



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA/FITOTECNIA

RUAN CARLOS DE MESQUITA OLIVEIRA

MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS PARA *Helicoverpa punctigera*
(WALLENGREN, 1860) (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) NO MUNDO: POTENCIAL
INVASÃO E RISCOS DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

FORTALEZA

2021

RUAN CARLOS DE MESQUITA OLIVEIRA

MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS PARA *Helicoverpa punctigera*
(WALLENGREN, 1860) (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) NO MUNDO: POTENCIAL
INVASÃO E RISCOS DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Fitotecnia) da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de *Doctor Scientiae* em Agronomia (Fitotecnia). Área de concentração: Entomologia Agrícola.

Orientador: Prof. Patrik Luiz Pastori, *D. Sc.*
Coorientador: Prof. Myron Zalucki, *PhD.*

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O51m Oliveira, Ruan Carlos de Mesquita.
Modelagem de nicho ecológico para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren, 1860) (Lepidoptera: Noctuidae) no mundo: potencial invasão e riscos diante das mudanças climáticas / Ruan Carlos de Mesquita Oliveira. – 2021.
108 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Fitotecnia), Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Patrik Luiz Pastori.
Coorientação: Prof. Dr. Myron Zalucki.
1. Pragas exóticas. 2. Modelos de previsão. 3. Mudanças climáticas. 4. Climex. 5. Dymex. I. Título.
CDD 630
-

RUAN CARLOS DE MESQUITA OLIVEIRA

MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS PARA *Helicoverpa punctigera*
(WALLENGREN, 1860) (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) NO MUNDO: POTENCIAL
INVASÃO E RISCOS DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Fitotecnia) da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de *Doctor Scientiae* em Agronomia (Fitotecnia). Área de concentração: Entomologia Agrícola.

Aprovada em: 26/07/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Patrik Luiz Pastori, *D. Sc.* (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Marcos Gino Fernandes, *D. Sc.*
Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)

Marianne Gonçalves Barbosa, *D. Sc.*
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Maurício Sekiguchi de Godoy, *D. Sc.*
Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA)

Prof. Ricardo Siqueira da Silva, *D. Sc.*
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

A Deus, pelo dom, graça da vida, saúde e por ter me dado forças para prosseguir e concluir mais uma etapa desta vida.

Aos meus pais, Lourival Francisco Oliveira e Antônia Veralúcia Mesquita, aos meus irmãos, Raul e Rosarlane, e minha querida esposa Andressa pelo amor incondicional, por toda dedicação, compreensão, apoio, incentivo, conselhos e ensinamentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela graça da vida, por ter me dado saúde, força para superar as dificuldades, e por tudo mais que precisei para chegar até aqui. Obrigado Pai.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia - Departamento de Fitotecnia pela oportunidade concedida para realização do Doutorado em Agronomia/Fitotecnia com ênfase em Entomologia Agrícola.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88881.189410/2018-01, pela concessão da bolsa de doutorado sanduiche (PDSE) para a realização de parte da minha pesquisa na Austrália.

A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador prof. Patrik Luiz Pastori, pela oportunidade, orientação, apoio e compreensão nesse momento tão turbulento que vivemos de pandemia. Gostaria de mencionar o apoio, amizade, pelo “brilho nos olhos” e pelos valiosos ensinamentos e conselhos que foram essenciais para meu amadurecimento profissional e pessoal. Muito obrigado por tudo!

Ao meu co-orientador prof. Myron Zalucki pela tão calorosa recepção na University of Queensland. Você me deu total apoio, amparo e suporte durante o processo de execução da pesquisa no laboratório de ecologia. Aos amigos do laboratório Linda Perkins, Mizuki Uemera e Kayvan Etabari, pelos dias afincos de pesquisa e conversas. Ao Dr. Darren Kriticos do CSIRO pela recepção e atenção durante ao período de treinamento realizado em Canberra.

Aos membros do IPPRG (International Pest Risk Research Group) pelo incentivo na condução do trabalho e apoio na condução da pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fitotecnia da UFC pelos ensinamentos transmitidos, em especial ao prof. José Wagner Melo e ao Dr. Marcos Botton pelo apoio dentro e fora da sala de aula.

Aos membros do Laboratório de Entomologia Aplicada (LEA) que apesar do período em que estive fora do país e pela pandemia sempre se mostraram muito solícitos a ajudar.

A minha amiga e sócia Cristiane Coutinho por encarar o desafio de empreender em um momento tão difícil que o país vive. Muito obrigado por construir comigo a IN Soluções Biológicas.

A equipe da IN Soluções Biológicas, Abelardo, Lorena, Israel, Victor e Gabriel por estar diariamente nos ajudando a fortalecer esse sonho e permitir alçar voos mais altos.

Aos membros do PADETEC na UFC pelo convívio diário e momentos de descontração.

Aos meus pais, Vera e Lourival, por sempre terem me encorajado e acreditar nos meus sonhos e crer que por meio da educação podemos transformar o mundo, amo vocês.

Aos meus irmãos, Rosariane e Raul, por estarem sempre ao meu lado me dando forças.

Ao meu querido sobrinho e afilhado, Gabriel, pelo carinho e amor que demonstra por mim, espero ser um tio exemplar e presente na sua vida.

À minha família, nas pessoas dos meus avôs, tios e primos pela fé depositada.

À minha querida e amada esposa Andressa, pelo incondicional apoio, carinho, compreensão, solidariedade e amor nos mais felizes e difíceis momentos.

Aos meus sogros Andrea e Antônio por sempre me tratar tão bem e zelar pelo nosso bem-estar.

Aos meus queridos amigos de infância, Thomas, Ronkally, Carliane, Mikaelly, Marcelo, Leonardo Lopes e Leonardo Cardoso que sempre estiveram me apoiando ao longo dessa jornada.

“Reze como se tudo dependesse de Deus e
trabalhe como se tudo dependesse de você.”
(Cardeal Shellman)

RESUMO

Helicoverpa punctigera (Wallengren, 1860) (Lepidoptera: Noctuidae) é uma importante praga polífaga que causa sérios danos em uma ampla variedade de plantações, especialmente na Austrália onde é possível identificar a ocorrência em todo país, seja em áreas persistentes no litoral ou efêmeras na parte central. Dada à riqueza de dados espaciais e climáticos na Austrália é possível desenvolver modelos de distribuição e abundância bastante robustos. Neste sentido, para compreender e identificar regiões adequadas ao estabelecimento de *H. punctigera*, foi desenvolvido uma análise de modelagem CLIMEX. Esta metodologia permite prever a distribuição geográfica potencial de espécies de acordo com sua preferência climática e, mostrar a resposta destas ao clima ao longo do tempo, usando dados climáticos mensais ou semanais. Essas previsões foram então correlacionadas com os dados subsequentes de abundância de *H. punctigera* para oito regiões na Austrália e posteriormente extrapoladas para outros países levando-se em consideração o cenário climático atual e futuro. Sob as condições climáticas atuais e futuras, o modelo indica que *H. punctigera* pode se estabelecer em todos os trópicos e subtropicais. A comparação das distribuições potenciais em cada cenário climático revelou que, no futuro, sua distribuição potencial provavelmente mudará para os polos e para altitudes mais elevadas, em áreas que atualmente são muito frias, conforme observado no Sul do Brasil, Europa, América do Norte, Sudeste Asiático e, Ilhas do Pacífico Sul, incluindo a Nova Zelândia. A distribuição potencial projetada pode informar as estratégias de biossegurança pré e pós-fronteira para essa praga em cada país. Para compreender como a variação do ambiente nos cenários de mudanças climáticas vai influenciar no desenvolvimento de *H. punctigera* foi realizada uma análise DYMEX. Nesta análise, observou-se variação na abundância de indivíduos em comparação ao cenário atual, em que de maneira geral, a população de adultos vai se manter baixa ao longo dos meses enquanto que a oviposição apresentará três picos populacionais (janeiro, março e junho). Enquanto que o tempo médio de desenvolvimento dos estágios de vida de *H. punctigera* reduzirá entre os períodos simulados de 2010 e 2100 devido ao aumento da temperatura média mundial.

Palavras-chave: pragas quarentenárias; modelos de previsão; mudanças climáticas; CLIMEX; DYMEX.

ABSTRACT

Helicoverpa punctigera (Wallengren, 1860) (Lepidoptera: Noctuidae) is an important polyphagous pest that causes serious damage in a wide variety of plantations, especially in Australia where it is possible to identify the occurrence throughout the country, whether in persistent areas on the coast or ephemeral in the the center, the middle part, the nucleus. Given the wealth of spatial and climatic data in Australia, it is possible to develop very robust distribution and abundance models. In this sense, to understand and identify suitable regions for the establishment of *H. punctigera*, a CLIMEX modeling analysis was developed. This methodology allows predicting the potential geographic distribution of a species according to its climate preference and showing its response to the climate over time using monthly or weekly climatic data from the location. These predictions were then correlated with subsequent *H. punctigera* abundance data for eight regions in Australia and later extrapolated to other countries in the world taking into account the current and future climate scenario. Under current and future climatic conditions, the model indicates that *H. punctigera* can establish itself in all tropics and subtropics. Comparison of potential distributions in each climate scenario revealed that, in the future, their potential distribution will likely shift towards the poles and to higher altitudes, in areas that are currently very cold, as observed in Southern Brazil, Europe, North America, Southeast Asia, and South Pacific Islands, including New Zealand. The projected potential distribution can inform pre- and post-border biosecurity strategies for managing this pest in each country. To understand how environmental variation in climate change scenarios will influence the development of *H. punctigera*, a DYMEX analysis was performed. In this analysis, there was a variation in the abundance of individuals compared to the current scenario, in which, in general, the adult population will remain low over the months, while oviposition will present three population peaks (January, March and June). While the average development time of the life stages of *H. punctigera* reduced between the simulated periods of 2010 and 2100 due to the increase in average temperature.

Keywords: quarantine pests; forecasting models; climate change; CLIMEX; DYMEX.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	MODELAGEM DO NICHU CLIMÁTICO DE <i>Helicoverpa punctigera</i> (WALLENGREN) (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) NA AUSTRÁLIA.....	17
2.1	Introdução.....	19
2.2	Material e Métodos.....	21
2.3	Resultados.....	27
2.4	Discussão.....	34
2.5	Conclusões.....	37
3	DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DISTRIBUIÇÃO ATUAL E FUTURA DE <i>Helicoverpa punctigera</i> (WALLENGREN) (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE).....	42
3.1	Introdução.....	44
3.2	Material e Métodos.....	46
3.3	Resultados.....	52
3.4	Discussão.....	57
3.5	Conclusões.....	60
4	MODELAGEM DA DINÂMICA POPULACIONAL DE <i>Helicoverpa punctigera</i> (WALLENGREN) (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) BASEADA NOS EFEITOS DO CLIMA USANDO DYMEX.....	70
4.1	Introdução.....	72
4.2	Material e Métodos.....	74
4.3	Resultados.....	78
4.4	Discussão.....	84
4.5	Conclusões.....	90
5	CONCLUSÕES FINAIS.....	96
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

Os modelos de produção agrícola são considerados sistemas complexos com vários processos de interação que consistem em subsistemas, que englobam os vegetais, microrganismos e artrópodes. Cada organismo, com suas próprias características e comportamento, contribui para o arranjo geral e funcionamento do sistema completo (FATH, 2014; WALTERS *et al.*, 2016; WALLACH *et al.*, 2018). Em sistemas de produção agrícola, muitos componentes interagem simultaneamente de forma não linear (WALTERS *et al.*, 2016; WALLACH *et al.*, 2018). Por fim essas interações, particularmente com artrópodes e microrganismos, podem desfavorecer o modelo de produção agrícola, principalmente quando um organismo externo a este ambiente é inserido, como é o caso das pragas consideradas exóticas (TONNANG *et al.*, 2017).

As invasões por pragas exóticas surgiram como sinal proeminente da mudança global, com impactos substanciais nos habitat's naturais e influenciados pelo homem, sendo consideradas como um dos maiores desafios ambientais enfrentados no século XXI (MOONEY, 1999; LENZNER *et al.*, 2019). Assim, identificar onde tais espécies podem potencialmente invadir é uma questão chave e crítica para o manejo eficaz dos riscos de biossegurança e populações de pragas em potencial (BAKER *et al.*, 2000; KRITICOS *et al.*, 2013; SUTHERST, 2014).

Discussões recentes sobre gerenciamento de risco de biossegurança têm focado a atenção nas questões de gerenciamento e identificação das ameaças antes que estas aconteçam. Dentre estas discussões, destaca-se o uso de técnicas que utilizam modelos com análises indutivas e dedutivas. A teoria dos modelos como o CLIMEX (CLIMatic indEX) é baseada na resposta estimada da praga à temperatura e umidade em um período de tempo. Essa abordagem foi desenvolvida partindo-se do pressuposto que, se for conhecido onde um organismo vive, as condições climáticas por ele toleradas podem ser inferidas para prever outras regiões do globo terrestre onde a espécie pode sobreviver e se reproduzir (SUTHERST; MAYWALD, 1985; SUTHERST, 2003). A teoria adotada no CLIMEX assume que um organismo, em um determinado local, experimenta duas estações durante o ano sendo uma onde há crescimento e outra com declínio populacional (SUTHERST; MAYWALD, 1985; SUTHERST, 2003).

No geral, o modelo CLIMEX propõe que a adequação do habitat em um local para um determinado organismo é fornecida por um Índice Ecoclimático (EI), que combina o potencial anual de crescimento populacional (GI), os estresses anuais que limitam a sobrevivência durante a estação desfavorável (SI) e as interações entre estresses (SX)

(SUTHERST; MAYWALD, 1985). Diversos países já utilizam essas análises de risco de introdução de pragas exóticas com sucesso, podendo-se destacar a Austrália, os EUA, a Coreia do Sul e a China (ZALUCKI; FURLONG, 2005; ZHENG *et al.*, 2012; KRITICOS *et al.*, 2015; BYEON *et al.*, 2018).

As previsões de abundância de longo prazo são especialmente úteis para as espécies de pragas com enormes potenciais uma vez que surtos de populações cada vez mais resistentes a inseticidas, podem tornar o manejo de pragas particularmente difícil (FORRESTER *et al.*, 1993; BIRD; DOWNES, 2014).

Zalucki & Fulong (2005) apontaram a possibilidade de disseminação de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) e de *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) para diversos países, principalmente nas Américas, África e Ásia. Nas safras 2011/2012 e 2012/2013, foram detectadas altas infestações de larvas (lagartas) de espécies de *Helicoverpa* em diferentes regiões do Brasil atacando lavouras e causando perdas econômicas significativas (TAY *et al.*, 2013). Inicialmente presumiu-se que o ataque seria de *Helicoverpa zea* (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae), que é frequentemente encontrada em plantações de milho e tomate no Brasil (DEGRANDE; OMOTO, 2013), porém, após identificação, verificou-se que se tratava de *H. armigera* (CZEPAK *et al.*, 2013).

No ano de 2015, no Estado do Ceará - Brasil, foi encontrado um inseto semelhante a *H. punctigera*, uma espécie polífaga e economicamente importante na Austrália, sendo considerada praga em uma ampla variedade, incluindo o conjunto das grandes culturas, hortícolas e flores (ZALUCKI *et al.*, 1986; CUNNINGHAM; ZALUCKI, 2014; EMBRAPA, 2015). Essa suspeita, no primeiro momento, foi embasada no fato dessa espécie ser amplamente migratória e ter sido interceptada pelo serviço de inspeção sanitária animal e vegetal (USDA APHIS) dos Estados Unidos em 1999 (KRITICOS *et al.*, 2015). Por fim, o espécime coletado não se tratava de *H. punctigera* (CZEPAK, 2019, informações pessoais).

Apesar de *H. punctigera* estar geograficamente restrita à Oceania, é necessário compreender os potenciais riscos de introdução e estabelecimento para outros países, seja no cenário atual (2020-2021) ou em um cenário futuro, devido ao aumento do comércio internacional ou do aquecimento global provocado pelas mudanças climáticas. Assim, o estudo foi realizado com os seguintes objetivos: 1) identificar áreas adequadas para o estabelecimento e propícias para o crescimento populacional de *H. punctigera* na Austrália; 2) Projetar a distribuição potencial global de abundância relativa e risco de estabelecimento de *H. punctigera*; 3) Avaliar a distribuição potencial de *H. punctigera* em cenários climáticos futuros e; 4) Integrar dados de mortalidade natural e efeito do clima no programa de

modelagem DYMEX para melhorar a compreensão da dinâmica populacional de *H. punctigera* e sua abundância relativa no atual cenário e em cenários futuros de mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- BAKER, R. H. A.; SANSFORD, C. E.; JARVIS, C. H.; CANNON, R. J. C.; MACLEOD, A.; WALTERS, K. F. A. The role of climatic mapping in predicting the potential geographical distribution of non-indigenous pests under current and future climates. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.82, p.57-71, 2000.
- BYEON, D. H.; JUNG, J. M.; LOHUMI, S.; CHO, B. K.; JUNG, S.; LEE, W. Predictive analysis of *Metcalfa pruinosa* (Hemiptera: Flatidae) distribution in South Korea using CLIMEX software. **Journal of Asia-Pacific Biodiversity**, v.10, p.379-384, 2017.
- CUNNINGHAM, J. P.; ZALUCKI, M. P. Understanding Heliothine (Lepidoptera: Heliothinae) pests: what is a host plant?. **Journal of Economic Entomology**, v.107, p.881-96, 2014.
- CZEPAK, C.; ALBERNAZ, K. C.; VIVAN, L. M.; GUIMARAES, H. O.; CARVALHAIS, T. First reported occurrence of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, p.110-113, 2013.
- DEGRANDE, E.; OMOTO, C. Estancar prejuízos. **Cultivar Grandes Culturas**, Abril, 32-35, 2013.
- DUKES, J. S.; MOONEY, H. A. Does global change increase the success of biological invaders? **Trends in Ecology & Evolution**, v.14, p.135-139, 1999.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Ameaças fitossanitárias para a cultura da soja na safra 2015/16. 2015.
- FATH, B. D. Sustainable systems promote wholeness-extending transformations: The contributions of systems thinking. **Ecological Modelling**, v.293, p.42-48, 2014.
- FORRESTER, N. W.; CAHILL, M.; BIRD, L. J.; LAYLAND, J. K. Management of pyrethroid and endosulphan resistance in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia. **Bulletin of Entomological Research**, v. 1, p. 132-145, 1993.
- KRITICOS, D. J.; LERICHE, A.; PALMER, D. J.; COOK, D. C.; BROCKERHOFF, E. G.; STEPHENS, A. E. A.; WATT, M. S. Linking climate suitability, spread rates and host-impact when estimating the potential costs of invasive pests. **PLoS One**, v.8, p.54861, 2013.
- KRITICOS, D. J.; OTA, N.; HUTCHISON, W. D.; BEDDOW, J.; WALSH, T.; WALSH, T.; TAY, W. T.; BORCHERT, D. M.; PAULA-MOREAS, S. V.; CZEPAK, C.; ZALUCKI, M. P. The potential distribution of invading *Helicoverpa armigera* in North America: Is it just a matter of time? **PLoS ONE**, v.10, p.1-24, 2015.
- LENZNER, B.; LECLÈRE, D.; FRANKLIN, O.; SEEBENS, H.; ROURA-PASCUAL, N.; OBERSTEINER, M.; DULLINGER, S.; ESSL, F. A framework for global twenty-first century scenarios and models of biological invasions. **BioScience**, v.69, p.697-710, 2019.

BIRD, L. J.; DOWNES, S. J. Toxicity and cross-resistance of insecticides to Cry2Ab-resistant and Cry2Ab-susceptible *Helicoverpa armigera* and *Helicoverpa punctigera* (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of Economic Entomology**, v.107, p.1923-1930, 2014.

SUTHERST, R. W. Pest species distribution modelling: Origins and lessons from history. **Biological Invasions**, v.16, p.239-256, 2014.

SUTHERST, R. W. Prediction of species geographical ranges. **Journal of Biogeography**, v.30, p.805-816, 2003.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F. A computerised system for matching climates in ecology. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v.13, p.281-299, 1985.

TAY, W. T.; SORIA, M. F.; WALSH, T.; THOMAZONI, D.; SILVIE, P.; BEHERE, G. T.; ANDERSON, C.; DOWNES, S. A brave new world for an old world pest: *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **PloS one**, v.8, e80134, 2013.

TONNANG, H. E. Z.; HERVÉC, B. D. B.; BIBER-FREUDENBERGERD, L.; SALIFU, D. Advances in crop insect modelling methods - Towards a whole system approach. **Ecological Modelling**, v.354, p. 88-103, 2017.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W.; BRUN, F. **Working with dynamic crop models: Methods, tools and examples for agriculture and environment**. 3rd edition. Academic Press, p. 483, 2018.

WALTERS, J. P.; ARCHER, D. W.; SASSENATH, G. F.; HENDRICKSON, J. R. Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. **Ecological Modelling**, v.333, p. 51-65, 2016.

ZALUCKI, M. P.; FURLONG, M. J. Forecasting *Helicoverpa* populations in Australia: A comparison of regression based models and a bioclimatic based modelling approach. **Insect Science**, v.12, p. 45-56, 2005.

ZALUCKI, M.; DAGLISH, G.; FIREMPONG, S.; TWINE, P. The Biology and ecology of *Heliothis armigera* (Hubner) and *Heliothis punctigera* Wallengren (Lepidoptera, Noctuidae) in Australia - What do we know. **Australian Journal of Zoology**, v.34, p. 779-814, 1986.

ZHENG, X. L.; WANG, P.; CHENG, W. J.; WANG, X. P.; LEI, C. H. Projecting overwintering regions of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* in China using the CLIMEX model. **Journal of Insect Science**, v.12, p.13, 2012.

2 MODELAGEM DO NICHU CLIMÁTICO DE *Helicoverpa punctigera* (WALLENGREN) (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) NA AUSTRÁLIA

RESUMO

As previsões de longo prazo da pressão populacional de insetos são fundamentais para o manejo eficaz em produções agrícolas. Nas regiões de cultivo na Austrália, infestações por *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) ocorrem anualmente atacando ampla variedade de culturas agrícolas. É possível identificar a ocorrência de *H. punctigera* em toda Austrália, em áreas persistentes ou efêmeras. As áreas persistentes concentram-se nas regiões costeiras orientais, geralmente mais úmidas, onde estão localizadas plantações de flores, hortaliças e grãos, enquanto áreas efêmeras são regiões sem cultivo no interior daquele país onde o inseto é observado em plantas hospedeiras nativas. Dada à riqueza de dados espaciais e climáticos na Austrália torna-se possível desenvolver modelos de distribuição e abundância bastante robustos. Neste sentido, para compreender e identificar regiões adequadas ao estabelecimento de *H. punctigera*, foi desenvolvido uma análise de modelagem CLIMEX. A abordagem baseada no modelo previu maior abundância de *H. punctigera* no Norte, Nordeste e Sudeste, enquanto na parte central da Austrália é observada baixa adequação climática devido ao estresse por seca, sendo este o principal fator limitante ao desenvolvimento de *H. punctigera*.

Palavras-chave: CLIMEX; modelos de previsão; distribuição de pragas.

ABSTRACT

Long-term predictions of insect population pressure are critical for effective management in agricultural crops. In growing regions in Australia, infestations by *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) occur annually attacking a wide variety of agricultural crops. It is possible to identify the occurrence of *H. punctigera* throughout Australia, in persistent or ephemeral areas. Persistent areas are concentrated in the eastern coastal regions, usually wetter, where flower, vegetable and grain plantations are located, while ephemeral areas are uncultivated regions in the interior of the country where the insect is observed on native host plants. Given the wealth of spatial and climatic data in Australia, it is possible to develop very robust distribution and abundance models. In this sense, to understand and identify suitable regions for the establishment of *H. punctigera*, a CLIMEX modeling analysis was developed. The model-based approach predicted greater abundance of *H. punctigera* in the North, Northeast and Southeast, while in the central part of Australia low climatic adequacy is observed due to dry stress, which is the main limiting factor for the development of *H. punctigera*.

Key words: CLIMEX; forecasting models; distribution of pests.

1 INTRODUÇÃO

Helicoverpa punctigera (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) é uma importante praga endêmica de culturas agrícolas na Austrália, tendo sua distribuição restrita à região da Austrália (MATTHEWS, 1999). É considerada uma espécie polífaga, desenvolvendo-se em diversas espécies de plantas, destacando-se principalmente nas das famílias Asteraceae, Fabaceae, Malvaceae, Brassicaceae, Solanaceae e outras 44 famílias de menor importância agrícola (ZALUCKI *et al.*, 1986; FITT, 1989; ZALUCKI *et al.*, 1994, CUNNINGHAM; ZALUCKI, 2014).

Helicoverpa punctigera é amplamente distribuída e comum em toda Austrália; uma vez que as mariposas adultas são capazes de migrar, partindo da região central para regiões de cultivo, que se estendem desde o interior do estado de Queensland, Western e South Australia (WARDHAUGH *et al.*, 1980; FARROW; DALY, 1987; GREGG *et al.*, 1995a; WALDEN, 1995; ROCHESTER *et al.*, 2002; BAILEY *et al.*, 2007). Além disso, alguns adultos podem usar as correntes de ventos marítimos e alcançarem ocasionalmente a Nova Zelândia (ROCHESTER *et al.*, 2002).

As chuvas de inverno que ocorrem geralmente nos meses outubro a março nas áreas da Austrália central propiciam amplo crescimento de plantas nativas, muitas das quais são hospedeiras de lagartas do complexo *Helicoverpa* (ZALUCKI *et al.*, 1994; GREGG *et al.*, 2018). Assim, *H. punctigera* passa por 1-2 gerações nessas regiões e durante a primavera (ZALUCKI *et al.*, 1986), quando as plantas hospedeiras secam, as mariposas emergentes migram em direção às áreas de cultivo usando os ventos favoráveis (ZALUCKI *et al.*, 1994; GREGG *et al.*, 2018). A quantidade de mariposas emergentes nestas áreas varia consideravelmente de acordo com a quantidade de chuvas na região ao longo dos anos, enquanto chuvas mais prolongadas permitem o desenvolvimento de uma maior quantidade de mariposas (FITT *et al.*, 1989; GREGG *et al.*, 1995a; ROCHESTER; ZALUCKI, 1998; MAELZER; ZALUCKI, 1999 e 2000).

No geral, *H. punctigera* consegue desenvolver pelo menos três gerações entre setembro e abril a cada 35-42 dias, com sobreposição da quarta e da quinta geração no final deste período (ZALUCKI *et al.*, 2005; BAKER; FITT, 2011). A população de *H. punctigera* predomina no início da estação de cultivo de verão, tornando-se escassa ao final (BAKER; FITT, 2011). Embora o padrão de abundância, em um ano, possa ser variável, no geral *H. punctigera* se torna menos comum durante o final do verão e, no outono, larvas e pupas podem ser raras (ZALUCKI *et al.*, 2005).

Uma compreensão da ecologia regional de *H. punctigera* é necessária para a tomada de decisões táticas e estratégicas, portanto, é importante explicar os padrões de abundância e distribuição das espécies (MAELZER; ZALUCKI, 2000). As táticas de controle contra pragas podem ser mais bem direcionadas se o momento do pico de abundância destas puder ser previsto (ZALUCKI; FURLONG, 2005). Dado o conhecimento de onde uma espécie é encontrada e os requisitos térmicos para o desenvolvimento, as previsões do tempo de emergência de adultos na próxima geração são relativamente simples (MOHANDASS; ZALUCKI, 2004; ZALUCKI; FURLONG, 2005).

Como o clima é um condutor básico dos processos biológicos, as ferramentas que captam a resposta das espécies às condições climáticas podem gerar uma contribuição significativa para o manejo (SUTHERST; MAYWALD, 2005). Modelos fenológicos, baseados em escalas de tempo fisiológicas de insetos, têm sido relativamente bem-sucedidos em prever o tempo de picos populacionais e são úteis para amostragem de tempo e medidas de controle (MOHANDASS; ZALUCKI, 2004). Essa abordagem é importante tanto para o planejamento estratégico quanto para a tomada de decisões táticas para o controle (MAELZER; ZALUCKI, 2000).

Pesquisas esclareceram a dinâmica sazonal de *H. punctigera* em sistemas agrícolas e não agrícolas na Austrália explicando os padrões de abundância e de distribuição (ZALUCKI; FURLONG, 2005). Apesar de existirem inúmeras abordagens descritivas, estatísticas ou baseadas em regras disponíveis, seu sucesso em fazer previsões de mudanças nas distribuições geográficas tem sido questionado repetidamente (SUTHERST, 1998; KRITICOS; RANDALL, 2001; THUILLER, 2003). Tais modelos estáticos sofrem da deficiência inerente de que quanto mais são parametrizados, essencialmente ajustados para descrever uma dada distribuição geográfica, menos são capazes de acomodar diferentes padrões climáticos (SUTHERST; MAYWALD, 2005).

Uma abordagem de correspondência climática mais sofisticada é usar técnicas estatísticas multivariadas para inferir, a partir de dados de distribuição georreferenciados, os fatores climáticos que se correlacionam com a distribuição das espécies (ZALUCKI; VAN KLINKEN, 2006). Essas abordagens determinam essencialmente o 'envelope climático', um conjunto de valores meteorológicos geralmente arbitrários que inferem os requisitos ecológicos de uma espécie no espaço climático (nicho) com base na distribuição geográfica das espécies, abundância relativa, fenologia sazonal e pode incluir dados experimentais (PETERSON, 2003; SUTHERST; MAYWALD, 2005; ZALUCKI; VAN KLINKEN, 2006).

A capacidade dessas abordagens estatísticas, baseadas em regras para modelar distribuições de espécies e fazer previsões significativas, tem algumas limitações, uma vez que não incorporam a fisiologia e sua interação com o clima e, assim, influenciam a distribuição e abundância do organismo (KRITICOS; RANDALL 2001; ZALUCKI; VAN KLINKEN, 2006). O software CLIMEX é um pacote de modelagem útil que integra processos fisiológicos e, portanto, produz previsões mais prováveis de serem biologicamente significativas e preditivas (MAYWALD; SUTHERST, 1991; ZALUCKI; VAN KLINKEN, 2006; KRITICOS *et al.*, 2015b).

Dada à riqueza de dados espaciais e climáticos em comparação com dados experimentais ou de campo específicos do local, os modelos resultantes podem ser bastante robustos (SUTHERST, 1995). Eles podem ser usados para testar hipóteses sobre fatores climáticos que limitam a distribuição de uma espécie e para estimar a adequação climática de outras regiões para aquela espécie (SUTHERST; MAYWALD, 2005). CLIMEX é geralmente usado para prever a adequação de um local para uma espécie com base no clima médio de longo prazo e nas respostas estimadas das espécies às condições de temperatura e umidade. Se dispuser dos dados meteorológicos diários (ou semanais) de longo prazo para um local, pode-se usar a resposta estimada das espécies às variáveis climáticas para inferir a variação na adequação (variação nos vários índices) no local ao longo do tempo, com base no registro climático observado (ZALUCKI; FURLONG, 2005).

Usando um modelo CLIMEX, Zalucki & Fulong (2005) indicaram amplamente onde *H. punctigera* estaria estabelecida na Austrália. Assim, o objetivo desse estudo foi refinar e aprimorar o modelo proposto por Zalucki & Fulong (2005) para identificar áreas adequadas para o estabelecimento e aquelas propícias ao crescimento populacional durante as estações favoráveis. Também se levou em consideração os efeitos da irrigação na extensão do alcance desta espécie e examinou-se o impacto dos índices de estresse (SX) no índice ecoclimático (EI) e no índice de crescimento (GI) anualmente ao longo dos anos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O modelo CLIMEX (versão 4.0.2) possui dois modos principais de aplicação: “Comparar locais” e “Comparar anos” (KRITICOS *et al.*, 2015b). A função “Comparar locais” pode prever a distribuição geográfica potencial de uma espécie de acordo com sua preferência climática, enquanto a função “Comparar anos” é usada para mostrar a resposta de uma espécie ao clima ao longo do tempo usando dados mensais ou diários no mesmo local (SUTHERST; MAYWALD, 2005; KRITICOS *et al.*, 2015b). Os resultados do modelo CLIMEX são

representados pelo índice ecoclimático (EI), que reflete o potencial combinado de crescimento populacional em períodos favoráveis e sobrevivência em períodos estressantes (KRITICOS *et al.*, 2015b). O EI é um número entre 0 e 100, calculado pela multiplicação do índice de crescimento (GI), índices de estresse (SI) e índices de interação dos estresses (SX). O GI descreve o crescimento potencial da população durante uma estação favorável, enquanto o SI aborda a extensão da redução da população durante uma estação desfavorável. O GI pode ser baseado em até sete variáveis (temperatura, umidade, radiação, substrato, diapausa, luz e, índice biótico).

A função “Comparar anos” usa um banco de dados que consiste em anos consecutivos de dados mensais ou diários do mesmo local, em vez de dados médios de longo prazo de muitos lugares diferentes, como na função “Comparar locais”. Assim, “Comparar anos” permite examinar o efeito da variação climática no potencial de crescimento populacional e sobrevivência de uma espécie em anos consecutivos (KRITICOS *et al.*, 2015b).

O SI é definido por quatro estresses: estresse por frio (CS), estresse por calor (HS), estresse por seca (DS) e estresse por umidade (WS) (KRITICOS *et al.*, 2015b). No presente estudo, “Comparar locais” e “Comparar anos” foram aplicados para *H. punctigera* em resposta ao clima na Austrália.

2.1 Distribuição conhecida de *H. punctigera*

Helicoverpa punctigera é endêmica da Austrália e, portanto, é possível identificar sua ocorrência em áreas persistentes e efêmeras. As áreas persistentes concentram-se nas regiões costeiras orientais, geralmente mais úmidas e, nas regiões tropicais setentrionais, onde estão localizadas as plantações de flores, hortaliças e grãos (ZALUCKI *et al.*, 1986) (Figura 1). A ocorrência efêmera é observada em plantas hospedeiras nativas em regiões sem cultivo do interior da Austrália, sendo essas plantas as principais contribuintes para a manutenção das populações de *H. punctigera* que migram para infestar regiões de cultivo do Sudeste (GREGG *et al.*, 1993, 1995) e Sudoeste da Austrália (WALDEN, 1995). A precipitação de aproximadamente de 250 mm por ano, que ocorre especialmente entre os meses de outubro a março, determina a extensão desses hospedeiros e o tamanho das imigrações na primavera (BAKER *et al.*, 2011).

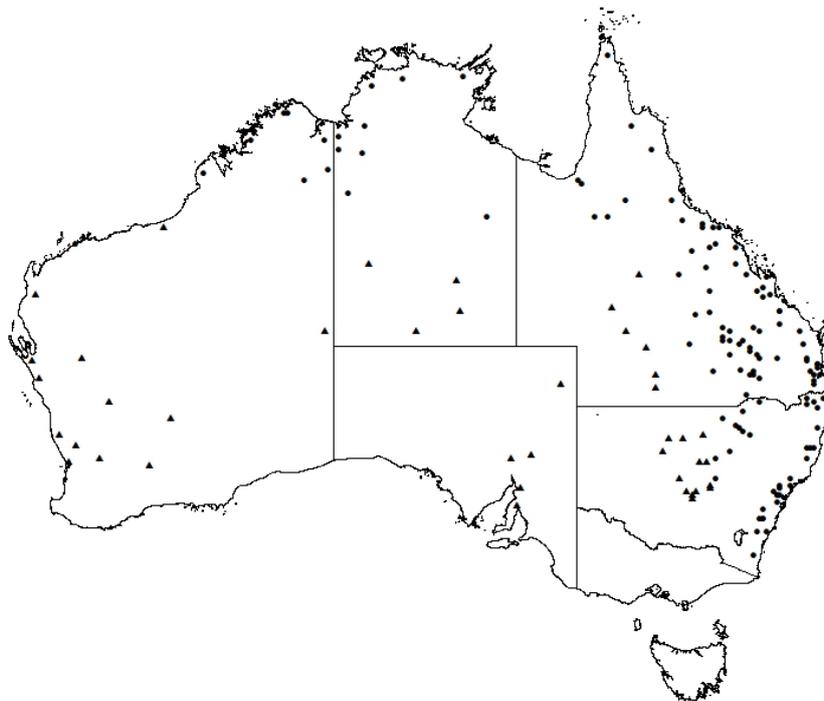


Figura 1. Distribuição geográfica da população persistente (●) e da população efêmera (▲) de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) na Austrália com base em Zalucki *et al.* (1986, 1994 e 2005) e Gregg (1995a).

2.2 Abundância de *H. punctigera* na Austrália

As tendências sazonais da abundância para a Austrália foram obtidas de Maelzer *et al.* (1996). Foram utilizadas oito séries relativamente longas de capturas de *H. punctigera* por armadilhas luminosas, nomeadas de: Myall Valley (= Narrabri neste trabalho) e Trangie em New South Wales (NSW), Turretfield na Austrália do Sul (SA), Emerald (QLD), Horsham e Hamilton (VIC) e Ord River e Prent Downs (WA).

Os dados de capturas de mariposas de todos os locais são compostos por totais semanais. Para Narrabri, os dados foram obtidos para os anos de 1973-77 e 1981 a 1987. Dados para Trangie foram obtidos para os anos de 1973 a 1984. Dados para Horsham e Hamilton foram obtidos para os anos de 1980 a 1985 e para Turretfield para os anos 1962 a 1984. Os dados para Ord River de 1965 a 1970 e os de Prent Downs datam de 1991.

2.3 Dados climáticos

Foi utilizado um conjunto de dados históricos de resolução espacial em grade de 10' do CliMond centrado em 1975 (CM10_1975H_V1), embora registros de estações de 1950 a 2000 tenham sido usados ocasionalmente para preencher lacunas nos registros. Os conjuntos de dados CRU baseiam-se exclusivamente em dados de 1961-1990 (KRITICOS *et al.*, 2012).

Este conjunto consiste em valores médios mensais de longo prazo para temperatura mínima, máxima, precipitação e umidade relativa às 09h00min e 15h00min.

2.4 Índice de temperatura

O índice de temperatura (IT) é uma versão parametrizada de dados relacionados à temperatura. O IT é definido por quatro parâmetros: O limite inferior de temperatura (DV0), a temperatura ótima inferior (DV1), a temperatura ótima superior (DV2) e o limite superior de temperatura (DV3) (KRITICOS *et al.*, 2015b). Quando a temperatura está entre DV1 e DV2, significa ser muito favorável para uma espécie. Por outro lado, pode não sobreviver às temperaturas inferiores a DV0 ou superiores a DV3. População graus-dia (PDD) representa o número total de graus-dia acima de DV0 necessário para completar uma geração inteira. Para *H. punctigera*, o DV0 e o PDD foram 11°C e 500, DV1 foi de 15°C, respectivamente, enquanto o DV3 foi de 40°C, ponto no qual a mortalidade dos ovos aumentou significativamente; DV2 foi ajustado para 30°C (QAYYUM; ZALUCKI, 1983) (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros CLIMEX preliminares definidos para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae)

Variáveis		Valores anteriores ¹	Novos valores	Fonte
Parâmetros de temperatura				
DV0	Limite inferior de temperatura	11°C	11°C	Daglish (1991) e estimado da distribuição geográfica ajustada na Austrália
DV1	Temperatura inferior ótima	15°C	25°C	
DV2	Temperatura superior ótima	33°C	30°C	
DV3	Limite superior de temperatura	40°C	40°C	
PDD	Graus-dias para completar 1 geração	500	500	
Parâmetros de umidade				
SM0	Limite inferior de umidade de solo	0,02	0,11	Zalucki; Furlong (2005)
SM1	Umidade ótima de solo inferior	0,08	0,6	
SM2	Umidade ótima de solo superior	0,8	1	
SM3	Limite superior de umidade de solo	1,2	1,2	
Estresse por calor				
THSS	Limite de estresse por calor	40°C	40°C	Estimado da distribuição geográfica ajustada na Austrália e Qayyum; Zalucki (1987).
THHS	Razão de estresse por calor	0,0004 semana ⁻¹	0,01 semana ⁻¹	
Estresse por frio				
TTCS	Limite de estresse por frio	9°C	4°C	Zalucki; Furlong (2005)
THCS	Razão de estresse por frio	-0,0003	-	
DTCS	Limite de graus-dias	-	10°C	
DHCS	Acumulação de razão de estresse	-	0,001 Week ⁻¹	
Estresse por seca				
SMDS	Limite de estresse por seca	0,08	0,1	Estimado da distribuição geográfica ajustada na Austrália & Zalucki; Furlong (2005)
HDS	Razão do estresse por seca	0,005 semana ⁻¹	0,025 semana ⁻¹	
Estresse por umidade				
SMWS	Limite de estresse por umidade	1	1,2	Zalucki; Furlong (2005)
HWS	Razão de estresse por umidade	0,005 semana ⁻¹	0,002 semana ⁻¹	
Parâmetros de diapausa				
DPD0	Diapausa induzida pelo comprimento do dia	11 h	11 h	Estimado da distribuição geográfica ajustada na Austrália & Murray (1991)
DPT0	Temperatura de indução a diapausa	19°C	19°C	
DPT1	Temperatura de terminação a diapausa	16°C	12°C	
DPD	Mínimo de dias na diapausa	-69	-69	
DPSW	Indicador de diapausa de verão ou inverno	0 (inverno)	0 (inverno)	

¹Valores referenciados de Zalucki; Furlong (2005).

2.5 Índice de umidade

A umidade do solo indica o efeito da precipitação na biologia de uma espécie. Assim, o índice de umidade do solo no CLIMEX, é composto por quatro parâmetros: O limite inferior de umidade do solo (SM0), a umidade ótima do solo inferior (SM1), a umidade ótima

do solo superior (SM2) e o limite superior de umidade do solo (SM3) (KRITICOS *et al.*, 2015b). O crescimento populacional atinge o pico entre as umidades ótimas do solo, dentro da faixa SM1 e SM2. Em resumo, para *H. punctigera* os valores atualizados para SM0, SM1, SM2 e SM3 foram 0,11; 0,6; 1 e 1,2; respectivamente.

2.6 Índices de estresses

No CLIMEX, os estresses ambientais são parametrizados pelo índice SI. É definido por quatro tipos de parâmetros de estresse: CS (estresse por frio), HS (estresse por calor), DS (estresse por seca) e WS (estresse por umidade). Esses quatro estresses ambientais representam condições desfavoráveis que limitam o crescimento populacional de uma espécie. Cada índice é especificado pelo limite e uma taxa de estresse (KRITICOS *et al.*, 2015b). Todos os parâmetros de estresse afetam cumulativamente o crescimento populacional de uma espécie quando ela é exposta a uma faixa fora de seus limites de desenvolvimento. O estresse por frio começa a se acumular quando as temperaturas ficam abaixo de um limite de temperatura (TTCS, °C) em uma determinada taxa (THCS).

Quando a temperatura é mais alta do que o limite de temperatura de estresse por calor (TTHS; °C) em uma determinada taxa (THHS), o estresse por calor começa a se acumular. Com o aumento da temperatura, a taxa de eclosão de ovos de *H. punctigera* aumenta, enquanto o tempo necessário diminui. Ovos de *H. punctigera* não eclodiram continuamente a 30°C, mas podem sobreviver a uma breve exposição à temperatura de 40°C (QAYYUM; ZALUCKI, 1983). Considerando que, o adulto de *H. punctigera* sobrevive em ambientes com mais de 40°C e, sugerindo que o estresse térmico é insignificante sob o clima atual de áreas tropicais. Com base nisso, o TTHS e o THHS foram determinados como sendo 40°C e 0,01, respectivamente. Estresses por seca e umidade ocorrem quando a umidade do solo é muito baixa ou muito alta. Esses estresses começam a se acumular quando a umidade do solo cai abaixo do limite de estresse por seca (SMDS) em uma taxa de estresse por seca (HDS) ou excede o limite de estresse por umidade (SMWS) em uma taxa de estresse por umidade (HWS). O estresse por seca foi calibrado considerando a precipitação e distribuição de *H. punctigera* na Austrália. Para atingir valores de EI que capturem a distribuição real na Austrália, o limiar de estresse seco (SMDS) precisou ser modificado para 0,1, enquanto o HDS foi mantido em 0,025. O valor do estresse por umidade foi estimado a partir da distribuição geográfica ajustada na Austrália.

2.7 Diapausa

A diapausa em populações de *H. punctigera* pode ser fenotipicamente variável, com apenas uma proporção de indivíduos entrando em diapausa quando as condições são adequadas (MURRAY, 1991). Indivíduos que entram em diapausa perdem oportunidades de crescimento em troca de proteção contra temperaturas extremamente altas ou baixas (KRITICOS *et al.*, 2015b). Na versão do CLIMEX, apenas um mecanismo de diapausa pode ser executado por vez e, assim, notou-se que os limites de frio foram mais importantes para projetar a faixa potencial de *H. punctigera* e, os limites da faixa de alta temperatura não parecem exigir um mecanismo de diapausa. Para contabilizar o comportamento da temperatura baixa na modelagem de adequação climática, duas versões do modelo foram executadas - com e sem um mecanismo de diapausa.

2.8 Irrigação

Um cenário de irrigação de $2,5 \text{ mm dia}^{-1}$, ao longo do ano, foi utilizado como complemento para avaliar o risco representado por *H. punctigera* em regiões onde o cultivo é sustentado por irrigação (YONOW; SUTHERST, 1998; KRITICOS *et al.*, 2015a). Para produzir um mapa composto, compreendendo áreas irrigadas e não irrigadas, para mostrar a adequação global projetada, determinou-se a área sobre a qual a irrigação é praticada utilizando o Global Irrigated Area V5 (GMIA5) desenvolvido por SIEBERT *et al.* (2005). Para cada célula $10'$, se a área de irrigação for maior que 0, o resultado do cenário de irrigação é usado; caso contrário, o resultado do cenário de chuva natural é usado.

2.9 Mapa composto de risco

Os cenários de diapausa e irrigação foram combinados em um conjunto totalmente fatorial de cenários. Dentro dos cenários de irrigação, os resultados dos modelos com e sem diapausa foram combinados, tomando o valor máximo de EI para cada célula, raciocinando com a célula mais adaptado ao clima dentro de cada célula iria predominar. Os resultados deste processo para cada um dos cenários de irrigação foram combinados, com base nos resultados para o cenário irrigado onde o conjunto de dados GMIA5 indicou que a irrigação foi praticada e os cenários de chuva natural em outro lugar.

3 RESULTADOS

A distribuição potencial de *H. punctigera* com base em EI (adequado para populações persistentes) e GI_A (expansão de amplitude sazonal temporária) (Figura 2) com

base nos valores dos parâmetros biológicos (Tabela 1), abrange todos os locais de ocorrência registrada. A adequação climática aumenta em direção às costas onde a alta porcentagem dos locais registrados foi inserida dentro da zona de alta adequação climática, especialmente no Norte, Nordeste e Sudeste, enquanto na parte central da Austrália é observada baixa adequação climática devido ao estresse por seca.

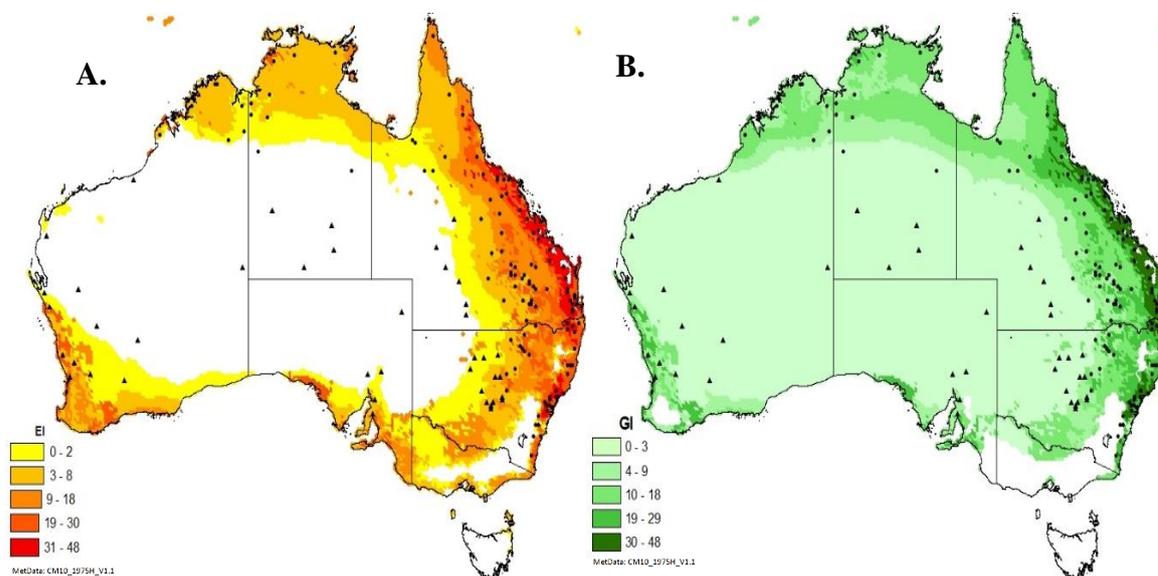


Figura 2. Adequação climática para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) na Austrália, modelado usando CLIMEX, levando em consideração a diapausa e irrigação. A) Ecoclimax (EI), indicando favorabilidade para persistência e B) Índice de Crescimento Anual (GI_A), indicando o potencial de crescimento populacional. As localizações dos pontos (•) indicam a ocorrência natural de população permanente e (▲) população efêmera.

Os parâmetros mais sensíveis que influenciam o intervalo modelado de *H. punctigera* foram à taxa de estresse seco (HDS), seguido pelo limite de temperatura de estresse frio (TTCS) e a temperatura de terminação de diapausa (DPT1). Além disso, os registros estão espalhados por toda Austrália, mesmo em áreas não agrícolas, onde as amostragens possivelmente representam populações efêmeras, ou seja, áreas adequadas para *H. punctigera* apenas durante as estações favoráveis.

CLIMEX gera mudanças semanais no GI_W ao longo de um ano médio para um local que permite a “adequação sazonal modelada” a ser comparada com a fenologia sazonal observada com base na captura de mariposas adultas (KRITICOS *et al.*, 2015b).

É possível identificar a correlação da previsão com a ocorrência natural de *H. punctigera*, sendo o crescimento populacional ocorrendo de setembro a janeiro (Figura 3). Além disso, o CLIMEX indica que o pico de crescimento populacional ocorre mais cedo que

o pico de captura nas armadilhas, correspondendo à atividade adulta após o desenvolvimento larval (YONOW *et al.*, 2017). Ambas as análises confirmam que os padrões fenológicos apropriados estão sendo simulados pelo modelo.

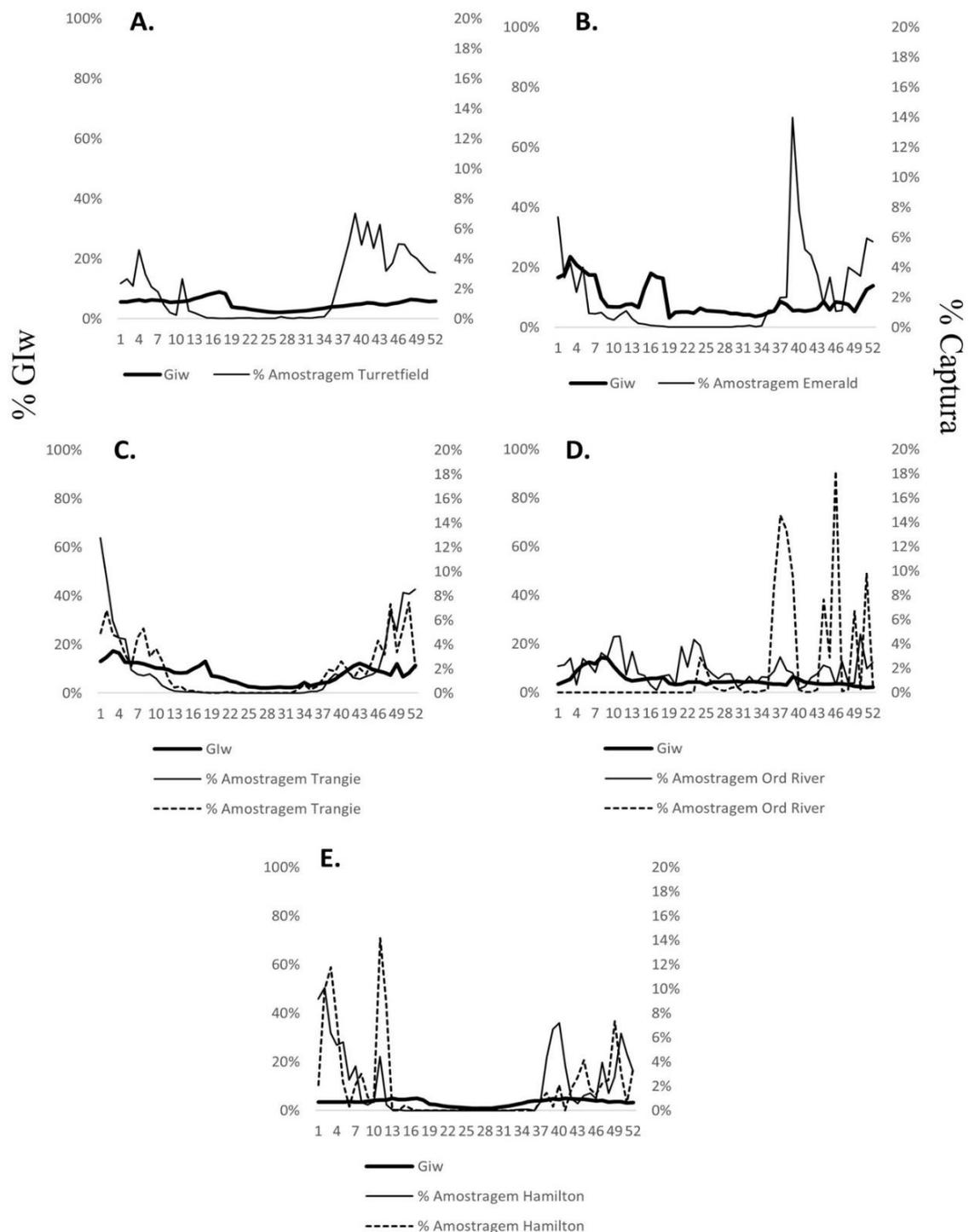


Figura 3. Índice de crescimento semanal (eixo Y principal) e medidas de abundância populacional para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) (expresso como % da captura total, eixo Y secundário) ao longo de um ano (tempo em semanas, 1-52) a partir de 1º de janeiro. GI_w (linha sólida espessa) é uma média de 4 cenários CLIMEX para *H. punctigera* (com e sem irrigação e com e sem diapausa) para: (a) Turretfield, província da South Australia, (b) Emerald, província de Queensland, (c) Narrabri, linha mais fina e linha fina tracejada para Trangie, ambas províncias de New South Wales, (d) Ord River (linha mais fina) e Prenti Downs (linha tracejada), província da Western Australia e (e) Horsham (linar mais fina) e Hamilton (linha tracejada) na província de Victoria.

Nas áreas de Turretfield, Emerald Narrabri o valor previsto do GI_w refletiu a tendência de ocorrência de *H. punctigera*, pois as capturas de adultos nas armadilhas correspondem às épocas que são, em média, climaticamente adequadas para o crescimento populacional do inseto (Figura 3a-c). No entanto, para outros locais como Horsham e Hamilton, ambos em Victoria (VIC), e Ord River e Prenti Downs, no Estado de Western Australia (WA), o GI_w permaneceu baixo por um período mais longo do que o pico populacional de mariposas (Figura 3d-e). Nestes Estados, o número de mariposas atingiu o pico de capturas durante a metade do mês de agosto e diminuiu entre janeiro e março. Acredita-se que essa variação no número de mariposas reflita os efeitos adicionais no nível da paisagem e disponibilidade de culturas hospedeiras, adequação e capacidade de migração (ZALUCKI *et al.*, 2009).

Os valores do índice ecoclimático abrangendo 58 anos para os oito locais australianos forneceram *insights* sobre a provável estação da atividade ecoclimática para *H. punctigera* (Figura 4). A região de Horsham e Hamilton, ambas no Estado de Victoria, estão inseridas em clima temperado com baixa temperatura e conseqüentemente alto estresse por frio. Em alguns anos, ocorreram epidemias de primavera nessas regiões e isso está estritamente associado à diminuição do estresse por frio (Figura 4 a-b).

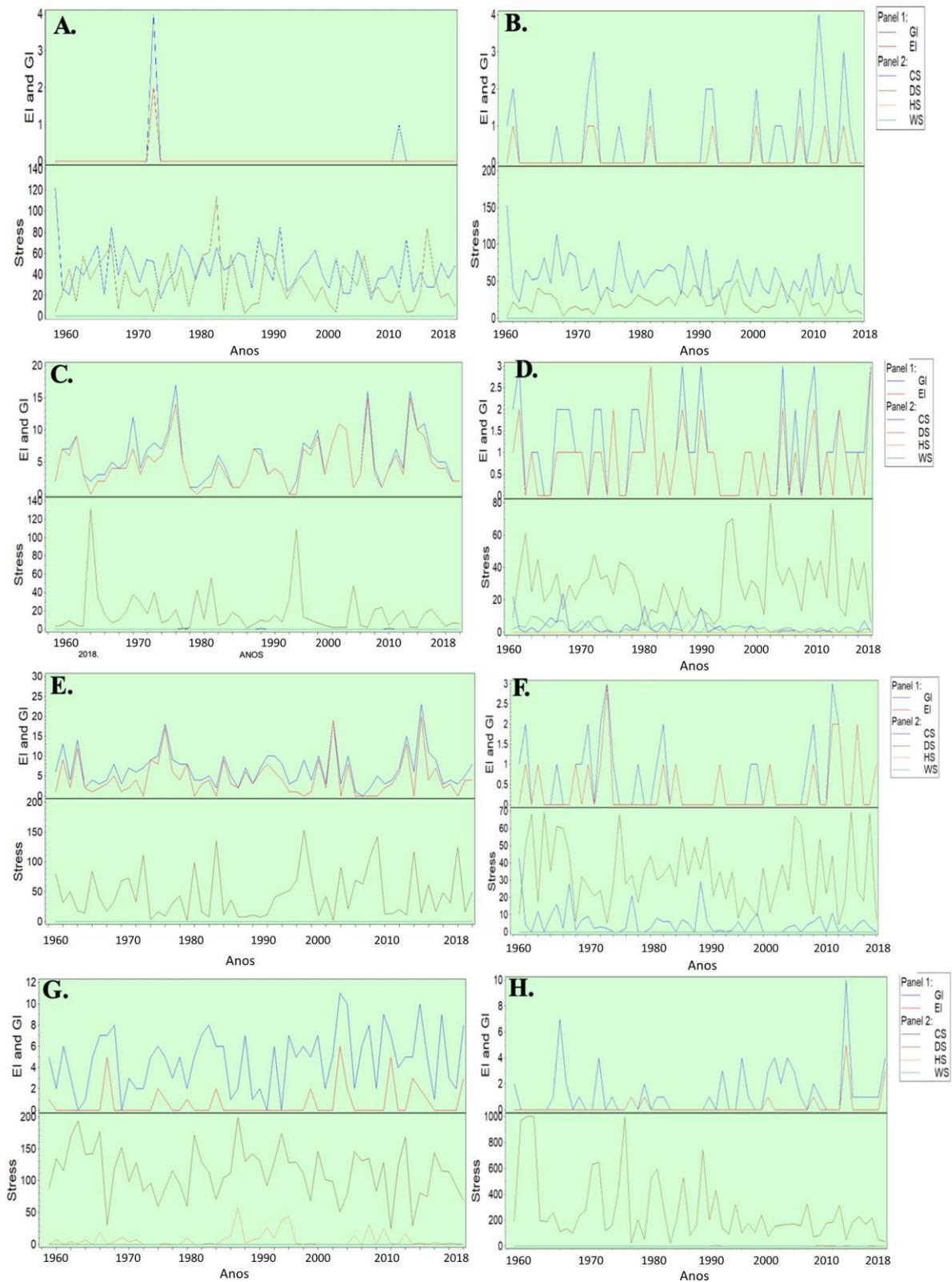


Figura 4. Índice ecoclimático anual (EI), índice de crescimento (GI) e índices de tensões para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) calculados para Horsham (VIC) (a), Hamilton (VIC) (b), Narrabri (NSW) (c), Trangie (NSW) (d), Emerald (QLD) (e), Turretfield (SA) (f), Ord River (WA) (g), Prenti Downs (WA) (h), ao longo de um período de 58 anos (1960-2018).

As deficiências de precipitação afetaram a maior parte de New South Wales, Queensland, South Australian e Western Australia. Em Narrabri (NSW), Trangie (NSW), Emerald (QLD) e Turretfield (SA) (Fig 4 cf), foram observadas variações sazonais de EI e de GI ao longo dos anos de acordo com os índices de estresses, especificamente estresse por seca e, ocasionalmente, estresse pelo frio no inverno, onde a temperatura média ficou abaixo de 10°C (BOM, 2019).

Outras áreas de deficiência de precipitação de longo prazo que afetaram as condições de seca foram observadas em Prenti Downs (WA) e Ord River (WA) (Figura 4 g-h). Prenti Downs apresentou, em particular, maior estresse por seca em comparação com os outros locais, isto está rigorosamente relacionado com a menor quantidade de chuva, geralmente abaixo de 300 mm (BOM, 2019). De maneira geral, é difícil comparar uma seca com outra, uma vez que cada seca difere na sazonalidade, localização, extensão espacial e duração das deficiências de chuva associadas. Além disso, cada estresse por seca é acompanhado por variações de temperatura e déficits de umidade do solo. Embora, o estresse por seca seja um fator importante no estabelecimento de *H. punctigera*, alguns desses pontos, como o perímetro irrigado de Ord River, são locais com condições que contribuem para o desenvolvimento de *H. punctigera* mesmo em GI desfavorável.

Em geral, o resultado sugere que a variação sazonal de EI e de GI ocorre de acordo com o estresse, principalmente por seca e frio. Se dados mais detalhados de longo prazo estivessem disponíveis, é provável que GI pudesse fornecer informações valiosas sobre os gatilhos climáticos para *H. punctigera* que poderiam então ser generalizados para uma gama mais ampla de locais. Embora o modelo não inclua todas as variáveis, como migração de mariposas, plantas hospedeiras adequadas, pulverização com inseticidas e a presença de inimigos naturais ou sua liberação, este pode demonstrar um padrão de disponibilidade de locais para *H. punctigera* em toda a Austrália.

Na Austrália, as condições de clima são diversas devido ao tamanho geográfico do país, mas a maior parte do território, especificamente na Austrália central é composto por áreas desérticas ou de semi-árido. Essas áreas são secas e quentes, portanto, apresentam alta taxa de evaporação, o que se expressa no alto valor de estresse por seca (Figura 5a). Essas áreas estão classificadas como deserto árido (BWh) e estepe árida (BSh) de acordo com o sistema de classificação climática Köppen-Geiger (KRITICOS *et al.*, 2012). Em contraste, as áreas costeiras tendem a ter taxa de evaporação mais baixa como resultado de sua proximidade a uma grande fonte de água (Figura 5b). Áreas com baixa precipitação e baixa umidade tendem a ter uma alta taxa de evaporação, o que impacta positivamente o estresse

por seca, enquanto áreas com alta pluviosidade e alta umidade tendem a ter uma baixa taxa de evaporação. Apenas no Sudeste australiano foi identificada a maior predominância de estresse pelo frio (Figura 5c), sendo esta área de clima oceânico (CFb) sendo classificada como clima temperado de acordo com o sistema de classificação climática Köppen-Geiger (KRITICOS *et al.*, 2012). O estresse por calor foi observado apenas na região desértica da Austrália Ocidental, onde se observa as maiores médias de temperatura (Figura 5d).

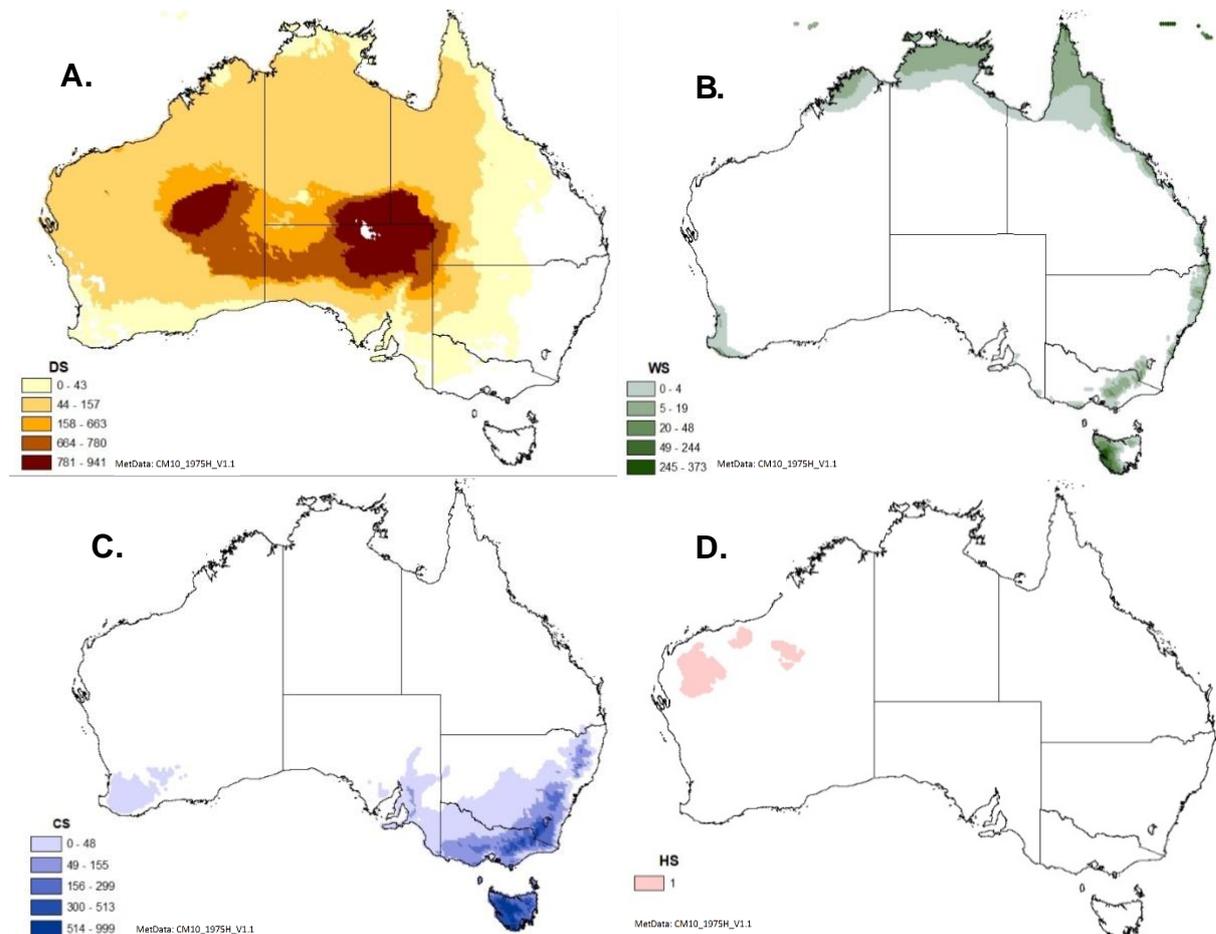


Figura 5. Mapas da Austrália considerando o estresse para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae), **a.** Estresse por seca (DS), **b.** Estresse por umidade (WS), **c.** Estresse por frio (CS) e **d.** Estresse por calor (HS), levando em consideração a diapausa e a irrigação.

4 DISCUSSÃO

A abordagem CLIMEX foi usada para construir um modelo de nicho para *H. punctigera*, avaliar a distribuição potencial e as áreas de risco desta importante praga na Austrália. CLIMEX combina os pontos fortes dos métodos de modelagem correlativos (permitindo que os parâmetros de estresse sejam ajustados aos dados de localização geográfica) e métodos de modelagem dedutiva (permitindo que as funções de crescimento

sejam informadas por estudos de laboratório e observações fenológicas) (KRITICOS *et al.*, 2015a).

O mapa modelado concorda estreitamente com a distribuição geográfica conhecida de *H. punctigera* na Austrália na região litorânea e central, onde observações fenológicas indicam que esta espécie-praga está distribuída por todo o país, mesmo em regiões temperadas áridas ou frias. A disponibilidade de hospedeiros não restringe a distribuição de *H. punctigera*, uma vez que esta espécie ocorre em ampla gama de gramíneas anuais e perenes, incluindo cereais de inverno e em sementes de várias espécies dicotiledôneas (ZALUCKI *et al.*, 1986, 1994; CUNNINGHAM; ZALUCKI, 2014).

O modelo CLIMEX anterior de Zalucki & Fulong (2005) indicou um valor EI positivo para grandes áreas de habitat árido e semi-árido na Austrália Central, onde o clima só é adequado para *H. punctigera* durante temporadas e anos favoráveis, enquanto o modelo ajustado nesse trabalho difere consideravelmente na sua formulação e representação do risco potencial de invasão, incluindo um cenário de irrigação. Dadas às novas informações incorporadas no modelo, foi possível obter uma representação mais precisa da distribuição potencial de *H. punctigera* na Austrália. Os parâmetros apresentados no presente modelo estão mais alinhados com as condições ambientais as quais a *H. punctigera* está presente. Além disso, o modelo resultante está de acordo com um conjunto expandido de dados de distribuição conhecidos.

Extensas pesquisas esclareceram a dinâmica sazonal de *H. punctigera* na Austrália, com população ocorrendo em habitats efêmeros, basicamente durante a estação chuvosa, e persistente em áreas agrícolas. Nas áreas agrícolas é observado o desenvolvimento de, pelo menos, três gerações entre setembro e abril, com a sobreposição da quarta e quinta gerações no final deste período (ZALUCKI *et al.*, 1986; GREGG *et al.*, 1993). As chuvas na parte central da Austrália durante o final do outono e inverno garantem que as áreas estejam adequadas para a reprodução no inverno, onde as larvas se alimentam de uma grande variedade de plantas nativas (ZALUCKI *et al.*, 1994; GREGG *et al.*, 1995b).

Excluindo-se as regiões Horsham, Hamilton, Ord River e Prenti Downs nos demais locais as mariposas foram capturadas em épocas que são, em média, climaticamente adequadas para o crescimento populacional (Figura 3). Assim, acredita-se que o conjunto de dados oferece uma visão geral válida da fenologia populacional de *H. punctigera* na Austrália. Apesar de várias pesquisas, a fenologia de *H. punctigera* é relativamente pouco compreendida, particularmente no que diz respeito aos fatores que controlam o padrão de diapausa (ZALUCKI; FURLONG, 2005). Dada sua notável capacidade migratória e curto tempo de

geração, não é fácil prever a abundância e distribuição de *H. punctigera*, particularmente no interior da Austrália, onde a população humana é esparsa e as populações de insetos raramente são monitoradas porque não existem plantações (GREGG *et al.*, 2001). Essas incertezas se combinam para limitar a capacidade de modelar a distribuição potencial de *H. punctigera* com grande precisão. No entanto, a distribuição de potencial modelada está de acordo com a distribuição conhecida (Figura 3).

A Austrália é um país com grande área territorial e assim contempla áreas com diferentes climas, cada um com sua particularidade. A proximidade de áreas com corpos d'água favorece *H. punctigera* como é o caso das áreas costeiras, conhecidas pela ocorrência das brisas marítimas refrescantes à tarde no verão e com noites mais amenas no inverno (BOM, 2019). Em contraste, as áreas do interior do país, por terem temperaturas frias à noite devido à sua distância do mar (que atua como uma "fonte de calor" durante a noite), níveis mais baixos de nebulosidade e umidade e, geralmente, baixas velocidades do vento, contribuirão para o aumento do estresse por seca (BOM, 2019).

O mapa de estresse por seca é o índice mais importante que regula a propagação de *H. punctigera*. Isso está diretamente relacionado com a alta temperatura e o baixo padrão de chuvas em toda a Austrália, o que ocorre em geral graças à localização do continente em relação à linha do equador (BOM, 2019). O mapa de estresse de frio mostra que a parte Sul do país é de clima temperado, mas há de se considerar também o efeito da topografia, com áreas mais altas apresentando temperaturas mais amenas. Um exemplo são as partes mais altas da Grande Cordilheira Divisória no Sudeste da Austrália onde a temperatura é baixa o suficiente para manter campos de neve durante a maioria dos invernos, o que impacta diretamente no estabelecimento e desenvolvimento de *H. punctigera* (BOM, 2019).

Prever a distribuição e abundância de uma espécie nativa não é fácil, por isso ela desenvolveu mecanismo de resistência para sobreviver em diferentes habitats, mesmo desfavoráveis como em região árida. Embora o clima possa ser o principal fator para a abundância de insetos, outros componentes abióticos e bióticos precisarão ser considerados em qualquer processo de previsão da dinâmica populacional. É sabido que a fenologia, o tipo e disponibilidade de hospedeiros, os locais de migração e hibernação desempenham um papel importante na determinação do nível de abundância. Este estudo desenvolveu modelos considerando diferentes cenários sob chuva natural e irrigação através do mapa de risco composto.

5 CONCLUSÕES

O atual modelo CLIMEX para *H. punctigera* é composto por novos valores de parâmetros biológicos que abordam e ajustam o modelo anterior de Zalucki & Furlong (2005), principalmente referente as temperaturas de desenvolvimento e diapausa. Em comparação com o modelo anterior, o atual fornece um melhor ajuste para a distribuição conhecida de *H. punctigera*, incluindo populações efêmeras e permanentes, além da inserção do uso da irrigação em áreas irrigadas. Na Austrália, o modelo atual prevê o aumento da adequação climática na faixa costeira, especialmente na região Norte, Nordeste e Sudeste, enquanto que a região central, mais árida, apresenta uma menor adequação climática devido a baixa disponibilidade de água e conseqüente aumento do estresse por seca. O modelo atual também oferece um melhor ajuste para os efeitos do estresse por frio no desenvolvimento de *H. punctigera*, em que foi identificado no Sudeste australiano um maior efeito do frio provocado pelas baixas temperaturas dessa região por esta em uma zona de clima temperado. As mudanças propostas no atual modelo permitiram ajustes finos que permitiram tornar essa análise mais robusta e confiável e, portanto, pode ser usado no desenho de estratégias de manejo de *H. punctigera* em áreas agrícolas australianas.

AGRADECIMENTOS

Em especial, ao Dr. Peter Gregg, por fornecer informações sobre a ocorrência de *H. punctigera* na Austrália, ao Dr. Myron Zalucki da University of Queensland (UQ) e ao Dr. Darren Kriticos (UQ e CSIRO). Esta pesquisa teve o apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) (88881.189410/2018-01), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da School of Biological Science da UQ, Brisbane, Austrália. As simulações foram realizadas usando recursos computacionais da UQ.

REFERÊNCIAS

- BAILEY, P. T. **Pests of field crops and pastures: Identification and control**. Collingwood: CSIRO Publishing. p. 89, 2007.
- BAKER, G. H.; TANN, C. R.; FITT, G. P. A tale of two trapping methods: *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera, Noctuidae) in pheromone and light traps in Australian cotton production systems. **Bulletin of Entomological Research**, v.101, p.9-23, 2011.
- Bureau of Meteorology (BOM). Average annual, seasonal and monthly rainfall. Disponível: <http://www.bom.gov.au/jsp/ncc/climate_averages/temperature>. Acessado em 26 de junho, 2019.
- CUNNINGHAM, J. P.; ZALUCKI, M. P. Understanding *Heliothine* (Lepidoptera: Heliiothinae) pests: what is a host plant?. **Journal of Economic Entomology**, v.107, p.881-96, 2014.
- DAGLISH, G. J. Influence of temperature on the development of *Helicoverpa armigera* (Hübner) and *H. punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae). **PhD Thesis**. The University of Queensland. 1991.
- FARROW, R. A.; DALY, J. C. Long range movement as an adaptive strategy in the genus *Heliothis* (Lepidoptera: Noctuidae): a review of its occurrence and detection in four pest species. **Australian Journal of Zoology**, v.35, p.124, 1987.
- FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P.; TWINE, P. H. Temporal and spatial patterns in pheromone-trap catches of *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) in cotton-growing areas of Australia. **Bulletin of Entomological Research**, v.79, p.145-161, 1989.
- GREGG, P. C.; DEL SOCORRO, A. P.; ROCHESTER, W. A. Field test of a model of migration of moths (Lepidoptera: Noctuidae) in inland Australia. **Australian Journal of Entomology**, v.40, p.249-256, 2001.
- GREGG, P. C. Pollen as a marker for *Helicoverpa armigera* (Hubner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae) emigrating from western Queensland. **Australian Journal of Ecology**, v.18, p.209-219, 1993.
- GREGG, P. C. Migration of cotton pests: patterns and implications for management. In: Challenging the Future. Proceedings of the First World Cotton Research Conference (eds GA Constable & NW Forrester), pp. 423-433. **CSIRO, Canberra**, Australia. 1995a.
- GREGG, P. C.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P.; MURRAY, D. A. H. Insect migration in an arid continent. II *Helicoverpa* in Eastern Australia. *Insect Migration: Tracking Resources Through Space and Time* (eds. V.A. Drake, A.G. Gatehouse), pp.151-172. Press Syndicate of the **University of Cambridge**, Cambridge, UK, 1995b.
- GREGG, P. C.; DEL SOCORRO, A. S.; MOTTEE, L. C.; TANN, C. R.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P. Host plants and habitats of *Helicoverpa punctigera* and *H. armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in inland Australia. **Austral Entomology**, v.58, p.547-560, 2018.

- KRITICOS, D. J.; OTA, N.; HUTCHISON, W. D.; BEDDOW, J.; WALSH, T.; TAY, W. T.; BORCHERT, D. M.; PAULA-MOREAS, S. V.; CZEPAK, C.; ZALUCKI, M. P. The potential distribution of invading *Helicoverpa armigera* in North America: Is it just a matter of time? **PLoS ONE**, v.10, p.21, 2015a.
- KRITICOS, D. J.; MAYWALD, G. F.; YONOW, T.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; SUTHERST, R. W. CLIMEX Version 4: Exploring the effects of climate on plants, animals and diseases. **CSIRO, Canberra**. 156 p., 2015b.
- KRITICOS, D. J.; WEBBER, B. L.; LERICHE, A.; OTA, N.; MACADAM, I.; BATHOLS, J.; SCOTT, J. K. CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. **Methods in Ecology and Evolution**, v.3, p.53-64, 2012.
- KRITICOS, D. J.; RANDALL, R. P. A comparison of systems to analyse potential weed distributions. *In: Weed Risk Assessment* (eds GROVES, R. H.; PANETTA, F. D. & VIRTUE, J. G.), 61-79. **CSIRO Publishing**, Melbourne, Australia, 2001.
- MAELZER, D. A.; ZALUCKI, M. P. Analysis and interpretation of long term light-trap data for *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia: the effect of climate and crop host plants. **Bulletin of Entomological Research**, v.89, p.455-464, 1999.
- MAELZER, D. A.; ZALUCKI, M.P. Long range forecasts of the *Helicoverpa* in using the SOI and the SST. **Bulletin of Entomological Research**, v.90, p.133-146, 2000.
- MAELZER, D.; ZALUCKI, M. P.; LAUGHLIN, R. Analysis and interpretation of long term light-trap data for *Helicoverpa punctigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia: population changes and forecasting pest pressure. **Bulletin of Entomological Research**, v.86, p.547-557, 1996.
- MATTHEWS, M. Heliothine Moths of Australia: A guide to Pest Bollworms and Related Noctuid Groups. **CSIRO**, Melbourne, p.201, 1999.
- MAYWALD, G. F.; SUTHERST, R. W. Users Guide to CLIMEX a Computer Program for Comparing Climates in Ecology. Second edition, **CSIRO** Australia, Division of Entomology Report No. 35, p.121, 1991.
- MOHANDASS, S.; ZALUCKI, M. P. DBM development: are we measuring the right temperatures?. *In: The management of Diamondback Moth and other crucifer pests*, **The Regional Institute**, Melbourne, Australia, 2004.
- MURRAY, D. A. H. Investigations into the development and survival of *Heliothis* spp. in south-east Queensland. **PhD Thesis**. The University of Queensland, p.187, 1991 1991
- OERTEL, A.; ZALUCKI, M. P.; MAELZER, D. M.; FITT, G. P.; SUTHERST, R. Size of the first spring generation of *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) and winter rain in central Australia. **Australian Journal of Entomology**, v.38, p.99-103, 1999.
- PETERSON, A. T. Predicting the geography of species invasion via ecological niche modeling. **The Quarterly Review of Biology**, v.78, p.419-433, 2003.

QAYYUM, A.; ZALUCKI, M. P. The effects of high temperatures on survival of eggs of *Heliothis armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of the Australian Entomological Society**, v.26, p.295-298, 1987.

ROCHESTER, W. A.; ZALUCKI, M. P.; WARD, A.; MILES, M.; MURRAY, D. A. H. Testing insect movement theory: empirical analysis of pest data routinely collected from agricultural crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.35, p.139-149, 2002.

ROCHESTER, W. A.; ZALUCKI, M. P. Measuring the impacts of *Helicoverpa armigera* migration on pest management during summer and autumn. In: **Pest Management - Future Challenges**, Vols 1 and 2, Proceedings. 6th Australasian Applied Entomological Research Conference, Brisbane Australia, (A94-A98), 1998.

SIEBERT, S.; DOLL, P.; HOOGEVEEN, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; FEICK, S. Development and validation of the global map of irrigation areas. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.9, p.535-547, 2005.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F. A climate model of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae): Implications for invasion of new regions, particularly Oceania. **Environmental Entomology**, v.34, p.317-335, 2005.

SUTHERST, R. W.; FLOYD, R. B.; MAYWALD, G. F. The potential geographic distribution of the cane toad, *Bufo marinus* L. in Australia. **Conservation Biology**, v.9, p.294-299, 1995.

THUILLER, W. BIOMOD - optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. **Global Change Biology**, v.9, p.1353-62, 2003.

WALDEN, K. J. Insect migration in an arid continent. III. The Australian Plague Locust *Chortoicetes terminifera* and the Native Budworm *Helicoverpa punctigera* in Western Australia. In: DRAKE, V. A. & GATEHOUSE, A. G. (eds.) **Insect migration: tracking resources through time and space**. Cambridge University Press, 1995.

WARDAUGH, K. G.; ROOM, P. M.; GREENUP, L. R. The incidence of *Heliothis armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae) on cotton and other host-plants in the Namoi Valley of New South Wales. **Bulletin of Entomological Research**, v.70, p.113-131, 1980.

YONOW, T.; SUTHERST, R. W. The geographical distribution of the Queensland fruit fly, *Bactrocera* (Dacus) *tryoni*, in relation to climate. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.49, p.935-953, 1998.

YONOW, T.; KRITICOS, D. J.; OTA, N.; VAN DEN BERG, J.; HUTCHISON, W. D. The potential global distribution of *Chilo partellus*, including consideration of irrigation and cropping patterns. **Journal of Pest Science**, v.90, p.459-477, 2017.

ZALUCKI, M. P.; VAN KLINKEN, R. D. Predicting population dynamics and abundance of introduced biological agents: science or gazing into crystal balls. **Australian Journal of Entomology**, v.45, p. 330-343, 2006.

ZALUCKI, M. P.; ADAMSON, D.; FURLONG, M. J. The future of IPM: whither or wither? **Australian Journal of Entomology**, v.48, p.85-96. 2009.

ZALUCKI, M. P.; DAGLISH, G.; FIREMPONG, S.; TWINE, P. The biology and ecology of *Heliothis armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia: what do we know? **Australian Journal of Zoology**, v.34, p.779-814, 1986.

ZALUCKI, M. P.; FURLONG, M. J. Forecasting *Helicoverpa* populations in Australia: a comparison of regression based models and a bio-climatic based modelling approach. **Insect Science**, v.12, p.45-56, 2005.

ZALUCKI, M. P.; GREGG, P. C.; FITT, G. P.; MURRAY, D. A. H.; TWINE, P. H.; JONES, C. Ecology of *Helicoverpa armigera* (Hübner) and *H. punctigera* in the inland areas of eastern Australia: larval sampling and host plant relationships during winter/spring. **Australian Journal of Zoology**, v.42, p.329-346, 1994.

3 DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL ATUAL E FUTURA DE *Helicoverpa punctigera* (WALLENGREN) (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE)

RESUMO

Helicoverpa punctigera (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae), a lagarta-nativa-dos-botões, é uma importante praga, altamente polífaga que causa sérios danos em uma ampla variedade de plantações na Austrália. Seu alcance se sobrepõe à da sua congênere, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae), uma praga invasora notória em todo o mundo. Foi utilizado o CLIMEX, um software de modelagem de nicho bioclimático, para estimar a distribuição geográfica potencial de *H. punctigera* no clima atual e cenários futuros (cenário A1B). Sob as condições climáticas atuais e futuras, o modelo indica que *H. punctigera* pode se estabelecer em todos os trópicos e subtropicais. A comparação das distribuições potenciais em cada cenário climático revelou que, no futuro, sua distribuição potencial provavelmente mudará para os polos e para altitudes mais elevadas, em áreas que atualmente são muito frias, conforme observado no Sul do Brasil, Europa, América do Norte, Sudeste Asiático, e Ilhas do Pacífico Sul, incluindo a Nova Zelândia. A distribuição potencial projetada pode informar as estratégias de biossegurança pré e pós-fronteira para o manejo dessa praga em cada país.

Palavras-chave: CLIMEX; invasão biológica; praga agrícola; modelo ecológico.

ABSTRACT

Helicoverpa punctigera (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae), the native budworm, is an important highly-polyphagous pest that has caused serious damage on a wide variety of crops in Australia. In Australia, its range overlaps that of its congener, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae), a notorious invasive pest globally. We used CLIMEX, a bioclimatic niche modelling software package, to estimate the potential geographical distribution of *H. punctigera* under current and future climates (A1B scenario). Under both current and future climate conditions, the model indicates that *H. punctigera* could establish throughout the tropics and subtropics. Comparing the potential distributions under each climate scenario revealed that in the future its potential distribution is likely to shift poleward and into higher altitudes, into areas that are currently too cold as observed in the South of Brazil, Europe, North America, South East Asia, and South Pacific Islands including New Zealand. The projected potential distribution can inform pre- and post-border biosecurity strategies for the management of this pest in each country.

Keywords: CLIMEX; biological invasion; crop pest; ecological model.

1 INTRODUÇÃO

As invasões biológicas surgiram como uma característica proeminente da mudança global, com impactos substanciais nos habitat's naturais e dominados pelo homem, e são um dos maiores desafios ambientais enfrentados no século XXI (DUKES; MOONEY, 1999; LENZNER *et al.*, 2019). Identificar onde tais espécies podem potencialmente invadir é uma questão chave e crítica para o manejo eficaz dos riscos de biossegurança e populações de pragas em potencial (BAKER *et al.*, 2000; KRITICOS *et al.*, 2013; SUTHERST, 2014).

Discussões recentes sobre gerenciamento de risco de biossegurança têm focado a atenção nas questões de como gerenciar essas ameaças. Uma visão geral sinótica de uma invasão potencial o mais cedo possível é necessária para que o risco de introdução, estabelecimento e impacto possam ser avaliados e estratégias adequadas de longo prazo e grande escala formuladas em tempo hábil (KRITICOS *et al.*, 2013). As taxas de invasão de espécies têm se expandido para todos os continentes, isso se deve, em grande parte, ao aumento do comércio internacional (LEVINE; D'ANTONIO, 2003; WESTPHAL *et al.*, 2008; HULME, 2009) e às mudanças climáticas (MASTER; NORRGROVE, 2010).

Saber onde as pragas invasoras podem e não podem persistir permite identificar os ativos naturais e outros em risco sob os cenários climáticos atuais e futuros e, portanto, quais medidas de biossegurança podem ser justificadas por motivos econômicos ou outros (KRITICOS *et al.*, 2013).

Modelos baseados em condições ambientais de locais de ocorrência conhecida podem ser usados para identificar áreas potencialmente adequadas que podem ser colonizadas por populações não nativas da espécie (PETERSON, 2003), bem como avaliar distribuições potenciais em cenários climáticos futuros (KRITICOS *et al.*, 2003; STEPHENS *et al.*, 2007). A maioria dos modelos bioclimáticos usa os fatores ecológicos e climáticos conhecidos em seus habitat's nativos para estimar sua distribuição potencial em outros lugares (GULLAN; CRANSTON, 2014). Um software de modelagem bioclimática - CLIMEX permite aos usuários modelar a distribuição potencial de organismos com base no conhecimento de sua distribuição atual e qualquer informação sobre sua ecofisiologia e fenologia com respeito às mudanças climáticas e prever distribuição potencial, similaridade climática e fenologia sazonal (KRITICOS *et al.*, 2015a). O CLIMEX pode ser executado em dois modos úteis diferentes: "Comparar locais", em que a resposta de uma espécie ao clima médio de longo prazo em locais diferentes, e "Combinar climas", para combinar ou comparar dados meteorológicos em locais diferentes (SUTHERST *et al.*, 2007).

A técnica de modelagem trabalha com a premissa de que, para persistir em um local, uma espécie precisa ser capaz de crescer o suficiente durante as estações favoráveis (SUTHERST *et al.*, 2007; KRITICOS *et al.*, 2015a). Os dados de distribuição indicam que uma espécie pode ter sido observada em um local, embora isso nem sempre signifique que foi capaz de persistir naquele local sem assistência artificial (por exemplo, irrigação ou casas-de-vegetação) (KRITICOS *et al.*, 2020) ou refluxo sazonal invasão via migração (ZALUCKI; FURLONG, 2011).

Helicoverpa punctigera (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) é uma espécie polífaga e economicamente importante na Austrália (ZALUCKI *et al.*, 1986). É uma espécie-praga importante em uma ampla variedade de plantas, incluindo grandes culturas, hortícolas e flores (CUNNINGHAM; ZALUCKI, 2014). Na maioria das culturas, as larvas (lagartas) se alimentam das folhas, vagens em desenvolvimento e grãos. Em outras, como feijão e algodão, as larvas recém-eclodidas infestam as estruturas reprodutivas. Essa ampla dieta demonstra por que *H. punctigera* é uma praga em diversos sistemas de cultivo e não apenas de algumas culturas específicas (ZALUCKI *et al.*, 1986). A espécie *H. punctigera* está bem adaptada aos habitat's considerados incertos da Austrália Central, incluindo desertos arenosos, planícies aluviais e mulga, onde se reproduz no inverno nas regiões áridas do interior com chuvas localizadas (GREGG, 1993, 1995a; GREGG *et al.*, 1995b; GREGG *et al.*, 2019).

Em 2015, um inseto com características morfológicas semelhantes a de *H. punctigera* foi encontrado na região Noroeste do Estado do Ceará, Brasil (EMBRAPA, 2015). A suspeita de invasão por *H. punctigera* causou grande preocupação aos agricultores brasileiros, principalmente produtores de soja e de algodão que já haviam presenciado a invasão de *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) em 2013 e que causou prejuízos na ordem de U\$ 2 bilhões no primeiro ano de detecção (CZEPAK *et al.*, 2013). O espécime coletado foi então identificado pelo Dr. Alexandre Specht e não se tratava de *H. punctigera* (CZEPAK, 2019, informações pessoais). No entanto, esse evento alertou as autoridades fitossanitárias brasileiras para o risco de estabelecimento de *H. punctigera* no Brasil.

Nos dias atuais, isto é, no ano de 2021, *H. punctigera* está geograficamente restrita à Oceania, mas esse cenário poderá mudar em um futuro devido ao aumento do comércio internacional e do aquecimento global. Assim, é bem provável que as mudanças climáticas alterem a distribuição potencial de *H. punctigera* em comparação com o cenário atual. Conhecendo a direção dessa mudança e a sensibilidade relativa da distribuição potencial de *H. punctigera* aos diferentes cenários pode-se avaliar as prováveis mudanças no risco de

invasão representado por esta espécie. Assim, o estudo foi realizado com os seguintes objetivos: 1) Projetar a distribuição potencial global, a abundância relativa e o risco de estabelecimento de *H. punctigera* e, 2) avaliar a distribuição potencial em cenários climáticos futuros.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Um modelo de nicho bioclimático da distribuição potencial de *H. punctigera* sob clima atual e futuro foi desenvolvido usando CLIMEX (SUTHERST; MAYWALD, 1985; KRITICOS *et al.*, 2015a). CLIMEX trabalha com base em um modelo de crescimento ecofisiológico que assume que em cada local, uma população pode experimentar períodos favoráveis para o crescimento populacional e períodos desfavoráveis que impedem o crescimento (KRITICOS *et al.*, 2015a). A distribuição geográfica conhecida de uma espécie é usada para inferir parâmetros que descrevem sua resposta ao clima. A capacidade de verificar as estimativas de parâmetros entre esses diferentes domínios de conhecimento foi identificada como um ponto forte do CLIMEX, que fornece uma forma forte validação de modelo independente (KRITICOS *et al.*, 2020).

Um índice de crescimento anual (GI_A) descreve o potencial de crescimento populacional quando as condições climáticas são favoráveis, enquanto quatro índices de estresse (frio, úmido, quente e seca) e até quatro índices de estresse de interação (quente-úmido, frio-úmido, quente-seco e frio-seco) descrevem a probabilidade de a população sobreviver a condições desfavoráveis. O Índice de crescimento é escalado de 0 a 100 para descrever as condições que favorecem o crescimento de uma população.

Os cálculos semanais dos índices de crescimento e de estresse são combinados em um índice anual geral de adequação climática, o índice ecoclimático (EI), que é escalado de 0 a 100. Este índice fornece uma medida geral da adequação climática de um determinado local para apoiar uma população permanente da espécie (SUTHERST *et al.*, 2007).

Para o nível adequado potencial, as seguintes categorias de EI foram adotadas com base nos valores de EI observados na faixa nativa de *H. punctigera*: Locais com EI= 0 (inadequado), $1 < EI < 10$ (marginal), $10 < EI < 20$ (moderado) e > 20 EI (altamente favorável).

2.1 Fenologia sazonal

Os padrões sazonais de fenologia para *H. punctigera* na Austrália foram obtidos de Maelzer *et al.* (1996), Walden (1995) e conjuntos de dados não publicados. Houveram oito séries relativamente longas de capturas de *H. punctigera* por armadilhas luminosas,

identificadas como Myall Vale (= Narrabri) e Trangie em New South Wales (NSW), Turretfield in South Australia (SA), Emerald (QLD), Horsham e Hamilton (VIC) e Ord River e Prenti Downs (WA).

Os dados de todos os locais são compostos por totais semanais. Para Narrabri, os dados foram obtidos para os anos de 1973-77 e 1981 a 1987. Dados para Trangie foram obtidos para os anos de 1973 a 1984. Dados para Horsham e Hamilton foram obtidos para os anos de 1980 a 1985 e para Turretfield nos anos 1962 a 1984. Os dados para Ord River de 1965 a 1970 e para Prent Downs datam de 1991 (WALDEN, 1995).

2.2 Banco de dados meteorológicos e mudanças climáticas

Os dados climáticos históricos foram obtidos a partir do conjunto de dados de resolução CliMond 10' para 1950-2000 representado pela temperatura média mínima mensal (T_{\min}), temperatura média mensal máxima (T_{\max}), precipitação média mensal (P_{total}) e umidade relativa às 09h00min (RH 09:00) e 15h00min (RH 15:00) (KRITICOS *et al.*, 2012). Essas mesmas variáveis foram utilizadas para caracterizar o clima potencial futuro em 2100, com base no CSIRO-Mk 3.0 (CS) um dos Modelos Climáticos Globais (GCMs.), que assume aumento de 2,8°C e uma redução da precipitação média em 2100 com o cenário A1B (IPCC, 2007).

O cenário descreve um mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, baixo crescimento populacional e mostra uma tendência crescente nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2050 e tendência decrescente até 2100 (IPCC, 2007).

2.3 Ajuste, verificação e validação do modelo

O conjunto de parâmetros CLIMEX para *H. punctigera* desenvolvido por Zalucki & Fulong (2005) foi tomado como ponto de partida durante a construção do novo modelo. *H. punctigera* é endêmica para Austrália e seus registros de distribuição indicam que é amplamente encontrada em todo país, mesmo em regiões xéricas (ZALUCKI *et al.*, 1986; ZALUCKI *et al.*, 1994; GREGG *et al.*, 2019). Fatores modificadores do clima, como a irrigação, podem desempenhar um papel importante na extensão da gama de espécies além dos limites proporcionados pelo clima (DE VILLIERS *et al.*, 2016). Portanto, hipotetizou-se que a persistência de *H. punctigera* nessas regiões secas pode ser atribuída, em parte, as práticas de irrigação ou eventos incomuns de chuva localizada. Portanto, incluí-se um cenário de irrigação para simular essas condições e fornecer melhor ajuste do modelo.

O modelo foi ajustado usando dados de distribuição e parâmetros derivados de fenologias observadas de acordo com as informações publicadas de Zalucki & Fulong (2005), bem como observações fenológicas feitas por meio da amostragem por Maelzer *et al.* (1996) na Austrália.

2.4 Índice de temperatura

O limite inferior de temperature (DV0) foi fixada em 11°C de acordo com Qayyum & Zalucki (1987). As temperaturas ideais inferiores e superiores para o desenvolvimento (DV1 e DV2) foram estimadas em 25 e 30°C, respectivamente, de modo que a fenologia de crescimento das mariposas está de acordo com as observações de campo de forte crescimento populacional (Tabela 1). A temperatura máxima de desenvolvimento (DV3) foi fixada em 40°C, de acordo com observações em Qayyum & Zalucki (1987) de que a mortalidade dos ovos aumentou significativamente acima deste limite de temperatura.

Tabela 1. Parâmetros CLIMEX definidos para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae). Os valores foram ajustados para melhor adequação às ocorrências da espécie na Austrália

Variáveis		Valores	Fonte
Parâmetros de temperatura			
DV0	Limite inferior de temperature	11°C	Daglish (1991) e estimativa da distribuição geográfica ajustada na Austrália
DV1	Temperatura inferior ótima	25°C	
DV2	Tempratura superior ótima	30°C	
DV3	Limite superior de temperature	40°C	
PDD	Graus-dias para completar 1 geração	500	
Parâmetros de umidade			
SM0	Limite inferior de umidade de solo	0,11	Zalucki; Furlong (2005)
SM1	Temperatura inferior ótima de umidade de solo	0,6	
SM2	Umidade ótima de solo superior	1	
SM3	Limite superior de umidade de solo	1,2	
Estresse por calor			
THSS	Limite de estresse por calor	40°C	Estimativa da distribuição geográfica ajustada na Austrália e Qayyum; Zalucki (1987).
THHS	Razão de estresse por calor	0,01 semana ⁻¹	
Estresse por frio			
TTCS	Limite de estresse por frio	4°C	Zalucki; Furlong (2005)
THCS	Razão de estresse por frio	-	
DTCS	Limite de graus-dias	10°C	
DHCS	Acumulação de razão de estresse	0,001 semana ⁻¹	
Estresse por seca			
SMDS	Limite de estresse por seca	0,1	Estimativa da distribuição geográfica ajustada na Austrália & Zalucki; Furlong (2005)
HDS	Razão do estresse por seca	0,025 semana ⁻¹	
Estresse por umidade			
SMWS	Limite de estresse por umidade	1.2	Zalucki; Furlong (2005)
HWS	Razão de estresse por umidade	0,002 semana ⁻¹	
Parâmetros de diapausa			
DPD0	Diapausa induzida pelo comprimento do dia	11 h	Estimativa da distribuição geográfica ajustada na Austrália & Murray (1991)
DPT0	Temperatura de indução a diapausa	19°C	
DPT1	Temperatura de terminação a diapausa	12°C	
DPD	Mínimo de dias na diapausa	-69	
DPSW	Indicador de diapausa de verão ou inverno	0 (inverno)	

2.5 Índice de umidade

O parâmetro limite de baixa umidade SM0 foi definido como 0,11, de acordo com o ponto de murcha permanente observado para as plantas hospedeiras (KRITICOS *et al.*, 2015a) (Tabela 1). Abaixo desse nível é improvável que as plantas hospedeiras sejam capazes de suportar o crescimento populacional de insetos.

2.6 Soma Mínima de Calor Anual

População graus-dia (PDD) representa o número total de graus-dia acima de DV0 necessário para completar uma geração inteira. Isso foi definido para 500°C dias de acordo com Darglish (1991) (Tabela 1).

2.7 Índices de estresse

No CLIMEX, os índices de estresse capturam a resposta da espécie-praga às condições climáticas desfavoráveis (KRITICOS *et al.*, 2015a). Existem quatro tipos de estresse: CS (estresse por frio), HS (estresse por calor), DS (estresse por seca) e WS (estresse por umidade) e, um conjunto adicional de quatro estresses de interação (frio-úmido, frio-seco, quente-seca e quente-úmida).

O estresse por frio começa a se acumular quando as temperaturas se situam abaixo do limite de temperatura de estresse por frio (TTCS) (4°C). O mecanismo de estresse por frio de graus-dia (DTCS) fornece uma limitação sob condições frias, onde as temperaturas máximas diárias são insuficientes para a realização da fotossíntese pela planta hospedeira e a alimentação de *H. punctigera* para compensar as perdas respiratórias da taxa de base metabólica. No modelo ajustado, foram definidos o DTCS em 10 graus-dia e o graus-dia de estresse pelo frio (DHCS) em -0,001 semana⁻¹.

Quando a temperatura é superior ao limite de temperatura de estresse térmico (TTHS; °C), esse estresse começa a se acumular a uma taxa determinada por THHS. Com o aumento da temperatura, a taxa de eclosão de ovos de *H. punctigera* aumentou, enquanto o tempo necessário para a eclosão diminuiu. Ovos de *H. punctigera* não eclodiram quando expostos a 30°C continuamente, mas os ovos podem sobreviver a uma breve exposição à temperatura de 40°C (QAYYUM; ZALUCKI, 1983). Com base nessas informações, TTHS e THHS, foram definidos para 40°C e 0,01 semana⁻¹, respectivamente.

O estresse por seca se acumula quando a umidade do solo permanece abaixo do limite de estresse seco (SMDS) em uma taxa de estresse por seca (HDS). Esse estresse por seca foi calibrado definindo SM0 para 0,1 e ajustando a taxa de acumulação de estresse (HDS)

para $-0,025$ semana⁻¹, dificilmente permitindo a persistência (um valor EI positivo) nos locais mais secos considerados capazes de manter populações persistentes de *H. punctigera*.

O estresse úmido se acumula a uma taxa (HWS) quando a umidade do solo excede o limite de estresse úmido (SMWS). Os parâmetros de estresse úmido foram ajustados à distribuição geográfica na Austrália. De acordo com Kriticos *et al.* (2003), os limiares de estresse não devem ser definidos dentro dos limites de crescimento então o SMDS de limiar de estresse molhado foi ajustado para cima visando corresponder ao SM3.

2.8 Diapausa

Helicoverpa punctigera exhibe diapausa facultativa na fase de pupa que é regulada pela temperatura e fotoperíodo (CULLEN; BROWING, 1978). Indivíduos que entram em diapausa por meio de uma estratégia adaptativa para ‘abrir mão’ de oportunidades de crescimento como uma “troca” para proteção contra temperaturas extremamente altas ou baixas que seriam letais (TAUBER *et al.*, 1986).

Em geral, as pupas que entram em diapausa no outono permanecem em diapausa durante o inverno para produzir adultos na primavera; porém aquelas que entram em diapausa na primavera encontram altas temperaturas do solo que encerram a diapausa (CULLEN; BROWING, 1978).

Na versão do CLIMEX, apenas um mecanismo de diapausa pode ser executado por vez. Assim, neste modelo notou-se que os limites de frio foram os mais importantes para projetar o alcance potencial de *H. punctigera*.

Os parâmetros de diapausa DPD0 (duração do dia de indução de diapausa) e DPT0 (temperatura de indução de diapausa) foram ajustados para 11h e 19°C, respectivamente. DPT1 é a temperatura mínima de diapausa que leva ao término da diapausa após o número mínimo de dias em diapausa (DPD) ter sido completado (Tabela 1). Esses valores foram fixados em 12°C e 69 dias, respectivamente. DPSW é um indicador da estação de diapausa e foi definido como zero (= inverno).

2.9 Irrigação e mapa de risco composto

Helicoverpa punctigera é encontrada em áreas que, em condições médias de chuva natural, são muito áridas para suportar o crescimento suficiente da cultura/planta e, portanto, a sobrevivência das populações de *H. punctigera* durante todo o ano. Utilizou-se os métodos descritos em De Villiers *et al.* (2016) e Yonow *et al.* (2016) para aplicar um cenário de irrigação de 2,5 mm dia⁻¹ ao longo do ano como complemento, um cenário moderado para

produzir um mapa de risco contingente à irrigação sendo praticada na célula 10' de acordo com o mapa global de irrigação, produzindo um mapa composto de risco de irrigação/chuva natural. A área sobre a qual a irrigação é praticada foi identificada usando o Global Irrigated Area V5 (GMIA5) desenvolvido por Siebert *et al.* (2005) para produzir um mapa composto, compreendendo áreas irrigadas e não irrigadas, para mostrar a adequação global projetada para *H. punctigera*.

Os cenários de diapausa e de irrigação foram combinados em um conjunto totalmente fatorial de cenários onde as áreas com sistema de irrigação identificado de acordo com Siebert *et al.* (2005) foram consideradas lâmina média de $2,5 \text{ mm dia}^{-1}$, que representa a quantidade média para irrigação de cobertura, enquanto que nas áreas não mapeadas foram consideradas somente como um quadro de chuva normal. Dentro dos cenários de irrigação, os resultados dos modelos com e sem diapausa foram combinados, tomando o valor máximo de EI para cada célula, raciocinando que o alelo mais adaptado ao clima dentro de cada célula predominaria nessas regiões (Figura 1).

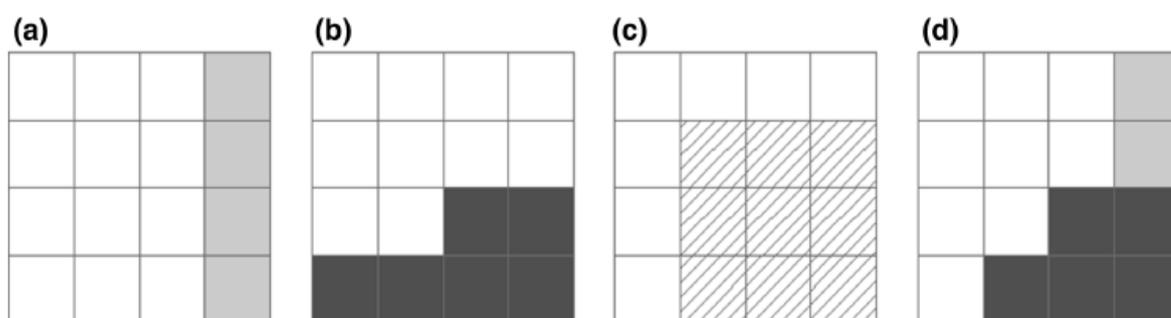


Figura 1. **a.** Áreas sombreadas são favoráveis para um cenário de chuva natural; **b.** áreas sombreadas são favoráveis em um cenário de irrigação; **c.** áreas com ranhuras são as áreas de irrigação identificadas por Siebert *et al.* (2005); **d.** mapa composto de valores máximos de EI usando áreas sombreadas em ambos **a.** e **b.** considerando as áreas de irrigação em **c.**

3 RESULTADOS

Em uma escala global, as condições climáticas foram adequadas para *H. punctigera* em grande parte dos trópicos e subtropicais, com exceção das áreas desérticas onde o estresse seco excessivo ou estresse térmico limitam sua distribuição, no entanto, a irrigação permitiria a espécie persistir (Figura 2). O Índice de Crescimento Anual (GI_A) ilustra áreas que são climaticamente adequadas para pelo menos uma geração (Figura 2). Com a agricultura irrigada, muitas partes da América do Sul, América Central, África Subsariana, sudeste dos Estados Unidos, Madagascar, o subcontinente indiano e a maior parte das Ilhas do Pacífico; parecem climaticamente adequados para que *H. punctigera* se estabeleça e possa se

espalhar para outras regiões quando o clima ou as temperaturas forem favoráveis para o seu desenvolvimento (Figura 2).

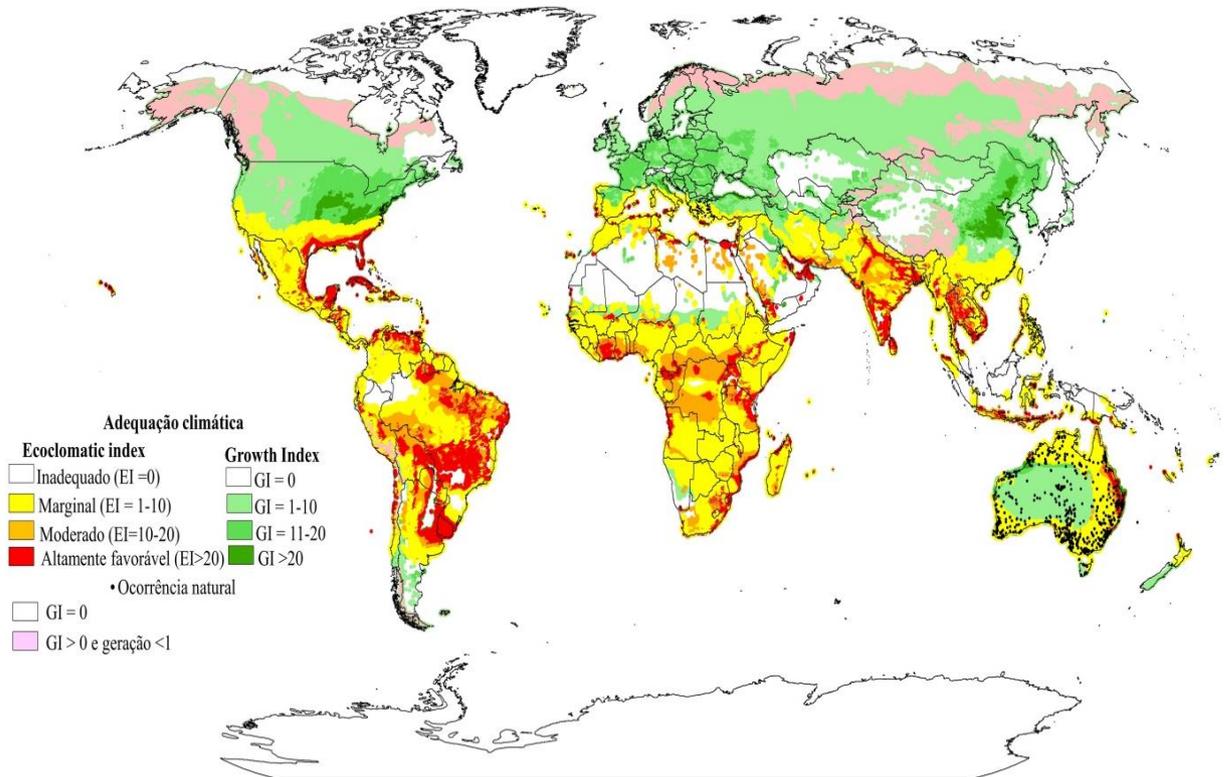


Figura 2. Adequação climática para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) modelado globalmente usando CLIMEX, incluindo efeitos espacialmente explícitos da irrigação. O Índice Ecoclimático (EI) descreve a adequação potencial para persistência, enquanto o Índice de crescimento (GI) descreve a adequação para o crescimento populacional de populações efêmeras. As localizações dos pontos indicam a ocorrência natural.

As condições climáticas foram mais adequadas durante os meses mais quentes do ano. No Hemisfério Sul, este período é entre setembro/outubro até fevereiro/março, enquanto no Hemisfério Norte, os meses adequados são abril/maio até setembro/outubro.

Os valores de diferença entre os valores EI do "cenário de mudanças climáticas futuro" e do "cenário atual" são apresentados na Figura 3. Áreas em vermelho indicam que, em comparação com o clima atual, os valores EI mostram mudanças positivas no clima futuro (Figura 3), enquanto áreas em azul indicam que, em comparação com o clima atual, os valores de EI reduzem no futuro.

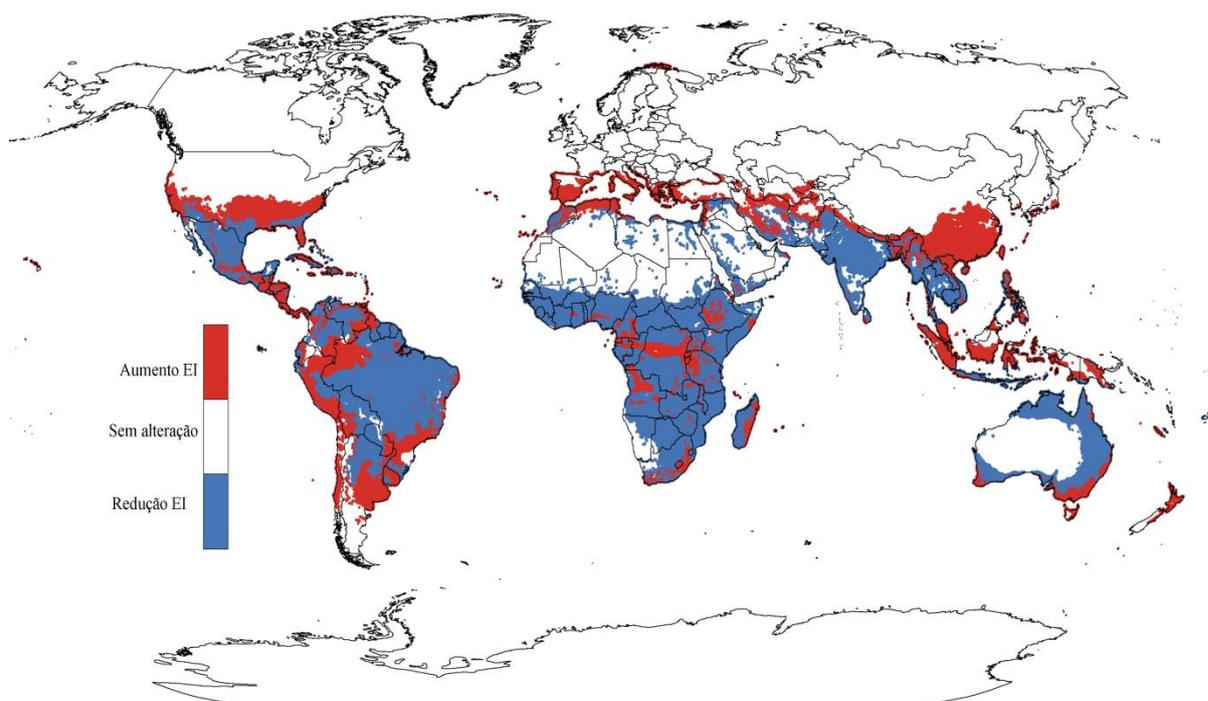


Figura 3. Impacto das mudanças climáticas na distribuição potencial de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) no cenário A1B. As mudanças globais de adequação [diferença do índice ecológico (EI)] em 2100 são comparadas com a condição histórica (1950-2000). A graduação de cores nas diferentes regiões demonstra a sensibilidade às mudanças climáticas. A cor vermelha representa EI positiva; enquanto a cor azul representa EI negativa.

No geral, o impacto do cenário climático futuro na distribuição potencial de *H. punctigera* é de que seu alcance expandirá para os polos e em altitudes mais elevadas; basicamente, em áreas que são atualmente muito frias (Figura 3). A extensão geográfica projetada de climas favoráveis para *H. punctigera* nos cenários climáticos futuros examinados indica aumento substancial na Europa, EUA, Sudeste Asiático e Ilhas do Pacífico Sul, incluindo Nova Zelândia (Figura 3). Na Europa, o alcance potencial para *H. punctigera* é projetado para expandir em direção ao Norte, com condições climáticas adequadas ou marginais ocorrendo em grande parte da Espanha, Portugal e Itália (Figura 3). Na Ásia, a faixa potencial projetada para *H. punctigera* também se expande em direção aos polos, embora as condições projetadas no Sudeste Asiático diminuam, devido ao aumento do estresse por seca na Nova Guiné, Mianmar e Tailândia. Na China, o alcance ideal para a invasão de *H. punctigera* é projetado para se estender para as áreas do Nordeste (Figura 3).

Na América do Sul, as áreas climaticamente ideais para estabelecimento de *H. punctigera* no clima atual são restritas às áreas fora da Bacia Amazônica, principalmente ao longo da Costa Leste da América do Sul na região Nordeste do Brasil, Nordeste da Argentina

e no interior do Paraguai (Figura 3). Apesar do aumento das áreas citadas é necessário ressaltar que áreas antes favoráveis, como a Bacia Amazônica, Índia e interior da Austrália serão menos propícias para o desenvolvimento de *H. punctigera*, uma vez que as projeções apontam um clima mais seco e, conseqüentemente, menos adequado para a ameaça de invasão de *H. punctigera* em termos de EI sobre 2100 (Figura 3).

3.1 Risco de estabelecimento na América do Sul

O GI_A descreve o potencial geral de crescimento e dá uma indicação do tamanho potencial ou abundância relativa de uma espécie em sua distribuição, conforme determinado apenas pelo clima (KRITICOS *et al.*, 2015a).

Os resultados do modelo indicam que a maioria dos países da América do Sul apresentam áreas com condições climáticas altamente adequadas ($GI > 20$) para *H. punctigera*, pelo menos sazonalmente (Figura 4 e Figura A - Anexo D).

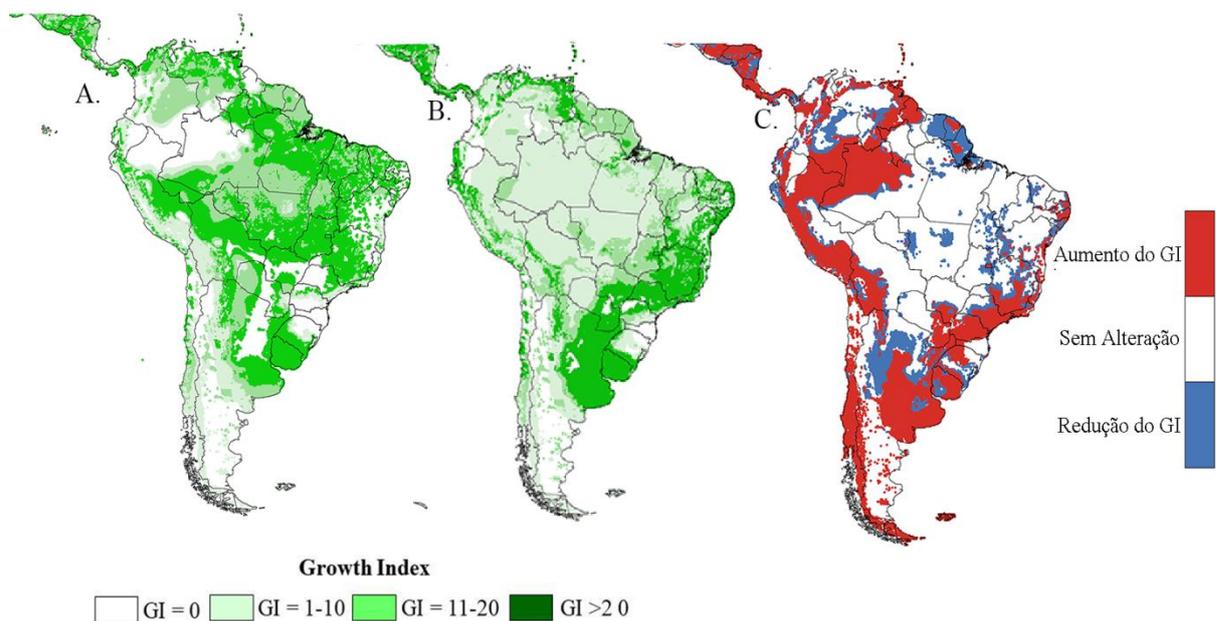


Figura 4. Índice de crescimento anual (GI_A) para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) na América do Sul, para **A.** cenário atual, **B.** cenário 2100, **C.** diferença de GI_A entre o cenário atual (1950-2000) e 2100, levando em consideração padrões de irrigação e diapausa.

Na maioria dos países da América do Sul, o cenário climático futuro projeta redução progressiva nas áreas com índice de crescimento anual de *H. punctigera* até 2100 em comparação com a situação atual (Figura 4). O índice de crescimento para *H. punctigera* reduzirá progressivamente em cada período de tempo projetado. Na América do Sul, entre os

dias atuais e em 2100, as áreas com índice de crescimento alto ($20 < GI < 100$) e menos adequado ($0 < GI < 20$) para *H. punctigera* diminuirão.

Os parâmetros de estresse mais sensíveis que influenciam o intervalo modelado de *H. punctigera* são estresse por seca (Figura 5 e Figura B - Anexo I) e, em um menor grau de importância, estresse por frio (Figura 6 e Figura C - ANEXO 1).

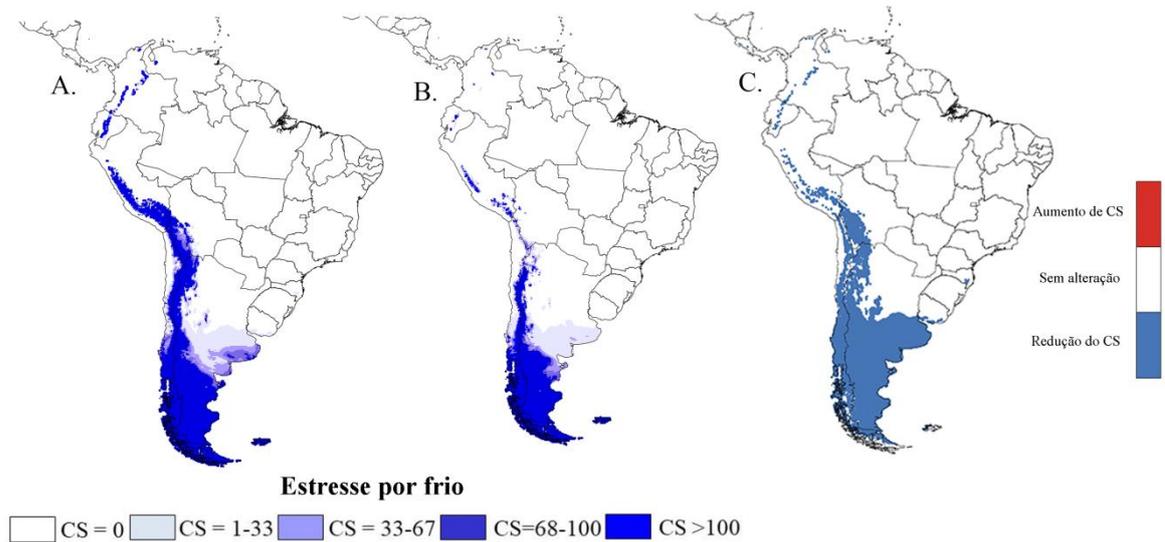


Figura 5. Índice de estresse por frio para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) projetado usando CLIMEX sob CS GCM executando o cenário A1B para **A.** cenário atual, **B.** 2100 e **C.** diferença entre cenário atual e 2100, para a América do Sul.

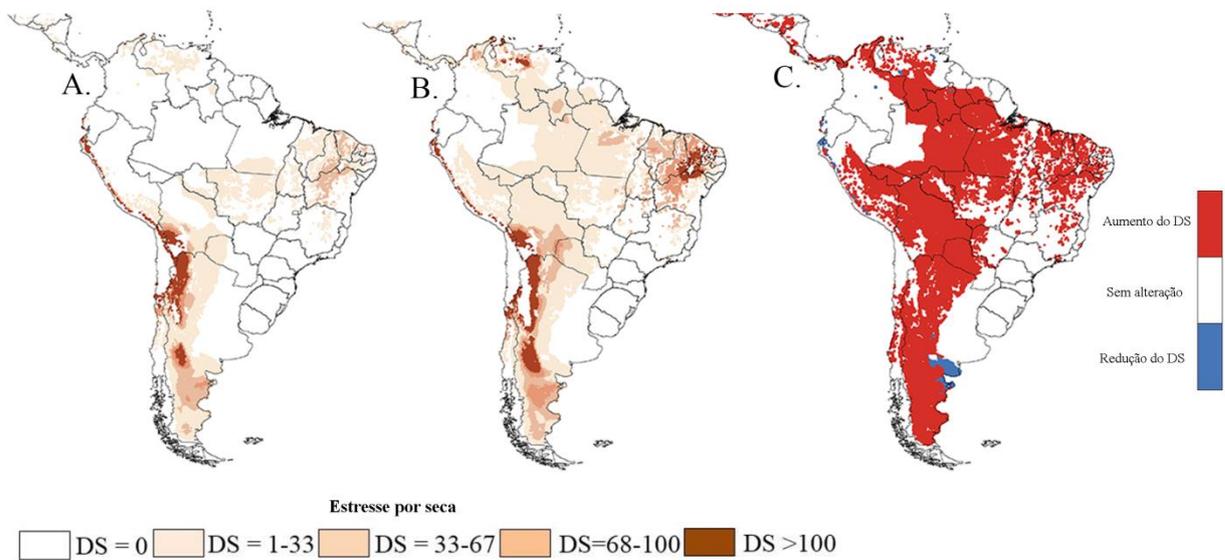


Figura 6. Índice de estresse por seca para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) projetado usando CLIMEX sob CS GCM executando o cenário A1B para **A.** atual, **B.** 2100 e **C.** diferença entre cenário atual e 2100, para a América do Sul.

Os índices de estresses representam até que ponto cada fator impede a sobrevivência da espécie. Neste caso, o mapa de estresse por frio (Figura 5) destaca os locais em que as condições de frio limitam a capacidade da espécie de sobreviver ao inverno; valores de 100 (indicados por tons de azul muito escuro) indicam condições letais de estresse pelo frio.

Os cenários climáticos futuros da A1B indicam que o estresse por seca provavelmente restringirá *H. punctigera* em algumas áreas (Figura 6). Na maioria dos países da América do Sul, a projeção é de aumento progressivo do estresse por seca para *H. punctigera*. Consequentemente, isso leva a diminuição progressiva das áreas adequadas para *H. punctigera* (Figura 6). No Norte do Brasil, o cenário futuro inclui a diminuição da chuva e, portanto, a diminuição da umidade do solo, o que afetará o estresse por seca (Figura 6); da mesma forma, a região Central e o Nordeste do Brasil se tornarão progressivamente mais secos e menos adequados para as plantas hospedeiras e, consequentemente para a mariposa.

4 DISCUSSÃO

Os resultados do modelo CLIMEX concordam estreitamente com a faixa geográfica conhecida de *H. punctigera* na Austrália, onde extensa amostragem indica que esta espécie está espalhada por todo o país, pelo menos sazonalmente. Embora o mapa sugira um limite estático, na realidade, a fronteira entre a área adequada para o estabelecimento e populações efêmeras será dinâmica, respondendo à variação anual do clima.

O modelo CLIMEX apresentou desempenho satisfatório, dando sensibilidade acerca da relação dos registros de distribuição qualificados e conhecidos. O modelo CLIMEX anterior proposto por Zalucki & Furlong (2005) realizou a modelagem Climex com *H. armigera* e *H. punctigera*, uma vez que ambas ocorrem nas mesmas área, porem apesar de possuir muitos hospedeiros em comuns a poulacao de *H. armigera* fica mais restrita a região litorânea, porem o modelo de Zalucki & Furlong (2005) indicou valor EI positivo para grandes áreas de habitat árido e semi-árido na Austrália Central, onde o clima só é somente adequado para *H. punctigera* durante temporadas e anos favoráveis, devido à ocorrência de hospedeiros alternativos durante a estação chuvosa (GREGG *et al.*, 2019). Visando aprimorar o entendimento e predição o modelo desenvolvido incorporou o uso das informações de irrigação de Siebert *et al.* (2005), podendo assim captar o efeito da irrigação das culturas, bem como a precipitação irregular no suporte às populações de *H. punctigera* em regiões áridas (DE VILLIERS *et al.*, 2016; YONOW *et al.*, 2016).

Extensas pesquisas esclareceram a dinâmica sazonal de *H. punctigera* na Austrália, com populações ocorrendo em habitat's efêmeros, basicamente durante a estação chuvosa em áreas do interior com boas condições para plantas hospedeiras nativas em regiões sem cultivo, onde as fases larvais de *H. punctigera* foram registradas em 106 plantas de 24 famílias e persistentes em áreas agrícolas (GREGG *et al.*, 2018).

Dada sua notável capacidade migratória e curto tempo de desenvolvimento de uma geração, não é fácil prever a abundância e distribuição de *H. punctigera*, particularmente no interior da Austrália (GREGG *et al.*, 2001). Essas incertezas se combinam para limitar a capacidade de modelar a distribuição potencial de *H. punctigera* com maior precisão. O índice ecoclimático (IE) modelado sugere que *H. punctigera* poderia se estabelecer e se espalhar além de sua faixa atual para outras regiões do mundo se for introduzida. O modelo apresentado mostra alto grau de confiabilidade devido aos valores dos parâmetros usados que foram baseados em registro de distribuição realista de populações persistentes e efêmeras. A região da América do Norte, Central, Sul, África Central e Ásia são vulneráveis à invasão por *H. punctigera* nas atuais condições climáticas (Figura 2).

A distribuição de *H. punctigera* em outras regiões estará relacionada à presença de plantas hospedeiras alternativas como ocorre na Austrália, onde foram registradas larvas em Asteraceae anuais, como *Polycalymma stuartii*, *Senecio gregorii* e *Rhodanthe charsleyae*, Fabaceae, especialmente anuais, e algumas plantas de outras famílias, incluindo Geraniaceae, Goodeniaceae, Malvaceae e Solanaceae (Gregg *et al.*, 2018). Todas essas famílias de plantas são comumente encontradas em outras regiões do mundo. A tribo Senecioneae possui aproximadamente 3.500 espécies (NORDENSTAM *et al.*, 2009), das quais cerca de 500 ocorrem nas Américas e entre 350-500 na África (PELSER *et al.*, 2007; MATZENBACHER, 2009; MILTON, 2009).

As vias de introdução de *H. punctigera* nessas outras regiões pode ser o comércio internacional, por meio de viajantes com material vegetal infestado com ovos ou larvas, ou mesmo via migração das mariposas que são altamente migrantes (ZALUCKI *et al.*, 1986; ROCHESTER *et al.*, 1996; ZALUCKI; FURLONG, 2005). Além disso, *H. punctigera* mostra uma ecologia semelhante a *H. armigera* (ZALUCKI *et al.*, 1986) e, é provável que se for introduzida em outras áreas, como no Brasil e Argentina na América do Sul, seja capaz de se estabelecer, como aconteceu com *H. armigera* (CZEPAK *et al.*, 2013).

As mudanças climáticas têm implicações significativas para a avaliação de risco de pragas e biossegurança, uma vez que os intervalos de introdução tendem a mudar devido às mudanças nos padrões de temperatura, umidade e umidade do solo (SUTHERST *et al.*, 2007;

KRITICOS *et al.*, 2013). As discussões de modelagem bioclimática que exploram cenários de mudanças climáticas relatam aumento projetado na invasão de pragas exóticas (DUKES; MOONEY, 1999; BRADLEY, 2009; BRADLEY *et al.*, 2010; DUURSMA *et al.*, 2013). No entanto, encontrou-se o inverso para *H. punctigera* em algumas regiões do mundo. De acordo com o cenário climático para 2100, em quase todos os países da América Central e do Sul, África Subsaariana e Ásia, as condições climáticas, atualmente favoráveis para *H. punctigera*, serão menos adequados ou desfavoráveis. Esta redução está relacionada ao aumento do estresse por seca e redução do potencial de crescimento (Figura 4 e 5). O cenário de mudança climática para o ano de 2100 projeta maior expansão do estresse por seca do que por frio.

Outros fatores são importantes para o crescimento de *H. punctigera*, por exemplo a temperatura, que influencia a sobrevivência, o desenvolvimento, o desempenho reprodutivo, a dinâmica populacional e a distribuição (CHOWN; NICOLSON, 2004; CHOWN; TERBLANCHE, 2006; ANGILLETTA, 2009). Acima de 40°C e em baixas umidades (< 75%), os ovos de *H. punctigera* não eclodem (QAYYUM; ZALUCKI, 1987). O aumento do estresse por seca é o principal fator que restringe *H. punctigera* em cenários climáticos futuros (Figura 6). Isso pode ser devido a maior vulnerabilidade à desidratação durante a fase larval, uma vez que a cutícula das larvas é mais permeável em comparação com as pupas (ZALUCKI *et al.*, 1986; DA SILVA *et al.*, 2017).

As projeções de adequação modeladas para *H. punctigera* realizadas nesse trabalho apesar de seguirem uma metodologia bem definida e utilizado em vários trabalhos de modelagem ainda ignoram outras variáveis além das ambientais, como dispersão, interações entre as espécies (JARNEVICH *et al.*, 2015), competição por recursos (BAKER *et al.* 2000), fatores biofísicos como solo (SUTHERST *et al.*, 2007), diversidade genética (JARNEVICH *et al.*, 2015) e cobertura vegetal (CHEJARA *et al.*, 2010).

Em resumo, as mudanças climáticas futuras podem reduzir as áreas adequadas para *H. punctigera*, principalmente onde atualmente esta vem causando grandes perdas em lavouras agrícolas. Esta redução progressiva da área climaticamente adequada para *H. punctigera* é provocada por aumento no estresse por seca devido à diminuição das chuvas.

No geral, as abordagens de modelagem usadas indicam o risco de invasão de *H. punctigera* em diferentes países, mesmo em um cenário de mudança climática. Identificou-se que os principais fatores que limitam o crescimento de *H. punctigera* é o estresse por seca. Esta descoberta pode ser útil para os programas de manejo integrado de pragas, incluindo o uso de agentes de controle biológico em potencial (IRLANDA *et al.*, 2018) e compreensão dos hospedeiros nativos (GREGG *et al.*, 2019) que podem ser usados em conjunto com o

modelo aplicando assim o melhor método nos locais de maior risco ou nas margens desses locais para evitar propagação adicional.

5 CONCLUSÕES

O clima é o principal fator para regulação da abundância de insetos, apesar de não ser o único, é o que mais contribui para essa inferência. Nas condições climáticas atuais e futuras, o modelo sugere capacidade de *H. punctigera* em se estabelecer em todas regiões dos trópicos. Nos cenários de mudança climática devido ao aumento de temperatura ocorrerá mudança em direção aos polos e regiões de maiores altitudes, que atualmente são frias, como o Sul do Brasil, Europa, América do Norte, Sudeste Asiático e Ilhas do Pacífico Sul, incluindo a Nova Zelândia. Por fim, identificou-se que o principal fator limitante ao desenvolvimento da *H. punctigera* é o estresse por seca, pois elevados índices deste estresse contribuem para a redução da abundância desta praga no cenário atual e de mudanças climáticas futuras.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Peter Gregg, por fornecer informações sobre a ocorrência de *H. punctigera* na Austrália, à Noboru Ota, Ricardo Siqueira da Silva, Márcio Regys e Sharon Gomes pelo auxílio na análise com ArcMap. Esta pesquisa teve o apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) (88881.189410/2018-01), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia da Universidade Federal do Ceará (UFC) e da School of Biological Science da University of Queensland (UQ), Brisbane, Austrália. As simulações foram realizadas usando recursos computacionais da UQ e do Laboratório de Entomologia Aplicada (LEA) na UFC.

REFERÊNCIAS

- ANGILLETTA, M. J. Thermal adaptation: A theoretical and empirical synthesis. **Oxford University Press**, p.1-302, 2009.
- AUKEMA, J. E.; MCCULLOUGH, D. G.; VON HOLLE, B.; LIEBHOLD, A.M.; BRITTON, K.; FRANKEL, S. J. Historical accumulation of nonindigenous forest pests in the Continental United States. **Bioscience**, v.60, p.886-897, 2010.
- BAKER, R. H. A.; SANSFORD, C. E.; JARVIS, C. H.; CANNON, R. J. C.; MACLEOD, A.; WALTERS, K. F. A. The role of climatic mapping in predicting the potential geographical distribution of non-indigenous pests under current and future climates. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.82, p.57-71, 2000.
- BRADLEY, B. A. Regional analysis of the impacts of climate change on cheatgrass invasion shows potential risk and opportunity. **Global Change Biology**, v.15, p.196-208, 2009.
- BRADLEY, B. A.; WILCOVE, D. S.; OPPENHEIMER, M. J. B. I. Climate change increases risk of plant invasion in the Eastern United States. **Biological Invasions**, v.12, p.1855-1872, 2010.
- CHEJARA, V. K.; KRITICOS, D. J.; KRISTIENSEN, P.; SINDEL, B. M.; WHALLEY, R. D. B.; NADOLNY, C. The current and future potential geographical distribution of *Hyparrhenia hirta*. **Weed Research**, v.50, p.174-184, 2010.
- CHOWN, S.L.; NICOLSON, S. Insect physiological ecology: Mechanisms and patterns. **Oxford University Press**: p.1-254, 2004.
- CHOWN, S. L.; TERBLANCHE, J. S. Physiological diversity in insects: Ecological and evolutionary contexts. **Advances in Insect Physiology**, v.33, p.50-152, 2006.
- CULLEN J. M.; BROWNING, T. O. The influence of photoperiod and temperature on the induction of diapause in pupae of *Heliothis punctigera*. **Journal of Insect Physiology**, v.24, p.595-601, 1978.
- CUNNINGHAM, J. P.; ZALUCKI, M. P. Understanding *Heliothine* (Lepidoptera: Heliothinae) pests: What is a host plant? **Journal of Economic Entomology**, v.107, p.881-896, 2014.
- CZEPAK, C.; ALBERNAZ, K. C.; VIVAN, L. M.; GUIMARAES, H. O.; CARVALHAIS, T. First reported occurrence of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, p.110-113, 2013.
- DAGLISH, G. J. Influence of temperature on the development of *Helicoverpa armigera* (Hübner) and *H. punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae). **PhD Thesis**. The University of Queensland, 1991.
- DA SILVA, R. S.; KUMAR, L.; SHABANI, F.; PICANÇO, M. C. Potential risk levels of invasive *Neoleucinodes elegantalis* (small tomato borer) in areas optimal for open-field

Solanum lycopersicum (tomato) cultivation in the present and under predicted climate change. **Pest Management Science**, v.73, p.616-627, 2017.

DE VILLIERS, M.; HATTINGH, V.; KRITICOS, D. J.; BRUNEL, S.; VAYSSIÈRES, J. F.; SINZOGAN, A.; BILLAH, M. K.; MOHAMED, S. A.; MWATAWALA, M.; ABDELGADER, H.; SALAH, F. E. E.; DE MEYER, M. The potential distribution of *Bactrocera dorsalis*: considering phenology and irrigation patterns. **Bulletin of Entomological Research**, v.106, p.19-33, 2016.

DUKES, J. S.; MOONEY, H. A. Does global change increase the success of biological invaders? **Trends in Ecology & Evolution**, v.14, p.135-139, 1999.

DUURSMA, D. E.; GALLAGHER, R. V.; ROGER, E.; HUGHES, L.; DOWNEY, P. O.; LEISHMAN, M. R. Next-generation invaders? Hotspots for naturalised sleeper weeds in Australia under future climates. **PloS One**, v.8, e84222, 2013.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ameaças fitossanitárias para a cultura da soja na safra 2015/16. 2015.

GREGG, P. C. Pollen as a marker for migration of *Helicoverpa armigera* and *H. punctigera* (Lepidoptera: Noctuidae) from western Queensland. **Australian Journal of Ecology**, v.18, p.209-219, 1993.

GREGG, P. C. Migration of cotton pests: patterns and implications for management. *In*: Constable GA, Forrester NW (Eds) Challenging the future. proceedings of the first world cotton research conference. **CSIRO**, Canberra (Australia), p.423-433, 1995a.

GREGG, P. C.; DEL SOCORRO, A. P.; LE MOTTEE, K.; TANN, C. R.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P. Host plants and habitats of *Helicoverpa punctigera* and *H. armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in inland Australia. **Australian Entomology**, v.58, p.547-560, 2019.

GREGG, P. C.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P.; MURRAY, D. A. H. Insect migration in an arid continent. II *Helicoverpa* spp. in eastern Australia. *In*: DRAKE, V.A. (Ed.), Insect migration: tracking resources through space and time. **University Press** (Cambridge): 151-172, 1995b.

GULLAN, P. J.; CRANSTON, P. S. The Insects: An outline of entomology, 5th Edition. **Wiley-Blackwell Publisher**: p.1-584, 2014.

HULME, P. E. Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. **Journal of Applied Ecology**, v.46, p.10-18, 2009.

IPCC. Climate Change: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**, Cambridge, UK and New York, USA, 2007.

IRELAND, K. B.; BULMAN, L.; HOSKINS, A. J.; PINKARD, E. A.; MOHAMMED, C.; KRITICOS, D. J. Estimating the potential geographical range of *Sirex noctilio*: comparison with an existing model and relationship with field severity. **Biological Invasions**, v.20, p.2599-2622, 2018.

JARNEVICH, C. S.; STOHLGREN, T. J.; KUMAR, S.; MORISETTE, J.T. & HOLCOMBE, T. R. Caveats for correlative species distribution modeling. **Ecological Informatics**, v.29, p.6-15, 2015.

LENZNER, B.; LECLÈRE, D.; FRANKLIN, O.; SEEBENS, H.; ROURA-PASCUAL, N.; OBERSTEINER, M.; DULLINGER, S.; ESSL, F. A framework for global twenty-first century scenarios and models of biological invasions. **BioScience**, v.69, p.697-710, 2019.

KRITICOS, D. J.; DE BARRO, P. J.; YONOW, T.; OTA, N.; SUTHERST, R. W. The potential geographical distribution and phenology of *Bemisia tabaci* Middle East Asia Minor 1, considering irrigation and glasshouse production. **Bulletin of Entomological Research**, v.1, p.10, 2020.

KRITICOS, D. J.; LERICHE, A.; PALMER, D. J.; COOK, D. C.; BROCKERHOFF, E. G.; STEPHENS, A. E. A.; WATT, M. S. Linking climate suitability, spread rates and host-impact when estimating the potential costs of invasive pests. **PLoS One**, v.8, p.54861, 2013.

KRITICOS, D. J.; MAYWALD, G. F.; YONOW, T.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; SUTHERST, R.W. CLIMEX Version 4: Exploring the effects of climate on plants, animals and diseases. **CSIRO**, Canberra, Australia, p.1-184, 2015a.

KRITICOS, D. J.; OTA, N.; HUTCHISON, W. D.; BEDDOW, J.; WALSH, T.; TAY, W. T.; BORCHERT, D. M.; PAULA-MOREAS, S. V.; CZEPAK, C.; ZALUCKI, M. P. The potential distribution of invading *Helicoverpa armigera* in North America: Is it just a matter of time? **PLoS One**, v. 10, e0133224, 2015b.

KRITICOS, D. J.; RANDAL, R. P. A comparison of systems to analyse potential weed distributions. *In*: GROVES, R. H.; PANETTA, F. D.; VIRTUE, J. G. (Eds), Weed Risk Assessment. **CSIRO Publishing**, Melbourne, Australia, p.61-79, 2001.

KRITICOS, D. J.; SUTHERST, R. W.; BROWN, J. R.; ADKINS, S. W.; MAYWALD, G. F. Climate change and the potential distribution of an invasive alien plant: *Acacia nilotica* ssp. *indica* in Australia. **Journal of Applied Ecology**, v.40, p.111-124, 2003.

KRITICOS, D. J.; VENETTE, R. C.; BAKER, R. H. A.; BRUNEL, S.; KOCH, F. H.; RAFOSS, T.; VAN DER WERF, W.; WORNER, S. P. Invasive alien species in the food chain: advancing risk assessment models to address climate change, economics and uncertainty. **NeoBiota**, v.18, p.1-7, 2013.

KRITICOS, D. J.; WEBBER, B. L.; LERICHE, A.; OTA, N.; MACADAM, I.; BATHOLS, J.; SCOTT, J. K. CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. **Methods in Ecology and Evolution**, v.3, p.53-64, 2012.

LEVINE, J. M.; D'ANTONIO, C. M. Forecasting biological invasions with increasing international trade. **Conservation Biology**, v.17, p.322-326, 2003.

LIN, W.; ZHOU, G.; CHENG, X.; XU, R. Fast economic development accelerates biological invasions in China. **PLoS One**, v. 2, p.1208, 2007.

- MAELZER, D.; ZALUCKI, M. P.; LAUGHLIN, R. Analysis and interpretation of long term light trap data for *Helicoverpa punctigera* (Lepidoptera; Noctuidae) in Australia: population changes and forecasting pest pressure. **Bulletin of Entomological Research**, v.86, p.547-557, 1996.
- MASTERS, G.; NORGROVE, L. Climate change and invasive alien species. **CABI Working Paper**, v.1, p.30, 2010.
- MATTHEWS, M. Heliothine moths of australia. monographs on australian lepidoptera. **CSIRO**, Melbourne, v.7, p.1-320, 1999.
- MATZENBACHER, N.I. Uma nova espécie do gênero *Senecio* L. (Asteraceae - Senecioneae) no Rio Grande do Sul, Brasil. **Iheringia**, Série Botânica, v. 64, p.109-113, 2009.
- MURRAY, D. A. H. Investigations into the development and survival of *Heliothis* spp. in south-east. **PhD Thesis** University of Queensland (Queensland), 1991.
- NORDENSTAM, B.; PELSER, P. B.; KADEREIT, J. W.; WATSON, L. E. Senecioneae. *In*: FUNK, V. A.; SUSANNA, A.; STUESSY, T. F.; BAYER, R. J. (eds.). Systematics, Evolution, and Biogeography of Compositae. **IAPT, Vienna**, pp.503-521, 2009.
- PEARSON, D. E.; ORTEGA, Y. K.; EREN, Ö.; HIERRO, J. L. Community assembly theory as a framework for biological invasions. **Trends in Ecology & Evolution**, v.33, p.313-325, 2018.
- PELSER, P. B.; NORDENSTAM, B.; KADEREIT, J. W.; WATSON, L. E. An ITS phylogeny of tribe Senecione (Asteraceae) and a new delimitation of *Senecio* L. **Taxon**, v.56, p.1077-1104, 2007.
- PETERSON, A. T. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modelling. **The Quarterly Review of Biology**, v.78, p.419-433, 2003.
- QAYYUM, A.; ZALUCKI, M. P. The effects of high temperatures on survival of eggs of *Heliothis armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of the Australian Entomological Society**, v.26, p.295-298, 1987.
- ROCHESTER, W. A.; DILLON, M. L.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P. A simulation model of the long-distance migration of *Helicoverpa* spp. moths. **Ecological Modelling**, v.86, p.151-156, 1996.
- ROQUES, A.; RABITSCH, W.; RASPLUS, J. Y.; LOPEZ-VAAMONDE, C.; NENTWIG, W.; KENIS, M. Alien terrestrial invertebrates of europe. handbook of alien species in europe. **Springer** (Dordrecht/The Netherlands): p.63-79, 2009.
- SIEBERT, S.; DÖLL, P.; HOOGEVEEN, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; FEICK, S. Development and validation of the global map of irrigation areas. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.9, p.535-547, 2005.
- STAFFORD SMITH, D. M.; MORTON, S. R. A framework for the ecology of arid Australia. **Journal of Arid Environments**, v.18, p.255-279, 1990.

STEPHENS, A. E. A.; KRITICOS, D. J.; LERICHE, A. The current and future potential geographical distribution of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). **Bulletin of Entomological Research**, v.97, p.369-378, 2007.

SUTHERST, R. W. Pest species distribution modelling: origins and lessons from history. **Biological Invasions**, v.16, p.239-256, 2014.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F. A climate model of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae): Implications for invasion of new regions, particularly Oceania. **Environmental Entomology**, v.34, p.317-335, 2005.

SUTHERST, R. W. Prediction of species geographical ranges. **Journal of Biogeography**, v.30, p.805-816, 2003.

SUTHERST, R. W.; CONSTABLE, F.; FINLAY, K. J.; HARRINGTON, R.; LUCK, J.; ZALUCKI, M. P. Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. **Wiley Interdisciplinary Review Climate Change**, v.2, p.220-237, 2011.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F.; KRITICOS, D. J. CLIMEX v.3: User's Guide. Hearne Scientific Software, Australia: p.1-131, 2007.

TAUBER, M. J.; TAUBER, C. A.; MASAKI, S. Seasonal adaptations of insects. Oxford **University Press**, Oxford, UK: p.1-426, 1986.

WALDEN, K. J. Insect migration in an arid continent. III. the Australian plague locust *Chortoicetes terminifera* and the native budworm *Helicoverpa punctigera* in Western Australia. In: Drake V. A; Gatehouse, A. G. (Eds), *Insect Migration: Tracking Resources Through Space and Time*. **Cambridge University Press**, Cambridge: p.173-190, 1995.

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**, v.416, p.389-395, 2002.

WESTPHAL, M. I.; BROWNE, M.; MACKINNON, K.; NOBLE, I. J. B. I. The link between international trade and the global distribution of invasive alien species. **Biological Invasions**, v.10, p.391-398, 2008.

YONOW, T.; KRITICOS, D. J.; OTA, N.; VAN DEN BERG, J.; HUTCHISON, W. D. The potential global distribution of *Chilo partellus*, including consideration of irrigation and cropping patterns. **Journal of Pest Science**, v.90, p.459-477, 2016.

ZALUCKI, M. P.; FURLONG, M. J. Forecasting helioverpa populations in Australia: a comparison of regression based models and a bioclimatic based modelling approach. **Insect Science**, v.12, p.45-56, 2005.

ZALUCKI, M. P.; FURLONG, M. J. Predicting outbreaks of a migratory pest: an analysis of DBM distribution and abundance revisited, pp 8-14, In: SRINIVASAN, R.; SHELTON, A. M.; COLLINS, H. L.; eds. 2011. *Proceedings of the Sixth International Workshop on Management of the Diamondback Moth and Other Crucifer Insect Pests*, 21 - 25 March 2011,

Kasetsart University, Nakhon Pathom, Thailand. AVRDC - The World Vegetable Center, Publication No. 11 - 755. AVRDC - **The World Vegetable Center**, Taiwan, 321 pp., 2011.

ZALUCKI, M. P.; DAGLISH, G. J.; FIREMPONG, S.; TWINE, P. The biology and ecology of *Heliothis armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia: what do we know?. **Australian Journal of Zoology**, v.34, p.779-814, 1986.

ZALUCKI, M. P.; MURRAY, D. A. H.; GREGG, P. C.; FITT, G. P.; TWINE, P. H.; JONES, C. Ecology of *Helicoverpa armigera* (Hübner) and *H. punctigera* (Wallengren) in the inland of Australia: larval sampling and host plant relationships during winter and spring. **Australian Journal of Zoology**, v.42, p.329-346, 1994.

ZALUCKI, M. P.; VAN KLINKEN, R. Predicting population dynamics and abundance of introduced biological agents: science or gazing into crystal balls. **Australian Journal of Entomology**, v.45, p.330-343, 2006.

ZALUCKI, M. P.; ADAMSON, D.; FURLONG, M. J. The future of IPM: whither or wither? **Australian Journal of Entomology**, v.48, p.85-96, 2009.

ANEXO I

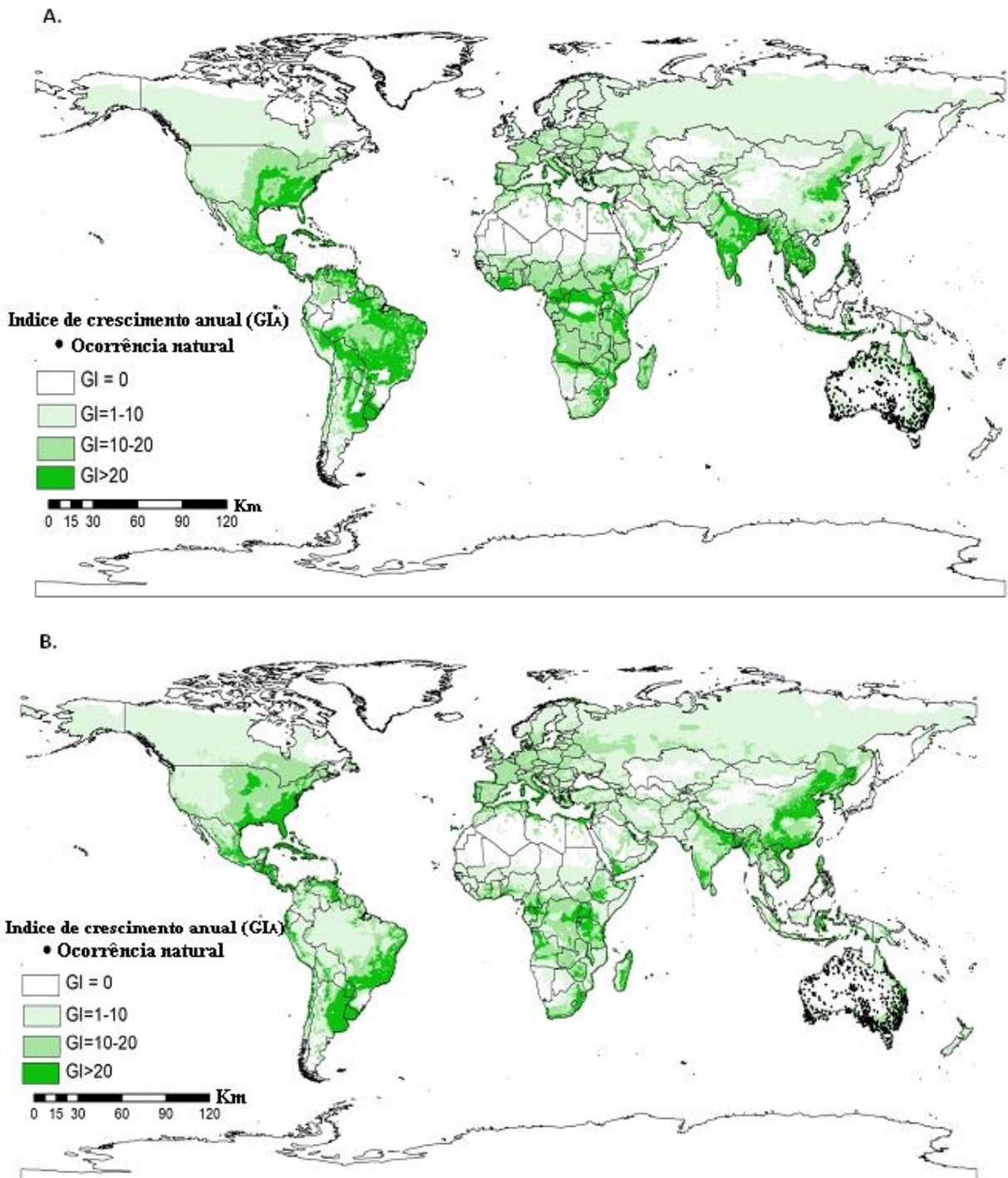


Figura A. Índice de crescimento anual (GIA) para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) projetado usando CLIMEX, levando em consideração os padrões de irrigação e diapausa, em CS GCM executando o cenário A1B para: **a)** Atual e **b)** cenário futuro de 2100. As localizações dos pontos indicam ocorrência natural da espécie.

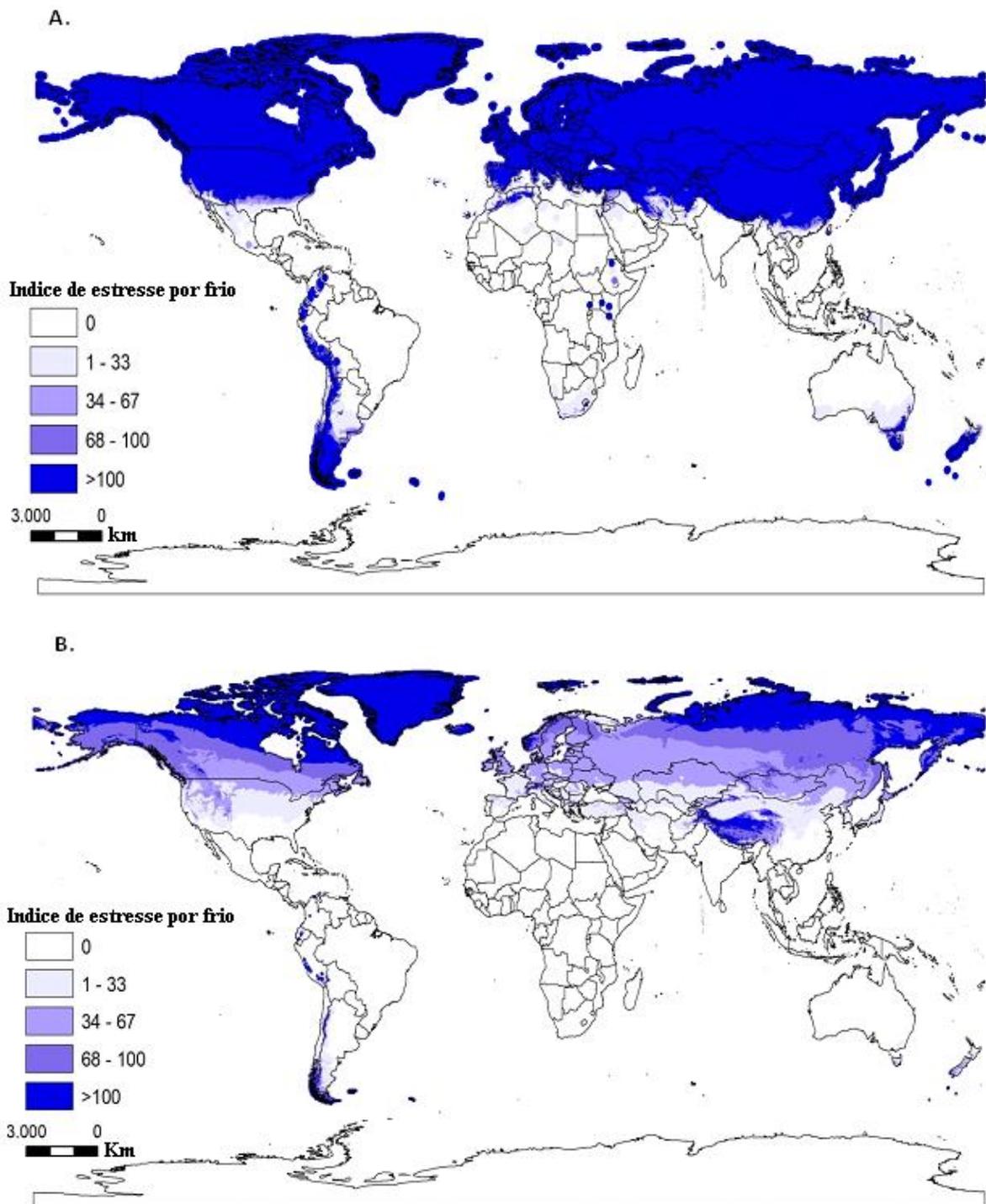


Figura B. Índice de estresse por frio para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) projetado usando CLIMEX, levando em consideração os padrões de irrigação e diapausa, em CS GCM executando o cenário A1B para: **a)** Atual e **b)** cenário futuro 2100. As localizações dos pontos indicam a ocorrência natural da espécie.

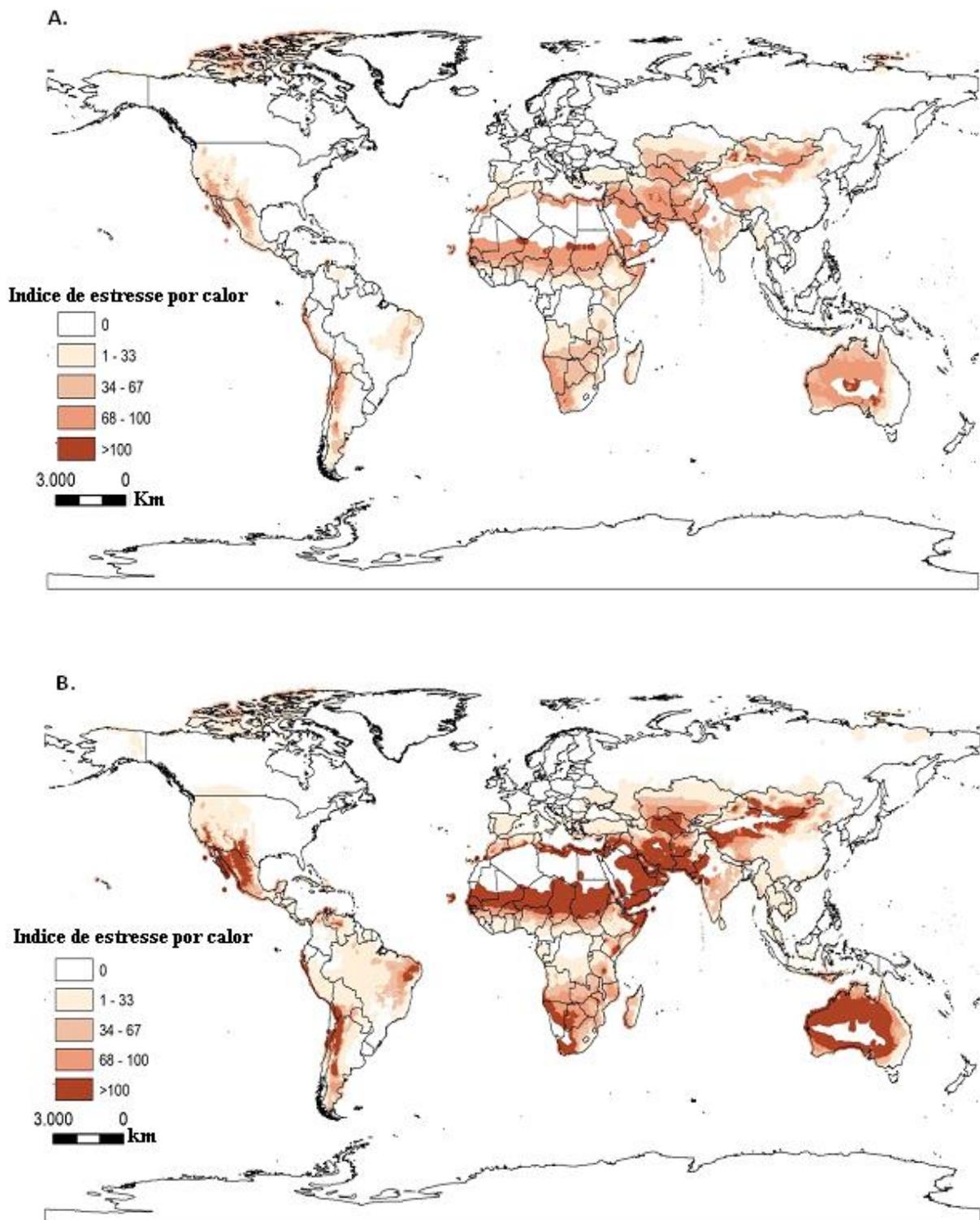


Figura C. Índice de estresse por seca para *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) projetado usando CLIMEX, levando em consideração os padrões de irrigação e diapausa, em CS GCM executando o cenário A1B para: **a)** Cenário atual e **b)** cenário futuro 2100. As localizações dos pontos indicam a ocorrência natural da espécie.

4 MODELAGEM DA DINÂMICA POPULACIONAL DE *Helicoverpa punctigera* (WALLENGREN) (LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) BASEADA NOS EFEITOS DO CLIMA USANDO DYMEX

RESUMO

A modelagem de simulação pode contribuir para a compreensão da dinâmica populacional de insetos e para o manejo daqueles considerados pragas. O modelo DYMEX é um mecanismo baseado no conceito de grupos que permite ser mais realista na simulação de dinâmicas populacionais afetadas por multifatores. A dinâmica populacional de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) é influenciada por fatores como clima, inimigos naturais e práticas agrícolas, dificultando a modelagem e a simulação da abundância populacional e da fenologia. Neste estudo, o software DYMEX foi usado para construir um modelo para *H. punctigera* considerando o cenário de mudanças climáticas do ano 2100. As simulações da abundância relativa da população e fenologia foram consistentes com os dados de monitoramento de campo. Os modelos de simulação baseados nos cenários de mudanças climáticas nas regiões estudadas na Austrália mostraram variação na população em comparação ao cenário atual. Em Emerald, por exemplo, verificou-se que a população de adultos deve se manter baixa ao longo dos meses enquanto que oviposição apresentará três picos populacionais (janeiro, março e final de junho). Em Hamilton e Horsham existirão picos populacionais em janeiro e março. Em Narrabri e Ord River, por apresentarem temperaturas médias maiores, os picos ficarão restritos ao início do ano e pequenas oscilações populacionais nos meses de março e junho. O tempo médio de desenvolvimento dos estágios de vida de *H. punctigera* reduziu entre os períodos simulados de 2010 e 2100, devido ao aumento de temperatura média. Por fim, o modelo DYMEX para *H. punctigera* indica a dinâmica populacional sob vários cenários e ajuda na análise dos cenários futuros contribuindo para o entendimento das influências dos diversos fatores para mudanças populacionais e, assim, permitir à elaboração de medidas de controle.

Palavras-chaves: modelos de previsão; insetos-praga; mudanças climáticas.

ABSTRACT

Simulation modeling can contribute to the understanding of insect population dynamics and pest management. The DYMEX model is a mechanism based on the concept of groups that allows a more realistic simulation of population dynamics affected by multifactors. The population dynamics of *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) is influenced by several factors such as climate, natural enemies and agricultural practices, making it difficult to model and simulate population abundance and phenology. In this study, DYMEX software was used to build a model for *H. punctigera* considering the year 2100 climate change scenario. Simulations of relative population abundance and phenology were consistent with field monitoring data. Simulation models based on climate change scenarios in the studied regions in Australia showed variation in population compared to the current scenario. In Emerald, for example, it was found that the adult population should remain low over the months, while oviposition will present three population peaks (January, March and late June). Hamilton and Horsham will have population peaks in January and March. In Narrabri and Ord River, due to their higher average temperatures, the peaks will be restricted to the beginning of the year and small population fluctuations in the months of March and June. The average development time of the life stages of *H. punctigera* reduced between the simulated periods of 2010 and 2100, due to the increase in average temperature. Finally, the DYMEX model for *H. punctigera* indicates the population dynamics under various scenarios and helps in the analysis of future scenarios, contributing to the understanding of the contributions of different factors to population changes and, thus, contributing to the development of control measures.

Keywords: prediction models; pest insects; climate changes.

1 INTRODUÇÃO

Ecologia populacional de insetos é um tema que traz grande facínio entre os pesquisadores que buscam entender os padrões de abundância e de distribuição das espécies para assim poder determinar o comportamento destes nos mais diferentes habitats para melhorar o processo de tomada de decisão e o planejamento estratégico (HENGEVELD, 1990; MAELZER; ZALUCKI, 2000).

Porém, os modelos de abundância e distribuição de insetos-praga são considerados complexos, pois existem vários processos de interação no sistema, originando diversos subsistemas e componentes, cada um com suas próprias características e comportamentos, contribuindo para o arranjo geral e função do sistema completo, principalmente quando são feitas tentativas para compreender ou prever o comportamento do sistema com pragas de hábitos migratórios, como espécies do complexo *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) (FATH, 2014; WALTERS *et al.*, 2016; WALLACH *et al.*, 2018).

Dentre os modelos de abundância elaborados para insetos-praga destaca-se o "HEAPS" (HEliothis Armigera and Punctigera Simulation), que foi desenvolvido por pesquisadores australianos para entender a dinâmica populacional de *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) e de *Helicoverpa punctigera* (Lepidoptera: Noctuidae), com cinco módulos principais: (i) Movimento do adulto, (ii) Oviposição, (iii) Desenvolvimento, (iv) Sobrevivência e (v) Fenologia do hospedeiro (HAMILTON; FITT, 1988). Porém, dada às limitações da época, esse modelo "HEAPS" não representava, em sua totalidade, o efeito do ambiente e o seu impacto na dinâmica populacional dessas espécies em um contexto de produção agrícola.

Com o avanço das pesquisas, novos tipos de modelos fenológicos foram desenvolvidos e assim foi possível "prever", com relativo sucesso, a dinâmica populacional de insetos-praga em relação ao tempo (ZALUCKI; FURLONG, 2005). Porém, um ambiente de produção agrícola, devido as suas características e interferência antrópica, apresenta natureza altamente não linear (WALLACH *et al.*, 2018). Essas interações e não linearidades precisam ser levadas em consideração quando feitas tentativas de compreender o comportamento de insetos-praga em sistema de produção para auxiliar na melhor tomada de decisão (TONNANGA *et al.*, 2017).

O manejo eficiente de insetos-praga em áreas agrícolas depende do monitoramento regular da população destes, para fornecer informações sobre as densidades de ovos e de larvas dentro de cada área de produção e, seus prováveis níveis de resistência (DILLON; FIN, 1990). Compreender, gerenciar e prever os impactos das pragas na produção

são grandes desafios (GARRETTA *et al.*, 2013). Embora os esforços de modelagem se concentrem em insetos-praga, ainda existem carências relacionadas à compreensão das interações com as plantas, o clima, o nitrogênio, o controle de água, os suprimentos e outros componentes do sistema (ITTERSUM *et al.*, 2003; WALLACH *et al.*, 2018).

Para contemplar essas interações entre os componentes dos sistemas ecológicos é possível aplicar a análise DYMEX, que é um modelo de mecanismo baseado no conceito de grupos, o que permite que essa avaliação seja mais realista na simulação de dinâmicas populacionais afetadas por multifatores, como o clima, os inimigos naturais, as práticas agrícolas e até cenários futuros com mudanças climáticas (KRITICOS *et al.*, 2016).

As variações da dispersão natural dos insetos provocados pela alteração do ambiente, seja por mudanças climáticas ou mudança da composição do agroecossistema local, podem provocar o estabelecimento e introdução de novas pragas à medida que os ecossistemas naturais respondam às alterações de temperatura e precipitação (GARRETT *et al.*, 2013). O aumento na frequência e magnitude de eventos extremos (ondas de calor, chuvas fortes, tempestades etc.) pode interromper a sincronia entre o crescimento, desenvolvimento e reprodução de agentes de controle biológico e seus respectivos hospedeiros/presas, levando a interferências tanto no controle biológico natural quanto no aplicado (AURAMBOU *et al.*, 2009; GUIBAN *et al.*, 2013). Nesse contexto, a avaliação e previsão de mudanças futuras na distribuição de insetos em escalas local, regional e global são necessárias para implantar estratégias de mitigação preventiva (EHRLÉN; MORRIS, 2015).

Cenários do futuro podem ser combinados com modelos que capturam os processos relevantes e suas interações e entregam projeções quantitativas de mudanças de componentes do ambiente biofísico (LENZNER *et al.*, 2019). O entendimento do comportamento dos insetos-praga às mudanças climáticas é muito importante, por exemplo, na definição e elaboração de planejamento de manejo e estratégias de controle para antecipar ataques de pragas no futuro (NURHAYATI *et al.*, 2017). O 5º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR5) preparou os dados de projeção de mudanças climáticas mais recentes com base em um cenário de projeções futuras (IPCC, 2013). Assim, é necessário adaptar um novo método de implementação de sistemas de alerta precoce de ataque de pragas, particularmente para apoiar a implementação de medidas de controle destas que tenha elevado impacto para um controle eficaz (NURHAYATI *et al.*, 2017).

Apesar de outros estudos relacionados à dinâmica populacional de *H. punctigera* baseado na sua distribuição geográfica terem sido realizados (MAYWALD *et al.*, 2004;

ZALUCKI; FURLONG, 2005), ainda existem informações importantes, como a estimativa de mortalidade natural e a dinâmica de mobilidade, que precisam ser levados em consideração. Assim, este trabalho tem por objetivo integrar dados de mortalidade natural e do efeito do clima no programa de modelagem DYMEX para melhorar a compreensão da dinâmica populacional de *H. punctigera*, e a abundância relativa no atual cenário e em cenários futuros de mudanças climáticas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do modelo

DYMEX é um pacote de modelagem modular composto por um construtor e um simulador que permite o desenvolvimento e a execução de modelos populacionais de organismos biológicos. O usuário cria o modelo no modo construtor, em seguida, executa-o com o simulador (MAYWALD; SUTHERST; KRITICOS, 2004).

O software de modelagem ecológica, DYMEX (MAYWALD; SUTHERST; KRITICOS, 2004), foi utilizado para construir um modelo diário de desenvolvimento que simulasse a fenologia de *H. punctigera* em ambiente de cultivo na Austrália. Embora seja possível criar modelos de dinâmica populacional baseados em processos detalhados (KRITICOS *et al.*, 2003; YONOW *et al.*, 2004), DYMEX também pode ser usado para construir e executar modelos de desenvolvimento simples, ignorando em grande parte, a demografia da população (FARR, 2002).

Nas análises com a modelagem DYMEX, o ciclo de vida consiste em um ou mais estágios que contêm grupos de indivíduos que têm em comum um conjunto de características (MAYWALD; SUTHERST; KRITICOS, 2004). A abordagem de grupos na modelagem permite que os modelos sejam mais realistas do que os modelos analíticos ou aqueles baseados em distribuições de probabilidade ou matrizes de transição porque leva em consideração uma gama de respostas às condições experimentadas por um indivíduo na população (MAYWALD; SUTHERST; KRITICOS, 2004). Estes grupos são criados em cada etapa de tempo em que um ou mais indivíduos progridem para um novo estágio de vida (KRITICOS; MAYWALD; YONOW; SUTHERST, 2016). Os grupos possuem várias propriedades que rastreiam os processos no estágio de vida. Por exemplo, o processo de desenvolvimento aumenta a variável de idade fisiológica, enquanto um processo de mortalidade diminui a variável do número de indivíduos em um grupo (KRITICOS *et al.*, 2016). Algumas propriedades do grupo podem ser predefinidas, como o número de indivíduos

ou a idade fisiológica dos indivíduos em um grupo, enquanto outras podem ser definidas pelo usuário (BIRD, 2006).

As características do modelo para *H. punctigera* são definidas pelo usuário e descrevem o efeito da diapausa em uma proporção de indivíduos e as diferentes fases de larvas em desenvolvimento em função do tempo. Essas etapas, por sua vez, impulsionam outros processos (como mortalidade e desenvolvimento) nos mesmos estágios de vida ou em estágios subsequentes (KRITICOS *et al.*, 2016).

2.2 Timer

O módulo Timer executa a função de cronometragem do modelo e define o intervalo de tempo de execução. O modelo *H. punctigera* opera em um único intervalo de tempo diário fixo. O cronômetro também rastreia a época do ano, o número de dias desde o início da simulação e a data da simulação para relacionar eventos biológicos ou de manejo com dias ou datas (KRITICOS *et al.*, 2016).

2.3 Dados meteorológicos

O módulo de dados meteorológicos (Metbase) avalia variáveis climáticas necessárias para rodar o modelo. Nesse trabalho utilizou-se cinco variáveis de entrada predefinidas: temperaturas mínimas, máximas diárias do ar, precipitação e umidade relativa às 09h00min e às 15h00min (KRITICOS *et al.*, 2016).

2.4 Ciclo de temperatura diário

O módulo circadiano é projetado para gerar uma variável que descreve a mudança de temperatura diurna. Calcula um conjunto de 24 valores que representa a temperatura média a cada hora do dia. Esses cálculos são baseados na interpolação da curva sinusoidal horária das temperaturas mínimas e máximas diárias. Todas as funções dependentes da temperatura no modelo são conduzidas pelo ciclo diário de temperatura (MAYWALD *et al.*, 2004).

2.5 Ciclo de vida do inseto

DYMEX incorpora um ciclo de vida estruturado em estágios, onde os estágios do ciclo de vida correspondem a unidades biologicamente significativas, ou seja, instares. O ciclo de vida de *H. punctigera* é composto de 9 estágios de vida (Figura 1). Várias funções são orientadas por variáveis que descrevem processos de história de vida, como taxas de desenvolvimento e mortalidade para cada fase da vida, bem como potencial reprodutivo na

fase adulta (MAYWALD *et al.*, 2004). Essas funções também são responsáveis pelo processo de transferência dos indivíduos de uma fase da vida para a seguinte. Os indivíduos de grupo são transferidos para um estágio de vida subsequente quando concluem o desenvolvimento, ou seja, quando atingem a idade fisiológica de 1 (MAYWALD *et al.*, 2004). Os processos são atualizados diariamente e podem ser valores diários, médios ou cumulativos.

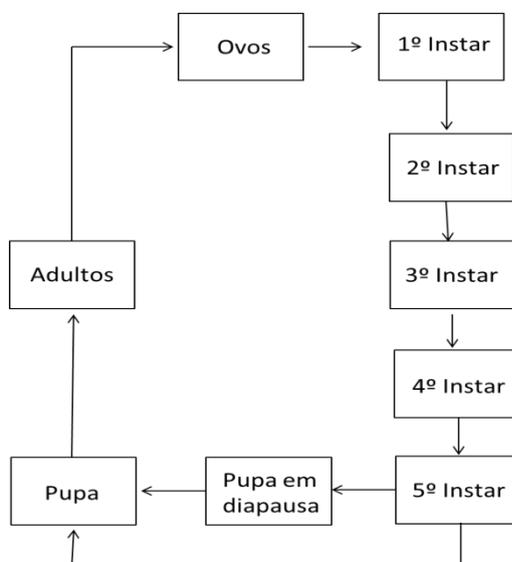


Figura 1. Diagrama esquemático do ciclo de vida de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae).

2.6 Processos de mortalidade de insetos

Dois tipos de fatores de mortalidade foram incorporados ao modelo para *H. punctigera*. O primeiro um processo de saída de mortalidade foi aplicado a cada fase da vida, fazendo com que uma proporção definida de indivíduos em um grupo morresse antes de deixar essa etapa (KRITICOS *et al.*, 2016). O segundo, a mortalidade é dependente da temperatura que foi incorporada ao modelo em função das taxas de mortalidade diárias dos estágios de vida de ovo, larva e pupa (KRITICOS *et al.*, 2016).

2.6.1 Mortalidade de saída

As tentativas de determinação da dinâmica de sobrevivência dos ovos de *H. punctigera* em condições de campo, esta têm sido de difícil avaliação e frequentemente são subestimadas (FITT, 1989). Embora cascas de ovos vazias com sinais de ataque de predadores, parasitoides ou de doenças sejam encontradas, fatores abióticos como o efeito do

vento e da chuva, são considerados a principal causa da mortalidade de ovos e larval (ZALUCKI *et al.*, 1986; FITT, 1989).

Para as fases larvais uma série de fatores contribui para a sua mortalidade. A incompatibilidade da planta hospedeira e os fatores abióticos (como dessecação e deslocamento) podem afetar o estabelecimento inicial da larva (ZALUCKI *et al.*, 1986). O efeito dos inimigos naturais reduz ainda mais a proporção de insetos que completam o desenvolvimento larval (ROOM, 1980). No entanto, as estimativas de mortalidade devido a inimigos naturais são difíceis de determinar devido à natureza esporádica de espécies de parasitoides e predadores. Com base em evidências observadas em campo, um fator de mortalidade de saída que remove 10% da população de larvas restantes em cada estágio de vida foi incorporado ao modelo (ROOM, 1980).

As larvas de *H. punctigera* são canibais e, embora tenham esse comportamento, junto com a competição por alimento, provavelmente tenha impacto sobre a sobrevivência e o desenvolvimento juvenil em algumas espécies, a tendência das fêmeas de *H. punctigera* é botarem ovos aleatoriamente em resposta à efêmera adequação de habitats para a reprodução visando minimizar o grau de sobreposição espacial entre ovos e larvas e, portanto, reduzir a quantidade de mortalidade de ovos devido ao canibalismo (GORDON; STEWART, 1988). O modelo para *H. punctigera* é um modelo espacial e não incorpora mortalidade dependente da densidade (YONOW *et al.*, 2004). Portanto, o número dos adultos tende a aumentar acentuadamente com o tempo.

2.6.2 Mortalidade por efeito da temperatura

Ficou evidenciado que ovos mantidos à 10°C não eclodem (Zalucki *et al.*, 1986). Mortalidade de ovos devido ao estresse por frio aumentaram linearmente abaixo do limite de 9°C. O declive foi ajustado usando esta suposição e a observação de que manter os ovos a 4°C durante sete dias resulta em 99% de mortalidade (BIRD, 2006). A mortalidade dos ovos foi completa em alta temperatura, isto é, acima de 40°C (ZALUCKI *et al.*, 1986).

As estimativas das taxas de mortalidade nas fases larvais foram baseadas em dados registrados por Twine (1978) que demonstrou que 76% das larvas foram mortas à 13,1°C, e em temperatura acima 40°C, nenhuma larva foi capaz de sobreviver. Porém, essa mortalidade em temperaturas podem ser agravadas por outros fatores, como a qualidade do hospedeiro/dieta (BIRD, 2006).

Não existiam dados disponíveis para a descrição adequada da mortalidade de adultos em temperaturas excessivamente altas ou baixas. Portanto, somente a idade do adulto

foi usada para nortear a taxa de mortalidade. A longevidade média das mariposas fêmeas foi estimada em 10 dias (ZALUCKI *et al.*, 1986; BIRD, 2006).

2.7 Processos de desenvolvimento de insetos

Em geral, a relação entre desenvolvimento e temperatura não é linear. Isso ocorre porque em extremos de temperatura a resposta do desenvolvimento é modificada pela tolerância fisiológica do inseto (KRITICOS *et al.*, 2016). No entanto, quando um modelo de melhor ajuste é formulado em uma ampla faixa de temperaturas, a taxa de desenvolvimento pode muitas vezes ser descrita como efetivamente linear (MAYWALD *et al.*, 2004).

2.8 Validação do modelo

A validação de um modelo consiste em verificar se o modelo representa a descrição adequada do sistema (KRITICOS *et al.*, 2016). A validação é um conceito multidimensional que reflete o propósito do modelo, teorias atuais e dados de testes experimentais relacionados ao sistema específico de interesse, juntamente com outros conhecimentos relevantes (TONNANGA *et al.*, 2017). Os modelos de *H. punctigera* foram testados usando métodos empíricos de validação, ou seja, os resultados foram comparados com dados de amostragem semanais de adultos em armadilhas luminosas provenientes das regiões de Narrabri nos anos de 1974-1978 no estado de New South Wales (NSW), Emerald nos anos de 1978-1982 no estado de Queensland (QLD), Horsham e Hamilton nos de 1980-1983 no estado de Vitoria (VIC) e Ord River nos anos de 1965-1968 no estado de Western Australia (WA).

2.9 Cenários de mudanças climáticas

Os cenários de mudanças climáticas, com base no relatório AR5 (IPCC, 2013) desmonstram projeções de curto prazo ao longo do período (2030-2100). Nesta pesquisa foram usados os cenários de base no CSIRO-Mk3.0 (CS) um dos muitos Modelos Climáticos Globais (GCMs), que pressupõe aumento de temperatura e redução na precipitação em 2100 com o cenário A1B (IPCC 2007).

3 RESULTADOS

O processo de calibração foi realizado com base nos dados de observação de coletas diárias de *H. punctigera* por meio de armadilhas luminosas nas localidades de

Emerald nos anos de 1978-1982, Horsham e Hamilton nos de 1980-1983, Narrabri para os anos de 1974-1978 e Ord River nos anos de 1965-1968.

A dinâmica populacional de *H. punctigera* simulada pelo DYMEX previu os picos populacionais de adultos de acordo com os valores observados no monitoramento (Figura 2). Em comparação com os dados reais da população adulta, foram reveladas ser discrepantes no tempo entre o aumento e diminuição das populações simuladas e reais. Em Emerald, o modelo previa picos sazonais no final do ano, mas estes, de fato, só aconteceram no final de 1980 (Figura 2A).

Para a localidade de Hamilton, a abundância populacional foi fortemente sazonal com um único pico no primeiro trimestre do ano (Figura 2B). Apesar dos longos períodos de baixa abundância, os adultos estavam presentes o ano todo em todos os locais. Em Horsham é possível identificar que a sazonalidade foi constante ao longo dos anos, com exceção para 1982, em que o modelo DYMEX não conseguiu prever esse aumento de crescimento abrupto da população local (Figura 2C).

Para Narrabri e Ord River verificou-se constância nos valores observados e previstos (Figura 2D e 2E). Apesar dos longos períodos de sazonalidade foi possível verificar sempre que populações de adultos estavam presentes o ano todo.

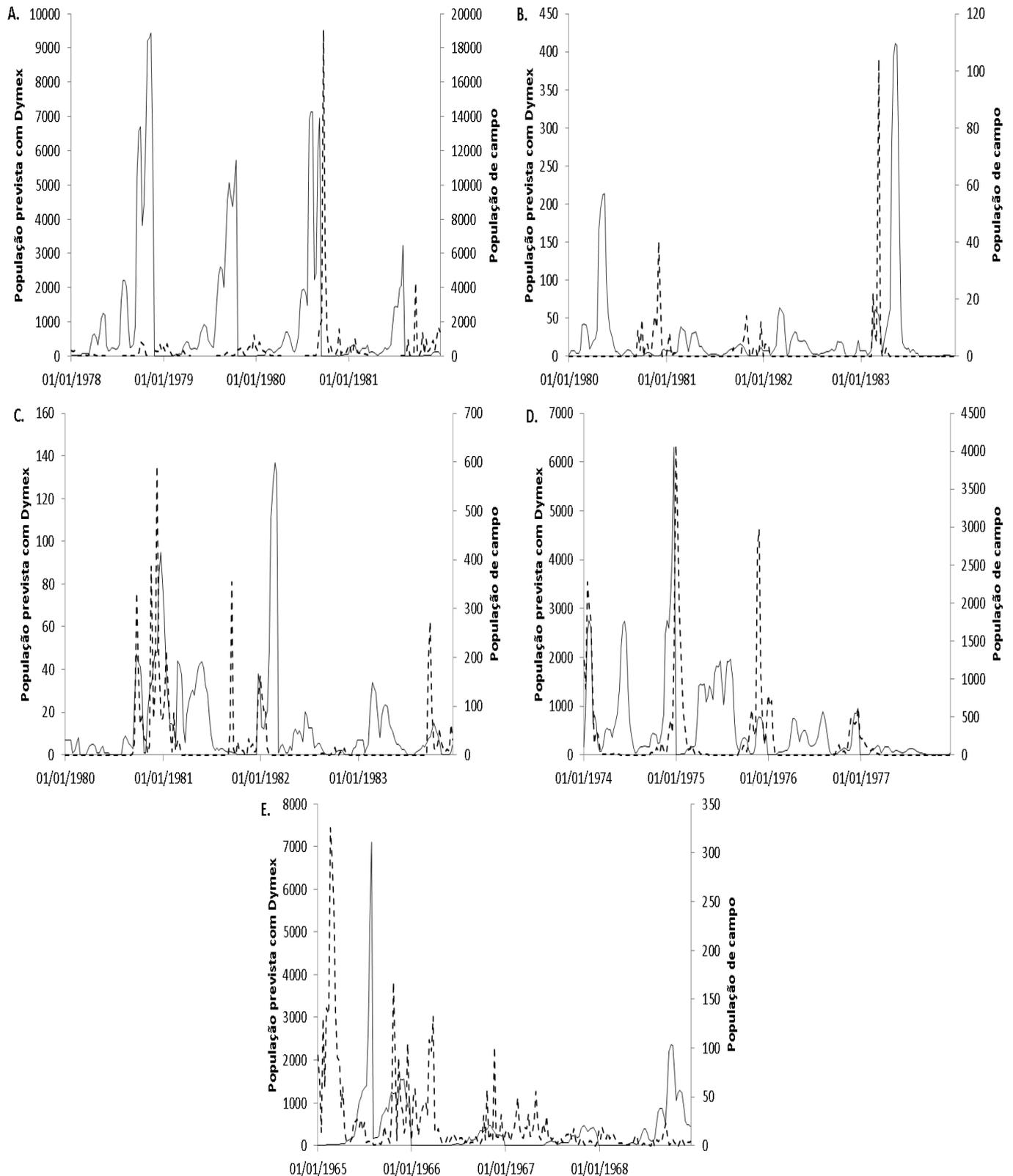


Figura 2. Número previsto e observado de adultos de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) capturados por armadilhas luminosas: (a) Emerald; (b) Hamilton; (c) Horsham; (d) Narrabri e (e) Ord River. As linhas sólidas são número previsto de adultos para aquela semana; as linhas pontilhadas são os valores médios dos adultos capturados nas armadilhas para aquela semana.

Para verificar a análise do modelo, procedeu-se com a transformação dos valores em *log* e, em seguida, seguiu-se com a análise de regressão linear dos valores para mensurar a qualidade do ajuste do modelo por meio do coeficiente de determinação (R^2) (Figura 3). Sempre que o valor de um parâmetro desconhecido foi ajustado, uma medida da qualidade do ajuste (valor de R^2) foi obtida para avaliar o impacto do ajuste do valor do parâmetro. O modelo é considerado o mais completo possível quando ajustes adicionais não trouxeram melhorias. Foi reconhecido que haviam lacunas na compreensão de alguns processos que nenhum ajuste resolveu (por exemplo, o impacto da disponibilidade sazonal e da migração de adultos da região semiárida). Em Emerald, o valor de R^2 foi de 0,36 (n= 104), em Hamilton, $R^2= 0,11$ (n= 104), em Horsham, o valor de R^2 é 0,40 (n= 52), em Narrabri, o valor de R^2 foi de 0,1 (n= 104) e em Ord River, $R^2=$ é 0,18 (n= 104) (Figura 3).

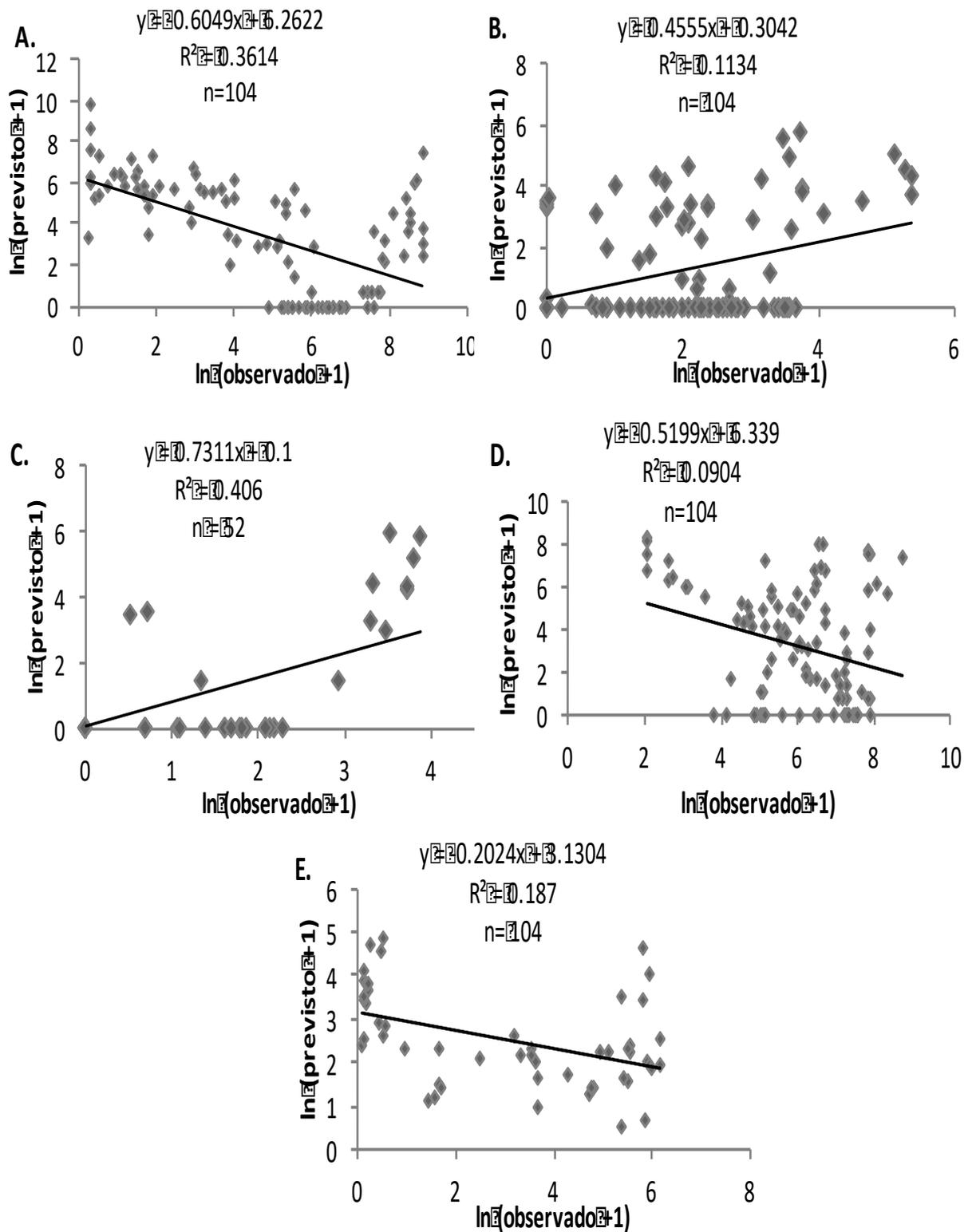


Figura 3. Número previsto de adultos de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) pelo modelo DYMEX versus número de adultos observado nas armadilhas luminosas: (a) Emerald; (b) Hamilton; (c) Horsham; (d) Narrabri e (e) Ord River. As linhas sólidas representam regressão dos valores previstos versus observados, com o valor de qualidade de ajuste (R^2).

Os modelos de simulação baseados nos cenários de mudanças climáticas (CSIRO-Mk3.0) nas regiões estudadas na Austrália mostraram variação na população em comparação com o cenário atual (Figura 4). Na região de Emerald verifica-se que a população de adultos deve se manter baixa ao longo dos meses enquanto que a oviposição apresentara três picos (janeiro, março e início de junho) (Figura 4A). A distribuição sazonal em Hamilton será menor ainda, com picos populacionais de ovos em janeiro e março. Esta tendência esta relacionada às baixas temperaturas nos períodos de frio que impactam no desenvolvimento das fases larvais e adultos (Figura 4B). Em Horsham observa-se cenário similar a Hamilton, porém o pico de oviposição em março será ligeiramente menor (Fig 4C). Em Narrabri, por apresentar temperaturas médias maiores, foi possível observar maior abundância de *H. punctigera*, principalmente com picos de oposições no período de verão (janeiro e início da primavera em junho) na região (Figura 4D). Por fim, em Ord River foi observado cenário bastante similar ao de Narrabri (Fig 4E).

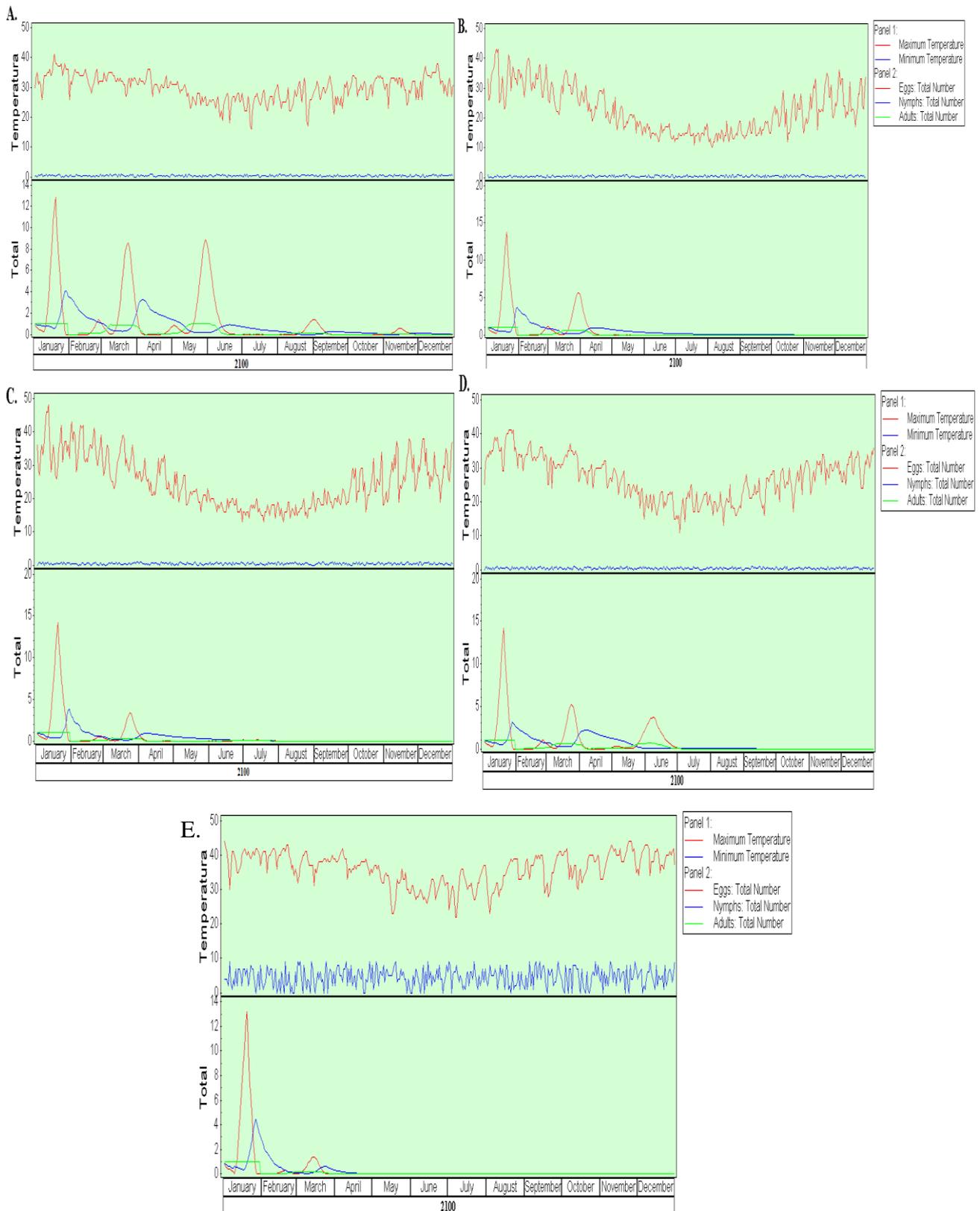
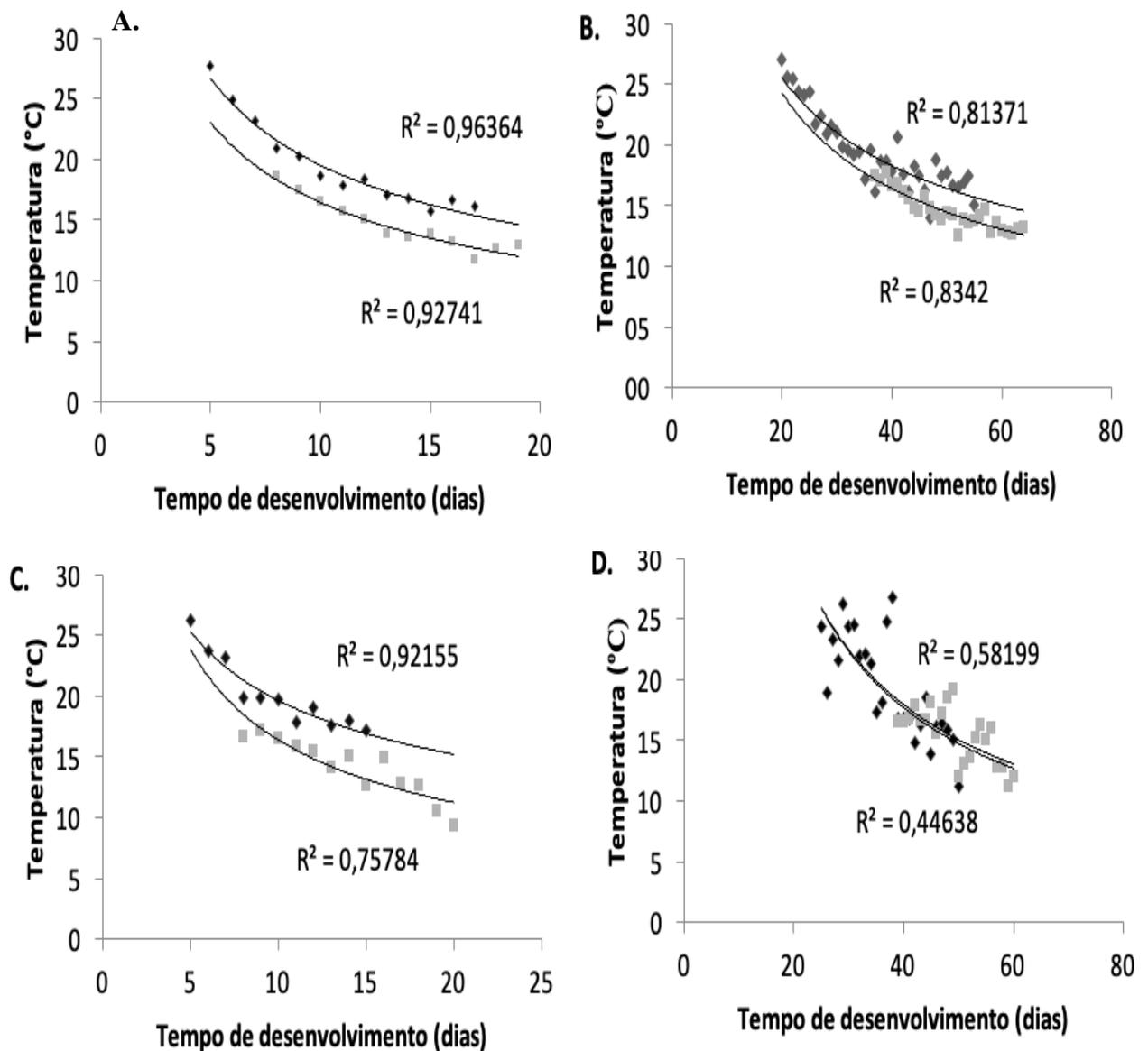


Figura 4. Número previsto de adultos de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) pelo modelo DYMEX para o ano base no cenário base de mudanças climáticas A1B para o 2100 e os valores máximos e mínimos de temperatura: (a) Emerald; (b) Hamilton; (c) Horsham; (d) Narrabri e (e) Ord River.

O tempo médio de desenvolvimento dos estágios de vida de *H. punctigera* entre os períodos simulados de 2010 e 2100 estão descritos (Figura 5). No modelo DYMEEX de *H. punctigera*, diferentes temperaturas afetaram o tempo de desenvolvimento dos estágios imaturos. A adequação do modelo aos resultados (R^2) em ovos e larvas foram acima de 0,70 com exceção para as fases larvais em Hamilton (Figura 5D) e Horsham (Figura 5E), com valores inferiores a 0,5, porém para todos os valores analisados, os níveis de significância foram $<0,01$.



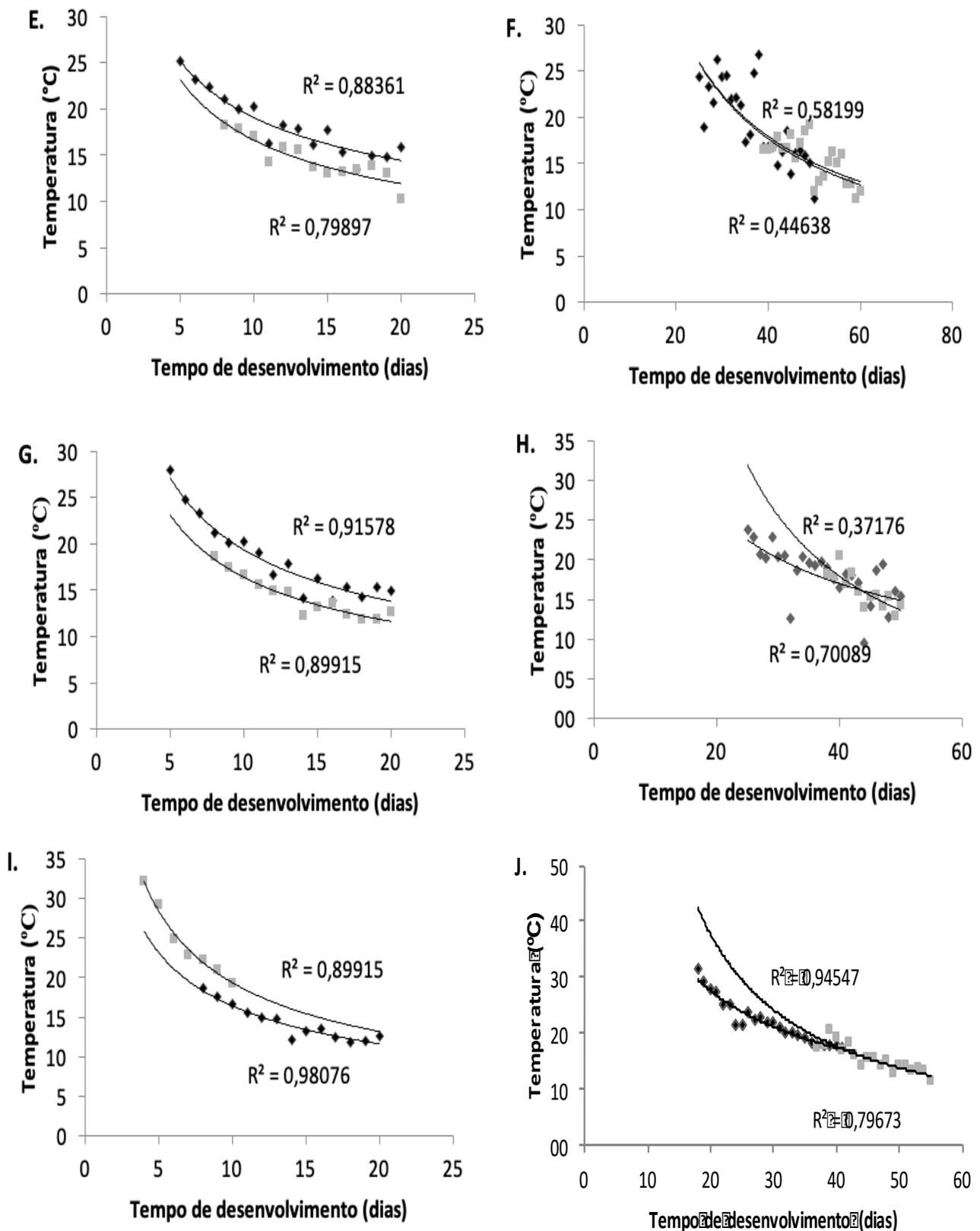


Figura 5. Comparação do tempo médio de desenvolvimento dos estágios de vida de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) entre as simulações para o ano 2010 (◆) e para o cenário futuro de 2100 (□). (a) Ovos em Emerald; (b) Larvas em Emerald; (c) Ovos em Hamilton; (d) Larvas em Hamilton; (e) Ovos em Horsham; (f) Larvas em Horsham; (g) Ovos em Narrabri; (h) Larvas em Narrabri; (i) Ovos em Ord River e (j) larvas em Ord River.

4 DISCUSSÃO

O monitoramento das populações de *H. punctigera* por longos períodos nas principais regiões de cultivo da Austrália revelou um padrão regular de aumento e redução populacional. As flutuações nas populações em cada local de monitoramento foram notavelmente consistentes entre os anos ou estações, mas foram únicas para as diferentes regiões. Comparações de dados reais de monitoramento de adultos de *H. punctigera* com os dados da simulação revelaram acúmulos populacionais mais rápidos e períodos mais longos de altos níveis populacionais em comparação com o das populações reais.

A fenologia e abundância de *H. punctigera* são diretamente influenciadas pela temperatura, sequência do hospedeiro e variabilidade do hospedeiro (FITT *et al.*, 1989). Normalmente, *H. punctigera* é a espécie dominante antes da antese, e se torna menos abundante nos meses após janeiro, enquanto isso, *H. armigera*, torna-se dominante a partir de janeiro (FITT *et al.*, 1989; FORRESTER *et al.*, 1993).

As regiões de Hamilton, Horsham, Narrabri e Ord River, nos intervalos analisados (Figura 2 B, D e E) apresentaram resultados mais próximos da realidade dos adultos observados nos picos de atividade medidos no monitoramento. Picos diferentes daqueles previstos pelo modelo podem ser resultado da imigração ou, no caso de picos experimentados no final da temporada, pode ser devido à união de populações de campo, provenientes de migração entre lavouras (LISA, 2006). Nas regiões de Emerald e Horsham, os picos previstos pelo modelo não coincidem com aqueles indicados pelos dados de captura da armadilha. Esta variação pode estar relacionada as composições atípicas das espécies nessas regiões, que são caracterizadas por abundância prolongada de *H. armigera* proveniente das áreas de algodão e baixa atividade de *H. punctigera* no agroecossistema nativo (LISA, 2006). Além disso, um refinamento adicional do modelo, usando valores para o desenvolvimento larval mais preciso e incorporando fatores adicionais, como a mortalidade provocada por inimigos naturais, poderiam melhorar a correspondência com os dados (NADEL *et al.*, 2014).

Fatores importantes para estudos futuros e possíveis contribuições para o modelo incluem o efeito da temperatura na fecundidade adulta, limites de temperatura para cada estágio larval e efeitos da cultura hospedeira no desenvolvimento das larvas, entre outros (STILING, 1988; ABBOTT; DWYER, 2007; SOLIMAN *et al.*, 2012).

Um problema subjacente ao tentar comparar os modelos de previsões com os dados de captura de armadilhas é que o modelo está efetivamente tentando fazer duas coisas ao mesmo tempo, no primeiro momento ele precisa representar com precisão a dinâmica geral da população de *H. punctigera* e, no segundo, deve abordar a questão da atratividade

armadilha (GU *et al.*, 2018). Isso está em contraste com outros modelos de insetos, onde os números previstos podem ser mais facilmente comparados às populações de campo observadas porque a técnica de amostragem com utilização de feromônios da população fornece uma medição direta da abundância de machos e indiretamente de fêmeas (YONOW *et al.*, 2004). Definir a armadilha em função da temperatura e da proporção masculina da população ativa permite uma melhora substancial no modelo, mas há, sem dúvida, questões adicionais relacionadas à atividade das mariposas e à atratividade das armadilhas que não foi possível abordar (BIRD, 2006).

A tendência de superestimação do modelo indicado é devido à atual incapacidade de descrever corretamente o número de adultos que migram da área do semiárido, onde se desenvolvem abundantemente em plantas hospedeiras nativas e posteriormente migram para as áreas agrícolas no período do verão (GREEG *et al.*, 2018). Em todos os locais há casos no verão em que nenhum adulto é registrado nas armadilhas, mas o modelo prevê um número relativamente alto de adultos.

No cenário de mudança climática para o ano de 2100 notou-se uma maior intensidade de ocorrência na abundância de *H. punctigera* no período de janeiro e março, com exceção da região de Narrabri e Emerald, que também apresentaram picos em maio/junho, enquanto a partir de julho, no início do inverno, e, posteriormente, em setembro na primavera, verificou-se uma redução drástica na abundância de ovos, larvas e adultos.

O aumento da temperatura na primavera provocada pelo efeito das mudanças climáticas promove uma explosão precoce de botões florais e, conseqüentemente, emergência de insetos (DELL *et al.*, 2005; KIM *et al.*, 2012; BALE; HAYWARD, 2010; PIAO *et al.*, 2015), o que pode levar à assincronia entre a fenologia de plantas e insetos (WANG *et al.*, 2014, 2015; KEENAN, 2015; UELMEN *et al.*, 2016; REGNIERE; NEALIS, 2018).

Os estudos sobre o aquecimento da primavera e a presença de insetos-praga também se concentraram nas variações da abundância da população (GU *et al.*, 2018). O aumento da temperatura da primavera mudou o tempo de aparecimento da praga, o que aumentou a assincronia fenológica entre as plantas hospedeiras e a praga (GU *et al.*, 2018). Assim, a abundância da população de pragas pode ser reduzida (SATAKE *et al.*, 2006). Em contraste, sob o aquecimento da primavera, a sobrevivência e o acasalamento do percevejo-verde no Sul do Japão, *Nezara viridula* (L.) (Hemiptera: Pentatomidae) aumentaram, o que promoveu o crescimento populacional e seu estabelecimento em áreas recém-colonizadas (TAKEDA *et al.*, 2010).

Estudos da abundância populacional de *H. armigera* sob mudanças climáticas com o aquecimento geral da primavera deram resultados conflitantes (OUYANG *et al.*, 2016; HUANG; LI, 2017). A possível razão pode ser que os padrões climáticos diferem entre os locais nos estudos (GU *et al.*, 2018). Como muitos sistemas biológicos estudados sob a mudança climática, os efeitos do aquecimento globais nas populações de insetos-pragas são complexos (GU *et al.*, 2018). Foi descoberto em outras espécies de Lepidópteros que a abundância populacional pode diminuir significativamente se uma temperatura extremamente baixa ocorrer durante o estágio de postura dos ovos (ROLAND; MATTER, 2016).

O meio ambiente está intimamente relacionado a abundância populacional da *H. punctigera* no campo afetando-o direta ou indiretamente (ZALUCKI; FURLONG, 2005). A variabilidade da densidade dos insetos pode ser influenciada diretamente pela sazonalidade devido ao impacto dos fatores climáticos (ou seja, chuva, vento e temperatura) e indiretamente devido à disponibilidade de alimentos (ZALUCKI *et al.*, 1986).

Para espécies como *H. punctigera*, a disponibilidade de alimentos não parece ser um fator principal na definição da sazonalidade, uma vez que é uma espécie polífaga que pode ser hospedada por várias espécies de plantas (GREEG *et al.*, 2018). A influência dos fatores climáticos na sazonalidade para *H. punctigera* parece ser maior do que a influência indireta da disponibilidade de planta hospedeira, uma vez que estas estão disponíveis no campo em boa parte do ano (ZALUCKI; FURLONG, 2005). Além disso, as condições climáticas futuras podem afetar também a dinâmica populacional de inimigos naturais, levando-os a uma baixa densidade que implica em um baixo índice de controle biológico natural (SUTHERST *et al.*, 2000).

A relação linear negativa entre o tempo de desenvolvimento do ovo e das fases larvais de *H. punctigera* e a temperatura é provavelmente uma parte importante na explicação da influência da temperatura média e do tamanho da população observada em todos os locais de monitoramento para o ano de 2010 (Fig 5). Esta taxa de desenvolvimento de ovos foi muito maior neste estudo em comparação com outros trabalhos, como o de Zalucki & Furlong (2005) que obtiveram uma taxa de desenvolvimento de 8 dias para ovos e 15 dias para as fases larvais a uma temperatura de 34°C. *H. punctigera* normalmente põem ovos em superfícies razoavelmente expostas (MORTON, 1979), que estão geralmente associadas à luz solar direta e, portanto, a temperaturas elevadas extremas. Isso acaba favorecendo para uma maior mortalidade dos mesmos, uma vez que temperaturas superiores a 41°C por um tempo superior a 4 horas provoca uma mortalidade de 75% (KAY, 1981; CULLEN, 1969).

5 CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que os eventos de mudanças climáticas estarão consideravelmente correlacionados diretamente com a abundância da população de *H. punctigera* na Austrália. De acordo com as previsões a temperatura continuará a aumentar e a precipitação reduzirá, ocasionando um aquecimento global significativo, portanto, a influência negativa do efeito do frio nas populações de *H. punctigera* diminuirá e a abundância da mariposa aumentará. Outro fato está relacionado com a redução do tempo de desenvolvimento das fases de ovos e larvas, conseqüentemente redução no ciclo de vida, permitindo assim um maior número de gerações por ano. Em escala global o aumento de temperatura pode criar condições favoráveis para *H. punctigera* migrar para outras regiões associadas, como a Ásia, onde as condições que eram antes adversas devido aos efeitos de longo período de frio no final da primavera, se tornarão adequadas à praga, de acordo com às modelagens. Essa expansão na disseminação da praga representa uma grande ameaça para diversas culturas de interesse agrícola, como grãos e algodão.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, K. C.; DWYER, G. Food limitation and insect outbreaks: complex dynamics in plant-herbivore models. **Journal of Animal Ecology**, v.76, p.1004-1014, 2007.
- AURAMBOUT, J. P.; FINLAY, K. J.; LUCK, J.; BEATTIE, G. A. C. A concept model to estimate the potential distribution of the Asiatic citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama) in Australia under climate change - A means for assessing biosecurity risk. **Ecological Modelling**, v. 220, p. 2512-2524, 2009.
- BALE, J. S.; HAYWARD, S. A. L. Insect overwintering in a changing climate. **Journal of Experimental Biology**, v.213, p.980-994, 2010.
- BIRD, L. J. **Relative fitness in *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae) associated with resistance to the CryIA-endotoxins of *Bacillus thuringiensis***. 2006. 304 f. These (PhD in Ecology) - Australian National University, Canberra, 2006.
- CULLEN, J. M. **The reproduction and survival of *Heliothi spunctigera* Wallengren in South Australia**. 1969. 195f. These (PhD in Ecology) - University of Adelaide, Adelaide, 1969.
- DELL, D.; SPARKS, T. H.; DENNIS, R. L. Climate change and the effect of increasing spring temperatures on emergence dates of the butterfly *Apatura iris* (Lepidoptera: Nymphalidae). **European Journal of Entomology**, v.102, p.161-167, 2005.
- DILLON, G. E.; FITT, G. P.; FORRESTER, N. W. Factors influencing egg survival and larval establishment of *Heliothis* on cotton. *In*: 6th Australian Cotton Conference, 1992, Broadbeach, Queensland. Australian Cotton Growers ' Research Association, p.277-282, 1992.
- DILLON, M. L.; FIN, G. P. HEAPS: a regional model of *Heliothis* population dynamics. *In*: **Fifth Australian Cotton Conference**, 1990, Broadbeach, QLD. p.337-344, 1990.
- EHRLÉN, J.; MORRIS, W. F. Predicting changes in the distribution and abundance of species under environmental change. **Ecology Letters**, v.18, p.303-314, 2015.
- FARR, J. D. Biology of the gumleaf skeletoniser, *Uraba lugens* Walker (Lepidoptera: Noctuidae), in the southern jarrah forest of Western Australia. **Australian Journal of Entomology**, v.41, p.60-69, 2002.
- FATH, B. D. Sustainable systems promote wholeness-extending transformations: The contributions of systems thinking. **Ecological Modelling**, v.293, p.42-48, 2014.
- FITT, G. P. The Ecology of *Heliothis* Species in Relation to Agroecosystems. **Annual Review of Entomology**, v.34, p.17-53, 1989.
- GARRETTA, K. A.; DOBSONB, A. D. M.; KROSCHEL, J.; NATARAJAND, B. The effects of climate variability and the color of weather time series on agricultural diseases and

pests, and on decisions for their management. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.170, p. 216-227, 2013.

GORDON, D.; STEWART, R. Demographic characteristics of the stored products moth *Cadra cautella*. **Journal of Animal Ecology**, v.57, p. 627-644, 1988.

GREGG, P. C.; DEL SOCORRO, A. S.; MOTTEE, L. C.; TANN, C. R.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P. Host plants and habitats of *Helicoverpa punctigera* and *H. armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in inland Australia. **Australian Entomology**, v.58, p.547-560, 2018.

GU, S.; HAN, P.; YE, Z.; PERKINS, L. E.; LI, J.; WANG, H.; ZALUCKI, M. P.; LU, Z. Climate change favours a destructive agricultural pest in temperate regions: Late spring cold matters. **Journal of Pest Science**, v.91, p.1191-1198, 2018.

GUISAN, A.; TINGLEY, R.; BAUMGARTNER, J. B.; NAUJOKAITIS-LEWIS, I. Predicting species distributions for conservation decisions. **Ecology Letters**, v.16, p. 1424-1435, 2013.

HAMILTON, G.; FITT, G. P. HEAPS, *Heliothis armigera* and *punctigera* simulation model. *In: Proceedings of the Australian Cotton Conference*, 1988, Surfers Paradise. p.139-145.

HENGEVELD, R. **Dynamic Biogeography**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, p.264, 1990. Cambridge Studies in Ecology.

HUANG, J.; LI, J. Spring phenology of cotton bollworm affects wheat yield. **Ecology and Evolution**, v.7, p.1078-1090, 2017.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, United Kingdom: 2013.

ITTERSUM, M.; LEFFELAAR, P.; KEULEN, H.; KROPFF, M. On approaches and applications of the wageningen crop models. **European Journal of Agronomy**, v.18, p. 201-234, 2003.

KAY, I. R. The effect of constant temperatures on the development time of eggs of *Heliothis armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of the Australian Entomological Society**, v. 20, p.155-156, 1981.

KEENAN, T.F. Phenology: Spring greening in a warming world. **Nature**, v.526, p.48-49, 2015.

KIM, Y.; KIMBALL, J. S; ZHANG, K.; MCDONALD, K. C. Satellite detection of increasing Northern Hemisphere non-frozen seasons from 1979 to 2008: Implications for regional vegetation growth. **Remote Sensing of Environment**, v.121, p.472-487, 2012.

KRITICOS, D. J.; BROWN, J. R.; MAYWALD, G. F.; RADFORD, I. D. SPAnDX: a process-based population dynamics model to explore management and climate change

impacts on an invasive alien plant, *Acacia nilotica*. **Ecological Modeling**, v.13, p. 187-208, 2003.

KRITICOS, D. J.; MAYWALD, G. F.; YONOW, T.; SUTHERST, R. W. **Dymex Builder: User's Guide**. 2016. 174 p.

LENZNER, B.; LECLÈRE, D.; FRANKLIN, O.; SEEBENS, H. A framework for global twenty-first century scenarios and models of biological invasions. **BioScience**, v.69, p.697-710, 2019.

MAELZER, D.; ZALUCKI, M. P. Long range forecasts of the numbers of *Helicoverpa punctigera* and *H. armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia using the southern oscillation index and the sea surface temperature. **Bulletin of Entomological Research**, v.90, p.133-146, 2000.

MAYWALD, G. F.; SUTHERST, R. W.; KRITICOS, D. J. **DYMEX Professional: Modelling Natural Systems (Version 2.0)**. Melbourne: Hearne Scientific Publishing, p.1151, 2004.

MORTON, N. Time related factors in *Heliothis* control on cotton. **Journal of Pesticide Science**, v.10, p.254-270, 1979.

NADEL, R. L.; WINGFIELD, M. J.; SCHOLE, M. C.; GARNAS, J. R.; LAWSON, S. A.; SLIPPES, B. Population dynamics of *Thaumastocoris peregrinus* in Eucalyptus plantations of South Africa. **Journal of Pest Science**, v.88, p.97-106, 2015.

NURHAYATI, E.; KOESMARYONO, Y. Predictive modeling of rice yellow stem borer population dynamics under climate change scenarios in Indramayu. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **58**, 2017.

OUYANG, F.; HUI, C.; MEN, X. Y.; ZHANG, Y.S. Early eclosion of overwintering cotton bollworm moths from warming temperature accentuates yield loss in wheat. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.217, p.89-98, 2016.

PIAO, S.; TAN, J.; CHEN, A.; FU, Y. H.; CIAIS, P.; LIU, Q.; JANSESS, I. A.; VICCA, S.; ZENG, Z.; JEONG, S.; LI, R.; MYNENI, R. B.; PENG, S.; SHEN, M.; PENUELAS, J. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. **Nature Communications**, v.6, p.1-19, 2015.

QAYYUM, A.; ZALUCKI, M. P. The effects of high temperatures on survival of eggs of *Heliothis armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of the Australian Entomological Society**, v.26, p.295-298, 1987.

REGNIERE, J.; NEALIS, V. G. Two side of a coin: host-plant synchrony fitness trade-offs in the population dynamics of the western spruce budworm. **Insect Science**, v.25, p.117-126, 2018.

ROLAND, J.; MATTER, S. F. Pivotal effect of early-winter temperatures and snowfall on population growth of alpine *Parnassius smintheus* butterflies. **Ecological Monographs**, v.86, p.412-428, 2016.

- ROOM, P. M. Parasites and Predator of *Helioths* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) In Cotton In The Namoi Valley, New South Wales. **Australian Journal of Entomology**, v.18, p.223-228, 1980.
- SATAKE, A.; OHGUSHI, T.; URANO, S.; UCHIMURA, K. Modeling population dynamics of a tea pest with temperature-dependent development: predicting emergence timing and potential damage. **Ecological Research**, v.21, p.107-116, 2006.
- SOLIMAN, E.; WILCKEN, C.; PEREIRA, J.; DIAS, T.; ZACHE, B.; DAL POGETTO, M.; BARBOSA, L. Biology of *Thaumastocoris peregrinus* in different eucalyptus species and hybrids. **Phytoparasitica**, v.40, p.223-230, 2012.
- STILING, P. Density-dependent processes and key factors in insect populations. **Journal of Animal Ecology**, v.57, p.581-593, 1988.
- SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F; RUSSELL, B. L. Estimating vulnerability under global change: modular modelling of pests. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.82, p.1-3, 2000.
- TAKEDA, K.; MUSOLIN, D. L.; FUJISAKI, K. Dissecting insect responses to climate warming: overwintering and post-diapause performance in the southern green stink bug, *Nezara viridula*, under simulated climate-change conditions. **Physiological Entomology**, v.35, p.343-35, 2010.
- TONNANGA, H. E. Z.; HERVÉC, B. D. B.; BIBER-FREUDENBERGERD, L.; SALIFU, D. Advances in crop insect modelling methods - Towards a whole system approach. **Ecological Modelling**, v.354, p.88-103, 2017.
- TWINE, P. H. Effect of temperature on the development of larvae and pupae of the com earworm *Heliothis armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae). **Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences**, v.35, p. 23-28, 1978.
- UELLEN, J. A.; LINDROTH, R. L.; TOBIN, P. C.; REICH, P. B. Effects of winter temperatures, spring degree-day accumulation, and insect population source on phenological synchrony between forest tent caterpillar and host trees. **Forest Ecology and Management**, v.362, p.241-250, 2016.
- VISSER, M. E.; HOLLEMAN, L. J. M. Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v.268, p.289-294, 2001.
- WAGENHOFF, E.; WAGENHOFF, A.; BLUM, R.; VEIT, H. Does the prediction of the time of egg hatch of *Thaumetopoea processionea* (Lepidoptera: Notodontidae) using a frost day/temperature sum model provide evidence of an increasing temporal mismatch between the time of egg hatch and that of budburst of *Quercus robur* due to recent global warming? **European Journal of Entomology**, v.111, p.207-215, 2014.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W.; BRUN, F. **Working with dynamic crop models: Methods, tools and examples for agriculture and environment**. 3rd edition. Academic Press, 2018.

WALTERS, J. P.; ARCHER, D. W.; SASSENATH, G. F.; HENDRICKSON, J. R. Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. **Ecological Modelling**, v.333, p. 51-65, 2016.

WANG, C.; CAO, R.; CHEN, J.; RAO, Y.; TANG, Y. Temperature sensitivity of spring vegetation phenology correlates to within-spring warming speed over the Northern Hemisphere. **Ecological Indicators**, v.50, p.62-68, 2015.

WANG, T.; OTTLE, C.; PENG, S.; JANSSENS, I. A. The influence of local spring temperature variance on temperature sensitivity of spring phenology. **Global Change Biology**, v.20, p.1473-1480, 2014.

YONOW, T.; ZALUCKI, M. P.; SUTHERST, R. W.; DOMINIAK, B.; MAYWALD, G.; MAELZER, D. A.; KRITICOS, D. Modelling the population dynamics of the Queensland fruit fly, *Bactrocera (Dacus) tryoni*: A cohort-based approach incorporating the effects of weather. **Ecological Modelling**, v.173, p.9-30, 2004.

ZALUCKI, M. P.; FURLONG, M. J. Forecasting *Helicoverpa* populations in Australia: A comparison of regression based models and a bioclimatic based modelling approach. **Insect Science**, v.12, p.45-56, 2005.

ZALUCKI, M. P.; DAGLISH, G.; FIREMPONG, S.; TWINE, P. The biology and ecology of *Heliothis armigera* (Hubner) and *Heliothis punctigera* Wallengren (Lepidoptera, Noctuidae) in Australia - what do we know. **Australian Journal of Zoology**, v.34, p.779-814, 1986.

ZALUCKI, M. P.; FURLONG, M. J. Forecasting *Helicoverpa* populations in Australia: a comparison of regression based models and a bioclimatic based modelling approach. **Insect Science**, v.12, p.45-56, 2005.

CONCLUSÕES FINAIS

O atual modelo CLIMEX para *H. punctigera* é composto por novos valores de parâmetros biológicos que abordam e ajustam algumas inconsistências no modelo anterior de Zalucki & Fulong (2005). Em comparação com o modelo anterior, o atual fornece um melhor ajuste para a distribuição conhecida de *H. punctigera*, incluindo populações efêmeras e permanentes, além da inserção do uso da prática da irrigação em áreas irrigadas. Na Austrália, o modelo atual prevê o aumento da adequação climática na faixa costeira, especialmente na região Norte, Nordeste e Sudeste, enquanto que a região central, mais árida, apresenta uma menor adequação climática devido a baixa disponibilidade de água e consequente aumento do estresse por seca. O modelo atual também oferece um melhor ajuste para os efeitos do estresse por frio no desenvolvimento de *H. punctigera*, em que foi identificado no Sudeste australiano um maior efeito do frio provocado pelas baixas temperaturas dessa região por esta em uma zona de clima temperado.

Nas condições climáticas atuais e futuras, o modelo sugere capacidade de *H. punctigera* em se estabelecer em todas regiões dos trópicos. Nos cenários de mudança climática devido ao aumento de temperatura ocorrerá mudança em direção aos polos e regiões de maiores altitudes, que atualmente são frias, como o Sul do Brasil, Europa, América do Norte, Sudeste Asiático e, Ilhas do Pacífico Sul, incluindo a Nova Zelândia. Foi identificado que o principal fator limitante ao desenvolvimento da *H. punctigera* é o estresse por seca, pois elevados índices deste estresse contribuem para a redução da abundância desta praga no cenário atual e de mudanças climáticas futuras.

De acordo com as previsões a temperatura continuará a aumentar e a precipitação reduzir em condição de aquecimento global, portanto, a influência negativa do efeito do frio nas populações de *H. punctigera* diminuirá e a abundância da mariposa aumentará. Outro ponto está relacionado com a redução do tempo de desenvolvimento das fases de ovos e larvas e, conseqüentemente uma redução no ciclo permitindo assim um maior número de gerações por ano. Em escala global esse aumento de temperatura pode criar condições favoráveis para *H. punctigera* migrar para outras regiões próximas, como a Ásia, onde as condições que eram antes adversas devido aos efeitos de longo período de frio presente no final da primavera. Essa expansão na disseminação representa uma grande ameaça para diversas culturas de interesse agrícola, como grãos e algodão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nesta pesquisa são de grande importância para o debate do risco real que as pragas quarentenárias ausentes (PQA) representam para diversos países no mundo, principalmente para o Brasil, um país que tem no agronegócio a grande roda motriz da economia. O Brasil, ao longo dos anos, colecionou diversos casos de introdução de PQA que após a introdução, se estabeleceram, provocando sérios prejuízos, com destaque para lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera: Noctuidae); broca-pequena-do-tomateiro, *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae); bicudo-do-algodoeiro, *Anthonomus grandis* Boheman (Coleoptera: Curculionidae); broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae); ácaro-das-palmeiras, *Raoiella indica* Hirst (Prostigmata: Tenuipalpidae) e lagarta-helicoverpa *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae).

No cenário mundial existem muitas outras pragas exóticas com elevado potencial de dano assim como *H. armigera*. Algumas PQA apresentam maior potencial de dano quando comparadas às outras. Destaca-se uma “prima” próxima da *H. armigera*, oriunda do mesmo centro de origem (Austrália), que assombra produtores de grãos, de algodão, de hortaliças e de frutas no mundo, e atende pelo nome científico de *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae). Por serem bastante similares é necessária atenção na identificação correta destas espécies. *Helicoverpa punctigera* é uma espécie extremamente polífaga que ataca aproximadamente 130 espécies de plantas e nos dias atuais encontra-se restrita apenas à Austrália

Dada a importância da dispersão de pragas exóticas no mundo, as técnicas de previsão de introdução tornaram-se fundamentais, pois trata-se de uma ferramenta de menor custo ante o controle ou a erradicação da praga introduzida, já que os custos subsequentes de um processo de invasão são crescentes e por vezes os problemas gerados são irreversíveis. Alguns países no mundo já utilizam essas análises de risco de introdução de pragas exóticas com sucesso, podendo-se destacar a Austrália, os EUA, a Coreia do Sul e a China

Além de criar modelos de introdução é possível prever a variação temporal e espacial de pragas endêmicas dentro do país e até mesmo prever como será a distribuição potencial em cenários futuros de mudança climática.

As análises de risco de pragas são poderosas ferramentas de comunicação visual para descrever onde espécies exóticas invasoras podem chegar, estabelecer-se, espalhar-se ou provocar impactos ambientais, sanitários e econômicos. Esses modelos têm como objetivo orientar as tomadas de decisão estratégicas e adotar as melhores táticas no gerenciamento de

pragas, como possíveis restrições de importação de mercadorias oriundas de locais com pragas potenciais ou refinar o design de pesquisas, desenvolvendo modelos mais precisos de interceptação de pragas quarentenárias, similar ao observado na USDA-APHIS-USA. No Brasil, poucos são os estudos utilizando essas ferramentas de modelagem na proteção fitossanitária, visto que é uma ciência multidisciplinar, ou seja, é necessário conhecimento sobre modelagem matemática, biologia e ecologia de insetos. Por isso, é necessário que haja um maior engajamento dos órgãos de regulação fitossanitária com a comunidade acadêmica em busca de uma maior colaboração internacional na construção de modelos mais robustos e com rigor científico necessário para que essas pesquisas fomentem políticas protecionistas.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, K. C.; DWYER, G. Food limitation and insect outbreaks: Complex dynamics in plant-herbivore models. **Journal of Animal Ecology**, v.76, p.1004-1014, 2007.
- ANGILLETTA, M. J. Thermal adaptation: A theoretical and empirical synthesis. **Oxford University Press**, 1-302, 2009.
- AUKEMA J. E.; MCCULLOUGH, D. G.; VON HOLLE, B.; LIEBHOLD, A. M.; BRITTON, K.; FRANKEL, S. J. Historical accumulation of nonindigenous forest pests in the Continental United States. **Bioscience**, v.60, p.886-897, 2010.
- AURAMBOUT, J. P.; FINLAY, K. J.; LUCK, J.; BEATTIE, G. A. C. A concept model to estimate the potential distribution of the Asiatic citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama) in Australia under climate change - A means for assessing biosecurity risk. **Ecological Modelling**, v. 220, p. 2512-2524, 2009.
- BAILEY, P. T. **Pests of field crops and pastures: Identification and control**. Collingwood: CSIRO Publishing. p. 89, 2007.
- BAKER, G. H.; TANN, C. R.; FITT, G. P. A tale of two trapping methods: *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera, Noctuidae) in pheromone and light traps in Australian cotton production systems. **Bulletin of Entomological Research**, v.101, p.9-23, 2011.
- BAKER, R. H. A.; SANSFORD, C. E.; JARVIS, C. H.; CANNON, R. J. C.; MACLEOD, A.; WALTERS, K. F. A. The role of climatic mapping in predicting the potential geographical distribution of non-indigenous pests under current and future climates. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.82, p.57-71, 2000.
- BALE, J. S.; HAYWARD, S. A. L. Insect overwintering in a changing climate. **Journal of Experimental Biology**, v.213, p.980-994, 2010.
- BIRD, L. J. **Relative fitness in *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae) associated with resistance to the CryIA-endotoxins of *Bacillus thuringiensis***. 2006. 304 f. (PhD) - Ecologic, Australian National University, Canberra, 2006.
- BRADLEY, B. A. Regional analysis of the impacts of climate change on cheatgrass invasion shows potential risk and opportunity. **Global Change Biology**, v.15, p.196-208, 2009.
- BRADLEY, B. A.; WILCOVE, D. S.; OPPENHEIMER, M. J. B. I. Climate change increases risk of plant invasion in the Eastern United States. **Biological Invasions**, v.12, p.1855-1872, 2010.
- Bureau of Meteorology (BOM). Average annual, seasonal and monthly rainfall.' Available: http://www.bom.gov.au/jsp/ncc/climate_averages/temperature. Acessado em 26 de junho ,2019.

CHEJARA, V. K.; KRITICOS, D. J.; KRISTIANSEN, P.; SINDEL, B. M.; WHALLEY, R. D. B.; NADOLNY, C. The current and future potential geographical distribution of *Hyparrhenia hirta*. **Weed Research**, v.50, p.174-184, 2010.

CHOWN, S. L.; NICOLSON, S. Insect physiological ecology: Mechanisms and patterns. **Oxford University Press**: 1-254, 2004.

CHOWN, S. L.; TERBLANCHE, J. S. Physiological diversity in insects: Ecological and evolutionary contexts. **Advances in Insect Physiology**, v.33, p.50-152, 2006.

CULLEN J. M.; BROWNING, T. O. The influence of photoperiod and temperature on the induction of diapause in pupae of *Heliothis punctigera*. **Journal of Insect Physiology**, v.24, p.595-601, 1978.

CULLEN. J. M. **The reproduction and survival of *Heliothi spunctigera* Wallengren in South Australia**. 1969. 195f. (PhD) - Ecologic, University of Adelaide, Adelaide. 1969.

CUNNINGHAM, J. P.; ZALUCKI, M. P. Understanding *Heliothine* (Lepidoptera: Heliothinae) pests: what is a host plant?. **Journal of Economic Entomology**, v. 107, p.881-96, 2014.

CZEPAK, C.; ALBERNAZ, K. C.; VIVAN, L. M.; GUIMARAES, H. O.; CARVALHAIS, T. First reported occurrence of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, p.110-113, 2013.

DA SILVA, R. S.; KUMAR, L.; SHABANI, F.; PICANÇO, M. C. Potential risk levels of invasive *Neoleucinodes elegantalis* (small tomato borer) in areas optimal for open-field *Solanum lycopersicum* (tomato) cultivation in the present and under predicted climate change. **Pest Management Science**, v.73, p.616-627, 2017.

DAGLISH, G. J. **Influence of temperature on the development of *Helicoverpa armigera* (Hübner) and *H. punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae)**. PhD Thesis. The University of Queensland. 1991.

DE VILLIERS, M.; HATTINGH, V.; KRITICOS, D. J.; BRUNEL, S.; VAYSSIÈRES, J. F.; SINZOGAN, A.; BILLAH, M. K.; MOHAMED, S. A.; MWATAWALA, M.; ABDELGADER, H.; SALAH, F. E. E.; DE MEYER, M. The potential distribution of *Bactrocera dorsalis*: considering phenology and irrigation patterns. **Bulletin of Entomological Research**, v.106, p.19-33, 2016.

DELL, D.; SPARKS, T. H.; DENNIS, R. L. Climate change and the effect of increasing spring temperatures on emergence dates of the butterfly *Apatura iris* (Lepidoptera: Nymphalidae). **European Journal of Entomology**, v.102, p.161-167, 2005.

DILLON, G. E.; FITT, G. P.; FORRESTER, N. W. Factors influencing egg survival and larval establishment of *Heliothis* on cotton *In*: 6th Australian Cotton Conference, 1992, Broadbeach, Queensland. Australian Cotton Growers ' Research Association, p. 277-282.

DILLON, M. L.; FIN, G. P. HEAPS: a regional model of *Heliothis* population dynamics. *In*: Fifth Australian Cotton Conference, 1990, Broadbeach, QLD. p. 337-344.

DUKES, J. S.; MOONEY, H. A. Does global change increase the success of biological invaders? **Trends in Ecology & Evolution**, v.14, p.135-139, 1999.

DUURSMA, D. E.; GALLAGHER, R. V.; ROGER, E.; HUGHES, L.; DOWNEY, P. O.; LEISHMAN, M. R. Next-generation invaders? Hotspots for naturalised sleeper weeds in Australia under future climates. **PloS one** **8**, e84222, 2013.

EHRLÉN, J.; MORRIS, W. F. Predicting changes in the distribution and abundance of species under environmental change. **Ecology Letters**, v.18 (3), p. 303-314, 2015.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ameaças fitossanitárias para a cultura da soja na safra 2015/16. 2015.

FARR, J. D. Biology of the gumleaf skeletoniser, *Uraba lugens* Walker (Lepidoptera: Noctuidae), in the southern jarrah forest of Western Australia. **Australian Journal of Entomology**, v. 41 (1), p. 60-69, 2002.

FARROW, R. A.; DALY, J. C. Long range movement as an adaptive strategy in the genus *Heliothis* (Lepidoptera: Noctuidae): a review of its occurrence and detection in four pest species. **Australian Journal of Zoology**, v. 35, p.124, 1987.

FATH, B. D. Sustainable systems promote wholeness-extending transformations: The contributions of systems thinking. **Ecological Modelling**, v. 293, p. 42-48, 2014.

FITT, G. P. The Ecology of *Heliothis* Species in Relation to Agroecosystems. **Annual Review of Entomology**, 34, n. 1, p. 17-53, 1989a.

FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P.; TWINE, P. H. Temporal and spatial patterns in pheromone-trap catches of *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) in cotton-growing areas of Australia. **Bulletin of Entomological Research**, v. 79, p. 145-161, 1989b.

GARRETT, K. A.; DOBSON, A. D. M.; KROSCHEL, J.; B. The effects of climate variability and the color of weather time series on agricultural diseases and pests, and on decisions for their management. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.170, p. 216-227, 2013.

GORDON, D.; STEWART, R. Demographic characteristics of the stored products moth *Cadra cautella*. **Journal of Animal Ecology**, v.57, p. 627-644, 1988.

GORDON, H. B.; ROTSTAYN, L. D.; MCGREGOR, J. L.; DIX, M. R.; KOWALCZYK, E. A.; O'FARRELL, S. P.; WATERMAN, L. J.; HIRST, A. C.; WILSON, S. G., COLLIER, M. A.; WATTERSON, I. G.; ELLIOTT, T. I. The CSIRO Mk3 Climate System Model. **CSIRO Atmospheric Research**, Aspendale, Australia: 1-134, 2002.

GREGG, P. C. Migration of cotton pests: patterns and implications for management. In: Constable GA, Forrester NW (Eds) Challenging the future. proceedings of the first world cotton research conference. **CSIRO**, Canberra (Australia), p.423-433, 1995 a.

GREGG, P.C. Pollen as a marker for *Helicoverpa armigera* (Hubner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae) emigrating from western Queensland. **Australian Journal of Ecology**, v.18, p. 209-219, 1993.

GREGG, P. C.; DEL SOCORRO, A. P.; LE MOTTEE, K.; TANN, C. R.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P. Host plants and habitats of *Helicoverpa punctigera* and *H. armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in inland Australia. **Austral Entomology**, v.58, p.547-560, 2019.

GREGG, P. C.; DEL SOCORRO, A. P.; ROCHESTER, W. A. Field test of a model of migration of moths (Lepidoptera: Noctuidae) in inland Australia. **Australian Journal of Entomology**, v.40, p. 249-256, 2001.

GREGG, P. C.; DEL SOCORRO, A. S.; MOTTEE, L. C.; TANN, C. R.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. Host plants and habitats of *Helicoverpa punctigera* and *H. armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in inland Australia. **Australian Entomology**, v. 58, p. 547-560, 2018.

GREGG, P. C.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P.; MURRAY, D. A. H. Insect migration in an arid continent. II *Helicoverpa* spp. in eastern Australia. In: DRAKE, V.A. (Ed.), Insect migration: tracking resources through space and time. **University Press** (Cambridge): 151-172, 1995b.

GU, S.; HAN, P.; YE, Z.; PERKINS, L. E.; LI, J.; WANG, H.; ZALUCKI, M. P.; LU, Z. Climate change favours a destructive agricultural pest in temperate regions: Late spring cold matters. **Journal of Pest Science**, v.91, p.1191-1198, 2018.

GUISAN, A.; TINGLEY, R.; BAUMGARTNER, J. B.; NAUJOKAITIS-LEWIS, I. Predicting species distributions for conservation decisions. **Ecology Letters**, v.16, p. 1424-1435, 2013.

GULLAN, P. J.; CRANSTON, P. S. The Insects: An outline of entomology, 5th Edition. **Wiley-Blackwell Publisher**: 1-584, 2014.

HAMILTON, G.; FITT, G. P. HEAPS, *Heliothis armigera* and *punctigera* simulation model. In: Proceedings of the Australian Cotton Conference, 1988, Surfers Paradise. p. 139-145.

HENGEVELD, R. **Dynamic Biogeography**. Cambridge, UK.: Cambridge University Press, 1990. Cambridge Studies in Ecology.

HUANG, J.; LI, J. Spring phenology of cotton bollworm affects wheat yield. **Ecology and Evolution**, v.7, p.1078-1090, 2017.

HULME, P. E. Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. **Journal of Applied Ecology**, v.46, p.10-18, 2009.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** Cambridge, United Kingdom: 2013.

IPCC. **Climate Change: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 2007.

IRELAND, K. B.; BULMAN, L.; HOSKINS, A. J.; PINKARD, E. A.; MOHAMMED, C.; KRITICOS, D. J. Estimating the potential geographical range of *Sirex noctilio*: comparison with an existing model and relationship with field severity. **Biological Invasions**, v.20, p.2599-2622, 2018.

ITTERSUM, M.; LEFFELAAR, P.; KEULEN, H.; KROPFF, M. On approaches and applications of the wageningen crop models. **European Journal of Agronomy**, v.18, p. 201-234, 2003.

JARNEVICH C. S., STOHLGREN T. J., KUMAR S., MORISETTE J. T. & HOLCOMBE T. R. Caveats for correlative species distribution modeling. **Ecological Informatics**, v.29, p.6-15, 2015.

KAY, I. R. The effect of constant temperatures on the development time of eggs of *Heliothis armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of the Australian Entomological Society**, v. 20, p.155-156, 1981.

KEENAN, T. F. Phenology: Spring greening in a warming world. **Nature**, v.526, p.48-49, 2015.

KIM, Y.; KIMBALL, J. S.; ZHANG, K.; MCDONALD, K. C. Satellite detection of increasing Northern Hemisphere non-frozen seasons from 1979 to 2008: Implications for regional vegetation growth. **Remote Sensing of Environment**, 121:472-487, 2012.

KRITICOS D. J.; OTA, N.; HUTCHISON, W.D.; BEDDOW, J.; WALSH, T.; WALSH, T.; TAY, W. T.; BORCHERT, D. M.; PAULA-MOREAS, S. V.; CZEPAK, C.; ZALUCKI, M. P. The potential distribution of invading *Helicoverpa armigera* in North America: Is it just a matter of time? **PLoS ONE**, v. 10, 2015a.

KRITICOS, D. J.; BROWN, J. R.; MAYWALD, G. F.; RADFORD, I. D. SPAnDX: a process-based population dynamics model to explore management and climate change impacts on an invasive alien plant, *Acacia nilotica*. **Ecological Modeling**, v.13, p. 187-208, 2003.

KRITICOS, D. J.; MAYWALD, G. F.; YONOW, T.; SUTHERST, R. W. **Dymex Builder: User's Guide**. 2016. 174 p.

KRITICOS, D. J.; DE BARRO, P. J.; YONOW, T.; OTA, N.; SUTHERST, R. W. The potential geographical distribution and phenology of *Bemisia tabaci* Middle East Asia Minor 1, considering irrigation and glasshouse production. **Bulletin of Entomological Research**, v.1, p.10, 2020.

KRITICOS, D. J.; LERICHE, A.; PALMER, D. J.; COOK, D. C.; BROCKERHOFF, E. G.; STEPHENS, A. E. A.; WATT, M. S. Linking climate suitability, spread rates and host-impact when estimating the potential costs of invasive pests. **PLoS One**, v.8, p.54861, 2013.

KRITICOS, D. J.; MAYWALD, G. F.; YONOW, T.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; SUTHERST, R. W. CLIMEX Version 4: Exploring the effects of climate on plants, animals and diseases. **CSIRO**, Canberra. 156 p, 2015b.

KRITICOS, D. J.; RANDALL, R. P. A comparison of systems to analyse potential weed distributions. *In: Weed Risk Assessment* (eds GROVES, R.H.; PANETTA, F.D. & VIRTUE, J.G.), 61-79. **CSIRO Publishing**, Melbourne, Australia, 2001.

KRITICOS, D. J.; SUTHERST, R. W.; BROWN, J. R.; ADKINS, S. W.; MAYWALD, G. F. Climate change and the potential distribution of an invasive alien plant: *Acacia nilotica* ssp. *indica* in Australia. **Journal of Applied Ecology**, v.40, p.111-124, 2003.

KRITICOS, D. J.; VENETTE, R. C.; BAKER, R. H. A.; BRUNEL, S.; KOCH, F. H.; RAFOSS, T.; VAN DER WERF, W.; WORNER, S. P. Invasive alien species in the food chain: Advancing risk assessment models to address climate change, economics and uncertainty. **NeoBiota**, v.18, p.1-7, 2013.

KRITICOS, D. J.; WEBBER, B. L.; LERICHE, A.; OTA, N.; MACADAM, I.; BATHOLS, J.; SCOTT, J. K. CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. **Methods in Ecology and Evolution**, v.3, p. 53-64, 2012.

LENZNER, B.; LECLÈRE, D.; FRANKLIN, O.; SEEBENS, H. A Framework for Global Twenty-First Century Scenarios and Models of Biological Invasions. **BioScience**, v.69 (9), p. 697-710, 2019.

LEVINE, J. M.; D'ANTONIO, C. M. Forecasting biological invasions with increasing international trade. **Conservation Biology**, v.17, p.322-326, 2003.

LIN, W.; ZHOU, G.; CHENG, X.; XU, R. Fast economic development accelerates biological invasions in China. **PLoS One**, v. 2, p.1208, 2007.

MAELZER, D.; ZALUCKI, M. Long range forecasts of the numbers of *Helicoverpa punctigera* and *H. armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia using the Southern Oscillation Index and the Sea Surface Temperature. **Bulletin of Entomological Research**, v.90 (2), p. 133-146, 2000.

MAELZER, D.; ZALUCKI, M. P.; LAUGHLIN, R. Analysis and interpretation of long term light-trap data for *Helicoverpa punctigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia: population changes and forecasting pest pressure. **Bulletin of Entomological Research**, v.86, p.547-557, 1996.

MAELZER, D. A.; ZALUCKI, M. P. Analysis and interpretation of long term light-trap data for *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia: the effect of climate and crop host plants. **Bulletin of Entomological Research**, v.89, p. 455-464, 1999.

MASTERS, G.; NORRGROVE, L. Climate change and invasive alien species. **CABI Working Paper**, v.1, p.30, 2010.

MATTHEWS, M. Heliothine Moths of Australia: A guide to Pest Bollworms and Related Noctuid Groups. **CSIRO**, Melbourne, 1999.

MATZENBACHER, N. I. Uma nova espécie do gênero *Senecio* L. (Asteraceae - Senecioneae) no Rio Grande do Sul, Brasil. *Iheringia, Série Botânica*, v. 64, p.109-113, 2009.

MAYWALD, G. F.; SUTHERST, R. W.; KRITICOS, D. J. **DYMEX Professional: Modelling Natural Systems (Version 2.0)**. Melbourne: Hearne Scientific Publishing, 2004.

MAYWALD, G. F.; SUTHERST, R. W. Users Guide to CLIMEX a Computer Program for Comparing Climates in Ecology. Second edition, **CSIRO** Australia, Division of Entomology Report No. 35, 1991.

MOHANDASS, S.; ZALUCKI, M. P. DBM development: are we measuring the right temperatures? In *The management of Diamondback Moth and Other Crucifer Pests*, **The Regional Institute**, Gosford, Australia, 26–29 November 2001, Melbourne, Australia, 2004.

MORTON, N. Time related factors in *Heliothis* control on cotton. **Journal of Pesticide Science**, v.10, p.254-270, 1979.

MURRAY, D. A. H. Investigations into the development and survival of *Heliothis* spp. in south-east. PhD Thesis University of Queensland, Queensland, 1991.

NADEL, R. L.; WINGFIELD, M. J.; SCHOLE, M. C.; GARNAS, J. R.; LAWSON, S. A.; SLIPPES, B. Population dynamics of *Thaumastocoris peregrinus* in Eucalyptus plantations of South Africa. **Journal of Pest Science**, v.88, p.97-106, 2015.

NORDENSTAM, B.; PELSER, P. B.; KADEREIT, J. W.; WATSON, L. E. Senecioneae. *In*: FUNK, V. A.; SUSANNA, A.; STUESSY, T. F.; BAYER, R. J. (eds.). **Systematics, Evolution, and Biogeography of Compositae**. IAPT, Vienna, pp. 503-521, 2009.

NURHAYATI, E.; KOESMARYONO, Y.; IMPRON. Predictive modeling of rice yellow stem borer population dynamics under climate change scenarios in Indramayu. *In*: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, **58**, 2017.

OERTEL, A.; ZALUCKI, M. P.; MAELZER, D. M.; FITT, G. P.; SUTHERST, R. Size of the first spring generation of *Helicoverpa punctigera* (Wallengren) (Lepidoptera: Noctuidae) and winter rain in central Australia. **Australian Journal of Entomology**, v.38, p.99-103, 1999.

OUYANG, F.; HUI, C.; MEN, X.Y.; ZHANG, Y. S. Early eclosion of overwintering cotton bollworm moths from warming temperature accentuates yield loss in wheat. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.217, p.89-98, 2016.

PEARSON, D. E.; ORTEGA, Y. K.; EREN, Ö.; HIERRO, J. L. Community assembly theory as a framework for biological invasions. **Trends in Ecology & Evolution**, v.33, p.313-325, 2018.

PELSER, P. B.; NORDENSTAM, B.; KADEREIT, J. W.; WATSON, L. E. An ITS phylogeny of tribe Senecione (Asteraceae) and a new delimitation of *Senecio* L. **Taxon**, v.56, p.1077-1104, 2007.

PETERSON, A. T. Predicting the geography of species invasion via ecological niche modeling. **The Quarterly Review of Biology**, v.78, p.419-433, 2003.

PIAO, S.; TAN, J.; CHEN, A.; FU, Y.H.; CIAIS, P.; LIU, Q.; JANSESS, I. A.; VICCA, S.; ZENG, Z.; JEONG, S.; LI, R.; MYNENI, R. B.; PENG, S.; SHEN, M.; PENUELAS, J. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. **Nature Communications**, v.6, 2015.

PORTER, J. H.; PARRY, M. L.; CARTER, T. R. The potential effects of climatic change on agricultural insect pests. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.57, p.221-240, 1991.

QAYYUM, A.; ZALUCKI, M. P. The effects of high temperatures on survival of eggs of *Heliothis armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae). **Journal of the Australian Entomological Society**, v.26, p.295-298, 1987.

REGNIERE, J.; NEALIS, V. G. Two side of a coin: host-plant synchrony fitness trade-offs in the population dynamics of the western spruce budworm. **Insect Science**, v.25, p.117-126, 2018.

ROCHESTER, W. A.; DILLON, M. L.; FITT, G. P.; ZALUCKI, M. P. A simulation model of the long-distance migration of *Helicoverpa* spp. moths. **Ecological Modelling**, v.86, p.151-156, 1996.

ROCHESTER, W. A.; ZALUCKI, M. P. Measuring the impacts of *Helicoverpa armigera* migration on pest management during summer and autumn. In: **Pest Management - Future Challenges**, Vols 1 and 2, Proceedings. 6th Australisian Applied Entomological Research Conference, Brisbane Australia, (A94-A98), 1998.

ROCHESTER, W. A.; ZALUCKI, M. P.; WARD, A.; MILES, M.; MURRAY, D. A. H. Testing insect movement theory: empirical analysis of pest data routinely collected from agricultural crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.35, p.139-149, 2002.

ROLAND, J.; MATTER, S.F. Pivotal effect of early-winter temperatures and snowfall on population growth of alpine *Parnassius smintheus* butterflies. **Ecological Monographs**, v.86, p.412-428, 2016.

ROOM, P. M. Parasites and Predator of *Helioths* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) In Cotton In The Namoi Valley, New South Wales. **Australian Journal of Entomology**, v.18 (3), p. 223-228, 1980.

ROQUES, A.; RABITSCH, W.; RASPLUS, J.Y.; LOPEZ-VAAMONDE, C.; NENTWIG, W.; KENIS, M. Alien terrestrial invertebrates of europe. handbook of alien species in europe. **Springer (Dordrecht/The Netherlands)**: 63-79, 2009

SATAKE, A.; OHGUSHI, T.; URANO, S.; UCHIMURA, K. Modeling population dynamics of a tea pest with temperature-dependent development: Predicting emergence timing and potential damage. **Ecological Research**, v.21, p.107-116, 2006.

SIEBERT, S.; DOLL, P.; HOOGEVEEN, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; FEICK, S. Development and validation of the global map of irrigation areas. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.9, p.535-547, 2005.

SOLIMAN, E.; WILCKEN, C.; PEREIRA, J.; DIAS, T.; ZACHE, B.; DAL POGETTO, M.; BARBOSA, L. Biology of *Thaumastocoris peregrinus* in different eucalyptus species and hybrids. **Phytoparasitica**, v. 40, p.223-230, 2012.

STAFFORD SMITH, D. M.; MORTON, S.R. A framework for the ecology of arid Australia. **Journal of Arid Environments**, v.18, p.255-279, 1990.

STEPHENS, A. E. A.; KRITICOS, D. J.; LERICHE, A. The current and future potential geographical distribution of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). **Bulletin of Entomological Research**, v.97, p.369-378, 2007.

STILING, P. Density-dependent processes and key factors in insect populations. **Journal of Animal Ecology**, v.57(2), p.581-593, 1988.

SUTHERST, R. W. Pest species distribution modelling: origins and lessons from history. **Biological Invasions**, v.16, p.239-256, 2014.

SUTHERST, R. W. Prediction of species geographical ranges. **Journal of Biogeography**, v.30, p.805-816, 2003.

SUTHERST, R. W.; CONSTABLE, F.; FINLAY, K. J.; HARRINGTON, R.; LUCK, J.; ZALUCKI, M. P. Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. **Wiley Interdisciplinary Review Climate Change**, v.2, p.220-237, 2011.

SUTHERST, R. W.; FLOYD, R. B.; MAYWALD, G. F. The potential geographic distribution of the cane toad, *Bufo marinus* L. in Australia. **Conservation Biology**, v.9, p.294-299, 1995.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F.; RUSSELL, B. L. Estimating vulnerability under global change: modular modelling of pests. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.82, p. 1-3, 2000.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F. A climate model of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae): Implications for invasion of new regions, particularly Oceania. **Environmental Entomology**, v.34, p.317-335, 2005.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F.; KRITICOS, D. J. CLIMEX v.3: User's Guide. Hearne Scientific Software, Australia: 1-131, 2007.

TAKEDA, K.; MUSOLIN, D. L.; FUJISAKI, K. Dissecting insect responses to climate warming: overwintering and post-diapause performance in the southern green stink bug, *Nezara viridula*, under simulated climate-change conditions. **Physiological Entomology**, v.35, p.343-35, 2010.

TAUBER, M. J.; TAUBER, C. A.; MASAKI, S. Seasonal adaptations of insects. **Oxford University Press**, Oxford, UK: p.1-426, 1986.

THUILLER, W. BIOMOD - optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. **Global Change Biology** v.9, p.1353-62, 2003.

TONNANG, H. E. Z.; HERVÉC, B. D. B.; BIBER-FREUDENBERGERD, L.; SALIFU, D. Advances in crop insect modelling methods - Towards a whole system approach. **Ecological Modelling**, v.354, p. 88-103, 2017.

TWINE, P. H. Effect of temperature on the development of larvae and pupae of the com earworm *Heliothis armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae). **Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences**, v.35, p. 23-28, 1978.

UELMEN, J. A.; LINDROTH, R. L.; TOBIN, P. C.; REICH, P. B. Effects of winter temperatures, spring degree-day accumulation, and insect population source on phenological synchrony between forest tent caterpillar and host trees. **Forest Ecology and Management**, v.362, p.241-250, 2016.

VISSER, M.E.; HOLLEMAN, L.J.M. Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v.268, p.289-294, 2001.

WAGENHOFF, E.; WAGENHOFF, A.; BLUM, R.; VEIT, H. Does the prediction of the time of egg hatch of *Thaumetopoea processionea* (Lepidoptera: Notodontidae) using a frost day/temperature sum model provide evidence of an increasing temporal mismatch between the time of egg hatch and that of budburst of *Quercus robur* due to recent global warming? **European Journal of Entomology**, v.111, p.207-215, 2014.

WALDEN, K. J. Insect migration in an arid continent. III. the Australian plague locust *Chortoicetes terminifera* and the native budworm *Helicoverpa punctigera* in Western Australia. In: Drake V. A.; Gatehouse, A. G. (Eds), *Insect Migration: Tracking Resources Through Space and Time*. Cambridge University Press, Cambridge: 173-190, 1995.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W.; BRUN, F. **Working with dynamic crop models: Methods, tools and examples for agriculture and environment**. 3rd edition. Academic Press, 2018.

WALTERS, J. P.; ARCHER, D. W.; SASSENATH, G. F.; HENDRICKSON, J. R. Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. **Ecological Modelling**, v.333, p. 51-65, 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**, v.416, p.389-395, 2002.

WANG, C.; CAO, R.; CHEN, J.; RAO, Y.; TANG, Y. Temperature sensitivity of spring vegetation phenology correlates to within-spring warming speed over the Northern Hemisphere. **Ecological Indicators**, v.50, p.62-68, 2015.

WANG, T.; OTTLE, C.; PENG, S.; JANSSENS, I. A. The influence of local spring temperature variance on temperature sensitivity of spring phenology. **Global Change Biology**, v.20, p.1473-1480, 2014.

WARDAUGH, K. G.; ROOM, P. M.; GREENUP, L. R. The incidence of *Heliothis armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae) on cotton and other host-plants in the Namoi Valley of New South Wales. **Bulletin of Entomological Research**, v.70, p.113-131, 1980.

WESTPHAL, M. I.; BROWNE, M.; MACKINNON, K.; NOBLE, I. J. B. I. The link between international trade and the global distribution of invasive alien species. **Biological Invasions**, v.10, p.391-398, 2008.

YONOW, T.; KRITICOS, D. J.; OTA, N.; VAN DEN BERG, J.; HUTCHISON, W. D. The potential global distribution of *Chilo partellus*, including consideration of irrigation and cropping patterns. **Journal of Pest Science**, v.90, p.459-477, 2016.

YONOW, T.; SUTHERST, R. W. The geographical distribution of the Queensland fruit fly, *Bactrocera* (Dacus) *tryoni*, in relation to climate. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.49, p.935-953, 1998.

YONOW, T.; ZALUCKI, M. P.; SUTHERST, R. W.; DOMINIAK, B.; MAYWALD, G.; MAELZER, D. A.; KRITICOS, D. Modelling the population dynamics of the Queensland fruit fly, *Bactrocera* (Dacus) *tryoni*: A cohort-based approach incorporating the effects of weather. **Ecological Modelling**, v. 173, p. 9-30, 2004.

ZALUCKI, M. P.; FURLONG, M. J. Forecasting *Helicoverpa* populations in Australia: A comparison of regression based models and a bioclimatic based modelling approach. **Insect Science**, v.12, p.45-56, 2005.

ZALUCKI, M.; DAGLISH, G.; FIREMPONG, S.; TWINE, P. The Biology and Ecology of *Heliothis armigera* (Hubner) and *Heliothis punctigera* Wallengren (Lepidoptera, Noctuidae) in Australia - What Do We Know. **Australian Journal of Zoology**, v.34, p.779-814, 1986.

ZALUCKI, M. P.; ADAMSON, D.; FURLONG, M. J. The future of IPM: whither or wither? **Australian Journal of Entomology**, v.48, p.85-96. 2009.

ZALUCKI, M. P.; DAGLISH, G. J.; FIREMPONG, S.; TWINE, P. The biology and ecology of *Heliothis armigera* (Hübner) and *H. punctigera* Wallengren (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia: what do we know?. **Australian Journal of Zoology**, v.34, p.779-814, 1986.

ZALUCKI, M. P.; FURLONG, M. J. Forecasting *Helicoverpa* populations in Australia: a comparison of regression based models and a bio-climatic based modelling approach. **Insect Science**, v.12, p.45-56, 2005.

ZALUCKI, M. P.; FURLONG, M. J. Predicting outbreaks of a migratory pest: an analysis of DBM distribution and abundance revisited, pp 8-14 In: SRINIVASAN, R.; SHELTON, A. M.; COLLINS, H. L.; eds. 2011. Proceedings of the Sixth International Workshop on Management of the Diamondback Moth and Other Crucifer Insect Pests, 21 - 25 March 2011, Kasetsart University, Nakhon Pathom, Thailand. AVRDC - The World Vegetable Center, Publication No. 11 - 755. AVRDC - The World Vegetable Center, Taiwan, 321 pp, 2011.

ZALUCKI, M. P.; GREGG, P. C.; FITT, G. P.; MURRAY, D. A. H.; TWINE, P. H.; JONES, C. Ecology of *Helicoverpa armigera* (Hübner) and *H. punctigera* in the inland areas of

eastern Australia: larval sampling and host plant relationships during winter/spring. **Australian Journal of Zoology**, v.42, p.329-346, 1994.

ZALUCKI, M. P.; VAN KLINKEN, R. D. Predicting population dynamics and abundance of introduced biological agents: science or gazing into crystal balls. **Australian Journal of Entomology**, v.45, p. 330-343, 2006.