificou-se alteração e redução na flutuação populacional de adultos e larvas de *D. saccharalis* após a liberação do parasitoide de ovos *T. galloi*. A intensidade de infestação para o tratamento testemunha foi de 2,98% e a quantidade acumulada de mariposas de 682,50 (Figura 2a). Em comparação ao tratamento testemunha, o tratamento em que houve liberação de *T. galloi*, apresentou intensidade de infestação de 2,81%, com número acumulado de mariposas de 322,70 (Figura 2b).

Especialmente para os intervalos referentes à primeira e terceira previsões (F1 e F3) houve redução no dano por lagarta observados no colmo (Figura 2). As indicações denominadas F1, F2 e F3 levam em consideração o intervalo de tempo em que as liberações de *T. galloi* devem resultar em efeito no campo nas liberações 1, 2 e 3, respectivamente.

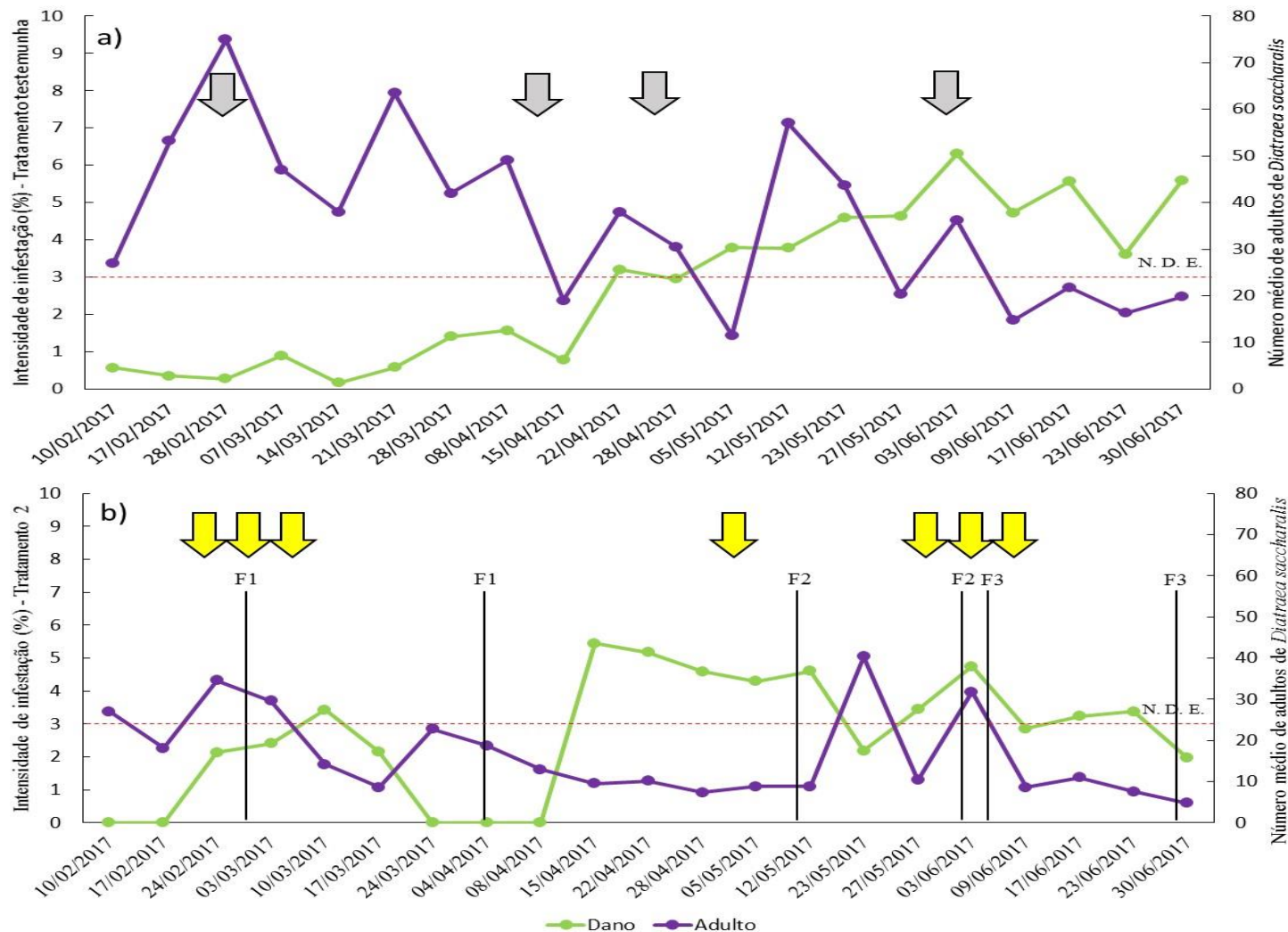


Figura 2. Intensidade de infestação e flutuação populacional de adultos (média/quatro armadilhas) em cana-de-açúcar. a) Setas (cinza) na testemunha indicam as datas previstas de picos de adultos. b) Setas (amarelo) indicam os momentos de liberação de *Trichogramma galloi* (tratamento 2). Linhas contínuas F1, F2 e F3 indicam o intervalo de tempo em que é esperado o efeito do tratamento realizado. N.D.E.: refere-se ao nível de dano econômico para cana-de-açúcar (3%).

Verificou-se que a abundância de adultos e larvas (interior da planta) de *D. saccharalis* no tratamento em que houve a aplicação da bactéria *B. thuringiensis* foi menor em relação ao tratamento testemunha (Figura 3). Os níveis de infestação de larvas se mantiveram abaixo do nível de controle (3% I.I) ao longo das avaliações, com exceção apenas de uma data de avaliação.

Os valores de infestação e número acumulado de adultos para este tratamento foram de 0,75% e 252,37, respectivamente.

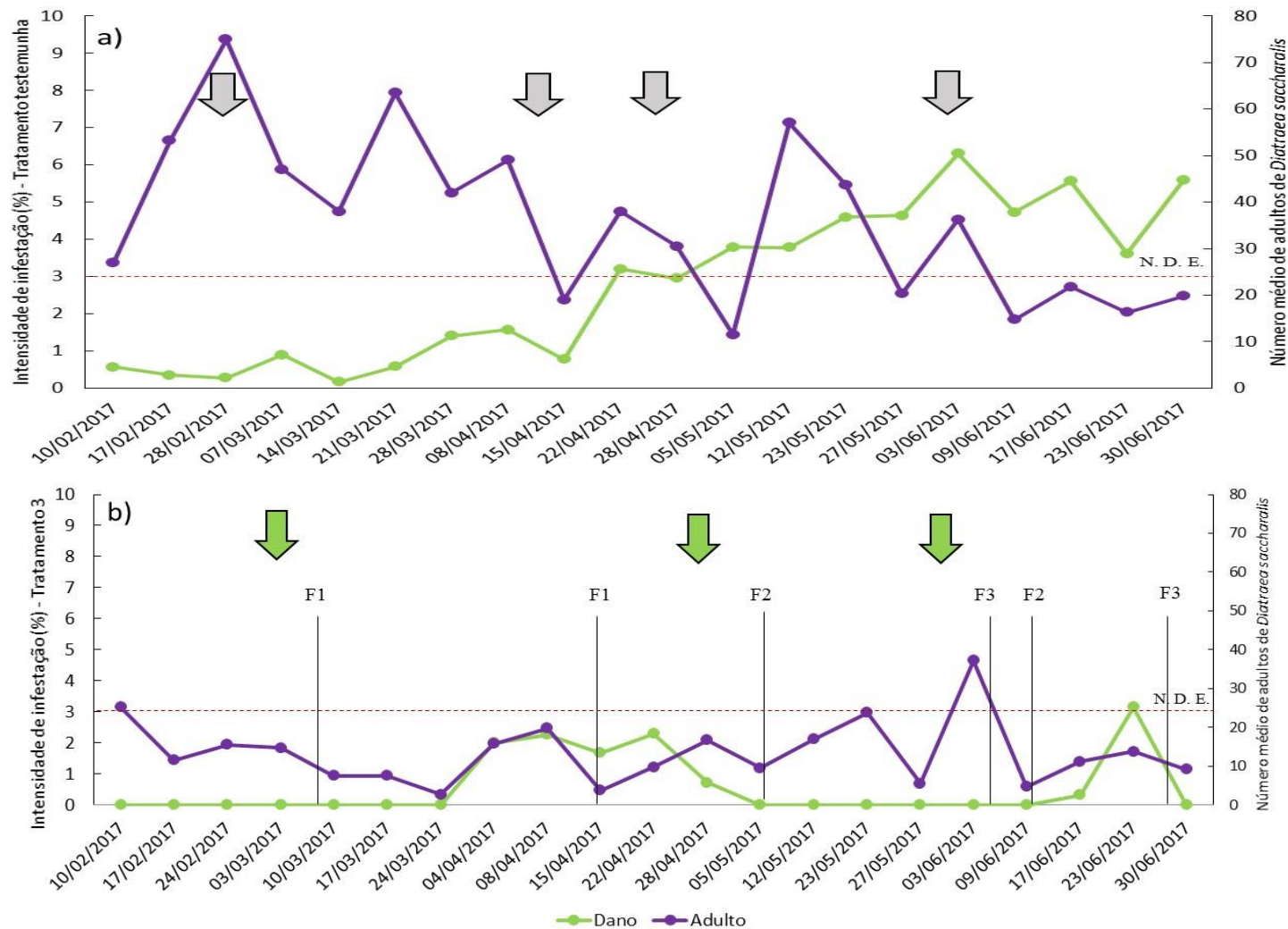


Figura 3. Intensidade de infestação e flutuação populacional de adultos (média/quatro armadilhas) em cana-de-açúcar. a) Setas (cinza) na testemunha indicam as datas previstas de picos de adultos. b) Setas (verde) indicam, os momentos de aplicação de *Bacillus thuringiensis* (tratamento 3). Linhas contínuas F1, F2 e F3 indicam o intervalo de tempo em que é esperado o efeito do tratamento realizado. N.D.E.: refere-se ao nível de dano econômico para cana-de-açúcar (3%).

De forma semelhante, a abundância de adultos e larvas (interior da planta) de *D. saccharalis* no tratamento em que houve a aplicação da bactéria *B. thuringiensis* conciliada com liberações de *T. galloi* foi reduzida em relação ao tratamento testemunha (Figura 4). Os níveis de infestação de larvas se mantiveram abaixo do nível de controle (3% I.I) ao longo das avaliações, com exceção apenas de uma data de avaliação. A intensidade de infestação foi de 1,24% e com um número acumulado de adultos em campo de 261,25 (Figura 4b).

Ressalta-se que, devido a não liberação de *T. galloi* no momento estabelecido durante a segunda previsão de ocorrência de picos de adultos, realizou-se uma única liberação, porém, com a quantidade de insetos correspondente ao somatório de 3 liberações. O produto à base de *B. thuringiensis*, Dipel®, foi aplicado logo após o pico de adultos, respeitando o prazo para que já estivessem presentes em campo as larvas recém-eclodidas, com base na temperatura nas datas dos levantamentos e somatório térmico.

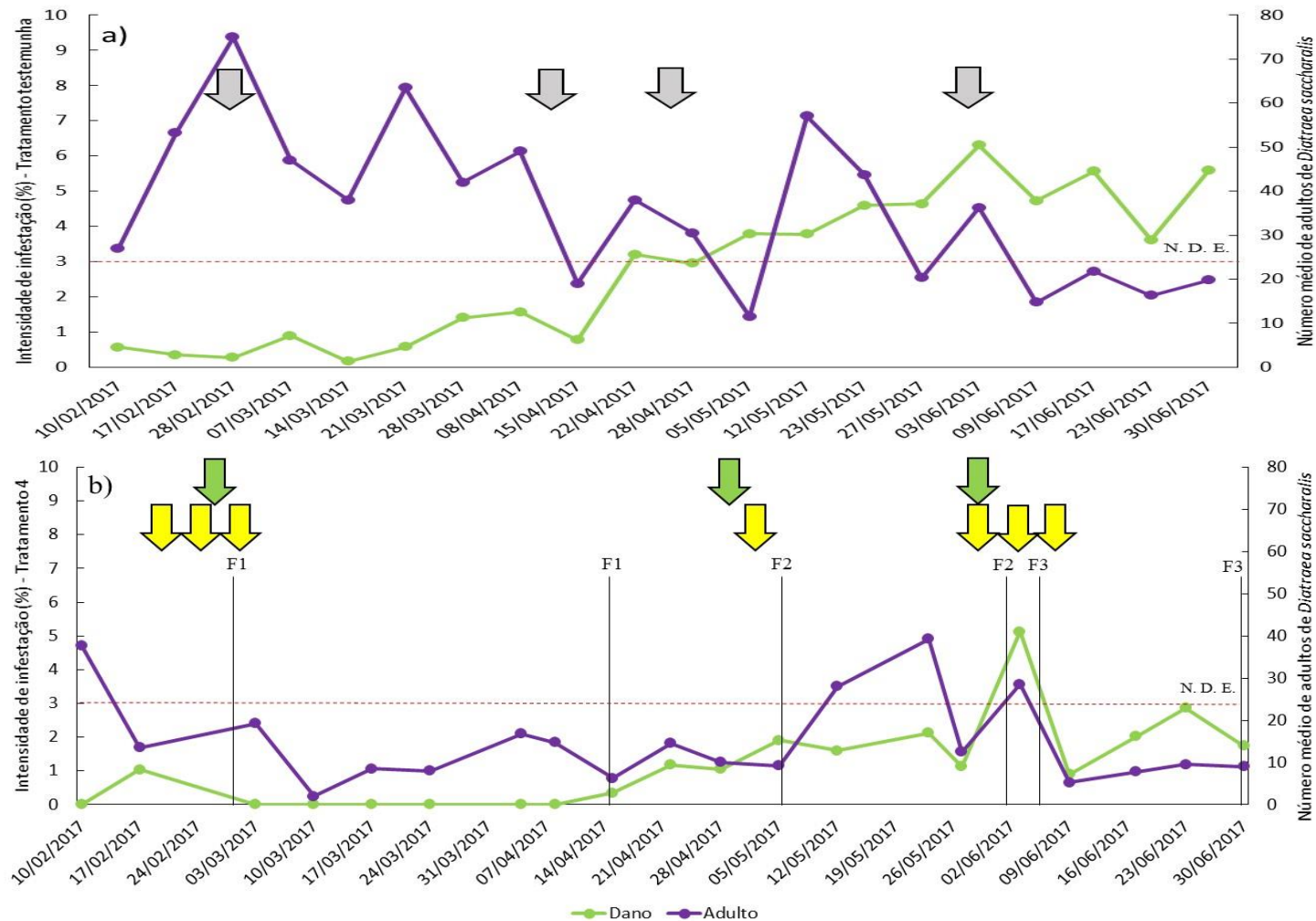


Figura 4. Intensidade de infestação e flutuação populacional de adultos (média/quatro armadilhas) em cana-de-açúcar. a) Setas (cinza) na testemunha indicam as datas previstas de picos de adultos. b) Setas indicam os momentos de aplicação de *B. thuringiensis* (verde) e liberação de *T. galloi* (amarelo) (tratamento 4). Linhas contínuas F1, F2 e F3 indicam o intervalo de tempo em que é esperado o efeito do tratamento realizado. N.D.E.: refere-se ao nível de dano econômico para cana-de-açúcar (3%).

A intensidade de infestação no tratamento de liberação de *C. flavipes* foi de 2,32% e com um número acumulado de adultos em campo de 301,04. As liberações do parasitoide *C. flavipes* foi feita respeitando o prazo para que já estivessem presentes em campo as larvas dentro do colmo, ou seja, a partir do terceiro instar (Figura 5). A infestação de larvas dentro do colmo de modo semelhante ao tratamento testemunha era esperado, uma vez que este parasitoide ataca as larvas dentro do colmo. Portanto, mesmo havendo o controle por estes parasitoides, a observação do dano ocasionado continuou sendo registrada (Figura 5b). O efeito do parasitismo de *C. flavipes*, no entanto, refletiu em considerável redução na abundância de adultos e, dessa forma, alteração na magnitude da flutuação populacional.

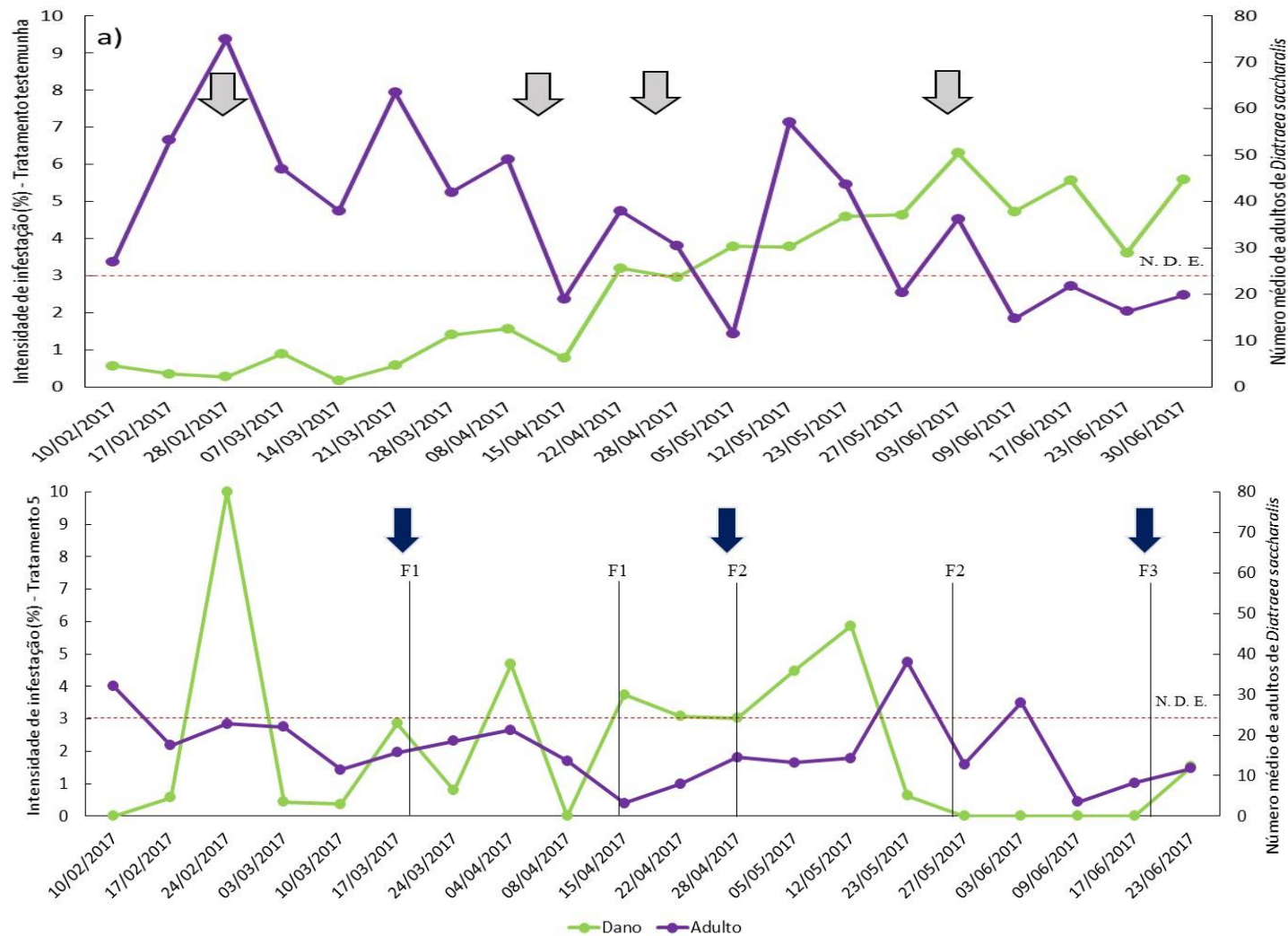


Figura 5. Intensidade de infestação e flutuação populacional de adultos (média/quatro armadilhas) em cana-de-açúcar. a) Setas (cinza) na testemunha indicam as datas previstas de picos de adultos. b) Setas (azul) indicam os momentos de liberação de *C. flavipes* (tratamento 5). Linhas contínuas F1, F2 e F3 indicam o intervalo de tempo em que é esperado o efeito do tratamento realizado. N.D.E.: refere-se ao nível de dano econômico para cana-de-açúcar (3%).

3.1.1. Aprimoramento do modelo matemático Graus-dia

Através de experimento em laboratório (capítulo 2) observou-se variação intraespecífica no tempo de desenvolvimento dos insetos nas diferentes fases e temperaturas (Figura 6). Portanto, ao longo do desenvolvimento de *D. saccharalis* em condições de campo, podemos observar mais de uma fase para ser controlada, o que pode implicar, muitas vezes na necessidade de utilização de diferentes táticas de controle.

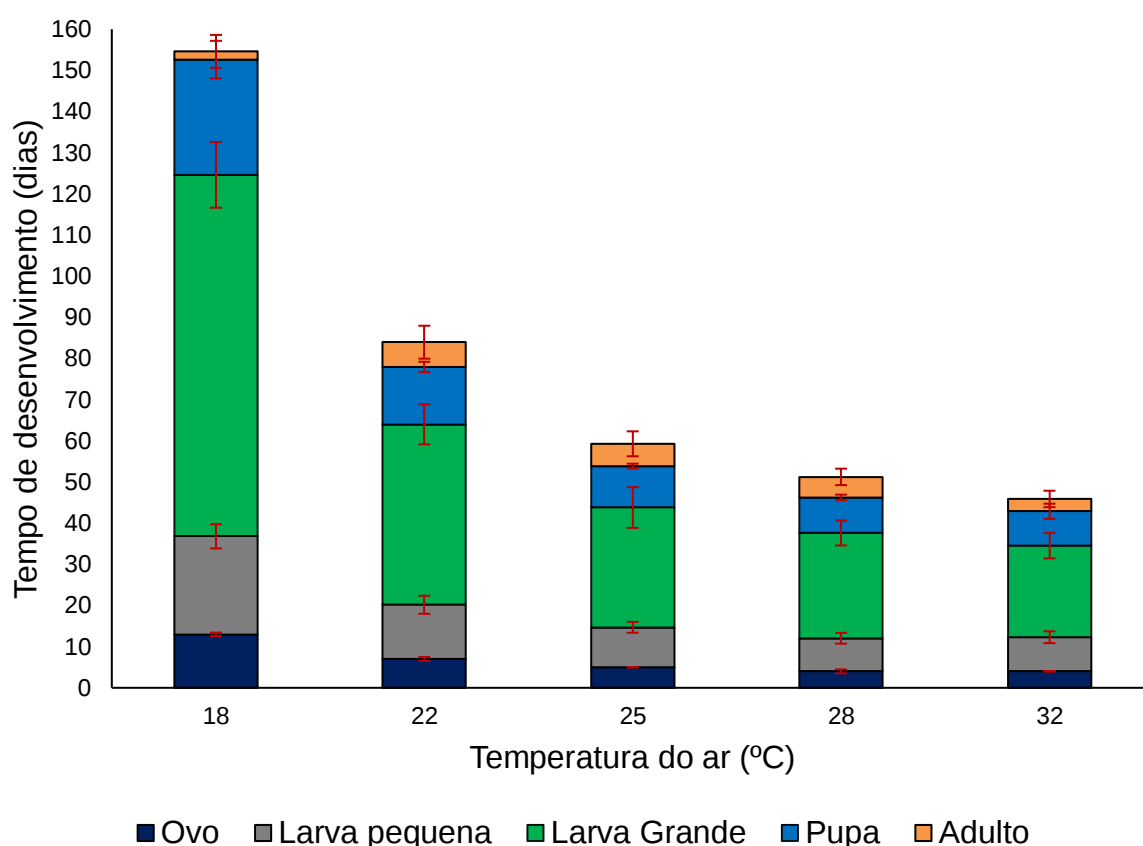


Figura 6. Tempo de desenvolvimento ($\pm$ Desvio Padrão) de ovo, larva (1º e 2º ínstaes), larva (3º a 7º ínstaes), pupa e adulto de *Diatraea saccharalis* em diferentes temperaturas constantes.

Foi possível estimar o intervalo de somatório térmico e faixa de controle para *D. saccharalis*. Assim, obteve-se os valores de início e término de acúmulo da constante térmica a ser considerado para cada fase e temperatura, como indicado na Tabela 3.

Tabela 3. Intervalo (GD) a ser considerado nas previsões de picos para as fases de ovo, larva pequena na folha (1º e 2º instares), larva grande no colmo (3º ao 7º instares) e pupa em diferentes temperaturas constantes

Temperatura (°C)	Ovo ($\pm K$)		Larva (1º e 2º instares) ($\pm K$)		Larva (3º a 7º instares) ($\pm K$)		Pupa ($\pm K$)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
18	66,09 GD	70,41 GD	73,42	94,12	245,88	295,04	11,55	15,93
22	63,78 GD	72,72 GD	69,84	97,70	240,53	300,39	12,52	14,96
25	68,25 GD	68,25 GD	72,36	95,18	224,47	316,45	12,91	14,57
28	60,56 GD	75,94 GD	70,12	97,42	238,42	302,50	12,64	14,84
32	68,25 GD	68,25 GD	69,24	98,30	232,76	308,16	10,70	16,78

3.2. Simulação teórica por equações diferenciais com retardo

3.2.1. Efeito de temperaturas constantes na flutuação populacional de insetos imaturos e adultos

As temperaturas ótimas para desenvolvimento dos imaturos e adultos encontram-se por volta de 22 °C e 25 °C, respectivamente. Na simulação variou-se a temperatura entre $T_{\min}= 13,16$ °C e $T_{\max} 35,83$ °C (obtidos em laboratório). Observou-se que a largura do pico de insetos imaturos é ligeiramente maior que a do pico de adultos. É possível observar, para cada temperatura avaliada, a proporção de insetos imaturos que conseguem atingir a fase adulta (18 °C=0,66%, 22 °C=5,2%, 25 °C=12,2%, 28 °C=11,8 e 32 °C=5,26%) (Figura 7).

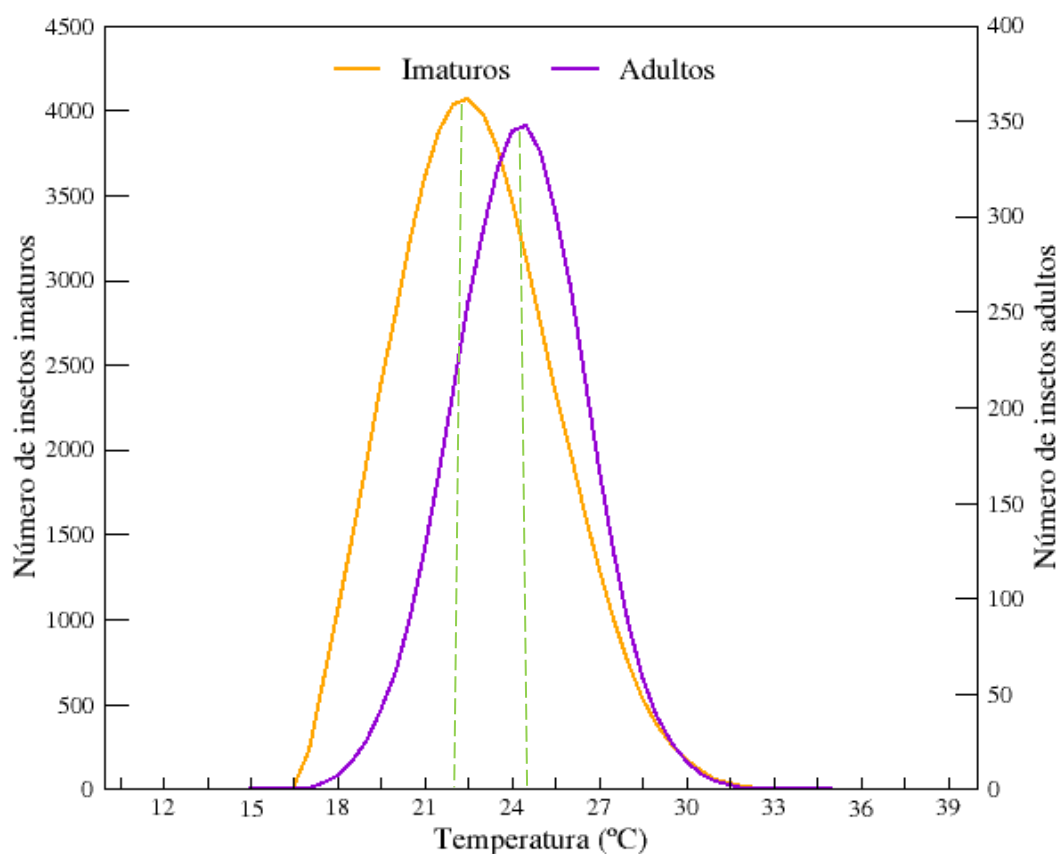


Figura 7. Número de insetos imaturos e adultos em função da temperatura. Linha verde tracejada representa a temperatura ótima para insetos imaturos (em torno de 22 °C) e adultos (25 °C).

Através das simulações observou-se que quando a temperatura é constante, após um transiente (pequeno intervalo de tempo) a população de *D. saccharalis* se mantém constante ao longo do tempo. Por outro lado, quando há variação da temperatura, ocorre flutuação no número de insetos (Figura 8).

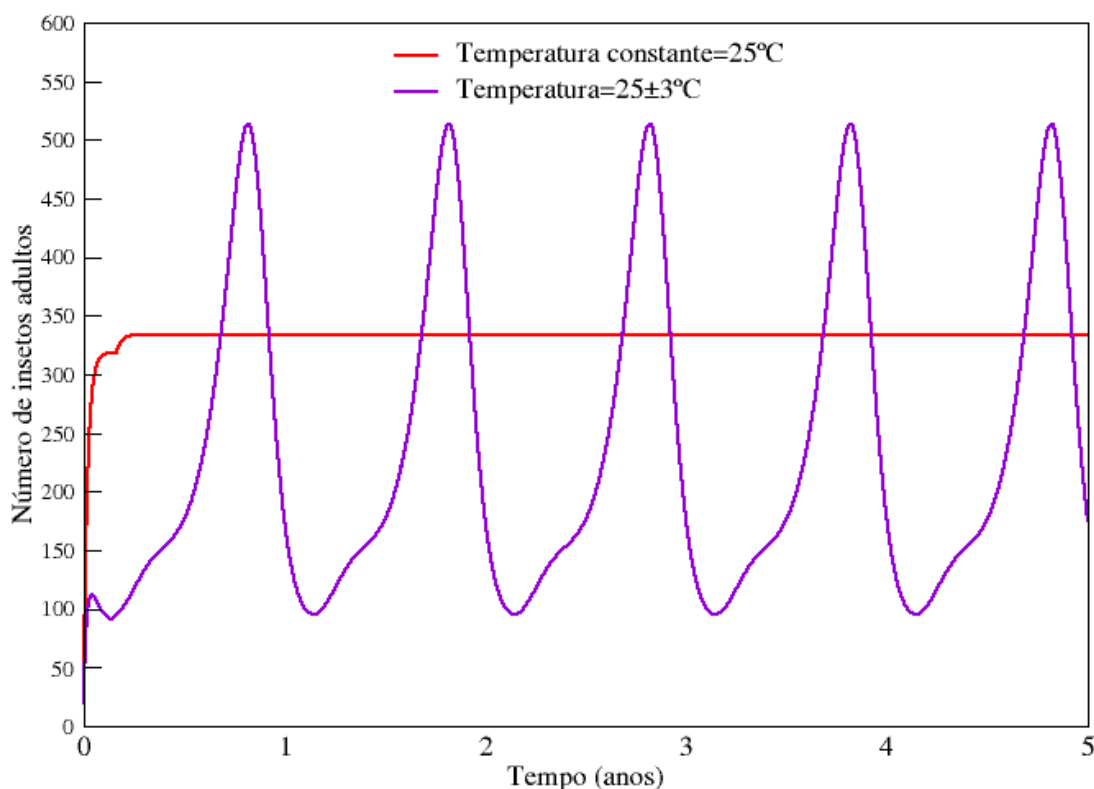


Figura 8. Número de insetos adultos a temperatura constante de 25 °C (linha vermelha) e a temperatura de 25±3 °C (linha roxa).

3.2.2. Efeito de temperaturas variáveis na flutuação populacional de insetos adultos

Observou-se diferenças na amplitude dos picos ao longo dos anos (flutuação populacional de adultos) bem como nos períodos em que a incidência de adultos é favorecida (períodos térmicos favoráveis) (Figura 9).

As temperaturas de 18±3 °C, 22±3 °C, 25±3 °C, 28±3 °C e 32±3 °C foram utilizadas nas simulações para quantificar a variação no número de indivíduos.

Assim observa-se que em 18 ± 3 °C, os picos aparecem, dentro do intervalo de um ano. Por um período, esta população chega próximo à zero e nos pontos de maior incidência atingem em torno de 100 indivíduos (Figura 9a). Considerando-se a temperatura de 22 ± 3 °C, observa-se que a população alcança cerca de 480 indivíduos no máximo e 50 indivíduos no mínimo, além de que a largura do pico (tempo de permanência do adulto no ambiente) é ligeiramente maior que na temperatura de 18 °C (Figura 9b). A variação dada pela temperatura de 25 ± 3 °C favoreceu a espécie de modo que o número de indivíduos variou entre 100 e 525, aproximadamente. Observa-se, também, a presença do inseto durante todo o ano (Figura 9c).

A simulação para a temperatura de 28 ± 3 °C revela um pico bem definido na porção mediana dentro do limite de um ano e variação entre 0 a 370 indivíduos. A redução da população a quase zero provavelmente se deve à temperatura extrema (Figura 9d). A temperatura de 32 ± 3 °C foi prejudicial à dinâmica de *D. saccharalis*. Foi possível observar a ausência de indivíduos em grande parte do ano e os picos gerados obtiveram um número inferior a 7,5 indivíduos (Figura 9e).

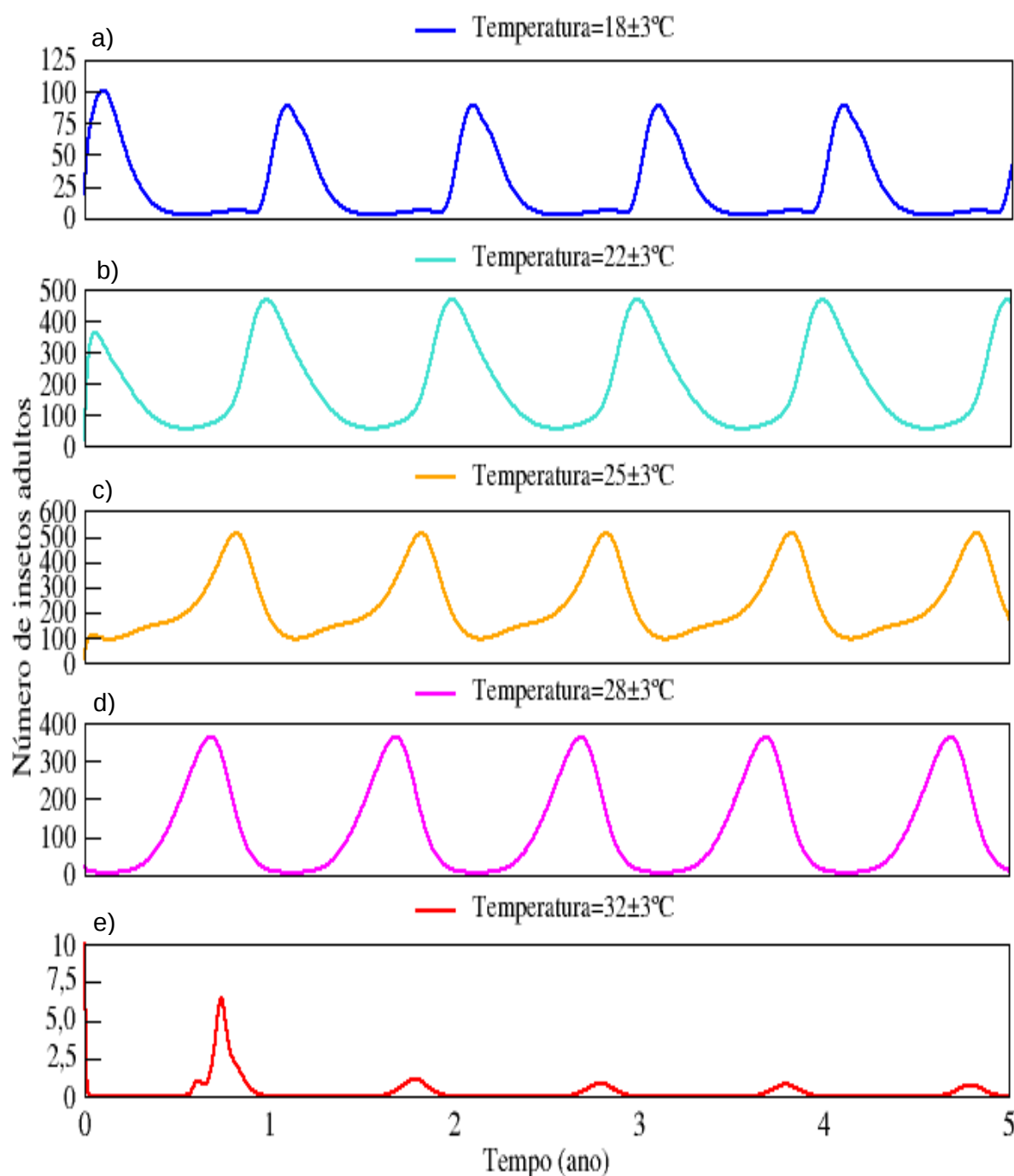


Figura 9. Número de insetos adultos de *Diatraea saccharalis* nas temperaturas de 18 °C, 22 °C, 25 °C, 28 °C e 32 °C ($\pm 3^\circ\text{C}$) ao longo de cinco anos de simulação. O início da simulação na abcissa corresponde à temperatura máxima considerando a temperatura média estudada somada à variação de 3 °C, o ponto médio dentro do intervalo de um ano corresponde a temperatura média e o período final dentro do intervalo de um ano representa a temperatura média estudada subtraída a variação de 3 °C.

Observa-se a cada ano (dentro do intervalo de cinco anos) para a simulação de variação de temperatura, períodos de temperatura mais alta e períodos de temperatura mais baixa (curva cossenoide) (Figura 10a). Na Figura 10b é mostrada a dinâmica populacional obtida a diferentes temperaturas que são: 25 ± 3 °C, 25 ± 5 °C e 25 ± 7 °C. Fica evidente a variação populacional ao longo do ano e permanência do inseto praticamente em todo o período do ano. Esta simulação corrobora a realizada anteriormente (Figura 9) em que a temperatura de 25 ± 3 °C (variação entre 22 °C e 28 °C) foi a mais favorável para o desenvolvimento e sobrevivência de *D. saccharalis*.

As simulações com a temperatura de 25 °C e variações de ± 5 °C e ± 7 °C, embora tenham permitido verificar um número elevado de insetos, por outro lado mostraram que a largura do pico é menor. A redução no número de insetos também é mais acentuada, como notado pelo exemplo demonstrado pela temperatura de 25 ± 7 °C com população muito próxima de zero (Figura 10b).

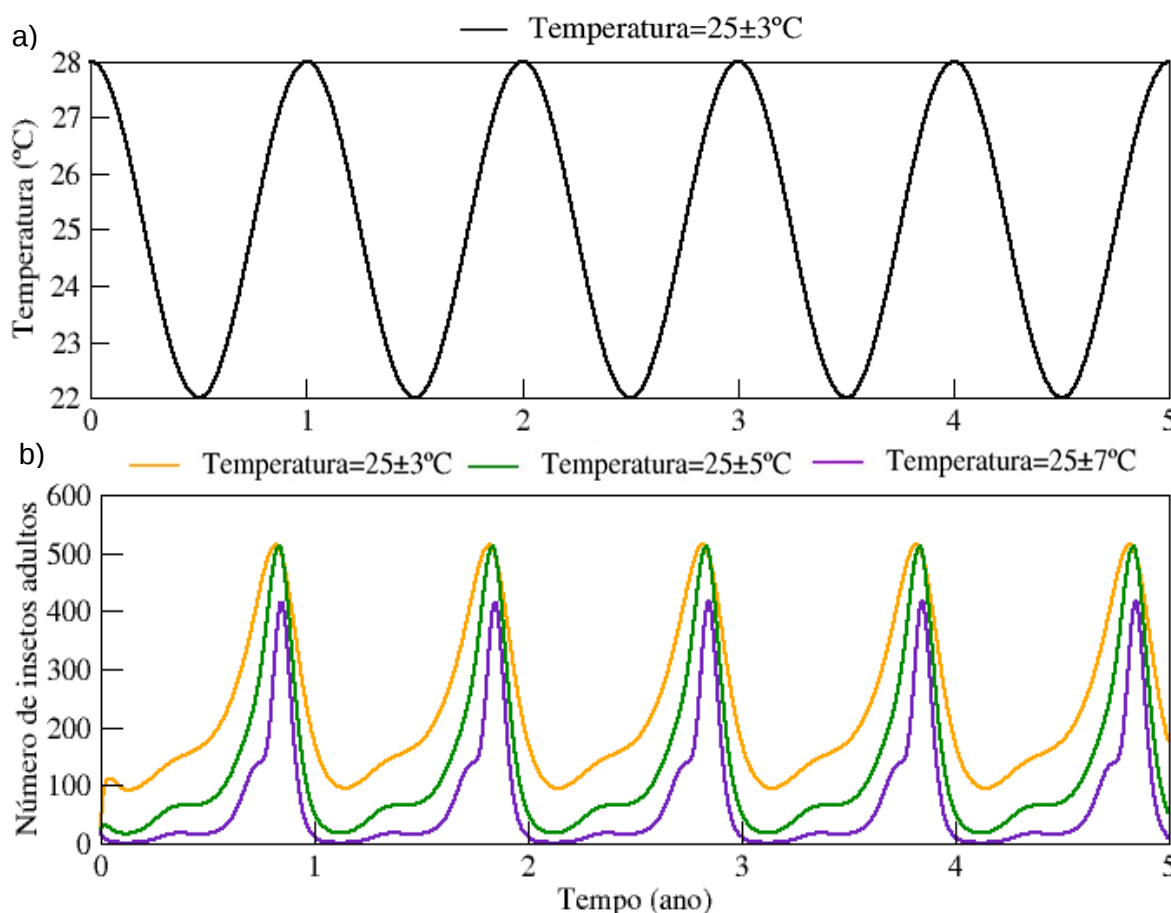


Figura 10. Número de insetos adultos nas temperaturas de 25 ± 3 °C, 25 ± 5 °C e 25 ± 7 °C.

3.2.2. Simulação teórica e validação de dados de campo

Através dos dados reais de temperatura em campo (vide item 3.1), foi possível simular a interferência da temperatura na dinâmica de *D. saccharalis* e comparar aos dados reais de dinâmica obtidos. Com isso, simulou-se a dinâmica populacional dada a temperatura em campo (Figura 11a).

Após um transiente a diminuição da temperatura acarretou na redução da população. O aumento da temperatura resultou no aumento da população. Portanto, houve correlação positiva com retardo. A curva que representa a dinâmica em campo (Figura 11b), a qual apresentou a incidência de quatro picos foi condizente com as previsões feitas em campo (Figura 2a).

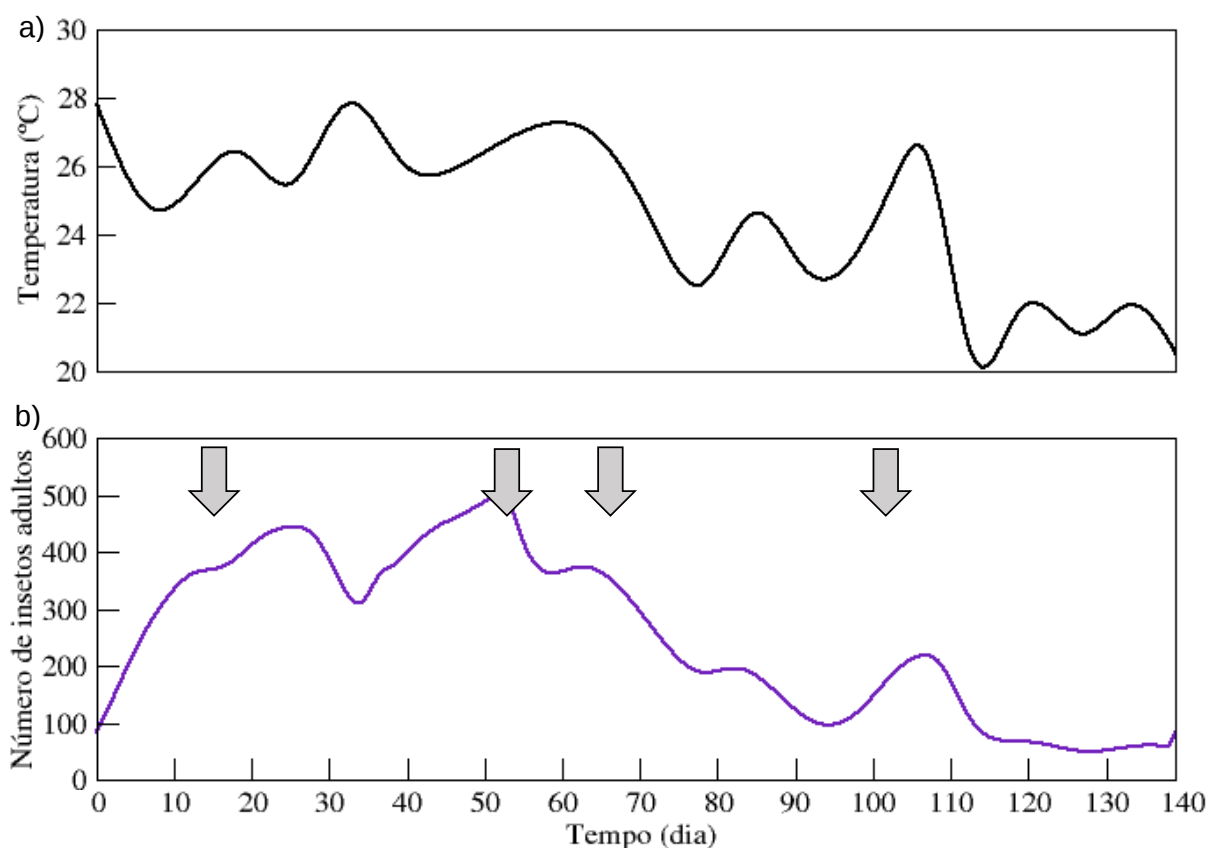


Figura 11. Simulação por equações diferenciais com retardo: a) Projeção dos dados reais de temperatura em Quirinópolis-GO e; b) Simulação de previsão de picos de insetos adultos em campo. As setas indicam as previsões de campo realizadas pelos modelos Graus-dia e Equações de diferenças.

5. DISCUSSÃO

Por meio da análise qualitativa entre os tratamentos observou-se diferenças na infestação de larvas e adultos, sugerindo fortemente acerto nas previsões de picos pelo modelo Graus-dia. Muitos trabalhos mostraram ao longo do tempo a importância e eficácia deste tipo de modelo em realizar previsões (JALLOW; MATSUMURA, 2001; MAIORANO, 2011) e, aqui neste trabalho, constatou-se novamente essa eficiência.

Já o modelo equações de diferenças é um recurso quantitativo que reforçou a existência de picos de adultos. Na primeira quantificação realizada, este modelo subestimou os valores (-44 mariposas) do pico populacional. Trata-se de um modelo discreto (não contínuo) em que os parâmetros são constantes (determinístico) (FREIRE *et al.*, 2005). Assim, possivelmente, este valor discrepante da primeira em relação às demais previsões ocorreu devido a necessidade de inclusão de um número maior de coletas anteriores, já que este modelo não altera sua dinâmica de maneira autônoma. Posteriormente, a previsão em número de mariposas ficou dentro de um intervalo bastante significativo, ou seja, o número de insetos previstos ficou muito próximo do número coletado em campo.

O tratamento no qual houve aplicação de *B. thuringiensis* apresentou o melhor resultado no controle de *D. saccharalis* (Intensidade de infestação de 0,75%). O Bt isolado é comercializado há muitos anos para controlar lepidópteros, dentre eles *D. saccharalis* (AGROFIT, 2019) e se tornou o principal bioinseticida comercializado para as pragas agrícolas (CRICKMORE, 2006). Esta bactéria possui uma inclusão proteica (denominada cristal) que ao ser ingerido pelos insetos, se dissolve no intestino médio, liberando as protoxinas. Essas protoxinas são ativadas pelas proteases presentes no trato digestivo, o que causa o efeito tóxico e a morte do inseto (BRAVO *et al.*, 2007; GULLAN; CRANSTON, 2012).

Embora o nível de infestação do tratamento em que foi feita a aplicação de Bt conciliada à liberação de *T. galloi* tenha sido ligeiramente maior que o do tratamento em que houve uso exclusivo de Bt, os dois atuando conjuntamente, também, realizaram controle e mantiveram os níveis de infestação baixos (1,24%). Apesar do ligeiro aumento e não da diminuição da infestação neste tratamento em que dois agentes estavam conciliados, alguns trabalhos tem sido realizados a fim de verificar a

compatibilidade de inimigos naturais com bioinseticidas a base de Bt (PINTO *et al.*, 2019). Dentre eles, Amichot *et al.* (2016) verificaram que *B. thuringiensis* var. *kurstaki* pode ser utilizado concomitantemente com parasitoides do gênero *Trichogramma*.

Estes resultados reforçam a ideia de que o melhor momento para controle e diminuição de danos a planta de cana-de-açúcar é na fase inicial de desenvolvimento desta espécie-praga, antes que ela entre e se alimente do colmo.

Ainda, de modo geral, foi possível observar que houve aumento da infestação da praga quando não houve adoção de medidas de controle, conforme previsto e estabelecido. Por outro lado, quando as medidas foram tomadas nos momentos previstos, tais surtos não foram evidenciados. Isto reforça a eficiência da estratégia de uso de adultos capturados em armadilhas associada aos modelos preditivos para tomada de decisão de controle. O expressivo aumento da infestação no tratamento com *T. galloi* ocorreu após a perda desse momento de liberação, sendo feito posteriormente e em uma única liberação. Estudos apontam a elevação do parasitismo por *T. galloi* em ovos de *D. saccharalis* após três liberações consecutivas. A recomendação atual é de liberação por três semanas consecutivas (BOTELHO *et al.*, 1995; BROGLIO-MICHELETTI, 2007) para assegurar maior intervalo de eficácia do parasitoide.

Já o tratamento em que se fez a liberação de *C. flavipes*, como esperado, teve infestação por larvas próxima à testemunha, pois, o dano continua sendo registrado mesmo com alto nível de parasitismo. Percebe-se, no entanto, sua eficácia ao avaliar o número de adultos que foi um número inferior à metade daquele observado na testemunha.

Por meio de todo o acompanhamento em laboratório das fases de ovo, larva, pupa e adulto foi possível estimar a variação no tempo de desenvolvimento do ciclo total de *D. saccharalis* em função da temperatura (capítulo 2; Tabela 2). A temperatura de 18 °C foi a que apresentou maior sobreposição das fases para larva, pupa e adulto. Este fato é particularmente importante pois em um primeiro momento pode-se levar em consideração apenas que em temperaturas mais baixas, o desenvolvimento lento possibilita um período mais prolongado para utilização de táticas de controle. No entanto, nesta temperatura e com a ocorrência de sobreposição das fases, pode

ocorrer mais de uma fase e isto ter de resultar na necessidade de se adicionar outros métodos de controle.

Assim, com a finalidade de tornar a previsão pelo modelo Graus-dia mais acurado, fez-se um pequeno aprimoramento, propondo um intervalo de controle. Dependendo do intervalo dado em graus-dia, o intervalo de controle corresponderá em dias em relação à previsão pontual que se costuma ser feito. Um possível fator genético, não testado ou comprovado aqui, pode ser alvo de estudos futuros a fim de explicar a possível variabilidade genética desta espécie, que a faz se desenvolver de forma tão dessincronizada pois, por se tratarem de organismos de mesma data de postura e eclosão e mantidas sob as mesmas condições de temperatura e umidade relativa, em determinados momentos foi possível observar todas as fases (larva, pupa e adulto) presentes. Trabalhos deste tipo que incluem variação genética em função da temperatura e termorresistência são encontrados apenas para organismos modelos como *Drosophila* Fallen, 1823 (Diptera: Drosophilidae) (HOFFMANN *et al.*, 2003). Conhecer a variabilidade genética e intervalos de tempo em que se é possível encontrar as diferentes fases, auxilia na interpretação das flutuações populacionais e consequentemente nas previsões de ocorrência deste inseto.

Foi proposto neste trabalho uma simulação teórica a fim de reforçar e validar as previsões feitas. Estas simulações permitiram verificar a influência da temperatura na dinâmica populacional da espécie. Inicialmente, observou-se que em temperaturas constantes, a população é constante no tempo e não se distingue as várias gerações que ocorrem no ano. E foi possível, também, reconhecer a proporção de insetos imaturos que atingem a fase adulta, sendo que os imaturos apresentam maior tolerância às temperaturas mais baixas em comparação aos adultos, isto reflete uma maior adaptação à variação térmica. Já em temperaturas mais altas, os dois apresentam tolerância semelhante.

A variação de temperatura é importante uma vez que simula o que ocorre em ambientes naturais. Assim, quando a temperatura variou, observou-se picos os quais estão relacionados a valores de temperaturas ótimas para as fases imaturas e adultas, que levam ao aumento considerável no número de insetos bem como a valores muito baixos, quando os valores de temperaturas são extremos.

Ao utilizarmos os dados reais de temperatura, o número de picos simulados coincidiu com as quatro previsões feitas em campo para o mesmo conjunto de dados de temperatura, validando assim o modelo matemático proposto. Jonhson *et al.* (2016) validaram dados de campo por meio deste mesmo modelo matemático para a espécie de hemíptero *Largus californicus* (Van Duzee, 1923) (Hemiptera: Largidae). Esses autores verificaram que para um conjunto de fatores (temperatura, recursos alimentares e competição intraespecífica), houve atraso induzido pelo desenvolvimento, o qual interferiu na flutuação populacional.

Ressalta-se que o modelo matemático de equações diferenciais com retardo foi parametrizado com os dados coletados de exigências térmicas em laboratório. Este tipo de ferramenta tem-se destacado nas relações ecológicas (COUTINHO, 2010) e foi eficaz auxiliando na verificação da dinâmica em campo e validação das previsões pelos modelos matemáticos.

6. REFERÊNCIAS

AGROFIT - SISTEMA DE AGROTÓXICOS FITOSSANITÁRIOS. 2019. **Coordenação geral de agrotóxicos e afins**. Brasília, 2019. Disponível em: http://extranet.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 25 out. 2019.

AMARASEKARE, P.; COUTINHO, R. M. Effects of Temperature on Intraspecific Competition in Ectotherms. **The American Naturalist**, Chicago, v. 184, n. 3, p. 50-65, 2014.

AMICHOT, M.; CURTY, C.; BENGUETTAT-MAGLIANO, O.; GALLET, A.; WAJNBERG, E. Side effects of *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* on the hymenopterous parasitic wasp *Trichogramma chilonis*. **Environmental Science and Pollution Research**, Germany, v. 23, n. 4, p. 3097–3103, 2016.

BOTELHO, P. S. M.; PARRA, J. R. P.; MAGRINI, E. A.; HADDAD, M. L.; RESENDE, L. C. L. Efeito do número de liberações de *Trichogramma galloi* (Zucchi, 1988) no parasitismo de ovos de *Diatraea saccharalis* (Fabr., 1794). **Scentia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n. 1, p. 65-69, 1995.

BRAVO, A.; GILL, S. S.; SOBERÓN, M. Mode of action of *Bacillus thuringiensis* Cry and Cyt toxins and their potential for insect control. **Toxicon**, United Kingdom, v. 49, p. 423–435, 2007.

BROGLIO-MICHELETTI, S. M. F.; PEREIRA-BARROS, J. L.; SANTOS, A. J. N.; CARVALHO, L. W. T.; CARVALHO, L. H. T.; OLIVEIRA, C. J. T. Efeito do número de adultos de *Trichogramma galloi* Zucchi, 1988 (Hymenoptera: Trichogrammatidae) liberados em semanas sucessivas, para o controle de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 1, p. 53-58, 2007.

BRUNINI, O.; LISBÃO, R. S.; BERNARDI, J. B.; FORNASIER, J. B.; PEDRO JUNIOR, M. J. Temperatura-base para alface cultivar “White-Boston”, em um Sistema de unidades térmicas. **Bragantia**, Campinas, v. 35, n. 19, p. 213-219, 1976.

CARBOGNIN, E. R. **Modelos de previsão de ocorrência de adultos de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**. 2016. 53 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia Agrícola) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

CARBOGNIN, E. R.; ÁLVARO, J. C.; PINTO, J. R. L.; CONCEIÇÃO, L. S.; FERNANDES, O. A. Ecologia aplicada à entomologia agrícola. *In*: CASTILHO, R. de C.; TRUZI, C. C.; PINTO, C. P. G. **Tópicos em entomologia agrícola XI**. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda, 2018. cap. 3, p. 52-69.

CORDEIRO, F. S.; EIRAS, A. E.; SILVA, F. R.; ACEBAL, J. L. Modelo entomológico para a Infestação por *Aedes aegypti* segundo variáveis meteorológicas: caso de Caratinga (Minas Gerais - Brasil). **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, São Carlos, v. 6, n.2, p. 1-7, 2018.

CORTES, A. M. P. **Feromônio sexual, ADN mitocondrial e expressão das proteínas ligantes do feromônio de *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae) e avanços na identificação do feromônio sexual de *Diatraea indiginella* Dyar & Heinrich, (Lepidoptera: Crambidae)**. 2010. 111 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba-PR.

COUTINHO, R. M. **Equações diferenciais com retardo em biologia de populações**. 2010. 60 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física Teórica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, São Paulo-SP.

CRICKMORE, N. Beyond the spore – past and future developments of *Bacillus thuringiensis* as a biopesticide. **Journal of Applied Microbiology**, United Kingdom, v. 101, n. 3, p. 616–619, 2006.

DENNIS, B.; KEMP, W. P.; TAPER, M. L. Joint Density Dependence. **Ecology**, Washington, v. 79, n. 2, p. 426–441, 1998.

DENNIS, B.; TAPER, M. L. Density dependence in time series observations of natural populations: estimation and testing. **Ecological Monographs**, Washington, v. 64, n. 2, p. 205-224, 1994.

DINARDO-MIRANDA, L. L. Pragas. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A de. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. cap.17, 882 p.

DONALÍSIO, M. R.; GLASSER, C. M. Vigilância Entomológica e Controle de Vetores do Dengue. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 259-279, 2002.

FREIRE, R. M.; PREGNOLATTO, S.; WALDER, J. M. M.; VON ZUBEN, C. J. Modelagem matemática aplicada ao controle biológico de *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) por *Diachasmimorpha longicaudata* Ashmed (Hymenoptera: Braconidae) em citrus. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 34, n. 2, p. 281-289, 2005.

GOMES, L. F.; THOMÉ, R. C. A. Modelagem matemática do *Aedes aegypti* com a utilização de mecanismos de combate à dengue. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**, São Carlos, v. 3, n. 1, p.1-3, 2015.

GULLAN, P. J.; CRANSTON, P. S. **Os insetos: um resumo de entomologia**. São Paulo: Roca, 2012. 480 p.

GUTIERREZ, A. P. **Applied population ecology: a supply-demand approach**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 320 p.

HIGLEY, L. G.; PEDIGO, L. P. **Economic Thresholds for Integrated Pest Management**. University of Nebraska Press: Lincoln, 1996. 327 p.

HOFFMANN, A. A.; SORENSEN, J. G.; LOESCHCKE, V. Adaptation of *Drosophila* to temperature extremes: bringing together quantitative and molecular approaches. **Journal of Thermal Biology**, United Kingdom, v. 28, n. 3, p. 175–216, 2003.

IANNELLI, M.; PUGLIESE, A. **An introduction to mathematical population dynamics: Along the trail of Volterra and Lotka**. New York: Springer, 2014. 346 p.

JALLOW, M. F. A.; MATSUMURA, M. Influence of temperature on the rate of development of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). **Applied Entomology and Zoology**, Japan, v. 36, n. 4, p. 427–430, 2001.

JOHNSON, C. A.; COUTINHO, R. M.; BERLIN, E.; DOLPHIN, K. E.; HEYER, J.; KIM, B.; LEUNG, A.; SABELLON, J. L.; AMARASEKARE, P. Effects of temperature and resource variation on insect population dynamics: the bordered plant bug as a case study. **Functional Ecology**, West Sussex, v. 30, p. 1122–1131, 2016.

LIMA, A. A.; COSTA, V. A.; PINTO, A. S.; ZÉRIO, N. G.; PARRA, J. R. P. Controle de qualidade de *Cotesia flavipes* Cameron (Hymenoptera: Braconidae) para criações massais em laboratório. **Simpósio de Controle Biológico – XII SICONBIOL**, 2011.

MAIORANO, A. A physiologically based approach for degree-day calculation in pest phenology models: the case of the european corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) in northern Italy. **Internacional Journal of Biometeorology**, Germany, v. 56, p. 653–659, 2011.

MELO, A. B. P de.; PARRA, J. R. P. Exigências térmicas e estimativa do número de gerações anuais de broca da cana-de-açúcar em quatro localidades canavieiras de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 7, p. 691-696, 1988.

PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. Controle Biológico: uma visão inter e multidisciplinar. *In*: PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. (ed.). **Controle Biológico no Brasil: parasitóides e predadores**. São Paulo: Manole, 2002.cap. 8, p. 125-142.

PINTO, C. P. G.; AZEVEDO, E. B.; SANTOS, A. L. Z.; CARDOSO, C. P.; FERNANDES, F. O.; ROSSI, G. D.; POLANCZYK, R. A. Immune response and susceptibility to *Cotesia flavipes* parasitizing *Diatraea saccharalis* larvae exposed to and surviving an LC25 dosage of *Bacillus thuringiensis*. **Journal of Invertebrate Pathology**, United States, v.166, p. 1-6, 2019.

REIS-JÚNIOR, R.; PARRA, J. R. P.; BENTO, J. M. S. Desenvolvimento de um modelo para previsão de ocorrência do bicho-furão-dos-citros, *Ecdytolopha aurantiana* (Lima) (Lepidoptera: Tortricidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 34, n. 4, p. 627-637, 2005.

ROSSATO JÚNIOR, J. A. S., COSTA, G. H. G., MADALENO, L. L., MUTTON, M. J. R., HIGLEY, L. G., FERNANDES, O. A. Characterization and impact of the sugarcane borer on sugarcane yield and quality. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 643–648, 2013.

SAHINER, A.; YILMAZA, N.; DEMIROZERB, O. Mathematical modeling and an application of the filled function method in entomology. **International Journal of Pest Management**, United Kingdom, v. 60, n. 3, p. 232-237, 2014.

SANDOVAL, S. S.; SENÔ, K. C. A. Comportamento e controle da *Diatraea saccharalis* na cultura da cana-de-açúcar. **Nucleus**, Ituverava, v. 7, n. 1, p. 243-258, 2010.

SILVEIRA, P. A. **Explorando modelos matemáticos para o manejo integrado de pragas (MIP) incluindo otimização**. 2014. 127 f. Tese (Doutorado em matemática aplicada) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Porto Alegre-RS.

SMERAGE, G. H. Representation of development in insect population models. *In*: GOODENOUGH, J. L.; MCKINION, J. M. (ed.). **Basics of Insect Modeling**, 1992, cap. 8.

CAPÍTULO 4 – Considerações finais

O programa de controle biológico no Brasil para a cultura da cana-de-açúcar é um dos mais conhecidos e bem estabelecidos mundialmente. No entanto, para o sucesso de qualquer programa de controle biológico é preciso conhecer bem a dinâmica do inseto-alvo e determinar o momento exato para o controle. O principal método de controle da broca-da-cana baseado na liberação do parasitoide larval *C. Flavipes*. É um parasitoide eficaz; no entanto, parasita somente larvas dentro do colmo da planta. Com isso, parte da matéria-prima da planta já foi consumida pela larva.

Os modelos matemáticos são um recurso eficaz para previsão de todas as fases, ainda mais quando algumas fases da praga-alvo, como é a fase de ovo para a espécie *D. saccharalis*, não é observada facilmente em campo. Além da dificuldade em se amostrar ovos e larvas recém-eclodidas, inclui-se a dificuldade do próprio exercício de monitoramento em campo, em que muitos trabalhadores estão sujeitos à acidentes.

Para utilização desses modelos de previsão, a temperatura é um fator chave a ser considerado e responsável pelo desenvolvimento dos organismos ectotérmicos. Com isso, destaca-se a importância de dados de exigência térmica em laboratório realizados em temperaturas constantes. Muitos trabalhos em entomologia se concentram em determinar tais exigências em laboratório, já que o requerimento térmico é específico para cada espécie. Os modelos utilizados aqui, cada um com sua peculiaridade, foram capazes de demonstrar a biologia e dinâmica populacional de *D. saccharalis*. Os dois modelos, Graus-dia e Equações de diferenças, se complementam à medida que um faz a previsão do pico e o outro determina a quantidade de insetos. O limitante do primeiro modelo é a tentativa de um controle pontual. Embora este modelo considere a temperatura no desenvolvimento, ele não considera a interferência deste fator no desenvolvimento, o que faz com que os insetos dentro de uma mesma população e mesma idade apresentem níveis de desenvolvimento diferente. Dessa forma, fez-se uma proposta para que se considere um intervalo de controle, dentro do qual as fases podem estar presentes e precisam, muitas vezes, de vários métodos de controle agindo.

Outro fator limitante e que deve ser considerado em modelos matemáticos é a umidade relativa. Sabe-se que é igualmente importante, assim como a temperatura, no entanto, poucos trabalhos são realizados devido à dificuldade em controlar este fator. Assim, diante de dados de campo de regiões com precipitação semelhante, acredita-se que a flutuação populacional de *D. saccharalis* em campo está extremamente relacionada à junção deste fator com a temperatura, embora precisa ser melhor avaliada.

O modelo equações de diferenças, também, necessita da inserção semanal dos dados de coletas de adultos para que as previsões quantitativas sejam feitas. Já o modelo de equações diferenciais com retardo, por outro lado, é capaz de ajustar tais parâmetros térmicos com os dados reais de temperatura obtidos em campo, o que auxiliou na quantificação da flutuação populacional bem como na constatação das previsões feitas e controle nos diferentes tratamentos e trata de um modelo mais independente que os demais sem a necessidade de inserção semanal.

Muitos trabalhos foram realizados ao longo das últimas décadas, a fim de conhecer e entender melhor a espécie *D. saccharalis*, mas poucos foram realizados a fim de prever sua ocorrência. Há muito ainda que ser feito, como por exemplo, incluir a umidade relativa nos modelos fenológicos pois, sabe-se que este fator abiótico é igualmente importante para os insetos e interfere consideravelmente na oviposição e viabilidade dos ovos. Diante de dados de campo de regiões com precipitação semelhante, acredita-se que a flutuação populacional de *D. saccharalis* em campo está extremamente relacionada à junção deste fator com a temperatura.

Desta forma, considera-se que a partir do conhecimento elucidado de sua dinâmica populacional bem como da acurácia dos modelos matemáticos utilizados, é possível transformar as informações da presente pesquisa em atuação nas regiões produtoras de cana-de-açúcar. Portanto, seja pelo conhecimento e melhor percepção de sua dinâmica populacional em função da temperatura ou através da utilização dos modelos matemáticos por meio de aplicativos, o momento certo de tomada de decisão e controle deste importante inseto pode ser aprimorado e deverá auxiliar na redução de perdas no setor sucro-alcooleiro.