

JOSÉ CARLOS BARBOSA DOS SANTOS

**PREVISÃO DOS RISCOS GLOBAIS ATUAIS E FUTUROS DA CIGARRINHA
Tagosodes orizicolus PARA OS CULTIVOS DE ARROZ USANDO FERRAMENTA
DE APRENDIZADO DE MÁQUINA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Marcelo Coutinho Picanço

Coorientador: Ricardo Siqueira da Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237p
2024

Santos, Jose Carlos Barbosa dos, 1991-

Previsão dos riscos globais atuais e futuros da cigarrinha
Tagosodes orizicolus para os cultivos de arroz usando ferramenta
de aprendizado de máquina / Jose Carlos Barbosa dos Santos. –
Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (32 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Marcelo Coutinho Picanço.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Fitotecnia, 2024.

Referências bibliográficas: f. 24-27.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.523>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Arroz - Doenças e pragas. 2. *Tagosodes orizicolus*.
3. Mudanças climáticas. 4. Aprendizado do computador .
I. Picanço, Marcelo Coutinho, 1958-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Fitotecnia. Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 632.754

JOSÉ CARLOS BARBOSA DOS SANTOS

**PREVISÃO DOS RISCOS GLOBAIS ATUAIS E FUTUROS DA CIGARRINHA
Tagosodes orizicolus PARA OS CULTIVOS DE ARROZ USANDO FERRAMENTA
DE APRENDIZADO DE MÁQUINA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 30 de julho de 2024.



Documento assinado digitalmente

JOSE CARLOS BARBOSA DOS SANTOS

Data: 06/09/2024 10:10:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

José Carlos Barbosa dos Santos
(Autor)



Documento assinado digitalmente

MARCELO COUTINHO PICANÇO

Data: 06/09/2024 09:50:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marcelo Coutinho Picanço
(orientador)

Aos meus pais,
pelo todo amor e carinho,
Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador e amigo, professor Marcelo Coutinho Picanço, pela orientação, incentivo e pelos seus conselhos.

Ao meu coorientador, professor Ricardo Siqueira da Silva, pelas valiosas críticas ao trabalho e pela enorme contribuição ao meu conhecimento científico. Aos doutores Jander Fagundes Rosado e Natália de Souza Ribas pelas sugestões e participação na banca examinadora de minha dissertação.

Aos órgãos de fomento pela concessão da bolsa de estudo: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Código de Financiamento 001.

Aos amigos e amigas do Laboratório de Manejo Integrado de Pragas MIP – UFV pela ajuda durante a execução deste trabalho e pelo agradável convívio. A Letícia, Jhersyka, Damaris e Luana Kailaine pelo suporte na coleta e análise dos dados de minha dissertação.

Às secretarias do Programa de Pós Graduação em Fitotecnia – UFV Tatiani e Lídia e ao funcionário Zé Evaristo do Departamento de Entomologia da UFV pela seriedade e eficiência no trabalho que fazem.

RESUMO

SANTOS, José Carlos Barbosa dos, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, julho de 2024. **Previsão dos riscos globais atuais e futuros da cigarrinha *Tagosodes orizicolus* para os cultivos de arroz usando ferramenta de aprendizado de máquina.** Orientador: Marcelo Coutinho Picanço. Coorientador: Ricardo Siqueira da Silva.

O arroz (*Oryza sativa*) é o alimento mais consumido diretamente pelas pessoas no mundo. A cigarrinha *Tagosodes orizicolus* (Hemiptera: Delphacidae) é uma praga que pode causar até 100% de perdas nas lavouras de arroz onde ela ocorre. Os modelos de nicho ecológico possibilitam prever a adequabilidade das regiões do mundo às pragas tanto no momento atual e mediante as mudanças climáticas. O MaxEnt é um algoritmo de aprendizado de máquina e ele é o principal programa para a determinação de modelos de nicho ecológico. Assim, este trabalho teve o objetivo de determinar modelo de nicho ecológico para previsão dos riscos globais atuais e futuros de *T. orizicolus* para lavouras de arroz usando o MaxEnt. O modelo de nicho ecológico teve como preditores a isotermalidade (Bio 3), precipitações pluviométricas dos trimestres mais quente (Bio 18) e mais frio (Bio 19), temperaturas médias do ar dos trimestres mais seco (Bio 9) e mais chuvoso (Bio 8). O modelo apresentou área abaixo da curva de $0,951 \pm 0,025$. As áreas do mundo com isotermalidade entre 25 a 85%, precipitação pluviométrica do trimestre mais quente entre 150 a 1000 mm, precipitação pluviométrica do trimestre mais frio entre 120 a 1500 mm, temperatura média do ar do trimestre mais seco acima de 10°C e temperatura média do ar do trimestre mais chuvoso entre 20 a 40°C são ideais para *T. orizicolus*. Deverá ocorrer aumento das áreas no mundo com alta adequabilidade climática à praga em 2040 e 2080, sobretudo se não houver controle global da emissão dos gases do efeito estufa (dióxido de carbono – CO₂, metano – CH₄, óxido nitroso – N₂O, ozônio (O₃) e hexafluoreto de enxofre (SF₆)). Portanto, o modelo de nicho ecológico determinado é robusto para prever áreas atuais e futuras do mundo com adequação climática para *T. orizicolus*. É previsto que as áreas do mundo com alta adequabilidade à praga aumentarão no futuro para o ano 2040 e 2080.

Palavras-chave: MaxEnt, *Oryza sativa*, mudanças climáticas, modelo de nicho ecológico, temperatura do ar, precipitação pluviométrica.

ABSTRACT

SANTOS, José Carlos Barbosa dos, M.Sc, Federal University of Viçosa, July 2024. **Forecasting the current and future global risks of the *Tagosodes orizicolus* leafhopper for rice crops using a machine learning tool.** Supervisor: Marcelo Coutinho Picanço. Co-supervisor: Ricardo Siqueira da Silva.

Rice (*Oryza sativa*) is the food most consumed directly by people in the world. The rice leafhopper *Tagosodes orizicolus* (Hemiptera: Delphacidae) is a pest that can cause up to 100% losses in rice fields where it occurs. Ecological niche models make it possible to predict the suitability of regions of the world for pests, both at the present time and in the face of climate change. MaxEnt is a machine learning algorithm and is the main program for determining ecological niche models. The aim of this study was to determine an ecological niche model for predicting the current and future global risks of *T. orizicolus* to rice crops using MaxEnt. The ecological niche model used isothermality (Bio 3), rainfall in the hottest (Bio 18) and coldest (Bio 19) quarters, and average air temperatures in the driest (Bio 9) and wettest (Bio 8) quarters as predictors. The model showed an area under the curve of 0.951 ± 0.025 . Areas of the world with isothermality between 25 and 85%, rainfall in the warmest quarter between 150 and 1000 mm, rainfall in the coldest quarter between 120 and 1500 mm, average air temperature in the driest quarter above 10°C and average air temperature in the wettest quarter between 20 and 40°C are ideal for *T. orizicolus*. There is likely to be an increase in areas in the world with high climatic suitability for the pest in 2040 and 2080, especially if there is no global control of greenhouse gas emissions (carbon dioxide - CO₂, methane - CH₄, nitrous oxide - N₂O, ozone (O₃) and sulphur hexafluoride (SF₆)). Therefore, the ecological niche model determined is robust to predicting current and future areas of the world with climatic suitability for *T. orizicolus*. It is predicted that the areas of the world with high suitability for the pest will increase in the future to the year 2040 and 2080.

Keywords: MaxEnt, *Oryza sativa*, climate change, ecological niche model, air temperature, rainfall.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1 Coleta dos dados	10
2.2. Determinação e validação do modelo	10
2.3. Determinação do efeito dos preditores sobre a adequabilidade climática das áreas do mundo a <i>T. orizicolus</i>	14
2.4. Determinação da adequabilidade climática atual e futura das áreas do mundo a <i>T. orizicolus</i>	15
3. RESULTADOS	17
3.1. Distribuição geográfica atual de <i>T. orizicolus</i>	17
3.2. Modelo de nicho ecológico	17
3.3. Efeito dos preditores sobre a adequabilidade climática das áreas do mundo a <i>T. orizicolus</i>	20
3.4. Adequabilidade climática atual e futura das áreas do mundo a <i>T. orizicolus</i>	20
4. DISCUSSÃO	23
5. CONCLUSÕES	26
6. REFERÊNCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é o cereal mais utilizado para o consumo humano no mundo e as suas lavouras são as principais fonte de emprego e renda para as populações rurais do mundo. Além disso, o arroz é um dos alimentos básicos mais importantes do mundo. Mais de 50 por cento da população mundial depende do arroz para cerca de 80 por cento de suas necessidades alimentares. (FAO, 2022; Norton et al., 2021; Samal et al., 2022). Os plantios de arroz ocupam 11% das terras aráveis do mundo. Em 2022 foram produzidas 776,46 milhões de toneladas de grãos de arroz em 165.04 milhões de hectares em 117 países da África, Américas, Ásia, Europa e Oceania. No ano de 2022 o comércio mundial dos produtos de arroz movimentou 27,69 bilhões de dólares em exportações e 31,18 bilhões de dólares em importações (FAO, 2024).

A cigarrinha *Tagosodes orizicolus* Müir. (Hemiptera: Delphacidae) é uma praga que devido aos seus danos diretos e indiretos causa até 100% de perdas nas lavouras de arroz nas regiões onde ela ocorre (Calvert & Reyes, 1999; Martin et al., 2020; Peñaranda et al., 1999). Além disso, esse inseto é praga quarentenária nos países produtores de arroz onde ele ainda não ocorre (EPPO, 2024). *T. orizicolus* causa danos devido a sucção de seiva, injeção de toxinas no sistema vascular das plantas e este inseto é vetor do vírus causador da virose da folha branca (RHBV). O ataque de *T. orizicolus* causa senescência e necrose das folhas, redução do crescimento das plantas de arroz e este ataque pode causar morte das plantas (González et al. 2012; Martin et al., 2020).

Os modelos de nicho ecológico possibilitam prever a adequabilidade climática para os insetos praga nas diversas regiões do mundo ao longo das estações do ano. Além disso, eles identificam os principais fatores reguladores das populações das pragas nas lavouras (Negrini et al., 2020; Zurell & Engler, 2019). O MaxEnt é um algoritmo de aprendizado de máquina e ele é o principal programa para a determinação de modelos de nicho ecológico. Nesses modelos é utilizada a distribuição geográfica atual da praga para determinar o nicho ecológico potencial da espécie. Isto é, modelos que possui o potencial para determinar as áreas ou épocas adequadas para uma ou mais espécies. O MaxEnt utiliza como preditores variáveis da temperatura do ar (11 variáveis), precipitação pluviométrica (8 variáveis) e a altitude dos locais (Guisan et al., 2017; Phillips & Dudík, 2008).

Os insetos são ectotérmicos (Bodlah, et al., 2023). Eles são altamente dependentes de fatores climáticos, tais como a temperatura do ar, precipitação pluviométrica e altitude. Esses fatores afetam a sobrevivência e mortalidade, crescimentos, desenvolvimento, reprodução e comportamento em populações de insetos. Os insetos podem causar danos às colheitas e perda significativa devido a esses fatores climáticos (Subedi, et al., 2023). A compreensão dos efeitos abióticos em relação a insetos pragas é importante para a gestão destes organismos nos cultivos e para estabelecer estratégias de Defesa Sanitária Vegetal e programas de Manejo Integrado de Pragas. Portanto, o entendimento da relação clima e praga é fundamental para determinar um modelo espaço-temporal populacional inseto-praga em cultivos comerciais de arroz. Os modelos de nicho ecológico possibilitam a determinação dos riscos com as pragas nas diversas regiões do mundo no momento atual e em tempos futuros em função das mudanças climáticas.

Mudanças climáticas são transformações de longo prazo nos padrões de temperatura e clima. Essas mudanças podem ser naturais, devido a mudanças na atividade do Sol ou erupções vulcânicas. As atividades humanas têm sido o principal motor das alterações climáticas, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás. Alterações climáticas podem ser divididas em diferentes tipos de cenários. Os cenários climáticos são descrições plausíveis sobre os riscos das alterações climáticas e identificar possíveis soluções com medidas políticas. Dentre os tipos de cenários existe cenários otimistas e pessimistas. O cenário otimista (SSP126) descreve que até 2100 a temperatura do ar no planeta irá aumentar em 2°C. O cenário pessimista (SSP585) descreve que até 2100 a temperatura do ar no planeta irá aumentar de 4 a 5,5°C.

Apesar da importância de *T. orizicolus* e das lavouras de arroz, até o momento, não foram realizados estudos sobre os riscos globais com esta praga nestas lavouras. Assim, este trabalho teve como objetivo determinar modelo de previsão dos riscos globais atuais e futuros com a cigarrinha *T. orizicolus* para lavouras de arroz usando o algoritmo de aprendizado de máquina MaxEnt.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Coleta dos dados

Os dados dos registros dos locais de ocorrência de *T. orizicolus* foram coletados no Global Biodiversity Information Facility (<https://www.gbif.org/DOI:https://doi.org/10.15468/dl.kevcvz>), Centro de Agricultura e Bioscience International (<https://www.cabi.org/>), Google Scholar (<https://scholar.google.com/>) e em revistas especializadas. Foram removidos os registros duplicados. As coordenadas geográficas dos locais de ocorrência do inseto foram conferidas usando o Google Earth (<https://www.google.com.br/earth/>). Foi realizada filtragem dos pontos de ocorrência do inseto utilizando o pacote spThin do software R versão 3.2.2 2 (Wang et al., 2023). Nessa filtragem foi selecionado apenas um registro de ocorrência do inseto em locais com distância de 10 km um do outro. Isso foi feito para evitar a ocorrência de autocorrelação espacial entre os pontos de registro de ocorrência do inseto (Chevalier, et al., 2021).

2.2. Determinação e validação do modelo

Nesta parte do trabalho foram usados os programas MaxEnt (Maximum Entropy) versão 3.4.4 (Phillips et al., 2017) e R (versão 4.2.3 (R Core Team ,2024)). Um total de 20 variáveis climáticas foram baixadas do site WorldClim (<http://www.worldclim.org/>) para os cenários atuais e futuros (Hijmans et al., 2005). No entanto, os parâmetros bioclimáticos estavam no formato TXT, que não pode ser reconhecido pelo software MaxEnt e, portanto, exigiu a conversão para o formato American Standard Code for Information Interchange (ASCII). A ferramenta SDM Toolbox v2.4 dentro do ArcGIS, uma caixa de ferramentas abrangente e gratuita baseada em Python para análises espaciais em ecologia, evolução e genética, foi empregada para esse propósito. No ArcMap, as 20 variáveis climáticas foram importadas como camadas raster e submetidos à conversão usando o Arc Tool Box (Phillips et al., 2006).

Os pontos de ocorrência georreferenciados da espécie *T. orizicolus* e 20 variáveis climáticas em formato ASCII foram então inseridas no programa MaxEnt versão 3.3.3k. (Phillips et al., 2006). Usamos, 10-dobrar cruz-validação. Isso significa que, o programa MaxEnt participou aleatoriamente dos dados de ocorrência em dez conjuntos independentes, calculando a contribuição de cada uma das 20 variáveis

para o modelo inicial. A contribuição das vinte (20) variáveis ambientais utilizadas no modelo inicial de nicho ecológico para *T. orizicolus* são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Código, nome e contribuição das variáveis ambientais utilizadas no modelo de nicho ecológico inicial para *T. orizicolus*.

Variáveis		Contribuição (%)
Código	Nome	
Bio 12	Precipitação pluviométrica anual (mm)	38.5
Bio 20	Altitude do local (m)	12.2
Bio 3	Isotermalidade (%)	8.6
Bio 11	Temperatura média do trimestre mais frio (°C)	7.5
Bio 19	Precipitação pluviométrica do trimestre mais frio (mm)	5.5
Bio 4	Sazonalidade da temperatura (°C)	5.1
Bio 2	Variação mensal da temperatura (°C)	4.3
Bio 1	Temperatura média anual (°C)	3.4
Bio 18	Precipitação pluviométrica do trimestre mais quente (mm)	2.8
Bio 14	Precipitação pluviométrica do mês mais seco (mm)	1.9
Bio 9	Temperatura média do trimestre mais seco (°C)	1.7
Bio 15	Sazonalidade da precipitação pluviométrica (%)	1.6
Bio 10	Temperatura média do trimestre mais quente (°C)	1.5
Bio 8	Temperatura média do trimestre mais úmido (°C)	1.4
Bio 16	Precipitação pluviométrica do trimestre mais úmido (mm)	1.4
Bio 6	Temperatura mínima do mês mais frio (°C)	1.3
Bio 7	Variação anual da temperatura (°C)	0.6
Bio 5	Temperatura máxima do mês mais quente (°C)	0.5
Bio 17	Precipitação pluviométrica do trimestre mais seco (mm)	0.2
Bio 13	Precipitação pluviométrica do mês úmido (mm)	0.0

Na seleção das variáveis do modelo final foram usados os critérios de colinearidade e contribuição das variáveis para ele. De acordo com o critério de colinearidade entre as variáveis que apresentaram correlação de Pearson $\geq 0,70$ selecionou-se apenas aquela com maior contribuição para o modelo. Esse procedimento foi feito para que o modelo fosse simples e possuísse um menor número de variáveis. No modelo final a contribuição total das variáveis selecionadas deve ser alta (>90%) (Nam J. et al., 2015).

Um conjunto de cinco variáveis bioclimáticas biologicamente significativas foi escolhido para produzir os modelos finais com base em análises estatísticas. Para selecionar a melhor configuração para o modelo final, usando o critério de Akaike (AIC). Esse critério é um método matemático usado para modelar distribuição de espécies (Warren et al., 2010). Menores valores de AIC representam uma maior qualidade e simplicidade. Incluímos uma variedade de configurações de parâmetros, como valores de multiplicadores de regularização variando de 1 a 5, bem como seis configurações de classes de recursos (L, LQ, H, LQH, LQHP, LQHPT), onde L = linear, Q = quadrático, H = dobradiça, P = produto e T = limite, conforme descrito por Brown et al., (2017). A configuração ideal foi selecionada pela pontuação mais baixa do Critério de Informação de Akaike (AICc), um parâmetro crítico para modelar a distribuição de espécies (Atauchi, P. J., et al., 2018). As pontuações do AICc são fornecidas na 2ª parte da Tabela 3.

As variáveis climáticas selecionadas foram inseridas no programa MaxEnt juntamente com os locais de ocorrências da espécie *T. orizicolus*. Selecionamos o menor valor de AIC para definir a configuração no programa MaxEnt. Posteriormente obteve-se o modelo final com a contribuição de cada variável preditora (Figura 2). Para entender o impacto de cada variável selecionada para o modelo final e o significado de cada variável adotamos o método popular de reamostragem. Testes Jackknife foi usado para avaliar a qualidade do modelo final. A área sob a curva (AUC) da característica operacional do receptor (Peterson et al., 2008). O valor da AUC e o formato da curva ROC indicam o quão bem os modelos diferenciam as áreas adequadas e inadequadas para espécie de *T. orizicolus*. Uma AUC de 0,5 indica que o modelo não consegue distinguir entre locais adequados e inadequados, enquanto valores entre 0,7 e 0,8 são considerados adequados, 0,8 a 0,9 significativos e superiores a 0,9 excelentes (Mandrekar, 2010).

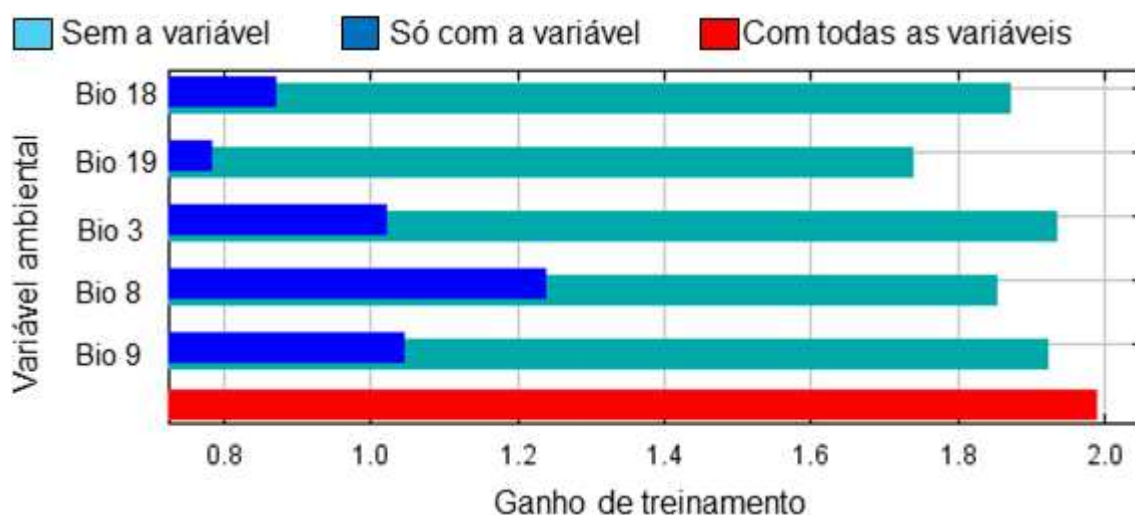


Figura 2. Importância relativa das variáveis ambientais no modelo final de nicho ecológico para *Tagosodes orizicolus* de acordo com o método de reamostragem: Jackknife.

As curvas de característica operacional repetida indicam a preferência da espécie *T. orizicolus* por variáveis importantes de habitat e são, portanto, componentes-chave de modelos de nicho ecológico. Para determinar a curva de característica operacional repetida, o programa MaxEnt criou curvas de resposta. As curvas vermelhas mostram a média de 10 repetições das variáveis ambientais que mais influenciaram a distribuição. As faixas azuis mostram o desvio padrão (DP) calculado em 10 repetições. Eixo X 1 - Especificidade (Área Prevista Fracionada) e eixo Y é a sensibilidade (1 - Taxa de Omissão) (Figura 3).

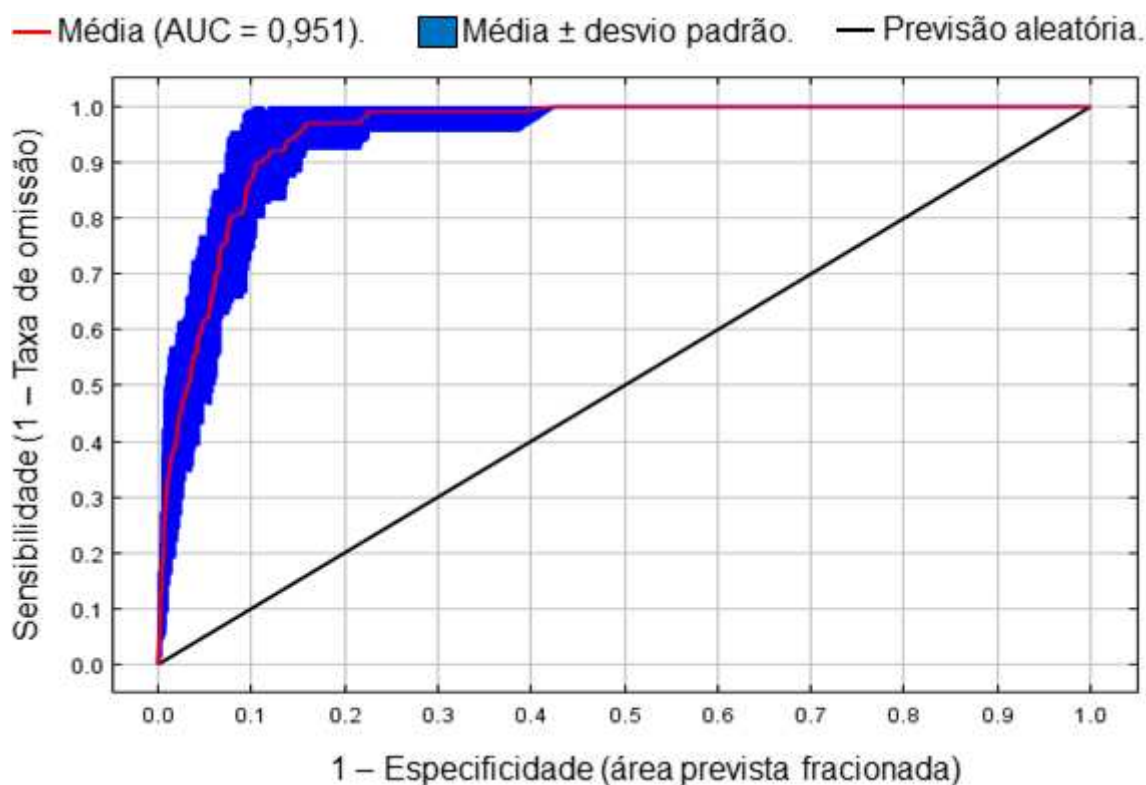


Figura 3. Curva de característica operacional repetida e importância relativa das variáveis ambientais no modelo final de distribuição geográfica no mundo de *Tagosodes orizicolus* utilizando algoritmo de aprendizado de máquina de máxima entropia (MaxEnt).

2.3. Determinação do efeito dos preditores sobre a adequabilidade climática das áreas do mundo a *T. orizicolus*

Para determinar as curvas de resposta que indicam as relações entre a adequabilidade climática das áreas do mundo a *T. orizicolus* o programa MaxEnt mostram a resposta média das 10 execuções replicadas do Maxent de coloração vermelho e a média +/- um desvio padrão em azul. A linha vermelha indica o ajuste do modelo aos dados de treinamento. A linha azul indica o ajuste do modelo aos dados de teste para cada variável climática selecionadas (Figura 4).

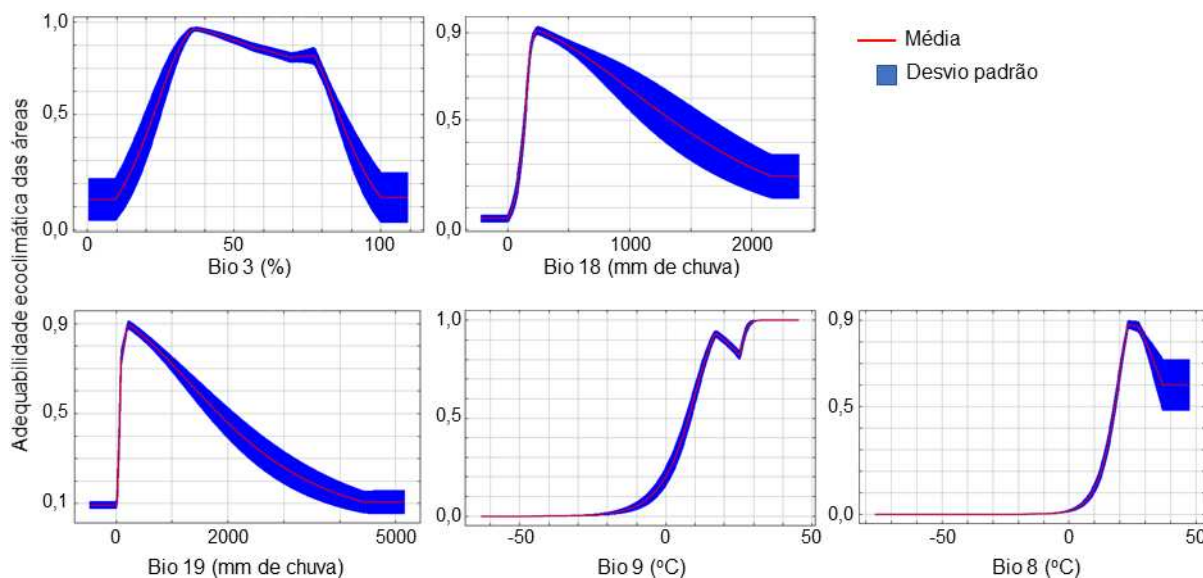


Figura 4. Adequabilidade climática das áreas do mundo a *Tagosodes orizicolus* em função da variação dos preditores do modelo de distribuição geográfica deste inseto. Bio 3 = isothermalidade, Bio 18 = precipitação pluviométrica do trimestre mais quente, Bio 19 = precipitação pluviométrica do trimestre mais frio, Bio 9 = temperatura média do trimestre mais seco e Bio 8 = temperatura média do trimestre mais úmido.

2.4. Determinação da adequabilidade climática atual e futura das áreas do mundo a *T. orizicolus*

Foram usados os programas MaxEnt para determinar a adequabilidade climática atual e futura. Usamos o modelo climático global CCSM4 baixado dos conjuntos de dados Global Climate Data WorldClim (Hijmans et al., 2005). O ArcGis foi usado para confeccionar os mapas de distribuição geográfica sobre dois cenários: cenário SSP126 (otimista) e cenário SSP585 (pessimista) em áreas do mundo a *T. orizicolus*. Com base no índice de aptidão gerado pelos modelos atual e futuro, a área de distribuição para *T. orizicolus* foi dividida em três categorias: Área inadequada, área adequada e área altamente adequada. Essas áreas representam as cores, brancas, amarela e vermelha respectivamente, conforme mostrado na Figura 5 em cenários atual e Figura 6 em cenários futuros. Essas categorizações das áreas adequadas foram definidas a partir do valor dos pixels da seguinte forma: Abaixo do valor do Threshold: inadequado, do threshold até 0.40 igual a baixa adequabilidade, de 0.41 a 0.60 igual a média adequabilidade e acima de 0.60 refere-se as áreas com alta

adequabilidade para adequabilidade climática atual e futura em escala global para a espécie *T. orizicolus*.

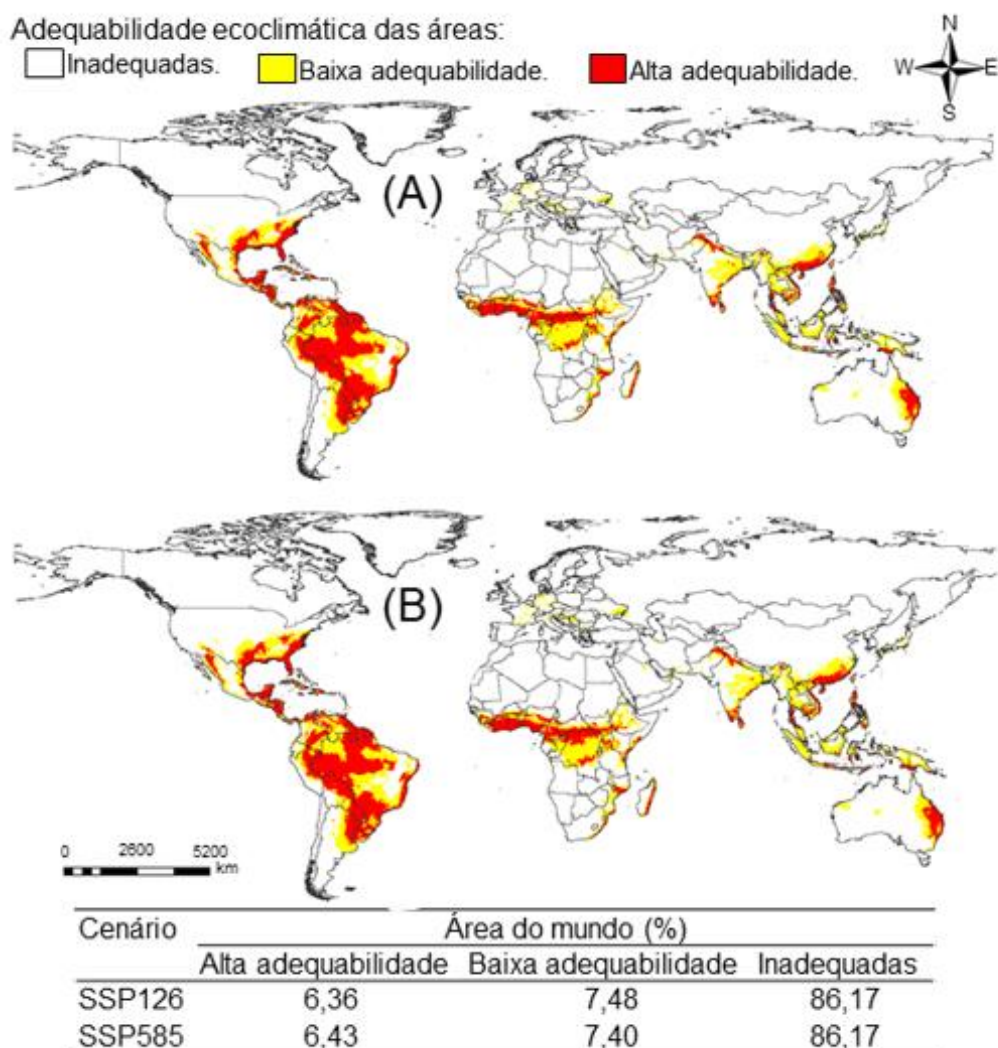


Figura 5. Projeção da adequabilidade climática das áreas do mundo a *Tagosodes orizicolus* em 2040 de acordo com o modelo determinado usando o MaxEnt para os cenários de mudanças climáticas (A) otimista (SSP126) e pessimista (SSP585).

3. RESULTADOS

3.1. Distribuição geográfica atual de *T. orizicolus*

Foram registrados 144 pontos de ocorrências onde *T. orizicolus* está presente. Todos estes pontos estão localizados no continente americano. (Estados Unidos, México, Cuba, Porto Rico, Guatemala, Nicarágua, Venezuela, Colômbia, Equador, Peru, Guiana, Suriname, Brasil, Peru, Bolívia, Uruguai e Argentina) (Figura 1A).

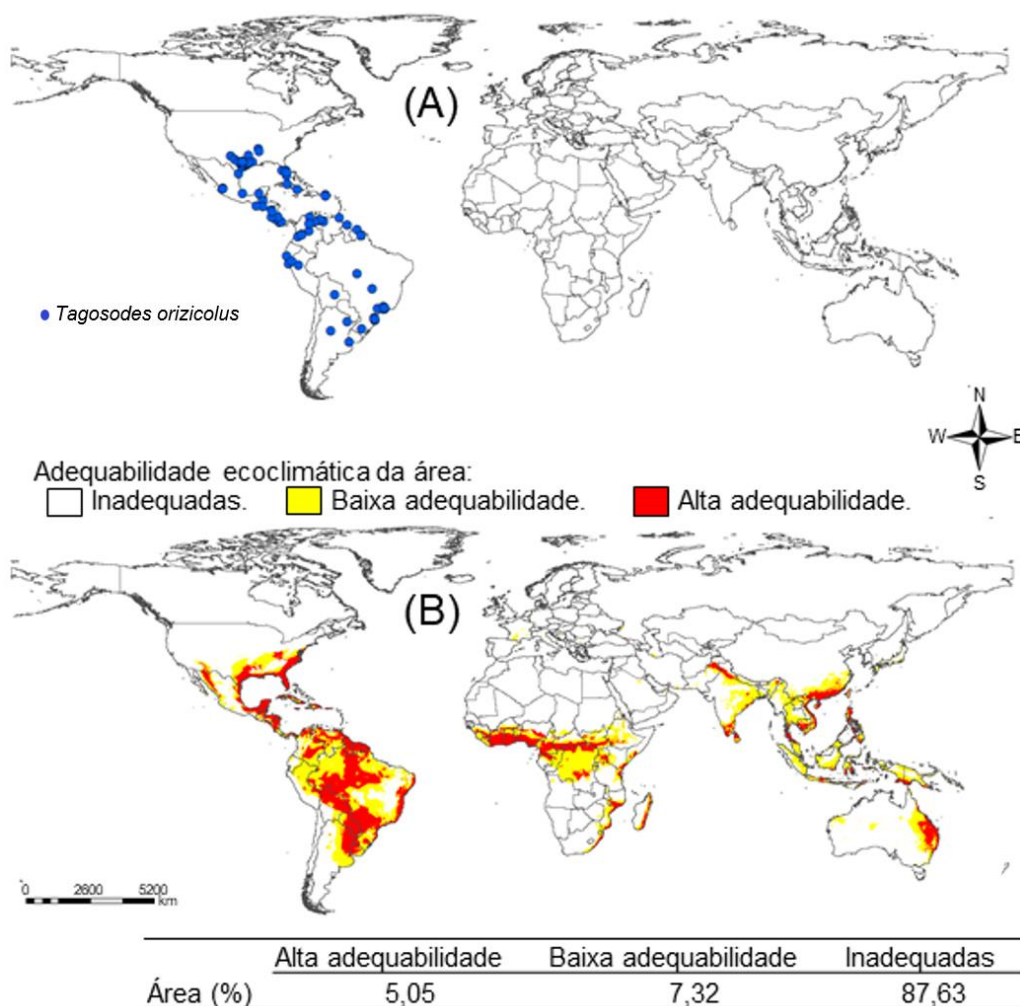


Figura 1. (A) Registros de ocorrência atual de *Tagosodes orizicolus* e (B) Adequabilidade climática atual das áreas do mundo a este inseto de acordo com o modelo determinado usando o MaxEnt.

3.2. Modelo de nicho ecológico

A contribuição de cada uma das 20 variáveis bioclimáticas para o modelo inicial de adequabilidade climática das áreas do mundo a *T. orizicolus* estão listadas na

16	0,50	0,32	0,61	0,66	0,16	0,62	0,64	0,14	0,45	0,12	0,62	0,91	0,99	0,06	0,36	1
17	0,22	0,31	0,22	0,25	0,15	0,16	0,10	0,08	0,08	0,25	0,38	0,01	0,08	0,91	0,81	0,01
18	0,06	0,22	0,09	0,22	0,56	0,08	0,26	0,00	0,16	0,41	0,08	0,46	0,44	0,27	0,03	0,46
19	0,43	0,38	0,42	0,38	0,10	0,48	0,42	0,03	0,48	0,16	0,44	0,77	0,65	0,26	0,08	0,64
20	0,27	0,40	0,29	0,24	0,50	0,09	0,09	0,51	0,20	0,76	0,02	0,01	0,11	0,28	0,34	0,15

Tabela 3. Contribuição das variáveis ambientais modelo de nicho ecológico final para *Tagosodes orizicolus* e seleção da configuração deste modelo usando o critério de informação de Akaike.

Variáveis do modelo final

Código	Nome da variável	Contribuição (%)
Bio 3	Isotermalidade (%)	31,7
Bio 18	Precipitação pluviométrica do trimestre mais quente (mm)	27,8
Bio 19	Precipitação pluviométrica do trimestre mais frio (mm)	19,3
Bio 9	Temperatura média do trimestre mais seco (°C)	14,3
Bio 8	Temperatura média do trimestre mais úmido (°C)	6,9

Seleção da configuração do modelo

Classificação	FC	RM	AIC	Classificação	FC	RM	AIC
1	LQHP	1	2180.95	16	LQHPT	4	2191.46
2	LQH	3	2182.39	17	LQH	1	2191.95
3	LQHP	2	2182.71	18	LQ	3	2195.18
4	LQHP	3	2182.89	19	LQHP	5	2197.62
5	LQHPT	3	2182.89	20	LQHPT	5	2197.62
6	H	3	2185.96	21	L	2	2197.62
7	LQH	2	2186.2	22	L	3	2198.01
8	H	2	2186.76	23	L	4	2198.58
9	LQHPT	2	2187.02	24	L	5	2199.33
10	LQH	4	2187.37	25	L	1	2199.66

11	LQH	5	2190.03	26	LQ	4	2200.23
12	H	1	2190.77	27	H	4	2200.94
13	LQ	1	2191.19	28	LQ	5	2201.65
14	LQ	2	2191.27	29	LQHPT	1	2208.57
15	LQHP	4	2191.46	30	H	5	2217.13

* FC = combinação de funções: linear (L), quadrática (Q), produto (P), limiar (T) e dobradiça (H). RM = multiplicador de regularização. AIC = Critério de informação de Akaike.

A configuração do modelo de nicho ecológico a *T. orizicolus* fornecida após o teste de critério de informação Akaike indicou que menor valor de AIC, que representou uma maior qualidade e simplicidade foi a classe de recurso foi a combinação LQHPT igual a 2180.95 AIC. De acordo com teste de reamostragem de Jackknife, a variável bioclimática utilizada isoladamente que proporcionou maior ganho para a performance do modelo final foi a isotermalidade. Já a variável bioclimática que mais diminui a performance do modelo final quando ela foi omitida foi a temperatura média do trimestre mais chuvoso (Figura 2). O modelo final de nicho ecológico apresentou área abaixo da curva de $0,951 \pm 0,025$ (Figura 3).

3.3. Efeito dos preditores sobre a adequabilidade climática das áreas do mundo a *T. orizicolus*

As curvas da adequabilidade climática das áreas do planeta a *T. orizicolus* em função isotermalidade, precipitação pluviométrica do trimestre mais quente, precipitação pluviométrica do trimestre mais frio, temperatura média do trimestre mais seco e temperatura média do trimestre mais úmido apresentaram pontos de máximo. As áreas do mundo com isotermalidade entre 25 a 85%, precipitação do trimestre mais quente entre 150 a 1000 mm, precipitação do trimestre mais frio entre 120 a 1500 mm, temperatura média do trimestre mais seco acima de 10°C e temperatura média do trimestre mais chuvoso entre 20 a 40°C apresentaram alta adequabilidade climática a *T. orizicolus* (Figura 4).

3.4. Adequabilidade climática atual e futura das áreas do mundo a *T. orizicolus*

Atualmente 5,05% da área do mundo apresenta alta adequabilidade climática a *T. orizicolus*. Enquanto que 7,32% e 87,63% da área do planeta apresentam média

e baixa adequabilidade climática a esse inseto. Parte das áreas com alta adequabilidade climática a *T. orizicolus* este inseto já presente e outras delas ele ainda não foi introduzido. Entre as áreas com alta adequabilidade a *T. orizicolus* e que esta espécie está presente estão o sudeste do Estados Unidos, leste do México, Caribe, leste da América Central e na região central do norte ao sul da América do Sul. Já entre as áreas com alta adequabilidade climática onde o inseto ainda não foi introduzido estão: parte da África central, sudeste asiático, leste da Índia, regiões do leste e extremo norte da China e centro-leste da Austrália (Figura 1B).

De acordo com o modelo de nicho ecológico em 2040 deverá haver aumento das áreas com alta adequabilidade no mundo em 26% (de 5,05% para 6.36% da área do planeta) a 27% (5.05% para 6.43%) nos cenários de mudanças climáticas otimista SSP126 e pessimista SSP585, respectivamente (Figura 5). Já em 2080 deverá haver aumento das áreas com alta adequabilidade no mundo em 30% (de 5,05% para 6.57% da área do planeta) a 56% (5.05% para 7.90%) nos cenários de mudanças climáticas otimista SSP126 e pessimista SSP585, respectivamente (Figura 6).

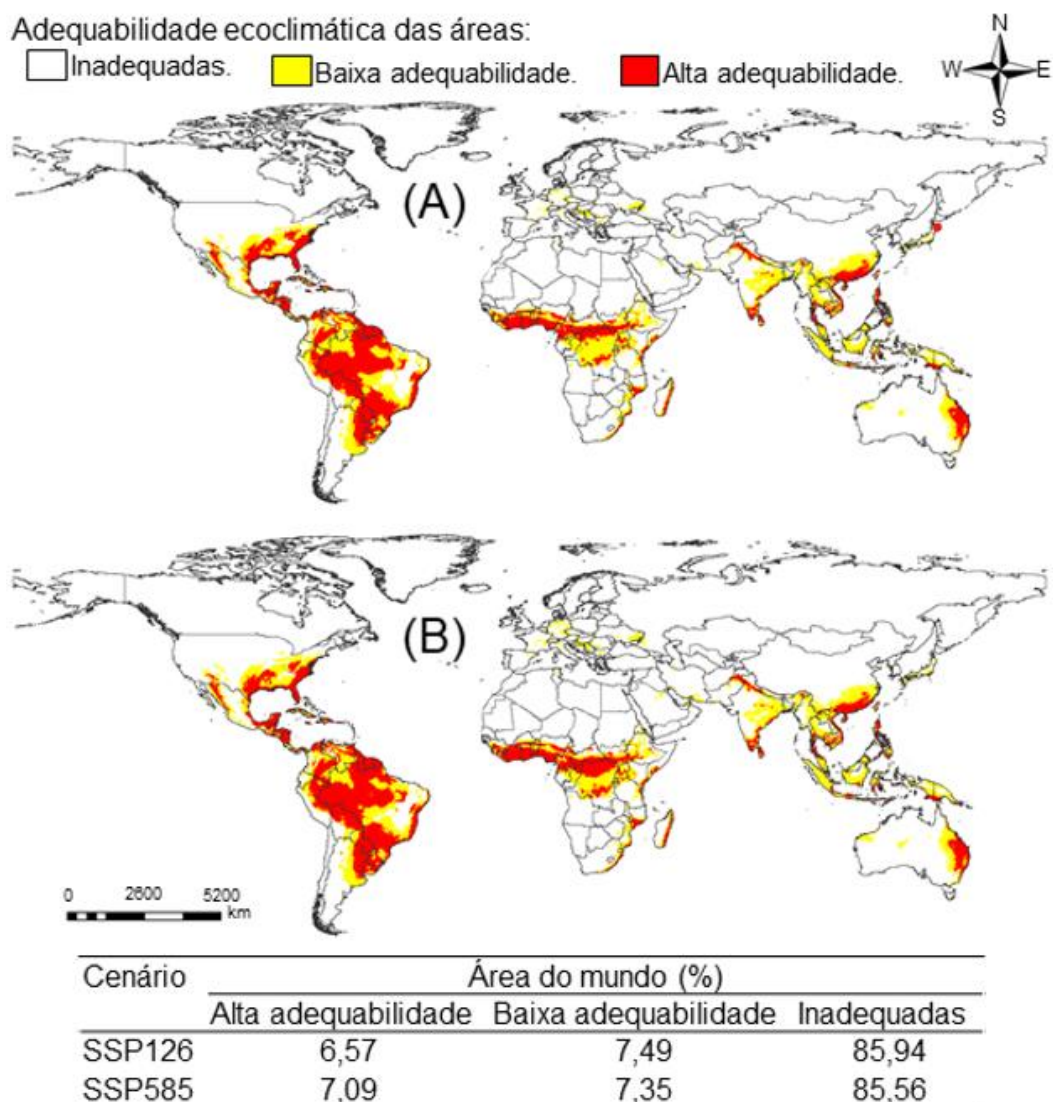


Figura 6. Projeção da adequabilidade climática das áreas do mundo a *Tagosodes orizicolus* em 2080 de acordo com o modelo determinado usando o MaxEnt para os cenários de mudanças climáticas (A) otimista (SSP126) e pessimista (SSP585).

4. DISCUSSÃO

Um dos maiores impedimentos para o aumento da produção de arroz são doenças que afetam o desenvolvimento da cultura. Entre 20% a 30% de perda de rendimento da produção global de arroz são causadas exclusivamente por insetos pragas (Savary, et al., 2000). A espécie *T. orizicolus*, cigarrinha do arroz é considerada uma das pragas mais destrutivas dessa cultura na América Latina (Arévalo-Aranda, et al., 2024). Causando danos diretos pela alimentação e oviposição, e danos indiretos pela transmissão do vírus da folha branca. No Brasil, o ataque da cigarrinha *T. orizicolus* pode causar perdas de até 100% da produção de arroz em função da sua alta capacidade de reprodução e elevado poder destrutivo (Martin, et al., 2020). Em decorrência desse ataque da praga ocorre nanismo, necrose e morte de plantas (Pereira et al., 2002). Essas injúrias são sensíveis às condições climáticas locais. Portanto, compreender as interações entre esta praga sob o clima em mudança é vital para seu controle e planejamento futuro (Ramos et al., 2019).

Este estudo é o primeiro que foi realizado para avaliar as áreas adequadas para a cigarrinha do arroz e o impacto das mudanças climáticas nesta praga em escala global. O modelo de distribuição espaço-temporal determinado nesse trabalho é robusto para prever áreas atuais e futuras do mundo com adequação climática para a cigarrinha do arroz *T. orizicolus*. Portanto, os resultados de previsão dos riscos globais atuais e futuros para *T. orizicolus* em cultivos de arroz usando ferramenta de aprendizado de máquina nos permitem fazer suposições muito confiáveis sobre as áreas altamente adequadas para o desenvolvimento da praga. Além disso o modelo tem alto poder preditivo com valor de AUC = 0,951. O alto valor de AUC obtidos indicam um forte desempenho do modelo, confirmando a robustez dos modelos de nicho ecológico para *T. orizicolus* (Li et al., 2024). Estes modelos são úteis para determinar habitats adequados e oferecem informações importantes sobre potenciais de áreas de risco para espécies.

O modelo do nosso trabalho é simples composto apenas por cinco variáveis e elas tiveram uma ótima contribuição para o modelo final. Juntas, essas variáveis bioclimáticas preditoras tiveram 100% de contribuição para o modelo e cada uma delas possuem significado biológico para a espécie *T. orizicolus*.

As variáveis de precipitação e temperatura contribuíram significativamente para prever os riscos globais atuais e futuros da cigarrinha *T. orizicolus* para os cultivos de

arroz. No nosso trabalho a temperatura contribui 52.9% e as variáveis de precipitação contribui 47.1%. As duas variáveis, precipitação e temperatura foram altamente relacionadas com a adaptação e sobrevivência da cigarrinha do arroz, *T. orizicolus*.

Em um trabalho feito por Obregón-Corredor et al., 2021 relataram os efeitos da temperatura em dinâmica populacional para *T. orizicolus*. A temperatura afeta a postura e eclodibilidade de ovos, desenvolvimento e sobrevivência da cigarrinha *T. orizicolus*. De acordo com seu estudo, a faixa de temperatura ideal para a cigarrinha do arroz está entre 24 e 26°C, o que corrobora com o nosso trabalho, isto é, as faixas de temperatura de Obregón-Corredor et al., 2021 está dentro da faixa de temperatura encontrada em nosso trabalho. Os resultados desta pesquisa destacam algumas áreas que não são infestados pela cigarrinha do arroz. Estas áreas correspondem a países europeu e algumas áreas do norte da África (Fig. 1B).

Áreas com baixa variação anual na temperatura diurna do ar, característica de climas tropicais, são consideradas mais adequadas para esta espécie. Isto é importante considerando que *T. orizicolus* depende da temperatura para funções biológicas, incluindo o crescimento e metabolismo. A isothermalidade pode afetar o crescimento e a reprodução de *T. orizicolus*. O arroz é uma cultura de verão de dias curtos cultivada sob diversas condições climáticas e edáficas. Cresce bem em regiões tropicais úmidas com alta temperatura (Javaid, T., et al., 2012). Muitas espécies de pragas favorecem o ambiente quente e úmido (Khaliq, A. M., 2014). O estresse hídrico na cultura torna-as suscetível para os insetos pragas (Huang, S. H., et al., 2010). Logo, a precipitação favorece o aumento da incidência e ataque de inseto praga. Nosso trabalho evidencia que locais no mundo que possui em média chuvas trimestrais entre 120 mm a 1500mm são favoráveis para a ocorrências e ataque da cigarrinha *T. orizicolus* em campos cultivados com arroz.

Neste estudo, dois novos diferentes cenários de mudanças climáticas (RCPs) foram selecionados para avaliar os impactos das mudanças climáticas em *T. orizicolus*. Os novos cenários representam diferentes desenvolvimentos socioeconômicos, bem como diferentes trajetórias de concentração atmosférica de gases com efeito de estufa. O cenário pessimista SSP126, prevê que até 2100 a temperatura do ar no planeta irá aumentar em 2 °C e o cenário SSP585, prevê que até 2100 a temperatura do ar no planeta irá aumentar de 4 a 5,5°C. Esses diferentes percursos climáticos (SSP126- SSP585) possui a possibilidade de prever diferentes situações climáticas sob insetos praga, aumentando ou diminuindo as áreas de maior

adequabilidade para a cigarrinha do arroz. Contudo, vê-se que as diferenças nas projeções dos aumentos de temperatura entre os dois cenários RCP afetará significativamente a distribuição das áreas adequadas para *T. orizicolus*. O aumento das áreas com alta adequabilidade à praga deverá ser maior em 2080 e em cenário de mudanças climáticas pessimista. Nos locais de alta produção de arroz no mundo onde a praga está presente, deverá ocorrer aumento de suas populações no sudeste dos Estados Unidos, sul do Brasil e sudeste da Argentina.

5. CONCLUSÕES

O modelo de nicho ecológico determinado neste trabalho é robusto para prever áreas atuais e futuras do mundo com adequação climática para a cigarrinha do arroz *Tagosodes orizicolus*. A isothermalidade, precipitações pluviométricas dos trimestres mais quente e mais frio, temperaturas médias do ar dos trimestres mais seco e mais chuvoso são os preditores do modelo. O sudeste do Estados Unidos, leste do México, Caribe, leste da América Central, parte central da América do Sul, África central, sudeste asiático, leste da Índia, leste e extremo norte da China e centro-leste da Austrália apresentam alta adequabilidade climática a *T. orizicolus*. Haverá aumento das áreas no mundo com alta adequabilidade climática à praga em 2040 e 2080, sobretudo se não houver controle global da emissão dos gases do efeito estufa.

6. REFERÊNCIAS

Arévalo-Aranda, Y., Rodríguez-Toribio, E., Rosillo, L., Díaz, H., Chávez, E. T., Cruz, J., ... & Pérez, W. (2024). Impact of Green Manuring and Nitrogen Fertilization on Rice Cultivation: A Peruvian Amazon Forest Study in San Martín Province.

Atauchi, P. J., Peterson, A. T., & Flanagan, J. (2018). Species distribution models for Peruvian plantcutter improve with consideration of biotic interactions. *Journal of Avian Biology*, 49(3), jav-01617.

Athak, M.D.; KHAN, Z.R. Insect pests of rice. Manila: IRRI, 1994. 89p.

Bodlah, M. A., Iqbal, J., Ashiq, A., Bodlah, I., Jiang, S., Mudassir, M. A., ... & Fareen, A. G. E. (2023). Insect behavioral restraint and adaptation strategies under heat stress: An inclusive review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 22(6), 327-350.

Brown, T. C. (2017). Substitution methods. *A Primer on Nonmarket Valuation*, 347-390.

Calvert, L. A., & Reyes Herrera, L. A. (1999). Manejo del complejo sogata-virus de la hoja blanca en el cultivo del arroz.

Chevalier, M., Mod, H., Broennimann, O., Di Cola, V., Schmid, S., Niculita-Hirzel, H., ... & Guisan, A. (2021). Low spatial autocorrelation in mountain biodiversity data and model residuals. *Ecosphere*, 12(3), e03403.

Curry, G. B., & Humphries, C. J. (2007). *Biodiversity databases: Techniques, politics and applications* (Vol. 485). Abingdon: Taylor & Francis.

D.L. Warren, R.E. Glor, M. Turelli ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models *Ecography*, 33 (2010), pp. 607-611.

EPPO, 2014. PQR database. Paris, France: European and Mediterranean Plant Protection Organization. <http://www.eppo.int/DATABASES/pqr/pqr.htm>.

FAO. Crop Prospects and Food Situation Quarterly Global Report No. 2, July 2021. Rome. 2021. Available online: <https://doi.org/10.4060/cb5603en> (accessed on 1 September 2022).

FAOSTAT. FAO statistical database (available at www.fao.org).

GBIF (2014) Centro Global de Informações sobre Biodiversidade. <http://www.gbif.org/>[acessado em 1 de março de 2023].

Geographic Division in Mesoregions and Microregions. IBGE, Brazil. v.1.

González, A., Labrín, N., Álvarez, R. M., Jayaro, Y., Gamboa, C., Reyes, E., & Barrientos, V. (2012). Mechanisms of *Oryza sativa* (Poaceae) resistance to *Tagosodes orizicolus* (Homoptera: Delphacidae) under greenhouse condition in Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 60(1), 105-117.

Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. (2017). *Habitat suitability and distribution models: with applications in R*. Cambridge University Press.

Hajjar, M. J., Ahmed, N., Alhudaib, K. A., & Ullah, H. (2023). Integrated insect pest management techniques for rice. *Sustainability*, 15(5), 4499.

Hijmans, R. J., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., Jarvis, A., & Richardson, K. (2005). *WorldClim*, version 1.3. University of California, Berkeley.

Huang, S. H., Cheng, C. H., & Wu, W. J. (2010). Possible impacts of climate change on rice insect pests and management tactics in Taiwan.

Javaid, T., Awan, I. U., Baloch, M. S., Shah, I. H., Nadim, M. A., Khan, E. A., ... & Abuzar, M. R. (2012). Effect of planting methods on the growth and yield of coarse rice. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 22(2), 358-362.

Khaliq, A. M., Javed, M., Sohail, M., & Sagheer, M. (2014). Environmental effects on insects and their population dynamics. *Journal of Entomology and Zoology studies*, 2(2), 1-7.

Li, N., Wang, Z., Deng, Q., Wang, T., & Su, Y. J. (2024). Effects of climatic fluctuations on the fragmented distribution pattern of a Tertiary relict plant, *Pseudotaxus chienii* (Taxaceae), in subtropical China. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 205(1), 55-74.

Liu T, Wang J, Hu X, Feng J (2020) Mudanças no uso da terra impulsionam distribuições presentes e futuras da lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Sci Total Environ* 706:135872

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE]. 2022. Brazilian Regional.

Mandrekar, J. N. (2010). Receiver operating characteristic curve in diagnostic test assessment. *Journal of Thoracic Oncology*, 5(9), 1315-1316.

Martin, J. E., Bernal Jimenez, E. K., Cruz, M. G., Zhu-Salzman, K., Way, M. O., & Badillo-Vargas, I. E. (2020). Assessing the potential infection of *Tagosodes orizicolus* (Hemiptera: Delphacidae) by rice hoja blanca virus in Texas. *Journal of economic entomology*, 113(2), 1018-1022.

Morales, F., & Jennings, P. (2010). Rice Hoja Blanca: A complex plant-virus-vector pathosystem. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 5 (43), 1–16.

Nam J, Cho H, Kim J. Effect of plant life cycle on plant settlement in diverse water level. *J. Wetlands Res.* 2015; 17: 19–25. 10.17663/JWR.2015.17.1.019. [CrossRef] [Google Scholar].

Negrini M, Fidelis EG, Schurt DA, Silva FS, Pereira RS, Bizzo HR. 2019. Insecticidal activity of essential oils in controlling fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Arq Inst Biol.* 86:e1112018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1808-1657001112018>.

Norton, G. W., Alwang, J., & Masters, W. A. (2021). *Economics of agricultural development: world food systems and resource use*. Routledge.

Obregón-Corredor, D., Hernández-Guzmán, F. J., & Rios-Moyano, D. K. (2021). Efecto de los factores climáticos, variedades y densidades de siembra en la dinámica de artrópodos en cultivos de arroz en Yopal-Casanare, Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*, 47(1).

Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological modelling*, 213(1), 63-72.

Pereira, P. D. S., & de Oliveira Junior, M. C. M. (2002). Delfacídeo-do-arroz *Tagosodes orizicolus* (MUIR, 1926) (Hemíptera: Delphacidae): descrição, biologia e danos.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.

Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E., & Blair, M. E. (2017). Opening the black box: An open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887-893.

Picanço, M. C., Lopes, M. C & Silva, G. A. (2023) Manejo integrado de pragas. Viçosa, MG: UFV.

Ramos, R. S., Kumar, L., Shabani, F., Silva, R. S., Araújo, T. A., & Picanço, M. C. (2019). Climate model for seasonal variation in *Bemisia tabaci* using CLIMEX in tomato crops. *International Journal of Biometeorology*, 63 (3), 281–291.

R Core Team ,2024. Package ‘parallel’.

Rousselet, J., Imbert, C. E., Dekri, A., Garcia, J., Goussard, F., Vincent, B., ... & Rossi, J. P. (2013). Assessing species distribution using Google Street View: a pilot study with the pine processionary moth. *PLoS One*, 8(10), e74918.

Samal, P., Babu, S. C., Mondal, B., & Mishra, S. N. (2022). The global rice agriculture towards 2050: An inter-continental perspective. *Outlook on Agriculture*, 51(2), 164-172.

Savary, S., Teng, P. S., Willocquet, L., & Nutter Jr, F. W. (2006). Quantification and modeling of crop losses: a review of purposes. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 44(1), 89-112.

Silva, R. S., Kumar, L., Shabani, F., Ribeiro, A. V., & Picanço, M. C. (2018). Dry stress decreases areas suitable for *Neoleucinodes elegantalis* (Lepidoptera: Crambidae) and affects its survival under climate predictions in South America. *Ecological Informatics*, 46, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.06.003>

Silva, J. V. R. D. (2021). Levantamento da incidência de Sogata (*Tagosodes orizicolus*) nas lavouras de arroz do Vale do Paraíba.

Subedi, B., Poudel, A., & Aryal, S. (2023). The impact of climate change on insect pest biology and ecology: Implications for pest management strategies, crop production, and food security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100733.

Tatebe, H., and Coauthors, 2019: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci. Model Dev.*, 12, 2727–2765, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>.

The Global Biodiversity Information Facility (GBIF) DOI: <https://doi.org/10.15468/dl.j6tfup>.

United Nations Statistics Division of the Food and Agriculture Organization (FAOSTAT); The Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE); The United States Department of Agriculture (USDA).

Wang, B. X., Zhu, L., Ma, G., Najjar-Rodriguez, A., Zhang, J. P., Zhang, F., ... & Ma, C. S. (2023). Current and potential future global distribution of the raisin moth *Cadra figulilella* (Lepidoptera: Pyralidae) under two different climate change scenarios. *Biology*, 12(3), 435.

Zurell, D., & Engler, J. O. (2019). Ecological niche modeling. Effects of climate change on birds, 60-73.