



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**VANDEILSON BELFORT MOURA**

**MONITORAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL E IMPACTOS DE MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS NA OCORRÊNCIA DE PRAGAS QUARENTENÁRIAS EM  
FRUTÍFERAS NA AMÉRICA TROPICAL**

**BELÉM**  
**2025**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**VANDEILSON BELFORT MOURA**

**MONITORAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL E IMPACTOS DE MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS NA OCORRÊNCIA DE PRAGAS QUARENTENÁRIAS EM  
FRUTÍFERAS NA AMÉRICA TROPICAL**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

**BELÉM**

**2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

Moura, Vandeilson Belfort

Monitoramento espaço-temporal e impactos de mudanças climáticas na ocorrência de pragas quarentenárias em frutíferas na América Tropical / Vandeilson Belfort Moura . - 2025.  
124 f.

Tese (Doutorado) - Programa de pós-graduação em Agronomia(PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

1. Mancha-preta-dos-citros. 2. Mosca-da-carambola. 3. Monilíase do cacauzeiro. 4. Segurança alimentar. 5. Defesa fitossanitária. 6. Variabilidade climática. I. Souza, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de, *orient.* II. Título

**VANDEILSON BELFORT MOURA**

**MONITORAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL E IMPACTOS DE MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS NA OCORRÊNCIA DE PRAGAS QUARENTENÁRIAS EM  
FRUTÍFERAS NA AMÉRICA TROPICAL**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doutor.

Data da Aprovação: 18/02/2025

**BANCA EXAMINADORA:**



---

Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveria Ponte de Souza (Orientador)  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

Documento assinado digitalmente



TELMA FATIMA VIEIRA BATISTA  
Data: 18/02/2025 17:01:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Telma Fátima Vieira Batista  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

Documento assinado digitalmente



LUCIANO JORGE SEREJO DOS ANJOS  
Data: 19/02/2025 11:50:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Luciano Jorge Serejo dos Anjos  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA

Documento assinado digitalmente



MIGUEL ALVES JUNIOR  
Data: 19/02/2025 10:19:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Miguel Alves Júnior  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA

Documento assinado digitalmente



JOSE VICTOR TORRES ALVES COSTA  
Data: 19/02/2025 10:00:15-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. José Victor Torres Alves Costa  
MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA - MAPA

Dedico a meus pais José Moura (*In Memoriam*)  
e Valdeci Belfort, aos familiares, mestres,  
amigos e colegas da ADEPARÁ.

Ao Professor Paulo Jorge e Grupo ISPAAM.

A Professora Iris Leitierre, PGAGRO e UFRA.

## AGRADECIMENTOS

As minhas palavras são de gratidão ao meu Deus, que todos os dias, desde quando me levanto para o combate até o meu deitar, me faz acreditar que o impossível é possível com coragem. Ao meu pai (*In Memoriam*), agradeço por sempre me apoiar nos estudos, pois foi pela memória dele que construí toda essa história. Ele que tanto se orgulhava de me apresentar para os médicos dizendo: “esse aqui é meu filho, doutor Vandeilson!”.

A você, meu Pai, dedico e devo toda a minha vida e história, sempre pautada no trabalho e estudo. Foi dele o ensinamento que sempre me dizia: “Deilson, estude, trabalhe, construa enquanto você é novo, para ter uma vida mais tranquila no futuro, assim como eu!”. Eu não consigo ver a vida ou vencer nela de outra forma que não seja pelo trabalho e estudo.

Agradeço à minha mãe, que me orientou a não desistir dessa qualificação, e que todos os dias intercede por mim, pedindo que Deus me guie e me dê sabedoria de Deus, entendimento, conhecimento, inteligência, discernimento, obediência a Deus, paz com todos e a verdadeira união. Minha mãe, a senhora é e sempre será meu baluarte e sempre estarei com a senhora. Nunca vou lhe abandonar, pois o papai me confiou essa missão. Te amo, Mãe!

Conciliar as atividades de servidor público, empresário, filho e demais demandas pessoais foi uma tarefa que exigiu planejamento na luta contra o tempo, muita dedicação, paciência e leitura, principalmente nas madrugadas. Todos os dias, sem exceção inclusive feriados e recessos, foram dedicados a esta tese.

Uma tese na Amazônia é uma oportunidade de mostrar ao mundo, nossa capacidade de pesquisar nesse território biodiverso e de relevância para o planeta, que exige atenção pelas suas peculiaridades sociais, econômicas e ambientais. Por isso, agradeço também:

Ao Governo Federal, Governo do Estado do Pará, Universidade Federal Rural da Amazônia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia e todo seu corpo docente, ao Grupo ISPAAM e à ADEPARÁ, onde exerço o cargo efetivo de Fiscal Estadual Agropecuário e que cedeu os dados para produção das informações desta pesquisa.

Ao apoio do meu companheiro diário de trabalho Raimundo Júnior, a Lucionila Pantoja, diretora da ADEPARÁ, e ao Adalberto Tavares, Gerente do programa das moscas-das-frutas, que acompanharam desde o início e de perto o desenvolvimento desse trabalho. Em nome deles, agradeço a todos os servidores que me acolhem e trabalham para manter a sanidade, competitividade e o desenvolvimento sustentável da fruticultura amazônica!

A todos os meus familiares e amigos pelo apoio em todos os momentos. Deborah, Kelly e Nena obrigado por serem meu porto seguro nessa jornada. A banca do Exame de Qualificação

e Defesa de Tese: Dr. Miguel Alves, Dr. Ricardo Adaime, Dr. Luciano Jorge, Dra. Telma Batista e Dr. José Victor que, de forma humilde e técnica, colaboraram para o avanço e conclusão dessa pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Jorge, que sempre provoca grandes mudanças na minha vida profissional, onde tive que unir a Agrometeorologia e Defesa Fitossanitária. Gratidão pela paciência, oportunidade, confiança, orientação, ensinamentos, respeito, amizade, competência e profissionalismo. Muito Obrigado!

*Vandeilson Belfort Moura*

*Solstício de Verão*

“A vida é combate,  
Que os fracos abate,  
Que os fortes e bravos,  
Só pode exaltar”  
(Gonçalves Dias)

## RESUMO

Pragas quarentenárias, como a mancha-preta-dos-citros (*Phyllosticta citricarpa* Van der Aa), mosca-da-carambola (*Bactrocera carambolae* Drew & Hancock) e a monilíase do cacauero [*Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans] representam sérias ameaças à produção de frutíferas na Amazônia, devido às restrições fitossanitárias impostas à comercialização dos frutos do território em que ocorrem. Esta tese composta por quatro capítulos, concentrou-se em: 1) realizar a análise do monitoramento da dinâmica espaço-temporal na ocorrência dessas pragas em condições de campo; 2) analisar a interação com hospedeiros em condições climáticas atuais, 3) avaliar a eficácia de medidas fitossanitárias usadas pelo controle oficial na erradicação de focos; 4) modelar a adequabilidade bioclimática potencial da monilíase no clima presente e em cenários de mudanças climáticas; 5) identificar rotas de risco de invasão dessas ameaças no território paraense como mecanismo de gestão da defesa fitossanitária do estado do Pará. Levantamentos fitossanitários de detecção foram realizados em plantios comerciais e domésticos de hospedeiros das pragas analisadas com registros de presença e ausência. Utilizou-se ferramentas quantitativas, sistema de informações geográficas e *machine learning* para análise dos riscos fitossanitários e compreensão das interações nos patossistemas. A partir das ocorrências, as análises revelaram que a mancha-preta-dos-citros apresentou incidência total em plantas de 6,5 %, padrão agregado, dependência espacial explicada pelo modelo gaussiano, com alcance da doença de 25,5 a 103 metros em plantios domésticos e comerciais. A prevalência total em propriedades da mancha-preta-dos-citros foi de 5,5 %, padrão espacial aleatório em plantios velhos com baixo número de hospedeiros e alcance de 20,3 km. A sazonalidade provocou sintoma de mancha dura a mancha virulenta causada por conídios com maior prevalência e incidência no período menos chuvoso. A mosca-da-carambola teve maior incidência em armadilhas do tipo Jackson instaladas em caramboleiras e mangueiras, influenciada pela umidade relativa, radiação global, frutos coletados e precipitação pluviométrica e elevada quantidade de solução atrativa sexual à base de paraferomônio metil eugenol. O período menos chuvoso favoreceu a abundância populacional de *B. carambolae* com baixa dependência espacial e raio de movimentação de 3,3 km, onde o monitoramento contínuo pelo armadilhamento, coleta e destruição de frutos, atrativos alimentares e sexuais erradicaram o inseto com o índice de mosca/armadilha/dia máximo de 0,54, que manteve a praga sob controle oficial em baixa prevalência. O modelo de distribuição potencial de *M. roreri*, sugere alto potencial bioclimático em todas as mesorregiões do Pará, com alto risco de invasão em Juruti, Terra Santa, Oriximiná e Jacareacanga. Com as mudanças climáticas, espera-se uma redução da favorabilidade para *M. roreri* nas regiões produtoras de cacau do Pará,

especialmente no caminho SSP5-8.5 de maior aquecimento. A transamazônica é a região que mais sofrerá perdas de adequabilidade bioclimática com sugestão de maior resiliência no Marajó, Baixo Amazonas e Sudeste Paraense. O mapeamento espaço-temporal de pragas quarentenárias em ambiente favorável e a identificação de áreas com risco de invasão e de rotas ativas de trânsito de material contaminado, são fundamentais para desenvolver estratégias de controle e manejo eficazes, visando garantir a sanidade das áreas produtoras, sua competitividade e minimizar vulnerabilidades. Esses resultados são de relevante interesse público, pois contribuem significativamente para a compreensão da epidemiologia das pragas em condições de campo e para tomadas de decisão na gestão fitossanitária, contribuindo no desenvolvimento sustentável da fruticultura tropical.

Palavras-chave: mancha-preta-dos-citros; mosca-da-carambola; monilíase do cacaueteiro; segurança alimentar; defesa fitossanitária; variabilidade climática.

## ABSTRACT

Quarantine pests, such as citrus black spot (*Phyllosticta citricarpa* Van der Aa), the carambola fruit fly (*Bactrocera carambolae* Drew & Hancock), and cacao frosty pod rot [*Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans], pose serious threats to fruit production in the Amazon due to phytosanitary restrictions imposed on the commercialization of fruits from affected areas. This thesis, composed of four chapters, focused on: 1. Analyzing the spatial-temporal dynamics of these pests under field conditions; 2. Examining their interactions with hosts under current climatic conditions; 3. Evaluating the effectiveness of phytosanitary measures used by official control programs for eradication; 4. Modeling the potential bioclimatic suitability of *M. roreri* under present climate conditions and climate change scenarios; 5. Identifying risk invasion routes of these threats in Pará as a phytosanitary defense management strategy for the state. Phytosanitary surveys were conducted in commercial and domestic plantations of host plants, recording both presence and absence of the pests. Quantitative tools, geographic information systems, and machine learning techniques were applied to assess phytosanitary risks and understand pathogen-host interactions. The analyses revealed that citrus black spot had a total incidence of 6.5% in plants, displaying an aggregated pattern with spatial dependence explained by a Gaussian model, and a disease spread range of 25.5 to 103 meters in domestic and commercial orchards. The total prevalence of citrus black spot in properties was 5.5%, showing a random spatial pattern in older plantations with a low number of hosts and a spread range of 20.3 km. Seasonality influenced the transition from hard spot to virulent spot symptoms, with conidia-driven infections showing higher prevalence and incidence during the drier period. The carambola fruit fly had a higher incidence in Jackson traps installed in carambola and mango trees, influenced by relative humidity, global radiation, collected fruits, rainfall, and an increased amount of paraferomone-based methyl eugenol sexual attractant solution. The drier period favored the population abundance of *B. carambolae*, which exhibited low spatial dependence and a movement radius of 3.3 km. Continuous monitoring through trapping, fruit collection and destruction, and the use of food and sexual attractants eradicated the insect, maintaining a maximum fly/trap/day index of 0.54, which kept the pest under official control at low prevalence. The potential distribution model for *M. roreri* suggests high bioclimatic suitability across all mesoregions of Pará, with a high invasion risk in Juruti, Terra Santa, Oriximiná, and Jacareacanga. Under climate change scenarios, a reduction in favorability for *M. roreri* is expected in Pará's cacao-producing regions, particularly under the SSP5-8.5 high-warming pathway. The Trans-Amazonian region is projected to experience the greatest loss in

bioclimatic suitability, whereas greater resilience is suggested for Marajó, Baixo Amazonas, and Southeastern Pará. Spatial-temporal mapping of quarantine pests in favorable environments, as well as the identification of invasion-risk areas and active transit routes of contaminated material, are essential for developing effective control and management strategies. These measures aim to ensure the health of production areas, maintain competitiveness, and minimize vulnerabilities. These findings are of significant public interest, as they contribute to understanding pest epidemiology under field conditions and support decision-making in phytosanitary management, promoting the sustainable development of tropical fruit farming.

Key words: citrus black spot; carambola fruit fly; cocoa moniliasis; food security; phytosanitary defense; climate variability.



## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....  | 15 |
| <b>2 VULNERABILIDADE CLIMÁTICA E TERRITORIAL NA OCORRÊNCIA<br/>ESPAÇO-TEMPORAL DA MANCHA-PRETA-DOS-CITROS NA AMAZÔNIA<br/>ORIENTAL</b> .....                           | 29 |
| <b>RESUMO</b> .....  | 29 |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | 29 |
| <b>2.1 Introdução</b> .....  | 30 |
| <b>2.2 Material e Métodos</b> .....  | 31 |
| 2.2.1 Levantamento fitossanitário de detecção de <i>Phyllosticta citricarpa</i> Van der Aa .....   | 31 |
| 2.2.2 Detecção da mancha-preta-dos-citros.....   | 33 |
| 2.2.3 Dados de prevalência e incidência anual da mancha-preta-dos-citros .....   | 34 |
| 2.2.4 Sazonalidade na prevalência e incidência da mancha-preta-dos-citros.....   | 34 |
| 2.2.5 Análise de dados espaciais .....   | 35 |
| 2.2.6 Fatores de risco associados à mancha-preta-dos-citros .....  | 36 |
| <b>2.3 Resultados</b> .....  | 36 |
| <b>2.4 Discussão</b> .....   | 44 |
| <b>2.5 Conclusão</b> .....   | 52 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 52 |
| <b>3 EFETIVIDADE DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS DE CONTROLE NO<br/>DECLÍNIO POPULACIONAL DA MOSCA-DA-CARAMBOLA NAS CONDIÇÕES<br/>CLIMÁTICAS DA AMAZÔNIA ORIENTAL</b> ..... | 57 |
| <b>RESUMO</b> .....  | 57 |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | 57 |
| <b>3.1 Introdução</b> .....  | 58 |
| <b>3.2 Material e Métodos</b> .....  | 60 |
| 3.2.1 Caracterização da área de estudo.....  | 60 |
| 3.2.2 Monitoramento de <i>Bactrocera carambolae</i> .....  | 61 |
| 3.2.3 Análise dos dados .....  | 66 |
| <b>3.3 Resultados</b> .....  | 67 |
| <b>3.4 Discussão</b> .....   | 74 |

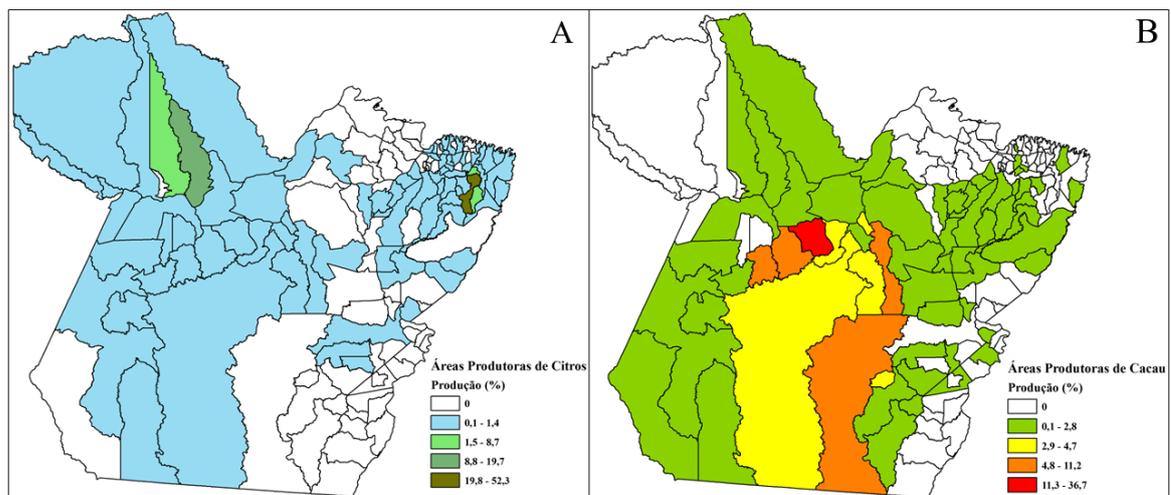
|  |     |
|--|-----|
| <b>3.5 Conclusão</b> .....   | 81  |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 82  |
| <b>4 DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL NO CLIMA PRESENTE E EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DA MONILÍASE DO CACAUEIRO NA AMÉRICA TROPICAL</b> ..... | 89  |
| <b>RESUMO</b> .....  | 89  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | 89  |
| <b>4.1 Introdução</b> .....  | 90  |
| <b>4.2 Material e Métodos</b> .....  | 92  |
| 4.2.1 Área de estudo .....   | 92  |
| 4.2.2 Dados de ocorrência de espécies .....  | 93  |
| 4.2.3 Dados ambientais e cenários de mudanças climáticas.....  | 93  |
| 4.2.4. Procedimentos da modelagem de distribuição de <i>Moniliophthora roreri</i> .....  | 96  |
| 4.2.5 Análise dos dados .....  | 97  |
| 4.2.6 Análises espaciais .....   | 98  |
| <b>4.3 Resultados e Discussão</b> .....  | 98  |
| 4.3.1 Condições ambientais das áreas de ocorrência da monilíase e produtoras de cacau na América Tropical.....                             | 98  |
| 4.3.2 Modelagem da distribuição potencial e futura de <i>M. roreri</i> no estado do Pará .....   | 101 |
| 4.3.3 Mapeamento e quantificação das áreas bioclimáticas adequadas a invasão de <i>M. roreri</i> no estado do Pará.....                    | 103 |
| 4.3.4 Rotas de trânsito com vias de ingresso e vulnerabilidade na dispersão de <i>M. roreri</i> no território paraense .....               | 108 |
| <b>4.4 Conclusões</b> .....  | 113 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 114 |
| <b>5 CONCLUSÕES GERAIS</b> .....   | 121 |

## 1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas (507.44 mil hectares) com uma produção de 58 milhões de toneladas/ano, que soma 1,2 bilhão de dólares. Isso representa apenas 5,4% da produção mundial, ficando atrás da China (243 milhões/t) e Índia (106 milhões/t), e ainda ocupa a 26ª posição na exportação de frutos pelo forte mercado interno e processamento da laranja (FAO, 2021a).

O Estado brasileiro é o maior produtor mundial de citros, com cultivo em ascensão no Pará (Figura 1A). O Pará ocupa a 7ª posição nacional na produção de citros (FAO, 2021b). O Brasil é ainda, o 7º na produção mundial de cacau, sendo o estado do Pará, o maior produtor brasileiro (150.565 t) (Figura 1B) (IBGE, 2024). A fruticultura brasileira emprega cerca de 193.9 mil trabalhadores em 940 mil estabelecimentos, com 81% de participação da agricultura familiar na produção de frutíferas em todo o Brasil (IBGE, 2023).

Figura 1 - Percentual da produção de citros (A) e cacau no estado do Pará (B).



Fonte: Adaptado a partir da base de dados do IBGE (2023) e IBGE (2024).

A produção de citros no Pará atualmente, compreende área de 19.214 ha com destaque para Capitão Poço com produção de 180 t/ano de laranja que abriga 90% da área plantada do estado e Monte Alegre que produz 68.425 t/ano de lima ácida Tahiti (A) (IBGE, 2023). A transamazônica concentra em 11 municípios, 85% da produção de cacau do estado em uma área de 155.859 mil hectares com produtividade média de 960 a 1.097 kg/ha<sup>-1</sup> (IBGE, 2023).

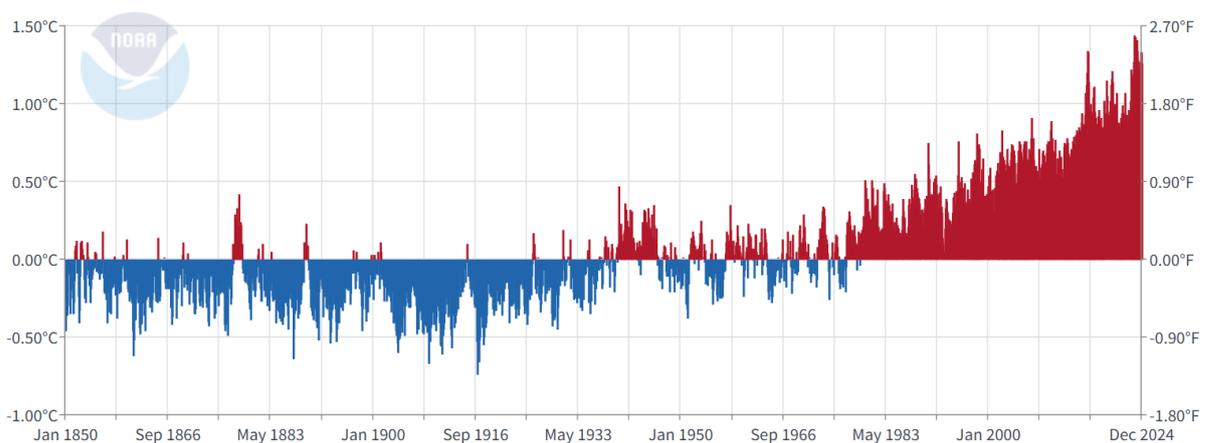
Porém, assim como as demais atividades agrícolas, a fruticultura também é dependente do clima e sensível às mudanças climáticas (Farrell *et al.*, 2018). É desafiador a todos os atores das cadeias produtivas agrícolas de culturas anuais e perenes, produzir em ambiente de

vulnerabilidade e com expectativas de redução da oferta da produção, considerando aumento da demanda da população mundial (Thornton *et al.*, 2011; Baldos *et al.*, 2020), aumento no preço dos alimentos e redução da segurança alimentar que afetará principalmente regiões mais pobres do mundo (Rosegrant *et al.*, 2012).

Mudanças climáticas são alterações de longo prazo no padrão do clima identificadas através de mudanças na média ou na variabilidade de suas propriedades (IPCC 2014; IPCC 2021) que decorrem de forma natural, da ação antropogênica ou da combinação de ambos na alteração da composição da atmosfera mundial (Rolim; Souza-Filho, 2019).

Anomalias em relação à média histórica, vêm sendo observadas no clima global desde 1850 (Figura 2), e intensificadas pelo aumento das atividades humanas, que por esta razão, o planeta experimenta aquecimento maior do que a média global desde a revolução industrial (1760-1840) (Marengo, 2006; IPCC, 2021).

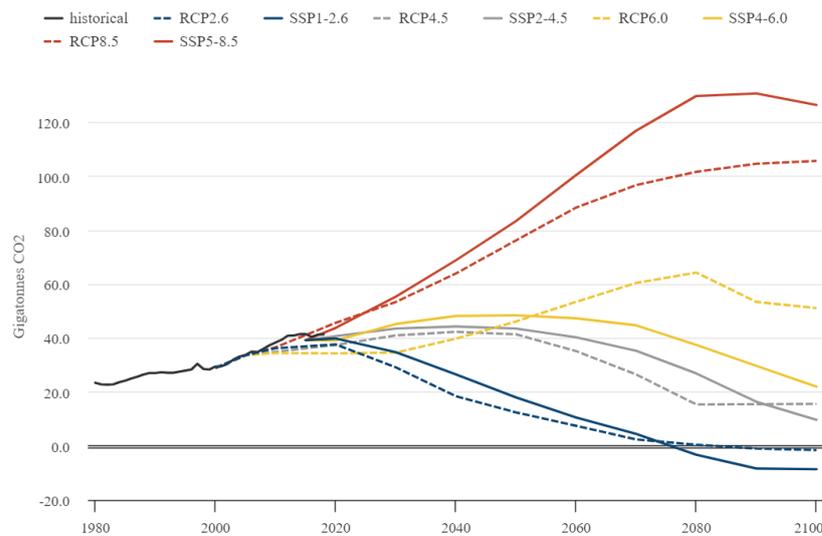
Figura 2 - Série temporal das anomalias globais de temperatura terrestre e oceânica.



Disponível em: < [https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/tavg/land\\_ocean/1/0/1850-2024](https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/tavg/land_ocean/1/0/1850-2024)>. Acesso em: 28/01/2025.

Concretiza-se o fato e o feito de que, estamos emitindo mais gases do efeito estufa (GEE) do que o estimado para a condição máxima pelos modelos climáticos globais (GCMs) ou modelos gerais de circulação mais pessimistas. Estes simulam baseados em leis de conservação de massa, energia e momento dos processos físicos, químicos e biológicos da atmosfera, os oceanos, a massa continental e a criosfera (Maraun *et al.*, 2017) (Figura 3).

Figura 3 - Comparação entre cenários futuros de emissões de CO<sub>2</sub> do RCP (Representative Concentration Pathway), apresentados no Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP) fase 5 e seus homólogos do CMIP fase 6, bem como emissões históricas de CO<sub>2</sub>.



Disponível em: < <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained/>>. Acesso em: 26/12/2023.

Estudos que estimam os possíveis impactos nas cadeias produtivas agrícolas causados pelas mudanças climáticas são de grande importância, uma vez que, o setor agrícola é o mais vulnerável aos efeitos adversos das alterações do clima (Clapp *et al.*, 2018).

A modelagem climática global é teórica, pois não se pode realizar vários experimentos com o planeta Terra, e muito do que é projetado nos GCMs através do *Coupled Model Intercomparison Project* fase 6 (CMIP6), é projetado para o futuro pelo *Scenario Model Intercomparison Project* (ScenarioMIP), e o futuro não é conhecido, mas pode ser previsível. Projeções climáticas multimodelos baseadas em cenários alternativos de emissões futuras e mudanças no uso da terra, melhoram a compreensão do sistema climático e permite caracterizar riscos sociais e das opções de resposta das ações tomadas no presente (O'Neill *et al.*, 2016).

As projeções futuras presentes nos relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) com estudos sobre as mudanças climáticas desde 1988, indicam que as emissões de GEE serão responsáveis por um aquecimento médio de 1,5 °C em todas as regiões do globo até 2100, valor limite estabelecido no Acordo de Paris, mas que já está perigosamente próximo (Figura 2) (IPCC, 2022).

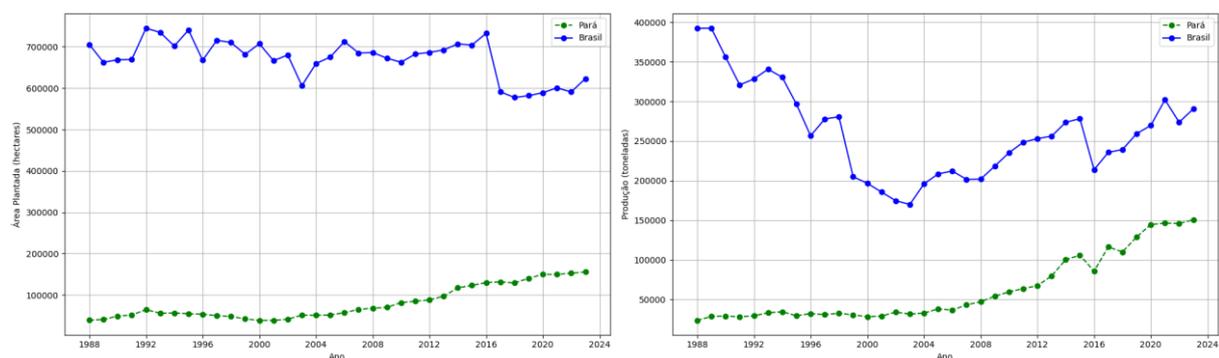
Além da emergência climática, estamos enfrentando emergências fitossanitárias de pragas quarentenárias como a monilíase do cacauero (Brasil, 2022) e a mosca-da-carambola (Brasil, 2023). São condições oficialmente reconhecidas por focos de pragas com potencial de disseminação e produção de consequências fitossanitárias sociais e econômicas que comprometem o comércio nacional e internacional, e que exigem ações imediatas para seu controle ou erradicação visando o restabelecimento da condição indene anterior (Brasil, 2017).

O aumento das concentrações de GEE, da temperatura com eventos climáticos extremos mais frequentes terão consequências significativas para a produção, qualidade, distribuição e segurança futura de alimentos com efeitos diretos e indiretos sobre a epidemiologia de doenças de plantas que será alterada com as mudanças climáticas (Trebicki, 2020). Estudos desses efeitos são ferramentas inovadoras, eficientes e necessárias na gestão fitossanitária (Scherer; Yang, 1995; Gómez *et al.*, 1999; Garrett *et al.*, 2021).

Cerca de 40% das perdas na produção agrícola mundial são devidas as pragas com impacto de US\$ 220 bilhões anuais. Já no Brasil, a perda anual é de 7,7% com prejuízos de US\$ 17,7 bilhões, cujas mudanças climáticas estão tornando as pragas mais destrutivas, aumentando as ameaças à segurança alimentar global e ao meio ambiente (FAO, 2021c), podendo aumentar o potencial reprodutivo e melhorar a adaptabilidade das pragas em algumas regiões (Trebicki, 2020).

Como exemplo brasileiro, temos o fenômeno destrutivo conhecido como vassoura-de-bruxa, que teve impacto devastador sobre a produção e as exportações nacionais de cacau. O cacau emergiu em 1989 no estado da Bahia, maior produtor do país da época (Figura 4). No Pará, os plantios ocorreram em meados do século XVIII (Oliveira, 2016). O cacau continuou a ser cultivado no Brasil apesar da crise fúngica, e que hoje é ameaçado pela monilíase (IBGE, 2024).

Figura 4 - Série histórica da área plantada e produção de amêndoas de cacau no Pará e Brasil de 1988 a 2023.



Fonte: Adaptado de IBGE (2024).

A ocorrência no Brasil das pragas quarentenárias mancha-preta-dos-citros (*Phyllosticta citricarpa* Van der Aa), mosca-da-carambola (*Bactrocera carambolae* Drew & Hancock) que são pragas presentes e monilíase do cacaueiro classificada como praga quarentenária ausente [*Moniliophthora roreri* (Cif & Par.)] (Brasil, 2018a), que podem provocar aumento de custos

de produção, depreciação e restringem exportações de produtos de origem vegetal como frutos, amêndoas e material propagativo hospedeiro (Pará, 2010).

De acordo com o “Observatório Pragas Sem Fronteiras” de 1980 a 2014, 203 espécies de importância agrícola se estabeleceram no Brasil, sendo que pelo menos 65% delas tiveram sua entrada facilitada pelo ser humano (Silva *et al.*, 2014; Sugayama *et al.*, 2015), através do trânsito ilegal de frutas infestadas em viagens aéreas, terrestres ou marítimas, ou ainda por meio do contrabando de frutos que não passam por fiscalização ou inspeção fitossanitária (Duarte; Malavasi, 2000).

Há evidências da entrada de pragas quarentenárias na Amazônia pela atividade humana, que poderia ter sido evitada pela intensificação da vigilância e educação fitossanitária (Navia *et al.*, 2015; Morais *et al.*, 2016). Nesse contexto, a região amazônica se apresenta como área extremamente vulnerável à introdução de pragas presentes pela grande extensão de fronteira com outros países (Lemos *et al.*, 2011). Essa vulnerabilidade se deve à dificuldade de acesso e fiscalização a determinadas áreas, baixa capacitação de pessoal para identificar espécies-praga, além das condições edafoclimáticas favoráveis ao estabelecimento das pragas (Morais *et al.*, 2016).

A Agência Estadual de Defesa Agropecuária do Estado do Pará (ADEPARÁ) é uma Autarquia em regime especial, vinculada à Secretaria de Estado de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca (SEDAP), e tem o dever legal de evitar a introdução, estabelecimento e disseminação de pragas dos vegetais no território paraense (Pará, 2010).

Diante disso, a vigilância sobre o território é um processo oficial indispensável para proteger a produção agrícola, onde há coleta e registro de dados em um local particular em determinado tempo, dentro de uma área, de forma contínua para atestar a presença ou ausência de uma praga (Brasil, 2017). Medidas de controle devem ser adotadas sempre que uma população de praga ocorrer em uma densidade populacional capaz de causar dano econômico, por isso deve ser constantemente monitorada, e para alguns casos, como o de pragas severas o nível de dano econômico não pode ser atingido (Moura *et al.*, 2003).

Os levantamentos fitossanitários realizados pela ADEPARÁ são instrumentos de registro do controle oficial e vigilância de pragas quarentenárias que podem ser: levantamento de delimitação que estabelece limites de uma área infestada ou livre; levantamento de detecção que determina a presença de pragas; e o levantamento de monitoramento que tem o objetivo de verificar as características da população da praga durante a aplicação de medidas de contenção (prevenir a dispersão), supressão (diminuir) e erradicação (eliminar), visando aferir os níveis

da população e avaliar a eficácia das medidas fitossanitárias de controle (Pará, 2011; Brasil, 2017).

Praga quarentenária é definida devido a importância econômica potencial da praga para a área em perigo, onde ainda não está presente, ou quando presente, não se encontra amplamente distribuída e está sob controle oficial. Foco é descrito como populações de pragas isoladas, recentemente detectadas com probabilidade de sobreviver no futuro imediato, onde esses dois conceitos são norteadores na aferição do estudo de níveis populacionais de pragas em focos (Brasil, 2017; Brasil, 2018a; Brasil, 2018b).

Medidas fitossanitárias são qualquer legislação, regulamentação ou procedimento oficial que tem o propósito de prevenir a introdução ou a disseminação de pragas quarentenárias ou limitar o impacto econômico de pragas não quarentenárias regulamentadas. Elas precisam ser analisadas e elucidadas pela pesquisa científica para reprodução no ensino, pesquisa e extensão, estabelecidas pela ocorrência da praga que é definida como a presença em uma área oficialmente reconhecida como sendo nativa ou introduzida e que não tenha sido oficialmente relatada como erradicada (Brasil, 2017).

De acordo com a Norma Internacional de Medidas Fitosanitárias (NIMF) nº 6, a seleção de locais apropriados de levantamento pode ser determinada pela presença e distribuição da praga previamente comunicada, sua biologia, distribuição de plantas hospedeiras, pontos de possível entrada, vias de disseminação e áreas de produção comercial e adequação climática. O período de tempo dos procedimentos de levantamento pode ser determinado pelo ciclo de vida da praga, seus hospedeiros, período de tempo dos programas de manejo ou se a praga é mais bem detectada nos cultivos em crescimento ativo ou colhidos.

Planos de contingência e de trabalho que norteiam os levantamentos fitossanitários de pragas no campo, elaborados pelos órgãos públicos para orientar ações de preparação e resposta imediata num cenário de risco que contemple princípios, estratégias, ações emergenciais, procedimentos e responsabilidades para o controle e erradicação de uma praga em uma área oficialmente delimitada, requerem informações técnico-científicas (Brasil, 2017).

Os métodos utilizados nesta tese, podem facilitar a análise espaço-temporal dos dados de populações de pragas e a interação com hospedeiros nas condições climáticas atuais e futuras, por conseguirem trabalhar o maior problema na ciência de dados que é a variância. Dados de incidência de pragas são utilizados para doenças que atacam toda a planta ou para aquelas pragas que em uma única infecção tem o poder suficiente para impedir a comercialização do produto (Amorim *et al.*, 2011).

O principal desafio da fruticultura é o acesso a mercados internacionais que são exigentes devido às barreiras fitossanitárias que cobram avanços no manejo da fitossanidade e pós-colheita que depende de todos para o fortalecimento de medidas de prevenção e gerenciamento do controle de pragas em cultivo de frutíferas no estado do Pará.

Medidas fitossanitárias eficazes e eficientes são necessárias para prevenir a introdução e disseminação de pragas, proteger o comércio e garantir a sustentabilidade da produção agrícola. A utilização de tecnologias como o Sistema de Informação Geográfica (SIG) e *machine learning* pode ajudar no monitoramento espaço-temporal, sendo o controle das pragas um dos maiores desafios para a comunidade fitossanitária (FAO, 2021b; IPCC, 2022).

A defesa agropecuária é uma política pública de soberania nacional e elemento fundamental na consolidação da fruticultura paraense no mercado interno e externo. As negociações nacionais e internacionais exigem trabalho no marco institucional e implementação da rastreabilidade e sustentabilidade que busca a identidade, qualidade, idoneidade, conformidade e sanidade dos produtos (Pará, 2010).

É urgente e emergente a promoção do diálogo e compartilhamento de responsabilidades, proximidade do serviço oficial de defesa vegetal com todos os atores da cadeia produtiva de frutíferas sobre o comportamento da população de pragas quarentenárias e dos impactos das mudanças climáticas em plantios de interesse econômico que interferem nas relações comerciais da fruticultura paraense.

Esta tese tem a ideia central de que, a vulnerabilidade à ocorrência de pragas quarentenárias no estado do Pará é favorecida pelas condições climáticas, suscetibilidade de hospedeiros e trânsito de material vegetal contaminado no extenso território, podendo ser monitorada com auxílio do SIG e *machine learning* para mapeamento e análise das medidas fitossanitárias de prevenção e erradicação das principais pragas que ameaçam a cadeia produtiva de frutíferas na América Tropical.

A presente pesquisa, está alinhada aos interesses institucionais e com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da agenda 2030, no que concerne a ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima, pois a partir da regionalização dos GCMs do CMIP6, serão geradas informações considerando diversos modelos com a quantificação dos potenciais impactos na adequação de pragas frente às mudanças climáticas.

Estes, por sua vez, servirão para o aprimoramento da gestão adaptativa dos atores da cadeia produtiva de frutíferas da Amazônia oriental e de alerta para melhor prestação de serviço no suporte a produtores, empresas, órgãos públicos e sociedade civil. Vale ressaltar que os planos de contingência das pragas quarentenárias, ainda não contam com detalhamento sobre

os impactos das mudanças do clima na ocorrência de pragas para o estado do Pará com os novos cenários do CMIP6 que apresentam menores vieses e maior sensibilidade climática (Eyring *et al.*, 2016).

Essa pesquisa converge ainda para os ODS que versam sobre construir resiliência a desastres econômicos, sociais e ambientais (ODS 1 - Erradicação da Pobreza), prevenir restrições ao comércio (ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável), volatilidade no preço dos alimentos (ODS 8 - Trabalho Decente e Crescimento Econômico), acesso a mercado e crescimento de empresas (ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis) e reduzir perdas pós-colheita (ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis).

Dessa forma, este trabalho visa melhorar a gestão fitossanitária no Pará, fornecendo informações científicas para planejamento e tomada de decisão nas ações do governo a partir de evidências, entendimento sobre os padrões das incidências das pragas e apontar cenários possivelmente críticos e rotas de risco de ocorrência de pragas. Os resultados desta pesquisa poderão minimizar riscos, esforços, impactos locais e globais, além de promover o desenvolvimento sustentável da produção de frutíferas amazônicas que tem conquistado o mundo e contribuído na geração de emprego, renda e dignidade aos produtores da fruticultura tropical.

Espera-se colocar luz sobre os temas, apontar e preencher lacunas, de modo a colaborar com o aumento da segurança alimentar e a redução da vulnerabilidade climática e territorial desses patossistemas com soluções duradouras. Esta tese alicerça-se como pesquisa de relevante interesse público, voltada para o combate às principais pragas quarentenárias, na promoção da proteção das áreas produtoras de frutíferas da Amazônia, e de contribuir para a resiliência da agricultura frente às mudanças climáticas.

A hipótese geral testada nesta pesquisa é de que o clima é o principal fator que influencia na ocorrência de pragas quarentenárias em frutíferas e que a ação humana potencializa a disseminação de pragas quarentenárias.

Dessa forma, a presente tese tem o objetivo geral de analisar a distribuição espacial e temporal de níveis de populações de pragas quarentenárias em focos, e suas relações com as condições climáticas atuais e de mudanças climáticas como mecanismo de gestão da defesa fitossanitária do estado do Pará.

Para responder a hipótese e objetivo geral, o presente estudo propõe três capítulos com os seguintes objetivos específicos e hipóteses:

1) Quantificar, mapear e analisar a dinâmica espaço-temporal e padrões sazonais de prevalência e incidência de mancha-preta-dos-citros no município de Eldorado do Carajás, Pará, Brasil.

Hipóteses: A mancha-preta-dos-citros possui padrão de dependência de distribuição espacial e temporal agregado que pode ser estimado por meio de análise geoestatística; Os municípios do estado do Pará apresentam risco pelas condições climáticas, dimensão territorial e trânsito de material propagativo com a mancha-preta-dos-citros; Mapas de interpolação e extensão geográfica facilitam o desenvolvimento de ações estratégicas eficazes na identificação e controle oficial da praga.

2) Avaliar a eficácia de medidas fitossanitárias de controle no declínio populacional da mosca-da-carambola (*Bactrocera carambolae*) nas condições climáticas do município de Oriximiná, Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

Hipótese: O armadilhamento na área urbana arborizada e demais medidas fitossanitárias contribuem para a redução populacional da mosca-da-carambola (*Bactrocera carambolae*) em condições climáticas favoráveis e elevada disponibilidade de hospedeiros.

3) Identificar e quantificar áreas com adequabilidade bioclimática potencial, áreas de adaptação às mudanças climáticas e rotas de risco de ocorrência da *Moniliophthora roreri* como suporte ao planejamento de ações estratégicas na gestão da defesa fitossanitária do estado do Pará.

Hipótese: Áreas adequadas climaticamente para ocorrência da monilíase do cacauero serão reduzidas em cenários de mudanças climáticas no estado do Pará; As mudanças climáticas diminuirão o potencial de disseminação da monilíase pela redução das chuvas e aumento na temperatura do ar.

Considerando que pesquisa gera conhecimento e por conseguinte desenvolvimento, com esta tese, busca-se com originalidade, inovação e aprofundamento teórico para formulação de novas teorias no avanço da ciência amazônica, particularmente em relação aos seguintes produtos: Mapas de representação de níveis populacionais e adequabilidade bioclimática para gestão estratégica no controle oficial de pragas quarentenárias; Aplicação do conceito de área urbana arborizada no armadilhamento da mosca-da-carambola; Estabelecimento de rotas de trânsito de disseminação de pragas quarentenárias; Incremento científico-tecnológico.

## REFERÊNCIAS

ADAIME, R.; JESUS BARROS, C. R.; BARIANI, A.; LIMA, A. L.; CRUZ, K. R.; CARVALHO, J. P. Novos registros de hospedeiros da Mosca-da-Carambola (*Bactrocera*

*carambolae*) no Estado do Amapá, Brasil. Macapá: Embrapa Amapá, 2016. 5 p. (Comunicado Técnico, 146).

AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. **Manual de fitopatologia**. 2. ed. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2011. 704 p.

BALDOS, U. L. C.; FUGLIE, K. O.; HERTEL, T. W. The research cost of adapting agriculture to climate change: A global analysis to 2050. **Agricultural Economics** (United Kingdom), v. 51, n. 2, p. 207-220, 2020.

BELO, A. P. D.; ROCHA, L. M. S.; CORRÊA, J. M. G.; FERREIRA, R. M. A.; COSTA-NETO, S. V.; SOUSA, M. S. M.; ADAIME, R.; LEMOS, L. N. New host plants records of *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock, 1994 and *Anastrepha* spp. (Diptera: Tephritidae) in Brazil. **Entomological Communications**, v. 2, ec02036, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 28, de 20 de julho de 2017**. [Estabelece os procedimentos operacionais para as ações de prevenção, contenção, supressão e erradicação da praga quarentenária presente *Bactrocera carambolae* (mosca-da-carambola)]. Diário Oficial da União, seção 1, 26 jul. 2017. Disponível em: <<https://sistemasweb.agricultura.gov.br/cefiti/leg/IN28-2017.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 38, de 01 de outubro de 2018**. [Estabelece a lista de Pragas Quarentenárias Presentes (PQP) para o Brasil]. Diário Oficial da União, seção 1, 02 out. 2018a. Disponível em: <<https://sistemasweb.agricultura.gov.br/cefiti/leg/IN38-2018.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 39, de 01 de outubro de 2018**. [Estabelece a lista de Pragas Quarentenárias Ausentes (PQA) para o Brasil]. Diário Oficial da União, seção 1, 02 out. 2018b. Disponível em: <[https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sanidade-animal-e-vegetal/sanidade-vegetal/analise-de-riscos-de-pragas-arquivos/PRAGASQUARENTENRIASAUSENTES\\_SITEMAPA\\_31.8.2020.pdf](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sanidade-animal-e-vegetal/sanidade-vegetal/analise-de-riscos-de-pragas-arquivos/PRAGASQUARENTENRIASAUSENTES_SITEMAPA_31.8.2020.pdf)>. Acesso em: 24 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Portaria MAPA nº 467, de 2 de agosto de 2022**. [Prorroga o prazo de vigência da emergência fitossanitária previsto na Portaria MAPA nº 249, 4 de agosto de 2021, relativa ao risco iminente de introdução da praga quarentenária ausente *Moniliophthora roreri* nos Estados do Acre, Amazonas e Rondônia e estabelece as diretrizes para a elaboração de Plano Estadual Emergencial de Prevenção, Supressão e Erradicação da praga]. Diário Oficial da União, seção 1, 03 ago. 2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mapa-n-467-de-2-de-agosto-de-2022-419638399>>. Acesso em: 29 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Portaria MAPA nº 627, de 10 de novembro de 2023**. [Declara estado de emergência fitossanitária relativo ao risco iminente de dispersão da praga quarentenária presente *Bactrocera carambolae* (mosca-da-carambola) nos Estados do Amapá, Amazonas, Pará e Roraima]. Diário Oficial da União, seção 1, 13 nov. 2023. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mapa-n-627-de-10-de-novembro-de-2023-522497468>>. Acesso em: 29 dez. 2023.

CLAPP, J.; NEWELL, P.; BRENT, Z. W. The global political economy of climate change, agriculture and food systems. **Journal of Peasant Studies**, v. 45, n. 1, p. 80-88, 2018.

COSTA, J. V. T. A.; SOUSA, M. do S. M. de; JESUS, C. R. de; SOUZA-FILHO, M. F. de; COSTA, V. A.; SILVA, B. M. da S. e; OLIVEIRA, J. P. M.; ADAIME, R. New Findings on Carambola Fruit Fly Hosts in South America. **FLORIDA ENTOMOLOGIST**, v. 106, p. 161-174, 2023.

DUARTE, A. L.; MALAVASI, A. Tratamento quarentenário. *In*: MALAVASI, A.; ZUCCHI, R. A. (Eds.). **Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: conhecimento básico e aplicado**. Ribeirão Preto: Holos, 2000. p. 187-192.

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, **Geosci. Model Dev**, v. 9, p. 1937-1958, 2016.

FARRELL, A. D.; RHINEY, K.; UMAHARAN, P. Climate adaptation in a minor crop species: is the cocoa breeding network prepared for climate change? **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 42, n. 7, p. 812-833, 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Anuário Estatístico da FAO - Alimentação e Agricultura Mundial**. Roma, Itália, p. 382, 2021a. Disponível em: <[http://www.cnpmf.embrapa.br/Base de Dados/index\\_pdf/dados/mundo/laranja/w1\\_laranja.pdf](http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/mundo/laranja/w1_laranja.pdf)>. Acesso em: 21 jun. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Anuário Estatístico da FAO - Alimentação e Agricultura Mundial**. Roma, Itália, 2021b. Disponível em: <<http://fenix.fao.org/faostat/internal/en/#data>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Mudança climática influencia na perda da produção agrícola para pragas**. 2021c. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/130780-mudan%C3%A7a-clim%C3%A1tica-influencia-na-perda-da-produ%C3%A7%C3%A3o-agr%C3%ADcola-para-pragas-conclui-estudo>>. Acesso em: 03 jan. 2024.

GARRETT, K. A.; NITA, M.; WOLF, E. D. de; ESKER, P. D.; GOMEZ-MONTANO, L.; SPARKS, A.H. Plant pathogens as indicators of climate change. **Climate change**. Elsevier, p. 499-513, 2021.

GODOY, M. J. S.; PACHECO, W. S. P.; PORTAL, R. R.; PIRES FILHO, J. M.; MORAES, L. M. M. Programa Nacional de Erradicação da Mosca-da-carambola. *In*: SILVA, R. A.; LEMOS, W. P.; ZUCCHI, R. A. (Eds.). **Moscas-das-frutas na Amazônia brasileira: diversidade, hospedeiros e inimigos naturais**. Macapá: Embrapa Amapá. p. 134-158, 2011.

GÓMEZ, G.; PADRÓN, J.; MEULENERT, A. Influencia del evento meteorológico El Niño Oscilacion Sur sobre epifitotias del tizón tardío de la papa y el moho azul del tabaco en Cuba. **Fitosanidad**, v. 3, n. 3, p. 21-26, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola 2023**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal 2022**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 04 ago. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Headline Statements from the Summary for Policymakers**. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Impacts, Adaptation and Vulnerability 2022**. Geneva: IPCC, p. 3670, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. **Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, p. 151, 2014.

LEITE, R. S. V.; ALBUQUERQUE, P. S. B. de; GASPAROTTO, L.; BRAVIN, M. P.; AMORIM, J. F. F. de; BRITO, A. M. de; FERREIRA, A. F. T. A. F. e. **Monilíase do cacauzeiro e cupuaçuzeiro**. Embrapa Amazonas (Comunicado Técnico 166), 2023.

LEMONS, L. N.; PEREIRA, J. D. B.; SILVA, R. A.; MARSARO JUNIOR, A. L. Vulnerabilidade da faixa de fronteira do Brasil à introdução de espécies invasoras exóticas. In: PORTO, J. L. R.; SOTTA, E. D. **Reformatações fronteiriças no Platô das Guianas: (re)territorialidades de cooperações em construções**. Publit: Rio de Janeiro, 2011. p. 121-144.

MARAUN, D.; SHEPHERD, T. G.; WIDMANN, M.; ZAPPA, G.; WALTON, D.; GUTIÉRREZ, J. M.; HAGEMANN, S.; RICHTER, I.; SOARES, P. M. M.; HALL, A.; MEARN, L. O. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 11, p. 764-773, 2017.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MIRANDA, S. H. G.; NASCIMENTO, A. M.; XIMENES, V. P. Potenciais impactos socioeconômicos da expansão da mosca-da-carambola. In: VILELA, E. F.; ZUCCHI, R. A. (Ed.). **Pragas introduzidas no Brasil: insetos e ácaros**. Piracicaba: FEALQ, 2015. p. 132-149.

MORAIS, E. G. F.; JESUS-BARROS, C. R.; ADAIME, R.; LIMA, A. L.; NAVIA, D. Pragas de expressão quarentenária na Amazônia, In: SILVA, N. M.; ADAIME, R.; ZUCCHI, R. A. **Pragas Agrícolas e florestais na Amazônia**. Brasília: Embrapa, 2016. p. 521-559.

MOURA, M. F.; PICANÇO, M. C.; SILVA, E. M.; GUEDES, R. N. C.; PEREIRA, J. L.; Plano de amostragem do biótipo B de *Bemisia tabaci* na cultura do pepino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 12, p. 1357-1363, 2003.

NAVIA, D.; MORAIS, E. G. F.; MENDONÇA, R. S.; GONDIM JÚNIOR, M. G. C. Ácaro-vermelho-das-palmeiras, *Raioella indica* Hirst (Prostigmata: Tenupalpidae). In: VILELA, E.; ZUCCHI, R. A. **Pragas introduzidas no Brasil: insetos e ácaros**. Piracicaba: Fealq, 2015. p. 418-452.

NORMAS INTERNACIONAIS PARA MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS (NIMF). NIMF Nº 6, **Diretrizes para Vigilância**, FAO, Roma, 1997. Disponível em: [https://www.ippc.int/largefiles/NIMF\\_06\\_1997\\_PTFINAL\\_0.pdf](https://www.ippc.int/largefiles/NIMF_06_1997_PTFINAL_0.pdf). Acesso em: 27 jun. 2024.

O'NEILL, B. C.; TEBALDI, C.; VUUREN, D. P. V.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J. F.; LOWE, J., MEEHL, G. A.; MOSS, R.; RIAHI, K.; SANDERSON, B. M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geosci. Model Dev.**, v. 9, p. 3461-3482, 2016.

OLIVEIRA, V. A. S. **O enigma da vassoura-de-bruxa: análise de um choque exógeno na economia de Ilhéus/Bahia**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Faculdade de Economia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

PARÁ. Agência de Defesa Agropecuária do Pará. **Decreto nº 106 de 20/06/2011**. [Aprova o Regulamento da Lei nº 7.392, de 7 de abril de 2010, que dispõe sobre a Defesa Sanitária Vegetal no âmbito do Estado do Pará e dá outras providências]. Diário oficial do Estado, 21 jun. 2011. Disponível em: < <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=148115>>. Acesso em: 03 jan. 2024.

PARÁ. Agência de Defesa Agropecuária do Pará. **Lei nº 7.392, de 07 de abril de 2010**. [Dispõe sobre a Defesa Sanitária Vegetal no âmbito do Estado do Pará e dá outras providências]. Diário oficial do Estado, 09 abri. 2010. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=147900>>. Acesso em: 22 dez. 2023.

ROLIM, L. Z. R.; SOUZA-FILHO, F. A. Análise dos modos de variação sazonal, interanual e multidecadal do clima atual através da análise de séries temporais de vazões. ADAPTA: Gestão adaptativa do risco climático de seca. **Expressão Gráfica e Editora**, Fortaleza/CE, 2019.

ROSEGRANT, M. W.; TOKGOZ, S.; BHANDARY, P. The new normal? A tighter global agricultural supply and demand relation and its implications for food security. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 95, n. 2, p. 303-309, 2012.

SALMAH, M.; ADAM, N. A.; MUHAMAD, R.; LAU, W. H.; AHMAD, H. Infestation of fruit fly, *Bactrocera* (Diptera: Tephritidae) on mango (*Mangifera indica* L.) in peninsular Malaysia. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, v. 9, n. 2S, p. 799-812, 2017.

SCHERM, H.; YANG, X. B. Interannual variations in wheat rust development in China and the United States in relation to the El Nino/Southern Oscillation. **Phytopathology**, v. 85, n. 9, p. 970-976, 1995.

SILVA JÚNIOR, G. J. da; FEICHTENBERGER, E.; SPÓSITO, M. B.; AMORIM, L.; BASSANEZI, R. B.; GOES, A. de. **Pinta preta: a doença e seu manejo**. Araraquara, SP: Fundecitrus, p. 208, 2016. Disponível em: <[https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/manual\\_detalhes/pinta-preta-dos-citros--a-doenca-e-seu-manejo/58](https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/manual_detalhes/pinta-preta-dos-citros--a-doenca-e-seu-manejo/58)>. Acesso em: 21 jun. 2023.

SILVA, M. L. da; SANCHES, M. M.; STANCIOLI, A. R.; ALVES, G.; SUGAYAMA, R. The role of natural and human-mediated pathways for invasive agricultural pests: a historical analysis of cases from Brazil. **Agricultural Sciences**, v. 5, p. 634-646, 2014.

SUGAYAMA, R. L.; STANCIOLI, A. R.; VILELA, E. F. Ameaças fitossanitárias para o Brasil: entender o passado para prever o futuro. In: VILELA, E. F.; ZUCCHI, R. A. **Pragas introduzidas no Brasil: insetos e ácaros**. Piracicaba: Fealq, 2015. p. 53-66.

THORNTON, P. K.; JONES, P. G.; ERICKSEN, P. J.; CHALLINOR, A. J. Agriculture and food systems in sub-Saharan Africa in a 4°C+ world. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 369, n. 1934, p. 117-136, 2011.

TREBICKI, P. Climate change and plant virus epidemiology. **Virus research**, v. 286, n. 198059, 2020.

Capítulo Publicado em 15/12/2024 na International Journal of Agriculture and Biology

## 2 VULNERABILIDADE CLIMÁTICA E TERRITORIAL NA OCORRÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL DA MANCHA-PRETA-DOS-CITROS NA AMAZÔNIA ORIENTAL

### RESUMO

A mancha-preta-dos-citros causada por *Phyllosticta citricarpa* Van der Aa é uma praga quarentenária que causa queda prematura de frutos, restringe a exportação e causa prejuízos na citricultura do Brasil, onde sua ocorrência deve ser monitorada. Assim, objetivou-se analisar a dinâmica espaço-temporal e padrões sazonais de prevalência e incidência da mancha-preta-dos-citros no município de Eldorado do Carajás, Pará, Brasil. Foram inspecionadas 181 propriedades com prevalência de 5,6, 4 e 7.8 % e incidência média anual nos focos de 62, 73,08 e 61,46 % em 2019, 2021 e 2022, respectivamente. Foram erradicadas 439 plantas doentes em 11 focos, com maior incidência no período menos chuvoso (81,8 %) do que no período mais chuvoso (18,2 %) com maior influência da umidade relativa do ar, temperatura mínima e precipitação pluviométrica no patossistema. A incidência foi diagnosticada 90 % em plantios domésticos e 10 % em unidades produtivas comerciais. As espécies cítricas laranja doce (52,94 %), tangerina (29,41 %) e limão cravo (17,65 %) apresentaram as maiores incidências em plantios com mais de 10 anos. Na escala da propriedade, as incidências apresentaram padrão espacial agregado explicadas pelo modelo gaussiano e autocorrelação pelo Índice de Moran, com alcance da doença de 25,5 a 103 metros. Na escala do município, os focos foram espacialmente aleatórios. O mapeamento mostrou que as propriedades rurais com focos da doença estão próximas de vias de fácil acesso para a venda ambulante de mudas contaminadas com pragas quarentenárias que ameaçam a competitividade da comercialização de frutos cítricos e o desenvolvimento sustentável da citricultura amazônica.

**Palavras-Chave:** Citricultura amazônica. Geoestatística. Levantamento Fitossanitário. *Phyllosticta citricarpa* Van der Aa. Sistema de informação geográfica.

## CLIMATIC AND TERRITORIAL VULNERABILITY IN THE SPATIO-TEMPORAL OCCURRENCE OF CITRUS BLACK SPOT IN THE EASTERN AMAZON

### ABSTRACT

Citrus black spot (*Phyllosticta citricarpa* Van der Aa) is a quarantine pest that causes premature fruit drop, restricts exports, and causes damage to citrus farming in Brazil, where its occurrence must be monitored. Thus, the objective was to analyze the spatio-temporal dynamics and seasonal patterns of prevalence and incidence of citrus black spot in the municipality of Eldorado do Carajás, Pará, Brazil. A total of 181 properties were inspected, with a prevalence of 5.6, 4, and 7.8%, and an average annual incidence in the hotspots of 62, 73.08, and 61.46% in 2019, 2021, and 2022, respectively. A total of 439 diseased plants were eradicated from 11 hotspots, with higher incidence in the less rainy period (81.8%) compared to the more rainy

period (18.2%), with greater influence of relative humidity, minimum temperature, and rainfall in the pathosystem. The incidence was diagnosed in 90% of domestic plantings and 10% in commercial productive units. The citrus species sweet orange (52.94%), tangerine (29.41%), and Rangpur lime (17.65%) had the highest incidences in plantings over 10 years old. At the property level, the incidences showed an aggregated spatial pattern explained by the Gaussian model and autocorrelation by the Moran Index, with the disease range from 25.5 to 103 meters. At the municipal level, the hotspots were spatially random. Mapping showed that rural properties with disease hotspots are close to easily accessible roads for the street sale of seedlings contaminated with quarantine pests, which threaten the competitiveness of citrus fruit marketing and the sustainable development of Amazonian citrus farming.

**Keywords:** Amazon citrus. Geostatistics. Phytosanitary Survey. *Phyllosticta citricarpa* Van der Aa. Geographic Information System.

## 2.1 Introdução

A citricultura brasileira é a maior do mundo e o estado do Pará é o primeiro na Amazônia brasileira em produção com aproximadamente 19.214 ha de área plantada (IBGE 2022), sendo o 7º maior produtor de laranja e 2º de lima ácida Tahiti no Brasil (FAO 2021). No entanto, a mancha-preta-dos-citros causada pelo fungo *Phyllosticta citricarpa* Van der Aa é uma das principais ameaças fitossanitárias que afetam essa cadeia produtiva (Magarey *et al.* 2015).

A criação dos polos citrícolas do Pará impulsionou a produção e comercialização de frutos frescos e suco pela abertura de mercado (Pará 2017), porém a mancha-preta-dos-citros (MPC) restringe a exportação de frutos para países onde a praga quarentenária é ausente, como aqueles pertencentes à União Europeia (Silva Júnior *et al.* 2016). Os levantamentos fitossanitários são ferramentas para o controle oficial, visando detectar a presença ou ausência de pragas quarentenárias no estado do Pará, a fim de garantir a sanidade e competitividade dos produtos no mercado nacional e internacional (Pará 2023).

Em 2019, a praga foi detectada pela primeira vez no estado do Pará, no município de Eldorado do Carajás, em um plantio comercial de citros pela Agência de Defesa Agropecuária do Pará (ADEPARÁ). A MPC é uma praga quarentenária presente no Brasil desde 1980, com distribuição geográfica restrita e sob controle oficial (Brasil 2018a), com ocorrência na região norte nos estados do Amazonas em 2003 (Gasparotto e Pereira 2004) e Rondônia no ano de 2008 (Vieira Junior *et al.* 2010).

O fungo possui dois mecanismos de dispersão, os ascósporos (esporos sexuais) (*Guignardia citricarpa* Kiely) que são produzidos em pseudotécios através de folhas cítricas em decomposição no solo, disseminados pelo vento que introduz a doença em novas áreas, e os

picnidiósporos (esporos assexuais) (*Phyllosticta citricarpa* Van der Aa) produzidos em picnídios nas lesões dos frutos, folhas aderidas às plantas e ramos secos disseminados a curtas distâncias pela água (Kotzé 1981).

Todas as variedades e híbridos de laranjas doces, tangerinas e limões verdadeiros são suscetíveis à praga. Ela pode provocar mais de 80 % de queda prematura dos frutos afetados devido às condições climáticas e à presença do patógeno com longo período de disseminação e incubação (Silva Júnior *et al.* 2016). A MPC introduzida por material vegetal do gênero *Citrus* infectado causa lesões, rejeição dos frutos pela indústria, eleva o custo do controle químico ao produtor rural e promove impactos socioambientais na cadeia citrícola (Spósito *et al.* 2011).

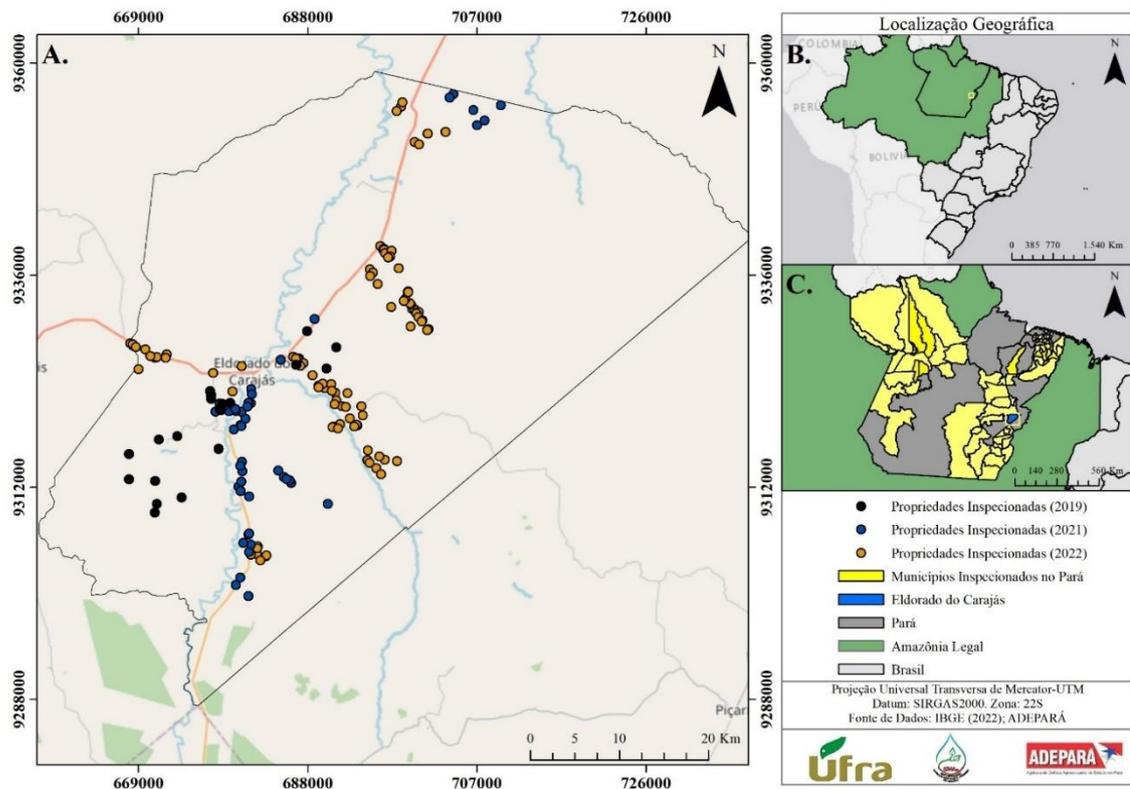
Nesse sentido, a pesquisa da dinâmica sazonal, temporal e geográfica em variadas escalas é estratégica para auxiliar ações de controle oficial, programa de manejo para erradicação de pragas (Byamukama *et al.* 2014) e identificar períodos de suscetibilidade dos pomares na Amazônia, a fim de, aprimorar o conhecimento da incidência da praga em condições de campo (Vieira Júnior *et al.* 2012).

Assim, este estudo teve o objetivo de quantificar, mapear e analisar a dinâmica espaço-temporal e padrões sazonais de prevalência e incidência de mancha-preta-dos-citros no município de Eldorado do Carajás, Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

## **2.2 Material e Métodos**

### **2.2.1 Levantamento fitossanitário de detecção de *Phyllosticta citricarpa* Van der Aa**

Os levantamentos fitossanitários de detecção foram realizados semestralmente nos anos de 2019, 2021 e 2022, em 66 municípios do estado do Pará pela Agência de Defesa Agropecuária do Pará (ADEPARÁ) (Fig. 1C), em plantios comerciais e domésticos de citros com detecção de *Phyllosticta citricarpa* Van der Aa no município de Eldorado do Carajás, Pará, Amazônia oriental, Brasil (Fig. 1A).



**Fig. 1:** Áreas de levantamento de detecção da mancha-preta-dos-citros no estado do Pará (C) e das propriedades rurais monitoradas (A) no município de Eldorado do Carajás, Pará, Brasil em 2019, 2021 e 2022 na Amazônia (B).

O município de Eldorado do Carajás está localizado na Amazônia Legal (6°8'30.94" S; 49°23'24.8" W; altitude de 152 m) (Fig. 1C). Apresenta vegetação de floresta densa em relevo aplainado e acidentado, latossolos e argissolos, 6 ha de área plantada de citros e rendimento médio de 8 a 12 t/ha<sup>-1</sup> (IBGE 2022). O clima é classificado conforme Koppen do tipo "Am", caracterizado como clima tropical com estação seca, temperatura do ar e radiação média anual de 27,4 °C e 169 W/m<sup>2</sup>, respectivamente (Alvares *et al.* 2013).

Em condições de campo, foram inspecionadas por técnicos da ADEPARÁ através do monitoramento com a detecção inicial da MPC, o total de 6.753 plantas do gênero *Citrus* em 181 propriedades, sendo 19, 52 e 110 nos anos de 2019, 2021 e 2022, respectivamente, em uma área de 24,31 ha. Cada propriedade rural foi inspecionada apenas uma vez durante os levantamentos, de forma a obter cobertura geográfica representativa do município e presença ou ausência da praga (Fig. 1A).

Foram inspecionadas todas as plantas em plantios domésticos, 20 % das plantas em plantios comerciais por amostragem sistemática, iniciando-se na primeira linha de plantio da bordadura da área, inspecionando-se uma a cada cinco plantas, ou uma a cada cinco linhas de

plantio, com inspeção de todas as plantas da linha (Brasil 2018b). Quando um único fruto com sintomas suspeito era detectado, a planta foi considerada doente (Brasil 2008).

Dados complementares coletados em campo incluíram informações do produtor, propriedade, área cultivada, número de plantas, número de plantas suspeitas, espécies de *Citrus* e gêneros afins, coordenadas geográficas e idade do plantio. Para identificação dos sintomas foi utilizado uma escala diagramática (Aguilar-Vildoso *et al.* 2002). Em caso de suspeita, as inspeções eram interrompidas preventivamente para não disseminar a praga para outras propriedades.

A avaliação visual da incidência da doença foi realizada pela inspeção dos frutos da parte externa e no terço inferior das plantas, onde há maior incidência de luz e frutos expostos ao sol com possíveis sintomas de mancha virulenta, dura, sardenta, trincada, rendilhada e falsa melanose (Fig. 2) (Brasil 2008; Silva Junior *et al.* 2016). O fungo expressa sintomas também em folhas, pecíolos, ramos, espinhos e pedúnculos (Feichtenberger *et al.* 2005).



**Fig. 2:** Frutos de laranja doce (A, B, C), tangerina (D) e limão cravo (E, F) inspecionados com sintoma de mancha dura a virulenta em propriedades rurais com presença da mancha-preta-dos-citros em Eldorado do Carajás, Pará, Brasil.

Mediante o laudo de diagnóstico fitossanitário oficial do laboratório de confirmação da presença de MPC, foram inspecionadas todas as plantas cítricas existentes em imóveis de produção comercial, não comercial, imóveis urbanos e áreas públicas confrontantes da propriedade com foco dentro do raio mínimo de um quilômetro (Brasil 2018b).

### 2.2.2 Detecção da mancha-preta-dos-citros

As plantas com sintomas suspeitos da MPC foram identificadas pelo método direto, sendo realizada a coleta das amostras compostas por 5 unidades de ramo, folha e fruto, acondicionados em saco de papel pardo, etiquetado, preenchido a lápis e em caixa térmica de isopor, sendo encaminhado ao laboratório Agrônômica de Porto Alegre (RS) para diagnóstico fitossanitário pelos métodos molecular e biológico (Brasil 2008; Brasil 2018b).

O teste laboratorial de indução de sintomas de MPC foi feito pela imersão dos frutos em solução contendo Ethephon a 750 ppm, por cinco minutos, e posterior incubação dos frutos em temperaturas acima de 25 °C, por um período mínimo de 28 dias. Observações visuais e microscópicas foram realizadas semanalmente nos frutos em incubação. Caso haja ocorrência de sintomas, o fungo agente causal é isolado por meio de cultura de cenoura-ágar suplementado com dextrose ou aveia-ágar (Brasil 2008).

### 2.2.3 Dados de prevalência e incidência anual da mancha-preta-dos-citros

Os dados de prevalência na escala do município foram definidos como o número de propriedades com plantios de citros que possuíam pelo menos uma amostra positiva de MPC pelo número total de propriedades inspecionadas x 100. A incidência de MPC foi calculada para a escala geográfica da propriedade, dividindo-se o número de plantas com amostras positivas para a MPC dentro de cada propriedade pelo número total de plantas inspecionadas em cada propriedade amostrada com MPC (Byamukama *et al.* 2014).

### 2.2.4 Sazonalidade na prevalência e incidência da mancha-preta-dos-citros

A sazonalidade da prevalência da doença de cada ano foi determinada como o número de propriedades positivas para a MPC pelo número total de propriedades inspecionadas x 100 no período mais e menos chuvoso. A sazonalidade da incidência da doença de cada ano foi determinada pelo número de plantas positivas para a MPC pelo número total de plantas inspecionadas x 100 no período mais e menos chuvoso (Byamukama *et al.* 2014).

O período mais chuvoso compreendido de janeiro a abril e menos chuvoso de maio a dezembro, foram determinados pelo método do balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (Rolim *et al.* 1998), a partir das características do solo do município (Doorenbos e Kassam 1994; IBGE 2022) e da profundidade efetiva do sistema radicular da laranjeira de 0 a 40 cm (Testezlaf *et al.* 2007), corroborado por Ferreira Filho *et al.* (2020).

Dados climáticos de temperatura máxima, média e mínima do ar (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C), direção e velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), radiação global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), precipitação pluviométrica (mm) e umidade relativa do ar (%) foram utilizados para análise das condições ambientais e realização do balanço hídrico, obtidos por informações de satélite e modelo de assimilação MERRA-2 do período de 1981 a 2022 da plataforma *National Aeronautics and Space Administration/Prediction of World Wide Energy Resources*

(NASA/POWER <http://power.larc.nasa.gov>) com resolução horizontal de 1° latitude-longitude (Monteiro *et al.* 2018) devido ao município não possuir estação meteorológica de superfície disponível. O software WRPLOT versão 8.0.2. foi usado na elaboração da rosa dos ventos.

#### 2.2.5 Análise de dados espaciais

As incidências de MPC no município foram plotadas para mapear e identificar as áreas geográficas com presença da doença pela coleta em campo de coordenadas geográficas pelo *Global Positioning System* (GPS), através do sistema de referência geodésico SIRGAS2000, onde foram transformados via sistema de informação geográfica (SIG) para Projeção Cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM).

Foram utilizados mapas interpolados que descrevem os níveis de incidência nas propriedades estimados pelo método da krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância (IQD) que considera os pontos mais próximos, mais parecidos do que os pontos mais distantes (Silva *et al.* 2019) através do software ArcGis 10.5.

A dependência espacial dos níveis de incidência da MPC na escala de propriedade e município foram analisadas por semivariogramas e Índice de Moran (IM) que varia de -1 (fraca dependência espacial) a 1 (forte dependência espacial) (Byamukama *et al.* 2014) pelo procedimento de análise geoestatística do complemento Smart-Map do software QGIS 3.28.12.

Baseado nos parâmetros estatísticos do coeficiente de determinação (precisão) e raiz do erro quadrático médio (acurácia) do teste, o modelo teórico gaussiano apresentou o melhor ajuste ao semivariograma empírico da incidência da MPC (Yamamoto e Landim 2013). O semivariograma expressa a variabilidade espacial de dissimilaridade entre pares de pontos em razão da distância ( $h$ ) e orientação entre dois locais de amostragem (Seidel e Oliveira 2014). A semivariância mede o grau de dependência espacial entre amostras, assumindo-se uma estacionariedade nas propagações de plantas doentes, onde as amostras mais próximas tendem para um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias (Nanos *et al.* 2004).

Os semivariogramas são modelos teóricos cujos valores de semivariância aumentam com a distância a nivelar na semivariância máxima conhecida como patamar ou soleira ( $h$ ) que é a distância em que as amostras apresentam variabilidade estática aleatória ( $C_0+C+a$ ). O alcance ou amplitude ( $a$ ) é a distância máxima em que uma amostra tem relação com a outra (dependência espacial) e não há mais aumento na semivariância, sendo definida a malha de amostragem no campo. Efeito pepita ( $C_0$ ) é a semivariância aleatória na curta escala que

representa a variabilidade real no campo do fenômeno espacial e indica a adequabilidade da escala de amostragem para representar a realidade (Yamamoto e Landim 2013).

#### 2.2.6 Fatores de risco associados à mancha-preta-dos-citros

Para determinar a influência da posição geográfica na incidência da MPC foram plotadas as coordenadas geográficas (latitude e longitude) das propriedades (x) versus a incidência da MPC de cada ano da propriedade no município (y) para analisar os gradientes norte-sul e leste-oeste. As porcentagens de incidência foram regredidas contra latitude e longitude (x), a fim de testar a relação de linearidade significativa.

A influência das condições climáticas na incidência de MPC foi realizada pelo método multivariado de análise de componentes principais para identificar grupos similares e dissimilares, reduzir a dimensionalidade dos dados com a menor perda de informações possível (Gomes Junior e Almeida 2017) e reter, em ordem de estimativa, o máximo de informações para a variação total e reconhecimento de padrões da distribuição geral dos dados de forma abrangente e realista (Dallastra *et al.* 2014). As análises foram conduzidas na linguagem de programação Python (<https://www.python.org/>, versão 3.7.3), observando pressupostos dos testes Bartlett e índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO).

A partir da análise das condições ambientais e ocorrência da praga, foram mapeadas as principais rotas de risco de trânsito em diferentes modais presentes no estado do Pará e identificados os municípios que permitem a entrada de material de propagação vegetal e que são vias de acesso as principais áreas produtoras de citros.

### 2.3 Resultados

A partir da análise da dinâmica espaço-temporal do patossistema da mancha-preta-dos-citros na sazonalidade amazônica, obteve-se que a praga foi detectada em 10 propriedades rurais e totalizou 11 focos, com 439 plantas doentes, sendo 31, 38 e 370 plantas em 2019, 2021 e 2022, respectivamente, que foram destruídas (erradicadas e incineradas) (Tabela 1).

**Tabela 1:** Data de plantio, detecção, incidência e prevalência de mancha-preta-dos-citros no período mais chuvoso (janeiro-abril) e menos chuvoso (maio-dezembro) em propriedades rurais com espécies de *Citrus* e gêneros afins no município de Eldorado do Carajás, Pará, Brasil em 2019, 2021 e 2022.

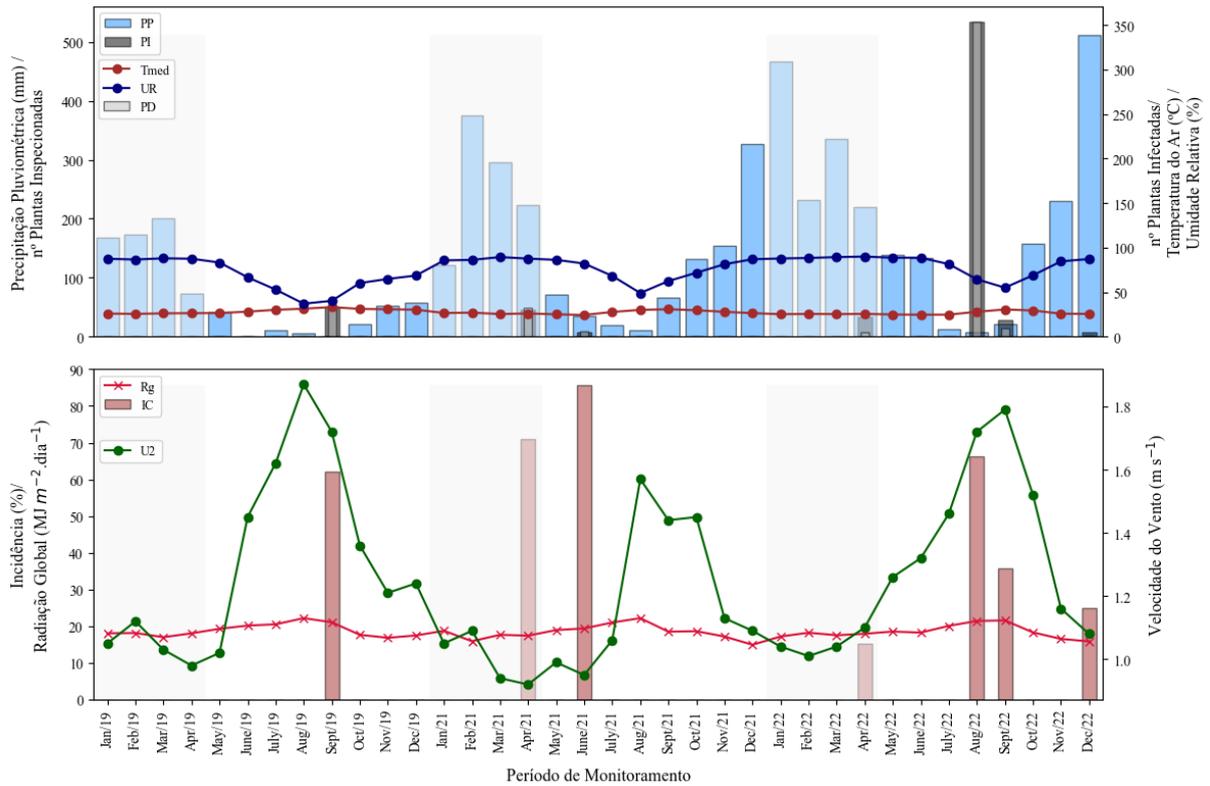
| Foco | Ano de plantio | Data de detecção | Hospedeiro                    | Nº Plantas Inspeccionadas | Nº Plantas Doentes | Incidência (%) | Prevalência anual (%) | Incidência anual (%) | Prevalência sazonal (%) | Incidência sazonal (%) |
|------|----------------|------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------|----------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|
| 1    | 2009           | 25/09/2019       | Tangerina                     | 50                        | 31                 | 62             | 5.6                   | 1.6                  | 12.5                    | 3.6                    |
| 2    | 2010           | 09/04/2021       | Laranja/Tangerina             | 45                        | 32                 | 71.1           | 3.8                   | 1.4                  | 3                       | 1.4                    |
| 3    | 1988           | 21/06/2021       | Laranja/Limão cravo           | 7                         | 6                  | 85.7           |                       |                      | 5.6                     | 1.2                    |
| 4    | 1992           | 11/04/2022       | Laranja/Limão cravo/Tangerina | 33                        | 5                  | 15.2           |                       |                      | 2.6                     | 0.9                    |
| 5    | 1995           | 29/08/2022       | Laranja                       | 23                        | 10                 | 43.5           |                       |                      |                         |                        |
| 6    | 2009           | 30/08/2022       | Tangerina                     | 450                       | 341                | 75.8           |                       |                      |                         |                        |
| 7    | 2012           | 30/08/2022       | Laranja                       | 45                        | 1                  | 2.2            |                       |                      |                         |                        |
| 8    | 2010           | 31/08/2022       | Laranja                       | 15                        | 1                  | 6.7            | 7.3                   | 18.1                 | 9.9                     | 25.1                   |
| 9    | 2010           | 01/09/2022       | Laranja                       | 15                        | 3                  | 20             |                       |                      |                         |                        |
| 10   | 2008           | 01/09/2022       | Laranja/Tangerina             | 13                        | 7                  | 5.8            |                       |                      |                         |                        |
| 11   | 2015           | 14/12/2022       | Laranja/Limão cravo           | 8                         | 2                  | 25             |                       |                      |                         |                        |
|      |                |                  | Total                         | 704                       | 439                |                | 5.5                   | 6.5                  |                         |                        |

A prevalência anual da MPC no município foi de 5,6, 3,8 e 7,3 %, em 1, 2 e 8 propriedades, e os plantios apresentaram valores de incidências anuais de 1,6, 1,4 e 18,1 % nos anos de 2019, 2021 e 2022, respectivamente, com uma prevalência total de 5,5 % nas propriedades rurais inspeccionadas e incidência total de 6,5 % de MPC em plantas. A maior incidência (85,7 %) ocorreu no foco 3, com apenas 6 plantas doentes de um total de 7 hospedeiros na propriedade (Tabela 1).

O município apresentou indicadores de prevalência e incidência sazonal maior para a MPC no período menos chuvoso (81,8 %) quando comparada ao período mais chuvoso (18,2 %), onde a prevalência sazonal apresentou flutuações, porém com diminuição quando comparada ao foco primário em 2019 (Tabela 1).

Pelo hábito de consumo de frutos frescos de citros na região amazônica, das 10 propriedades foco, em somente uma propriedade (10 %) a incidência ocorreu em unidade produtiva comercial. Cerca de 90 % das detecções ocorreram em plantios domésticos caracterizados por serem praticados em fundo de quintal para consumo familiar com plantio aleatório, sem manejo e finalidade comercial, sendo observado nessas áreas os maiores percentuais de incidência pela proporção devida ao baixo número de hospedeiros (Tabela 1).

As condições ambientais do município durante os levantamentos de monitoramento da MPC, apresentaram precipitação pluviométrica anual de 1.701,7 mm, com temperatura máxima, média e mínima do ar, umidade relativa do ar, radiação global e velocidade do vento de 40,5 °C, 27,5 °C, 20,9 °C, 76 %, 1,2 m s<sup>-1</sup> e 18,6 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente (Fig. 3).

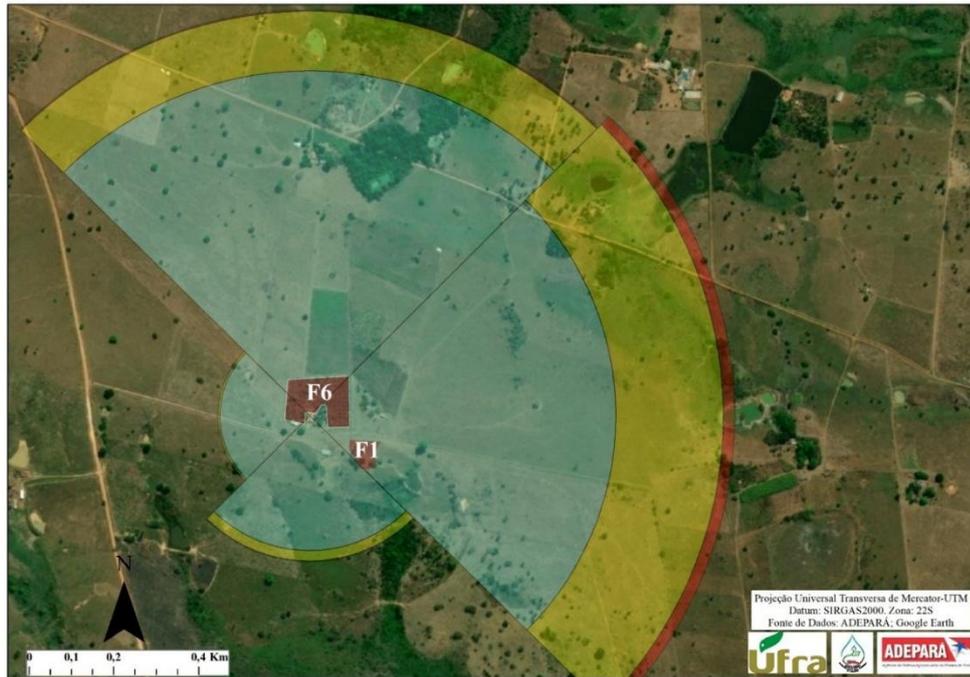


**Fig. 3:** Valores médios mensais de temperatura do ar (Tmed), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (U2), radiação solar global incidente (Rg), precipitação pluviométrica (PP), acumulado mensal de plantas inspecionadas (PI), plantas doentes (PD) e incidência (IC) em propriedades rurais com mancha-preta-dos-citros em Eldorado do Carajás, Pará, Brasil, em 2019, 2021 e 2022.

Observou-se aumento da precipitação pluviométrica e variação na flutuação temporal da incidência de MPC (Fig. 3), que embora tenha obtido crescimento pelo aumento dos focos no município, apresentou decréscimo na incidência média pela relação entre plantas inspecionadas e plantas doentes, com incidência média nos focos de 62, 73,1 e 61,5 %, em 2019, 2021 e 2022, respectivamente.

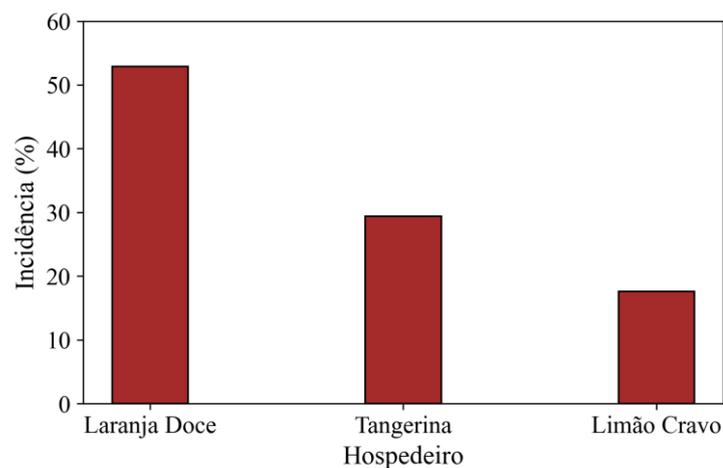
A direção do vento no município é oriunda 38,7 % do Leste (E), seguida da direção Norte (N) com 35,2 % de frequência. Durante o período menos chuvoso, há predominância de ventos de Leste (48 %), com velocidade média de 1,36 m s<sup>-1</sup> e no período mais chuvoso, do Norte (54,5 %), com velocidade média de 1,04 m s<sup>-1</sup>.

Os focos 1 e 6 foram registrados no período menos chuvoso, ambos na mesma propriedade. Foram identificadas 372 plantas doentes, com distâncias máxima e média entre as áreas afetadas de 156,9 e 41,4 m, respectivamente. Observou-se dispersão da praga entre 2019 a 2022 (Tabela 1), com aumento de infecções devido à falta de eliminação imediata após a detecção por parte do produtor. Somente em 2022, ocorreu a erradicação na propriedade que apresentou o maior número de plantas doentes durante o período analisado (Fig. 4).



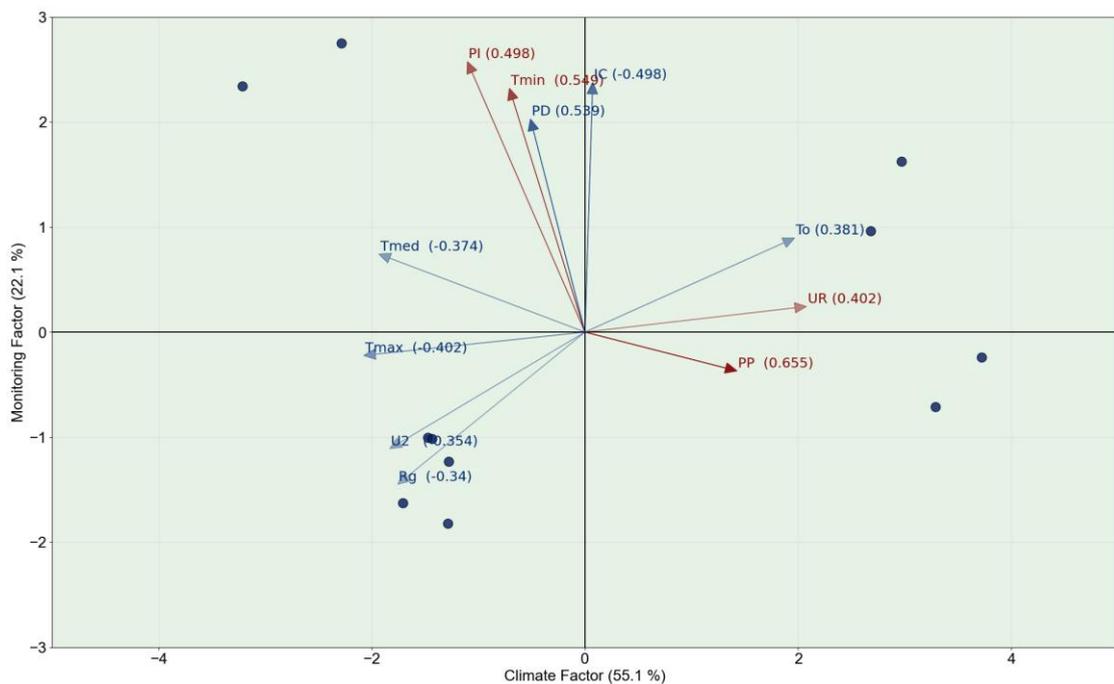
**Fig. 4:** Espacialidade da distribuição do vento no raio de 1000 m perifocalmente à localização do foco 1 (F1) em 2019 e foco 6 (F6) em 2022 de mancha-preta-dos-citros em propriedade rural e a rosa dos ventos indicando a direção, velocidade do vento do município de Eldorado do Carajás, Pará, Brasil.

Devido à filogenia das espécies de *Citrus* e gêneros afins ser complexa e conflitante, o que dificulta a identificação (Curk *et al.* 2016), os hospedeiros de incidência da MPC detectados no monitoramento foram agrupados em laranja doce (52,94 %), tangerina (29,4 %) e limão cravo (17,65 %) (Fig. 5), cujos plantios possuíam mais de 10 anos de implantação sem sistema de irrigação (Tabela 1).



**Fig. 5:** Hospedeiros com incidência de mancha-preta-dos-citros detectados em levantamentos de monitoramento nos anos de 2019, 2021 e 2022, no município de Eldorado do Carajás, Pará, Brasil.

A análise dos componentes principais resultantes da combinação linear de todas as variáveis originais, as quais são independentes entre si, indicou que o fator climático teve impacto significativo em todas as variáveis do patossistema, explicando 55,1 % da variação, seguido do fator de monitoramento com influência de 22,1 %, os quais explicaram 77,2 % da variância amostral total de forma efetiva do patossistema, cuja projeção dos dados com a rotação dos eixos capturaram a estrutura da máxima variância e da covariância (Fig. 6).



**Fig. 6:** Biplot componente principal 1 (fator climático) x componente principal 2 (fator monitoramento), a partir da correlação entre variáveis originais e componentes principais (baseada em matriz de covariância) da incidência da mancha-preta-dos-citros em Eldorado do Carajás, Pará, Brasil nos anos de 2019, 2021 e 2022. Tmax= temperatura máxima; Tmed= temperatura média; Tmin= temperatura mínima; To= temperatura do ponto de orvalho; U2= velocidade do vento; Rg= radiação solar global incidente; PP= precipitação pluviométrica; UR= umidade relativa do ar; IC= incidência; PI= plantas inspecionadas; PD= plantas doentes.

As variáveis originais transformadas que apresentaram maior importância e contribuição para a formação dos componentes principais foram a umidade relativa do ar, plantas inspecionadas, temperatura mínima e precipitação pluviométrica. Observou-se a partir da dispersão dos autovetores, inter-relação no agrupamento entre a temperatura mínima, plantas doentes e inspecionadas com a incidência da MPC (Fig. 6).

De acordo com IM, as incidências de MPC dentro das propriedades rurais dos focos 1, 2 e 6 (Tabela 1) apresentaram dependência espacial significativa e padrão espacial agregado,

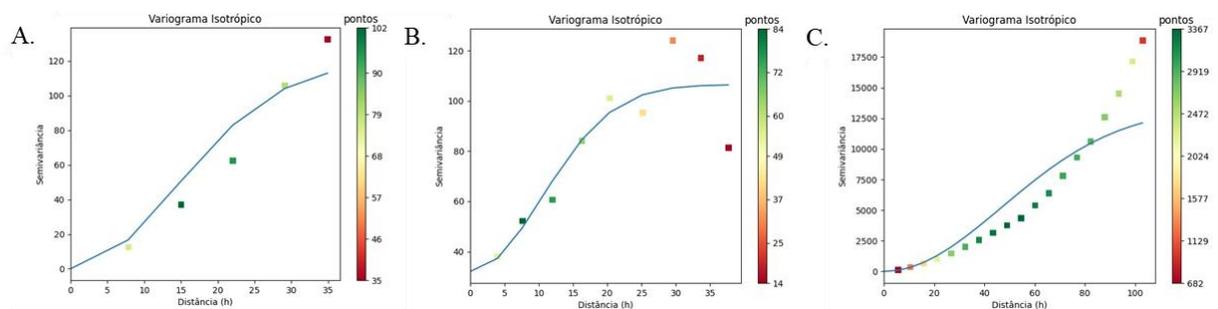
com maior autocorrelação no foco 1 e 6, por serem plantios comerciais com maior densidade de plantas doentes. Porém, observou-se menor agregação na propriedade do foco 2 em 2021, com hospedeiros dispersos na área e alcance de plantas doentes de 25,5 metros (Tabela 2).

**Tabela 2:** Análise da distribuição espacial de plantas infectadas pela mancha-preta-dos-citros em nível de propriedade rural com espécies cítricas em 2019, 2021 e 2022, analisados pelo Índice de Moran no município de Eldorado do Carajás, Pará, Brasil.

| <sup>1</sup> Ano | <sup>2</sup> Área (m <sup>2</sup> ) | <sup>3</sup> NPF | <sup>4</sup> IM | <sup>5</sup> P valor | <sup>6</sup> Co+C | <sup>7</sup> Modelo | <sup>8</sup> R <sup>2</sup> | <sup>9</sup> a | Raio   | Padrão Espacial |
|------------------|-------------------------------------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|--------|-----------------|
| 2019             | 1.800                               | 31               | 0.87            | 0.001*               | 118.87            | Gaussiano           | 0.90                        | 34.89          | 62.29  | Agregado        |
| 2021             | 1.600                               | 32               | 0.63            | 0.001*               | 106.43            | Gaussiano           | 0.82                        | 25.49          | 66.22  | Agregado        |
| 2022             | 16.200                              | 341              | 0.98            | 0.001*               | 13.338,06         | Gaussiano           | 0.83                        | 102.88         | 173.51 | Agregado        |

<sup>1</sup>Ano da amostragem; <sup>2</sup>Área amostrada; <sup>3</sup>Número de plantas doentes por foco; <sup>4</sup>Índice de Moran; <sup>5</sup>\*significativo a 1%; <sup>6</sup>Efeito pepita + variância espacial; <sup>7</sup>Ajuste teórico dos semivariogramas empíricos; <sup>8</sup>Coefficiente de determinação; <sup>9</sup>Alcance de plantas doentes (metros).

O padrão de distribuição agregado da MPC explicada pelos modelos teóricos gaussianos (Fig. 7), demonstram que a doença ocorreu como um fenômeno extremamente contínuo, com comportamento parabólico próximo da origem, característico de uma variabilidade espacial altamente regular (Yamamoto e Landim 2013).

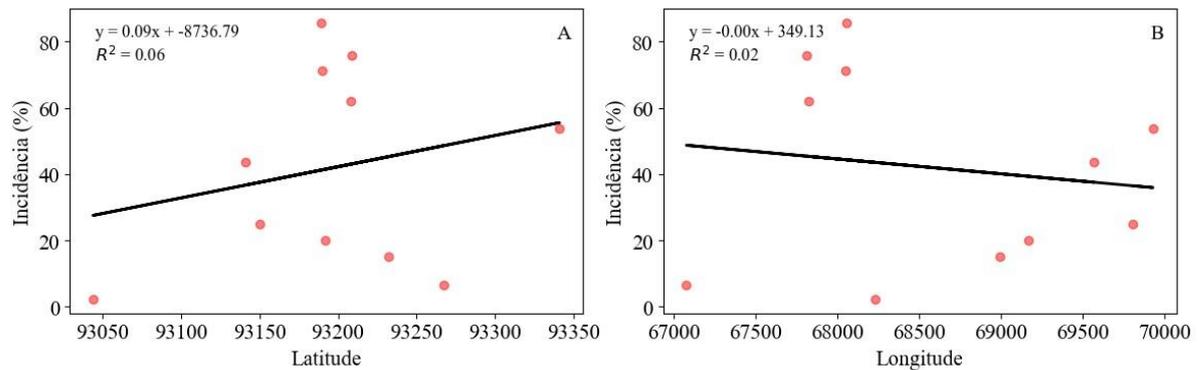


**Fig. 7:** Semivariogramas com alta continuidade na origem da dependência espacial da mancha-preta-dos-citros em propriedades com plantas de citros nos anos de 2019 (A), 2021 (B) e 2022 (C). Os quadrados são a média dos pares de pontos tomados a cada distância (h) dos semivariogramas empíricos e a linha sólida são os semivariogramas teóricos obtidos a partir do ajuste dos dados empíricos pelo modelo gaussiano.

A doença apresentou distância máxima de 37,4, 39,7 e 104,1 m em 2019, 2021 e 2022, respectivamente, sendo captada a variabilidade da pequena escala pela amostragem com um efeito pepita próximo a zero (Fig. 7).

As áreas dos focos 1, 2 e 6 apresentaram raios de possível dispersão da doença de 62,3, 66,2 e 173,5 m, respectivamente, que nortearam as inspeções no campo e podem auxiliar no raio variável de erradicação para controle de plantas doentes.

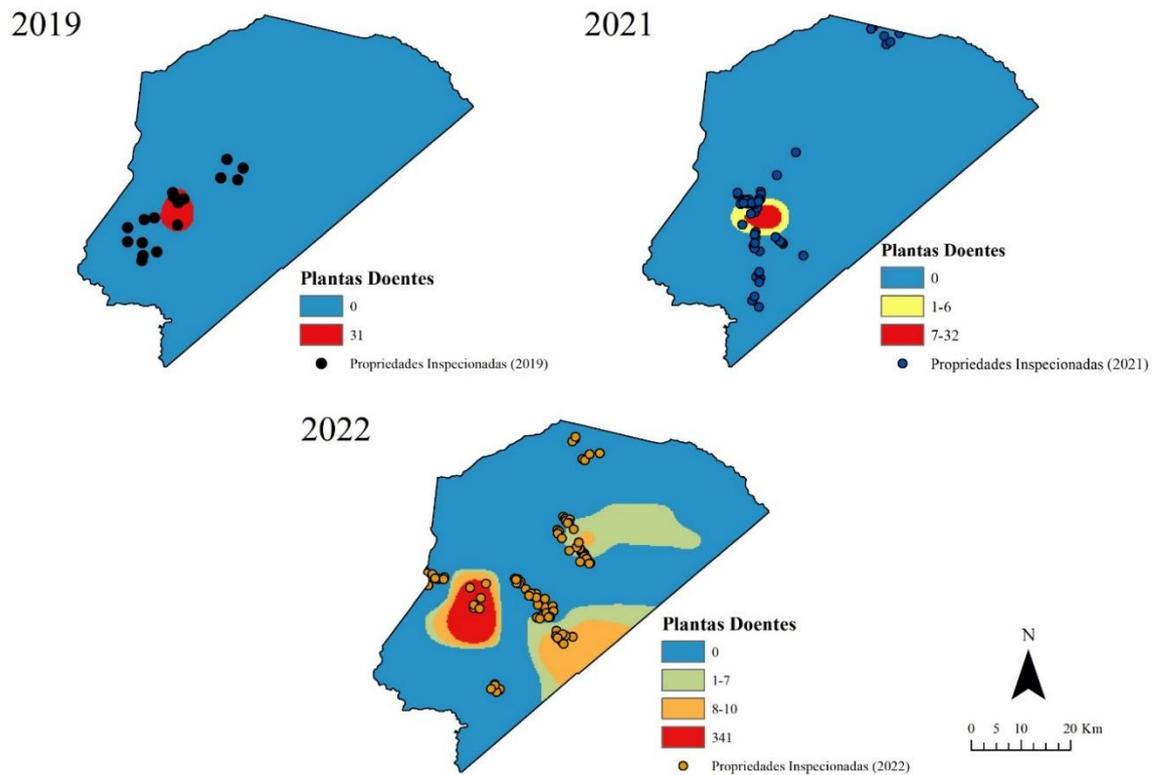
A relação linear entre a incidência da MPC e as coordenadas geográficas dos focos nos três anos analisados, apresentaram elevada dispersão e não foram significativas ( $p > 0.05$ ) de acordo com análise de regressão e os parâmetros de inclinação das equações que explicaram somente 0,06 e 0,02 % da variação da incidência da praga na área geográfica do município (Fig. 8).



**Fig. 8:** Relações lineares entre a incidência de mancha-preta-dos-citros regredidas contra a latitude (A) e longitude (B) dos focos no município de Eldorado do Carajás, em 2019, 2021 e 2022.

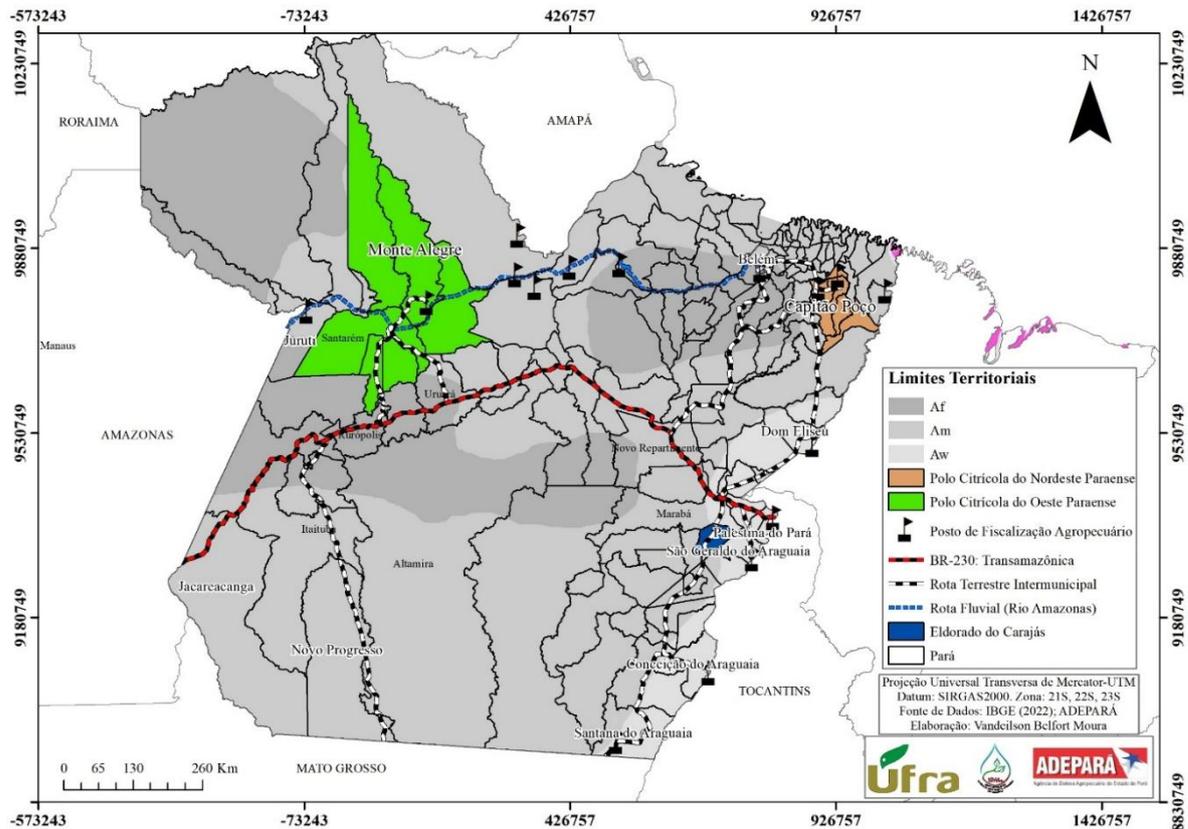
A elevada dispersão produz comportamento de distribuição espacial aleatório em plantas com poucos frutos doentes e áreas com plantio irregular como os plantios domésticos com baixa autocorrelação [IM de 0.4 ( $p < 0.05$ )] e coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,12$ ) que impossibilita agregação. A distância máxima entre focos, raio e alcance de 20,5, 34,2 e 20,3 km, respectivamente, explica a ocorrência da doença por material propagativo não certificado no município favorecida pelas condições ambientais do patossistema.

Na análise espaço-temporal da MPC no nível de escala municipal, observou-se um gradiente de incidência da MPC formando-se áreas concêntricas no sudoeste (alta incidência) e um gradiente de baixa incidência no nordeste e sudeste do município (Fig. 9).



**Fig. 9:** Inferência espacial da incidência estimada de plantas doentes de macha-preta-dos-citros em propriedade rurais com plantios de citros em Eldorado do Carajás, Pará, Brasil, em 2019, 2021 e 2022. Regiões de cor azul foram aquelas propriedades inspeccionadas em todos os anos e estavam sem ocorrência. Regiões com manchas agrupadas de cor amarela, laranja e vermelha apresentaram ocorrência.

O mapeamento pelo método IQD, indicou que o aumento de manchas agrupadas nas propriedades focos estão estabelecidas em torno das rodovias BR-155 e PA-275 que interligam o município com as demais regiões do estado do Pará e do Brasil (Fig. 10), e nas principais vicinais, onde estão localizadas a maior quantidade de propriedades rurais que facilitam o acesso para comercialização de mudas de frutíferas pela venda ambulante (Fig. 2).



**Fig. 10:** Tipos climáticos, rotas de trânsito, posto de fiscalização agropecuária e localização do polo citrícola do Nordeste Paraense com maior produção de laranja (cor laranja) e do polo citrícola do Oeste paraense com destaque na produção de lima ácida Tahiti (cor verde) e do município de Eldorado do Carajás localizado na mesorregião sudeste paraense com incidência de mancha-preta-dos-citros. **Fonte:** Adaptado de IBGE (2022).

As principais rotas de entrada de mudas infectadas no estado do Pará estão na região sudeste pelo modal terrestre em Santana do Araguaia (BR-158), Conceição do Araguaia (BR-158/PA-287/BR-155), São Geraldo do Araguaia (BR-153), Palestina do Pará (BR-230) e pela região sudoeste por Novo Progresso (BR-163) e Jacareacanga (BR-230), onde ambas convergem para a transamazônica (BR-230), que é via de acesso de grande parte do trânsito no sentido aos polos citrícolas do Pará pela BR-010 (Capitão Poço) e BR-163 (Monte Alegre) (Fig. 10).

Na região noroeste do estado, a entrada ocorre pelos modais terrestre/fluvial em Juruti pelo rio Amazonas, através do intenso fluxo de embarcações e mercadorias entre os estados do Amazonas e o Pará, com passagens em Santarém, Monte Alegre e destino final Belém. Na região nordeste, a entrada ocorre via Belém (BR-316) e Dom Eliseu (BR-010) para Irituia (PA-253), Ourém (PA-124) e Capitão Poço com presença de postos de fiscalização agropecuária.

## 2.4 Discussão

Embora a geoestatística tenha sido utilizada para análises fitossanitárias na citricultura por Oliveira *et al.* (2023), este estudo representa a primeira tentativa de descrever o padrão espacial da mancha-preta-dos-citros utilizando o modelo gaussiano no estado do Pará.

Esse achado também é corroborado por revisão de literatura realizada por Cardoso *et al.* (2021) sobre a aplicação da geoestatística no Pará. Em suas pesquisas foram identificados apenas estudos com foco em pragas como a mosca-negra-dos-citros (*Aleurocanthus woglumi* Ashby), o ácaro (*Brevipalpus phoenicis*) e a formiga (*Azteca barbifex*), todos realizados no município de Capitão Poço, localizado na mesorregião nordeste do Pará.

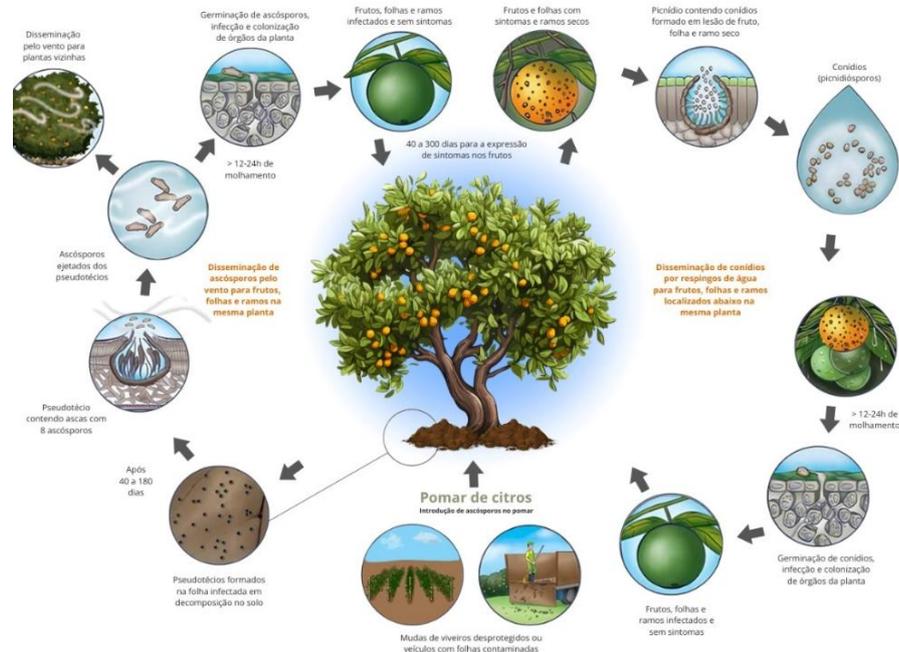
A primeira detecção de MPC no município foi identificado em 25 de setembro de 2019, em uma propriedade comercial com duas unidades produtivas de tangerina Ponkan, ambas implantadas em 2009, numa área de 1,8 ha, no espaçamento 6x6 m, cujo foco 1 possuía 50 plantas inspecionadas numa incidência de 62 % de MPC. Novos focos foram detectados à medida que os levantamentos de monitoramento no município avançaram nas propriedades confrontantes ao foco inicial (Tabela 1).

Em 2022, a prevalência aumentou devido à intensificação direcionada das inspeções em propriedades com foco mapeados nos anos anteriores (Fig. 1). Frutos maduros caídos no raio da copa das plantas facilitaram a detecção da praga nas propriedades, considerando que há um aumento na queda de frutos quando existe a presença de MPC na área. Entende-se que, plantas velhas com déficit hídrico e nutricional são mais afetadas pela MPC do que plantas novas, associada a condições climáticas pelo acúmulo progressivo do fungo no pomar (Brasil 2008; Silva Junior *et al.* 2016), que ratifica os resultados obtidos.

As chuvas de 2021 e 2022 durante todo o ano favoreceram o ciclo da MPC (Fig. 3), onde houve precipitação pluviométrica no período menos chuvoso com maiores valores nos anos de 2021 e 2022, sob efeito de *La Niña* intercalado com neutralidade do que em 2019 com *El Niño* (INMET 2023). A alternância observada entre os períodos mais e menos chuvoso com molhamento e secamento de folhas cítricas em decomposição no solo e a amplitude térmica diária são condições ótimas para maturação dos pseudotécios na produção e liberação dos ascósporos (Kotzé 1981).

Os ascósporos são ejetados pelos pseudotécios para atmosfera ultrapassando a camada limite, sendo dispersos pelo vento, onde o patógeno será depositado e causará a infecção (Fig. 11). Esse processo depende de 12-24 horas de água livre para ocorrer a germinação, formação do tubo germinativo e do apressório que penetrará no tecido vegetal e formará a massa micelial na região subcuticular, onde o patógeno poderá permanecer quiescente dependendo da idade do

fruto, concentração do inóculo e das condições ambientais (Kotzé 1981; Feichtenberger *et al.* 2005).



**Fig. 11:** Ciclo da mancha-preta-dos-citros. Fonte: Adaptado de Silva Júnior *et al.* (2016).

Variações na severidade com sintoma de mancha dura a virulenta pelo ataque severo do fungo por enzimas capazes de degradar substâncias pécnicas da parede celular do fruto pós-infecção (Silva Júnior *et al.* 2016), foram observadas no período mais e menos chuvoso e em todos os frutos maduros coletados (Fig. 2).

O sintoma de mancha dura observado, geralmente aparece no início da maturação dos frutos por infecções latentes e pode aparecer até seis meses após a queda das pétalas e em frutos de primeira florada (Baldassari *et al.* 2007). Apresenta o centro deprimido com lesões escuras (picnídios), coloração clara no fundo, bordas mais salientes de cor marrom escura que podem fundir e formar a mancha virulenta no período de 100 a 200 dias pós-infecção, que ocorre no fim da safra em altas temperaturas, onde ambos os sintomas são fontes do inóculo (Silva Junior *et al.* 2016).

Gasparotto e Pereira (2004) detectaram a MPC em um pomar da cultivar Pêra Rio às margens da Rodovia AM-010, no mês de setembro de 2003, no estado do Amazonas, em frutos com severidade extremamente elevada.

Mesmo que todas as variedades de citros sejam suscetíveis a MPC, principalmente em variedades de meia-estação (Pêra) e de maturação tardia como Valência e Natal (Rossetto *et al.*

2011), a colheita antecipada inibe a manifestação de sintomas e a queda prematura de frutos infectados que em períodos mais quentes e com menor nebulosidade reduzem a produção de frutos (Silva Junior *et al.* 2016).

Durante os levantamentos não foi observada a expressão de sintomas em plantas de lima ácida Tahiti [*C. latifolia* (Yu. Tanaka) Tanaka] próximas às plantas com MPC nas propriedades inspecionadas, considerada uma variedade de valor comercial resistente e desconsiderada como fonte de inóculo para novas infecções (Feichtenberger *et al.* 2005).

A temperatura mínima (20,9 °C) e média (27,5 °C) do município com menores valores da temperatura do ar no período mais chuvoso favorecem a infecção (Fig. 3), pois há liberação de ascósporos em temperaturas maiores que 18 °C (Fourie *et al.* 2013), podendo causar expressão dos sintomas devido ao longo período de disseminação (40 a 180 dias) e incubação do patógeno (40 a 300 dias) no período menos chuvoso com maior incidência da MPC (Tabela 1), influenciada por temperaturas do ar superiores a 20 °C e maior tempo de exposição dos frutos a radiação solar (Feichtenberger *et al.* 2005).

Para liberação dos ascósporos e infecção dos frutos, é necessário a presença de água (Mconie 1964) que em dias sem precipitação pluviométrica a liberação é menor (Lee e Huang 1973), devido outros elementos estarem envolvidos no ciclo do inóculo (Hidalgo *et al.* 1997). A umidade relativa do ar é a variável que mais influencia na formação de apressórios “in vitro” que causa a infecção (Magarey *et al.* 2015) devido à elevada liberação dos ascósporos durante 3 horas com umidade maior que 60 % (Fourie *et al.* 2013).

Não se observou correlações das demais variáveis com a incidência de MPC, porém mesmo com a diminuição da precipitação pluviométrica, a umidade relativa do ar (76 %) e a temperatura do ponto de orvalho (20,2 °C), o ambiente pode ter permitido a liberação dos ascósporos e infecção dos frutos no período menos chuvoso (Fig. 3). Tais condições minimizam o ressecamento das estruturas do fungo em elevadas temperaturas do ar e evidencia a adaptabilidade do patógeno as diversas condições climáticas pós-infecção como no ano de 2019 (Reis *et al.* 2006).

A radiação global, temperatura do ar e velocidade do vento apresentaram similaridade e contribuíram na ocorrência de plantas doentes e desenvolvimento das plantas com frutos em diferentes níveis de maturação (Fig. 6). A temperatura do ar, molhamento foliar, umidade do ar e radiação solar influenciam a expressão de sintomas de MPC, onde as condições ambientais podem ser mais importantes que a fase de maturação dos frutos, sendo necessário conhecer as condições do ambiente local para estabelecer estratégias eficientes de controle da praga (Ninin *et al.* 2012).

Segundo Reis *et al.* (2006), a maturação, liberação e dispersão dos ascósporos tem alta correlação e significância com a umidade do ar, precipitação pluviométrica e baixa correlação com a temperatura, observada em áreas com plantios das laranjas ‘Natal’ e ‘Valência’. Timossi *et al.* (2003) encontraram temperaturas ótimas de 22.5 a 27.5 °C para produção e maturação de 90 % dos pseudotécios em 19 dias com fotoperíodo 12/12 h e maior porcentagem de germinação dos ascósporos a 24 °C, que corroboram com a ocorrência do inóculo de forma qualitativa e quantitativa nas condições climáticas das propriedades rurais inspecionadas (Fig.3).

A ocorrência de ventos com velocidades máximas que podem chegar em média 5,23 m s<sup>-1</sup>, pode ter contribuído na disseminação da praga na propriedade dos focos 1 e 6 (Fig. 5). A turbulência do ar movimentava folhas de citros em decomposição que podem dispersar os ascósporos em áreas incidentes dentro e entre pomares na mesma propriedade (Silva Junior *et al.* 2016). No período menos chuvoso, ocorre a queda de folhas cítricas e geralmente no período mais chuvoso têm-se a decomposição de folhas no solo, aumento da produção e dispersão dos ascósporos que dependem de tecido cítrico morto para sobreviver (Aguilar-Vildoso *et al.* 2002).

Os esporos sexuais não sobrevivem em outro hospedeiro e livremente no solo, por isso, são oriundos de plantas infectadas próximas ao pomar, de mudas infectadas ainda que assintomáticas ou através de veículos e equipamentos contendo folhas infectadas (Feichtenberger *et al.* 2005; Vieira Júnior *et al.* 2012).

A rebrota ou áreas de replantio podem apresentar MPC, até mesmo áreas indenadas próximas de áreas com incidência e com plantio de mudas contaminadas. Desta forma, há introdução da doença em novas áreas podendo alcançar longas distâncias no raio de 25 a 35 m e apresentar sintomas após 2 anos e até 4 anos em plantas de citros infectadas ou até no pós-colheita (Silva Junior *et al.* 2016).

A metodologia de inspeção de plantas no campo adotada pelo serviço oficial de defesa fitossanitária (Brasil 2018b), mostrou-se adequada para a detecção da praga (Fig. 6). Isso ratifica a amostragem sistemática da inspeção realizada no campo nas linhas dos plantios e a importância dessa variável no patossistema indicada pela análise de componentes principais e o efeito pepita próximo de zero nos semivariogramas devido a pequena escala de amostragem.

O alcance da distribuição espacial da MPC variou de 25,5 a 103 metros, através de manchas de agregação com efeito gradual por valores de intensidade de disseminação da doença, onde é recomendado a realização dos levantamentos fitossanitários em espaçamentos inferiores ao alcance, pois ele indica a distância máxima de correlação entre os pontos amostrais e o limite da dependência espacial da doença na área de plantio (Gama e Farias 2021).

A MPC dispersa-se a distâncias até onde há hospedeiros suscetíveis na área, pelo elevado potencial dos dois mecanismos de disseminação e densidade da doença, cuja tendência de agregação é maior em plantios velhos (Spósito *et al.* 2007). A existência de plantas vizinhas doentes, produzem a probabilidade maior da infecção de uma planta sadia próxima, disseminada pelo patógeno a curtas e longas distâncias, na linha e entrelinha de plantio, em todas as direções pela isotropia que depende unicamente do vetor e não da direção como a MPC, que tende a se alastrar na área cultivada com hospedeiros suscetíveis (Silva Júnior *et al.* 2016).

A distância da disseminação da MPC é variável com o tempo, podendo ser menor em pomares velhos, devido ao maior tamanho das plantas que possibilita menor circulação do vento como também ao arranjo das plantas no campo (Spósito *et al.* 2007). A distância entre pares de 7,2, 4,3 e 5,5 metros em 2019, 2021 e 2022, respectivamente, onde são adotados geralmente os arranjos de 4x5, 5x5, 6x6, 6x7 e 7x7 m nos plantios de espécies cítricas no Pará, influencia no microclima e não inibiram as infecções com a entrada da MPC nas áreas inspecionadas.

O diagnóstico laboratorial ratificou a presença de conídios do fungo (*Phyllosticta citricarpa*) e ausência dos ascósporos nas amostras de frutos. A forma assexuada diagnosticada é responsável por autoinfecções em frutos, folhas, ramos com aumento da severidade da doença, favorecida pela água da chuva ou sistemas de irrigação não-localizada que corroboram com o comportamento de padrão agregado encontrado (Kotzé 1981; Spósito *et al.* 2007).

Os esporos assexuais são produzidos em picnídios, e somente nos frutos frescos que são envoltos por uma mucilagem clara e hidrossolúvel (cirro) que os protege do ressecamento, sendo disseminados de forma descendente na planta que em contato com água é dissolvida, e libera uma suspensão conidial que escorre pelo fruto com dispersão de 54 a 77 cm de distância do fruto doente (Spósito *et al.* 2011; Silva Junior *et al.* 2016).

Os picnidiósporos causam a infecção via estômato em frutos verdes com sintomas de falsa melanose pelo acúmulo de fenóis nas células-guarda e nas que circundam a câmara subestomática, onde não há formação de massa de micélio subcuticular, desenvolvendo-se no epicarpo e mesocarpo que provoca lise, hiperplasia celular e desarranjo do mesocarpo (Baldassari *et al.* 2007) em temperaturas de 4 a 37 °C e alta umidade do ar (Er *et al.* 2013). Observou-se no município máximas de temperatura e umidade do ar de 40,5 °C e 89,9 %, respectivamente.

A inferência espacial pelo método determinístico IQD que representa espacialmente áreas com baixa densidade de pontos por critérios puramente geométricos, onde as distâncias são euclidianas e não fornecem medidas de incerteza (Silva *et al.* 2019), mostrou-se mais contínua e identificou melhor as áreas de foco e a intensidade do nível populacional da praga

em cada ano analisado, do que a krigagem ordinária que apresentou menor desempenho estatístico (Tabela 2).

O mapeamento espaço-temporal auxiliou na identificação e controle por mostrar a evolução da praga no campo através de manchas agrupadas (Gama e Farias 2021) e poderá subsidiar a delimitação e a publicação de legislação complementar das áreas com ocorrência (Brasil 2008).

Os dois mecanismos de dispersão da doença ameaçam as propriedades vizinhas, onde a interdição das propriedades com focos da praga é realizada no estado do Pará, que proíbe o plantio de novas mudas do gênero *Citrus* e a saída de frutos cítricos e de qualquer material de propagação vegetativo da propriedade com a praga, assim como as propriedades confrontantes com risco de ocorrência da doença (Brasil 2008; Pará 2010; Brasil 2018b).

No estado do Pará, a medida fitossanitária para controle oficial, a fim de, prevenir o estabelecimento e disseminação da MPC e limitar o impacto socioeconômico na cadeia produtiva citrícola é a erradicação das plantas (Pará 2010). Na literatura é relatado como medida de controle e redução de incidência da MPC, a coleta de frutos e a remoção e queima de todas as folhas a cada 30 dias antes da formação de novos frutos, com resultados significativos em um pomar de laranjeira Valência com 8 anos de idade sem controle químico (Silva Junior *et al.* 2016). Ademais, o uso de quebra-vento com plantas não hospedeiras e a roçada ecológica como barreira física, também têm sido utilizadas por impedirem a dispersão dos ascósporos e reduzirem as infecções dos frutos (Feichtenberger *et al.* 2005).

De acordo com a classificação de Koppen (Fig. 10), o estado do Pará apresenta os tipos climáticos Af, Am e Aw com altitude de 61, 107 e 180 m, temperaturas médias anuais de 27,7, 27,5 e 27,3 °C, com máximas de 29,4, 29,4, 29,2 °C, mínimas de 24,1, 24, 25,2 °C e radiação média anual de 227, 215 e 161 W/m<sup>2</sup>, respectivamente (Alvares *et al.* 2013). A amplitude das condições climáticas do Pará é favorável aos ascósporos (15 e 35 °C) e picnidiósporos (10 e 35 °C) que pode permitir a ocorrência de infecção da MPC (Magarey *et al.* 2015).

O estado do Pará possui uma área territorial de 1.245.870,704 km<sup>2</sup> (IGBE 2022), o que dificulta a contenção de atividades clandestinas, onde a educação fitossanitária é indispensável para orientar produtores rurais e demais atores da cadeia produtiva sobre a compra de mudas de frutíferas com documentação fitossanitária obrigatória que comprova a rastreabilidade e sanidade da origem genética do material propagativo vegetal (Pará 2023). É preciso inibir a prática da venda ambulante de mudas em desacordo com os padrões estabelecidos, caracterizada pelo comércio fora de estabelecimento comercial nos municípios do Pará, além

de compartilhar as responsabilidades com a sociedade sobre os riscos e impactos da disseminação da praga no território paraense (Pará 2010).

Devido à disseminação da MPC estar associada ao transporte de folhas, materiais de propagação infectados como mudas e porta-enxertos de citros para áreas onde existam hospedeiros suscetíveis e condições ambientais favoráveis, frutos frescos com presença de conídios são comercializados no território brasileiro, inclusive para Unidades da Federação livres da doença, desde que isentos de folhas, ramos e com unidades produtivas cadastradas no sistema de mitigação de risco da MPC inspecionadas pelo controle oficial (Brasil 2008).

No intuito de evitar a introdução da praga em áreas citrícolas pela detecção em cargas que são rechaçadas, a exportação de frutos cítricos sintomáticos para países como os da União Europeia é proibida. Para exportação, se exige do país exportador a certificação fitossanitária de origem que declara a isenção da praga desde o cultivo, armazenamento (*packinghouse*), transporte e operadores envolvidos no manuseio dos frutos e que estejam registrados em programa oficial de controle (Silva Junior *et al.* 2016). No estado do Pará, a certificação e credenciamento de profissionais no controle oficial da praga é executado pela ADEPARÁ (Pará 2010).

Os estados do Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Pernambuco, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo apresentam ocorrência da praga (BRASIL 2018a). Considerando o risco de introdução da doença nos monocultivos do estado do Pará, procedente dessas Unidades da Federação, a identificação das principais rotas de risco de introdução da praga, situa-se como informação estratégica para auxílio da gestão fitossanitária, sendo proibida a entrada de material propagativo do gênero *Citrus* nos municípios dos polos citrícolas (Fig. 10), e condicionada a autorização pela ADEPARÁ, o ingresso desses materiais de estados sem a presença da praga (Pará 2023).

A melhor medida de controle da MPC é a prevenção para proteção da sanidade vegetal do polo citrícola do nordeste paraense (Irituia, Capitão Poço, Ourém, Garrafão do Norte e Nova Esperança do Piriá) que está localizado a 667 km dos focos, e do polo citrícola do oeste paraense (Monte Alegre, Alenquer, Santarém, Mojuí dos Campos, Belterra, Prainha), a 1.124 km (Fig. 10) (Pará 2017).

A disseminação da praga nos pomares paraenses, principalmente em plantios velhos poderá requerer de 4 a 5 pulverizações de fungicidas cúpricos em intervalos de 21 a 28 dias na dosagem de 50 a 90 g de Cu/100 L que causa sintomas severos de fitotoxicidade na casca (Feichtenberger *et al.* 2009) e deprecia os frutos frescos, a principal forma de comercialização

do produto do Pará (FAO 2021). Além da aplicação de estrobirulinas em intervalos de 30 a 45 dias na dose de 3,8 g de i.a./100 L ou calda bordalesa, iniciados com a queda de 2/3 das pétalas, observando o início das chuvas, variedades e desenvolvimento do fruto (Silva Junior *et al.* 2016).

A vigilância com a erradicação de plantas doentes pelo monitoramento espaço-temporal nos pomares através dos levantamentos fitossanitários, fiscalizações em viveiros e do trânsito de material vegetal apresentam aspectos preponderantes. Políticas públicas devem ser estimuladas na produção de mudas frutíferas em viveiros protegidos e certificados, e do planejamento da gestão fitossanitária no controle oficial que tem o dever legal de evitar a introdução, estabelecimento e disseminação de pragas dos vegetais na minimização de vulnerabilidades da ameaça da MPC para a citricultura amazônica, em especial a subsistência da agricultura familiar, visando proteger a sanidade e o desenvolvimento sustentável da cadeia produtiva citrícola do estado do Pará.

## **2.5 Conclusão**

Na escala de propriedade, a mancha-preta-dos-citros apresenta padrão agregado com dependência espacial explicada pelo modelo gaussiano com expansão da doença em plantios domésticos e comerciais.

A nível de município, a mancha-preta-dos-citros apresenta baixa prevalência em propriedades, padrão espacial aleatório em plantios velhos com baixo número de hospedeiros.

A sazonalidade provocou infecção nos hospedeiros suscetíveis com sintoma de mancha dura a mancha virulenta causada por confídios com maior prevalência e incidência no período menos chuvoso.

O inverso do quadrado da distância inferiu a ocorrência espaço-temporal da mancha-preta-dos-citros, que servirá como guia para pesquisas nessas condições para identificação de áreas com ocorrência de pragas.

A identificação de áreas geográficas com ocorrência de praga e rotas de comercialização de mudas frutíferas auxiliam ações estratégicas de controle oficial na minimização de vulnerabilidades da introdução de doenças fúngicas nas áreas produtoras de citros do Pará.

## **REFERÊNCIAS**

Aguilar-Vildoso CI, Ribeiro JGB, Feichtenberger E, Góes A de, Spósito MB (2002). *Manual Técnico de Procedimentos da Mancha Preta dos Citros*, pp: 72. Brasília DF. MAPA/DAS/DDIV

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Goncalves JL de M, Sparovek G (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22:711-728

Baldassari RB, Brandimarte I, Andrade AG de, Souza DCG de, Moretto C, Goes A de (2007). Indução da expressão precoce de sintomas de *Guignardia citricarpa* em frutos de laranja 'Pêra-Rio'. *Revista Brasileira de Fruticultura* 29:269-275

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 38, de 01 de outubro de 2018. [Estabelece a lista de Pragas Quarentenárias Presentes (PQP) para o Brasil]. *Diário Oficial da União*, seção 1, 02 out. 2018a. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/cefiti/leg/IN38-2018.pdf> (Acessado em 22 de dezembro de 2023).

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 21, de 25 de abril de 2018. [Institui os critérios e procedimentos para o estabelecimento e manutenção do status fitossanitário relativo à praga denominada Cancro Cítrico (*Xanthomonas citri subsp. citri*)]. *Diário Oficial da União*, seção 1, 11 mai. 2018b. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/cefiti/leg/IN21-2018.pdf> (Acessado em 05 de janeiro de 2024).

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 3, de 8 de janeiro de 2008. [Aprova os Critérios e Procedimentos para Aplicação das Medidas Integradas em um Enfoque de Sistemas para o Manejo de Risco - SMR da Praga Mancha Preta ou Pinta Preta dos Citros (MPC) *Guignardia citricarpa* Kiely (*Phyllosticta citricarpa*) Van der Aa em espécies do gênero *Citrus* destinadas à exportação e quando houver exigência do país importador]. *Diário Oficial da União*, seção 1, 06 jan. 2009. Disponível em: <https://www.defesa.agricultura.sp.gov.br/legislacoes/instrucao-normativa-3-de-08-01-2008,815.html> (Acessado em 11 de janeiro de 2024)

Byamukama E, Eggenberger SK, Coelho-Netto RA, Robertson AE, Nutter Jr, FW (2014). Geospatial and temporal analyses of Bean pod mottle virus epidemics in soybean at three spatial scales. *Phytopathology* 104:365-78

Curk F, Ollitrault F, Garcia-Lor A, Luro F, Navarro L, Ollitrault P (2016). Phylogenetic origin of limes and lemons revealed by cytoplasmic and nuclear markers. *Annals of Botany* 117:565-583

Dallastra A, Unêda-Trevisoli SH, Ferraudo AS, Mauro AOD (2014). Multivariate approach in the selection of superior soybean progeny which carry the RR gene. *Revista Ciência Agronômica* 45:588-597

Doorenbos J, Kassam AH (1994). *Efeito da água no rendimento das culturas*. pp: 306. Campina Grande: UFPB (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33)

Er HL, Roberts PD, Marois JJ, Van Bruggen, AHC (2013). Potential distribution of citrus black spot in the United States based on climatic conditions. *European Journal of Plant Pathology*, 137:635-647

FAO (2022). *Anuário Estatístico da FAO - Alimentação e Agricultura Mundial*. pp: 382. Roma, Itália. Disponível em: [http://www.cnpmf.embrapa.br/Base\\_de\\_Dados/index\\_pdf/dados/mundo/laranja/w1\\_laranja.pdf](http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/mundo/laranja/w1_laranja.pdf). (Acessado em 21 de junho de 2023).

Feichtenberger E, Bassanezi RB, Spósito MB, Belasque J (2005). Doenças dos citros (*Citrus* spp.). In: Kimati H, Amorim L, Rezende JAM, Bergamin Filho A, Camargo LEA. *Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas*, Vol. 2, pp: 239-269. Agronômica Ceres, São Paulo

Feichtenberger E, Santos JMF, Marin DR, Spósito MB (2009). Pulverizações em alto e baixo volume de calda fungicida no controle de mancha preta dos citros (*Guignardia citricarpa*). *Summa Phytopathologica* 35:148

Ferreira Filho DF, Pereira BRL, Crispim DL, Pessoa FCL, Fernandes LL (2020). Análise pluviométrica no estado do Pará: comparação entre dados obtidos de estações pluviométricas e do satélite GPCC. *Revista Brasileira de Climatologia* 26:541-560

Fourie P, Schutte T, Serfontein S, Swart F (2013). Modeling the effect of temperature and wetness on *Guignardia pseudothecium* maturation and ascospore release in citrus orchards. *Phytopathology* 103:281-292

Gama A, Farias P (2021). Geostatistical modeling of “lethal coconut palm crown atrophy”, a new disease in the State of Pará. *Semina: Ciências Agrárias* 42:3603-3616

Gasparotto L, Pereira JCR (2004). *Ocorrência e controle da pinta-preta (Guignardia citricarpa) dos citros no Estado do Amazonas*. Vol. 22, pp: 2, Embrapa Amazonas. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAA-2009-09/10242/1/Com-Tec-22.pdf>. (Acessado em 03 de maio de 2024).

Gomes Junior SC, Almeida RT de (2017). Análise multivariada aplicada aos estudos clínicos: notas práticas para profissionais de saúde. *Jornal Brasileiro de Ginecologia* 1:6-14

Hidalgo H, Sutton TB, Arauz F (1997). Epidemiology and control of citrus greasy spot on Valencia orange in the humid tropics of Costa Rica. *Plant Disease* 81:1015-1022

IBGE (2022). *Produção Agrícola Municipal 2022*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>. (Acessado em 04 de agosto de 2023)

INMET (2023). La Niña pode persistir até o verão de 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/la-ni%C3%B1a-pode-persistir-at%C3%A9-o-ver%C3%A3o-de-2023>. (Acessado em 03 de fevereiro de 2024)

Kotzé JM (1981). Epidemiology and control of citrus black spot in South África. *Plant Disease* 65:945-950

- Lee YS, Huang CS (1973). Effect of climatic factors on the development and discharge of ascospores of the citrus black spot fungus. *J. Taiwan Agric. Res* 22:135-144
- Magarey RD, Hong SC, Fourie PH, Christie DN, Miles AK, Schutte GC, Gottwald TR (2015). Prediction of *Phyllosticta citricarpa* using an hourly infection model and validation with prevalence data from South Africa and Australia. *Crop Protection* 75:104-114
- Mconie KC (1964). Orchard development and discharge of ascospores of *Guignardia citricarpa* and the onset of infection in relation to the control of citrus black spot. *Phytopathology* 54:1148-1453
- Monteiro LA, Sentelhas PC, Pedra GU (2018). Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. *International Journal of Climatology* 38:1571-1581
- Nanos N, Calama R, Montero G, Gil L (2004). Geostatistical prediction of height/diameter models. *Forest Ecology and Management* 195:221-235
- Ninin MVL, Spósito MB, Scaloppi ÉAG, Barbosa JC, Barreto M (2012). Desenvolvimento e validação de modelo de previsão para mancha preta dos citros em função de variáveis meteorológicas. *Summa Phytopathologica* 38:288-293
- Oliveira FJ de, Farias PRS, Noronha AC da S, Maldonado Junior W, Cardoso LAS (2023). Spatial distribution of citrus leprosis associated with its vector and abiotic factors in different cropping systems. *International Journal of Agriculture & Biology* 29:351-360
- Pará, Agência de Defesa Agropecuária do Pará. Decreto nº 1.943, de 21 de dezembro de 2017 (2017). [Cria os Polos Citrícolas do Estado do Pará e dispõe sobre a produção, a introdução e o comércio no Estado do Pará, de frutos, mudas, borbulhas ou qualquer outro material vegetativo do gênero *Citrus*, e dá outras providências correlatas]. *Diário oficial do Estado*, 22 dez. Disponível em: <https://sistemas.pa.gov.br/sisleis/legislacao/3770> (Acessado em 04 de janeiro de 2024)
- Pará, Agência de Defesa Agropecuária do Pará. Portaria ADEPARA nº 6.142, de 28 de dezembro de 2023 (2024). [Dispõe sobre a prevenção, o controle da disseminação das pragas dos citros no âmbito das áreas livres de cancro cítrico do estado do Pará e dá outras providências]. *Diário oficial do Estado*, 02 jan. Disponível em: <https://www.ioepa.com.br/portal/#3> (Acessado em 02 de janeiro de 2024)
- Pará, Agência de Defesa Agropecuária do Pará. Lei nº 7.392, de 07 de abril de 2010. [Dispõe sobre a Defesa Sanitária Vegetal no âmbito do Estado do Pará e dá outras providências]. *Diário oficial do Estado*, 09 abri. 2010. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=147900>. (Acessado em 22 de dezembro de 2023)
- Reis RF, Timmer LW, Goes A. Effect of temperature, leaf wetness, and rainfall on the production of *Guignardia citricarpa* ascospores and on black spot severity on sweet orange. *Fitopatologia Brasileira* 31:29-34

- Rolim G de S, Sentelhas PC, Barbieri V (1998). Planilhas no ambiente Excel™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 6:133-137
- Rossetto MP, Azevedo FA de, Martelli IB, Schinor EH (2011). Avaliação da mancha preta dos citros em diferentes variedades de laranja doce. *Bragantia* 70:58-63
- Seidel EJ, Oliveira MS (2014). New geostatistical index for measuring spatial dependence. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38:699-705
- Silva ASA da, Stosic B, Menezes RSC, Singh VP (2019). Comparison of interpolation methods for spatial distribution of monthly precipitation in the state of Pernambuco, Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering* 24: 04018068
- Silva Júnior GJ da, Feichtenberger E, Spósito MB, Amorim L, Bassanezi RB, Goes A de (2016). *Pinta preta: a doença e seu manejo*. pp: 208, Fundecitrus, Araraquara, SP. Disponível em: [https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/manual\\_detalhes/pinta-preta-dos-citros--a-doenca-e-seu-manejo/58](https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/manual_detalhes/pinta-preta-dos-citros--a-doenca-e-seu-manejo/58) (Acessado em 21 de junho de 2023)
- Spósito MB, Amorim L, Bassanezi RB, Yamamoto PT, Felipe MR, Czermainski ABC (2011). Relative importance of inoculum sources of *Guignardia citricarpa* on the citrus black spot epidemic in Brazil. *Crop Protection* 30:546-1.552
- Spósito MB, Amorim L, Ribeiro Junior PJ, Bassanezi RB, Krainski ET (2007). Spatial pattern of trees affected by black spot in citrus groves in Brazil. *Plant Disease* 91:36-40
- Testezlaf R, Coletti C, Matsura EE (2007). Distribuição de raízes da laranja 'Valência' irrigada por autopropelido. *Pesq. agropec. bras.* 42:905-908
- Timossi AJ, Goes A de, Kupper KC, Baldassari RB, Reis RF dos (2003). Influência da temperatura e da luminosidade no desenvolvimento de *Guignardia citricarpa*, agente causal da mancha preta dos frutos cítricos. *Fitopatologia Brasileira* 28:489-494
- Vieira Júnior JR, Fernandes C de F, Almeida UO de, Minosso SCC, Bezerra JVB, Silva DSG da, Ogrodowczyk L, Fernandes Neto A, Silva RB da; Moreno G (2012). *Levantamento da ocorrência da pinta-preta-dos-citros (Guignardia citricarpa) em Rondônia – primeira atualização*. Vol. 380, pp: 4, Embrapa Rondônia
- Vieira Junior JR, Fernandes CF, Antunes J, Silva DSG, Reis ND, Lima RF, Fernandes Neto A, Silva RB (2010). Levantamento da ocorrência da pinta preta dos citros em Rondônia. *Tropical Plant Pathology* 35:182
- Yamamoto JK, Landim PMB (2013). *Geostatistics: concepts and applications*. pp:213, São Paulo: Oficina de Textos

Capítulo submetido para publicação em 14/01/2025 na revista *Neotropical Entomology*

### 3 EFETIVIDADE DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS DE CONTROLE NO DECLÍNIO POPULACIONAL DA MOSCA-DA-CARAMBOLA NAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DA AMAZÔNIA ORIENTAL

#### RESUMO

A mosca-da-carambola (*Bactrocera carambolae* Drew & Hancock) é uma praga quarentenária que ameaça a produção e exportação da fruticultura brasileira. Em setembro de 2023, a praga foi registrada pela primeira vez no município de Oriximiná, estado do Pará. Foram utilizados métodos de controle pela Agência de Defesa Agropecuária do Pará, em articulação com Ministério da Agricultura e Pecuária, para erradicação da praga. O objetivo desse trabalho foi avaliar a eficácia de medidas fitossanitárias no declínio populacional da mosca-da-carambola nas condições climáticas do município de Oriximiná, Pará, Amazônia Oriental, Brasil. O monitoramento ocorreu de 12/09/2023 a 15/11/2023 em área urbana arborizada de 182 ha. No total, foram capturados 317 espécimes, sendo 274 machos e 43 fêmeas, com maior captura na armadilha do tipo Jackson (67,5 %) que na McPhail (32,5 %). A fase de frutificação foi observada em 93,1 % das fruteiras com armadilhas instaladas. A umidade relativa do ar, radiação solar e precipitação pluviométrica influenciaram a flutuação populacional da praga, associada à coleta de 1.059 kg de frutos. Obteve-se dissimilaridade entre o armadilhamento e a incidência da praga nas armadilhas, raio de movimentação de 3,3 km, baixa dependência espacial [Índice de Moran de 0.092 ( $p > 0.05$ )], baixa captura na maior área coberta pelo armadilhamento e maior abundância em áreas com intenso fluxo de embarcações no rio Amazonas que transitam no Pará. O índice mosca/armadilha/dia máximo de 0,54 evidencia o controle da praga, e a importância das ações do programa de erradicação na restrição territorial de *B. carambolae* na Amazônia Oriental e na sustentabilidade da cadeia produtiva de frutíferas nacional.

**Palavras-chave:** *Bactrocera carambolae*, Defesa fitossanitária, Mosca-das-frutas, Praga quarentenária, Fruticultura.

#### ABSTRACT

The carambola fruit fly (*Bactrocera carambolae* Drew & Hancock) is a quarantine pest that threatens Brazilian fruit production and export. In September 2023, the pest was recorded for the first time in the municipality of Oriximiná, in the state of Pará. Control methods were implemented by the Pará Agricultural Defense Agency, in coordination with the Ministry of Agriculture and Livestock, to eradicate the pest. The objective of this study was to evaluate the effectiveness of phytosanitary measures in reducing the population of the carambola fruit fly under the climatic conditions of Oriximiná, Pará, Eastern Amazon, Brazil. Monitoring took place from 09/12/2023 to 11/15/2023 in a 182-hectare urban green area. A total of 317 specimens were captured, including 274 males and 43 females, with a higher capture rate in Jackson traps (67.5%) compared to McPhail traps (32.5%). The fruiting phase was observed in 93.1% of the fruit trees where traps were installed. Relative humidity, solar radiation, and rainfall influenced the pest's population fluctuation, which was associated with the collection of 1,059 kg of fruit. A discrepancy was observed between trapping efforts and the incidence of the pest in traps, with a movement radius of 3.3 km, low spatial dependence [Moran's Index of 0.092 ( $p > 0.05$ )], low capture rates in the largest area covered by trapping, and higher abundance in areas with intense boat traffic along the Amazon River transiting through Pará.

The maximum fly/trap/day index of 0.54 highlights the effectiveness of pest control and the importance of the eradication program in restricting the territorial spread of *B. carambolae* in the Eastern Amazon, thereby contributing to the sustainability of Brazil's fruit production chain.

**Key words:** *Bactrocera carambolae*, Phytosanitary Measures, Fruit fly, Quarantine pest, Fruit growing.

### 3.1 Introdução

A mosca-da-carambola [*Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae)] é um dos principais riscos fitossanitários que ameaçam a fruticultura nacional (Soares et al. 2023). Seus danos são causados pelas larvas, que se alimentam da polpa, causando apodrecimento dos frutos hospedeiros (Silva et al. 2004), resultando em perdas de 90 a 100 % (Salmah et al. 2017), além de restringir a exportação de frutas de áreas produtoras, caso uma simples detecção seja realizada (Brasil 2017).

Nativa do Sudeste Asiático (Yong et al. 2019), é uma espécie invasora na América do Sul, introduzida pelo trânsito no comércio em pequena escala de frutas originárias da Indonésia (Silva et al. 2004; Marchioro 2016). No território brasileiro, é considerada uma praga quarentenária presente (Costa et al. 2023a).

*Bactrocera carambolae* foi detectada no Brasil em 1996, no município de Oiapoque, estado do Amapá (Morais et al. 2016), e em 2007, no distrito de Monte Dourado em Almeirim, estado do Pará (Brasil 2007). No Brasil, a praga é uma emergência fitossanitária com risco iminente de dispersão na Amazônia, entre os estados do Amapá, Amazonas, Pará e Roraima em pomares comerciais e domésticos (Brasil 2023).

Após a detecção inicial no Brasil, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), iniciou o Subprograma de *Bactrocera carambolae*, que estabelece diretrizes para as ações de monitoramento, controle e educação fitossanitária relacionados à praga, que a mantém sob controle oficial (Brasil 2017). Nos 144 municípios do estado do Pará, a Agência de Defesa Agropecuária do Pará (ADEPARÁ) e o MAPA executam os levantamentos de detecção, monitoramento e de contenção da praga com armadilhas do tipo Jackson e McPhail e outras medidas fitossanitárias de acordo com a Instrução Normativa nº 28, de 20 de julho de 2017 (Pará 2010).

Em 2023, a mosca-da-carambola foi registrada pela primeira vez na área urbana do município de Oriximiná, região do Baixo Amazonas, estado do Pará, norte do Brasil (Brasil 2023). No Pará, *B. carambolae* ocorre predominantemente em áreas urbanas arborizadas, que compreende toda cobertura vegetal de porte arbóreo, natural ou cultivada em áreas livres de uso

público e potencialmente coletivas, particulares e de acompanhamento do sistema viário (Rodrigues et al. 2002; Brasil 2021).

A mosca *B. carambolae* é polífaga na fase larval, e ataca, atualmente, 36 espécies vegetais hospedeiras no Brasil (Adaime et al. 2016; Belo et al. 2020; Costa et al. 2023a, 2023b; Costa et al. 2024a, 2024b; Lemos et al. 2024). A densidade populacional das moscas-das-frutas está diretamente relacionada com a disponibilidade de frutos hospedeiros (Silva et al. 2004) e deve ser monitorada por não apresentar padrão de distribuição pré-estabelecido e ser influenciada pelo ambiente (Duarte et al. 2015).

O armadilhamento é diagnóstico norteador do controle oficial no enfrentamento a essa praga. O sistema de detecção deve representar a área-alvo, em uma abordagem defensiva com uma estrutura composta por armadilhas com iscas alimentares, sexuais e demais medidas fitossanitárias de controle que reduzam custos, problemas ambientais e erradiquem o inseto-alvo com eficácia (Poltronieri 2008) no objetivo de restringir o seu movimento local e internacional (Cartaxo et al. 2020).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas e o estado do Pará apresenta ascensão na produção de fruteiras de importância econômica na Amazônia (FAO 2021). A dispersão da praga para polos frutícolas do Brasil é preocupante, pois afetaria a competitividade dos frutos no mercado externo com danos socioeconômicos e ambientais (Silva et al. 2004).

Estudos em condições de campo do efeito de medidas de controle com armadilhamento são indispensáveis para países com produção comercial de frutíferas que possuem ambientes favoráveis para *B. carambolae* (Danjuma et al. 2014), porém são escassos no Pará e nas condições ambientais da Amazônia (Brasil 2017).

Pesquisas com armadilhas promovem detecção, delimitação da área, conhecimento do nível populacional, identificação de vulnerabilidades quanto à entrada da praga e a decisão das medidas de controle a serem adotadas na minimização da possibilidade de dispersão da praga (Soares et al. 2023).

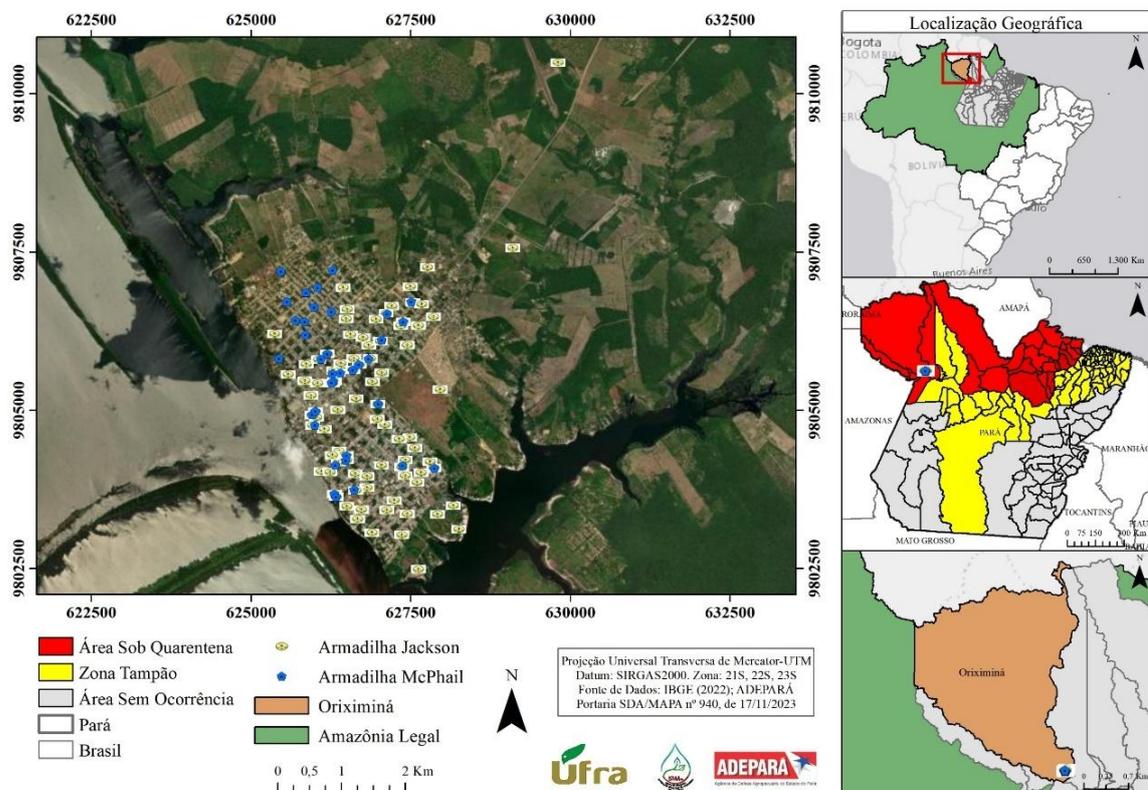
Nesse contexto, faz-se necessário mostrar a distribuição espaço-temporal da praga em áreas urbanas e compreender seu comportamento em condições de campo. Além disso, é preciso contribuir de forma efetiva nas ações de enfrentamento na restrição territorial de *B. carambolae* na Amazônia, mantendo o índice de mosca/armadilha/dia (MAD) baixo, evitando seu avanço para outros municípios (Brasil 2010; Duarte et al. 2015).

Assim, objetivou-se avaliar a eficácia de medidas fitossanitárias de controle no declínio populacional da mosca-da-carambola (*B. carambolae*) nas condições climáticas do município de Oriximiná, Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

## 3.2 Material e Métodos

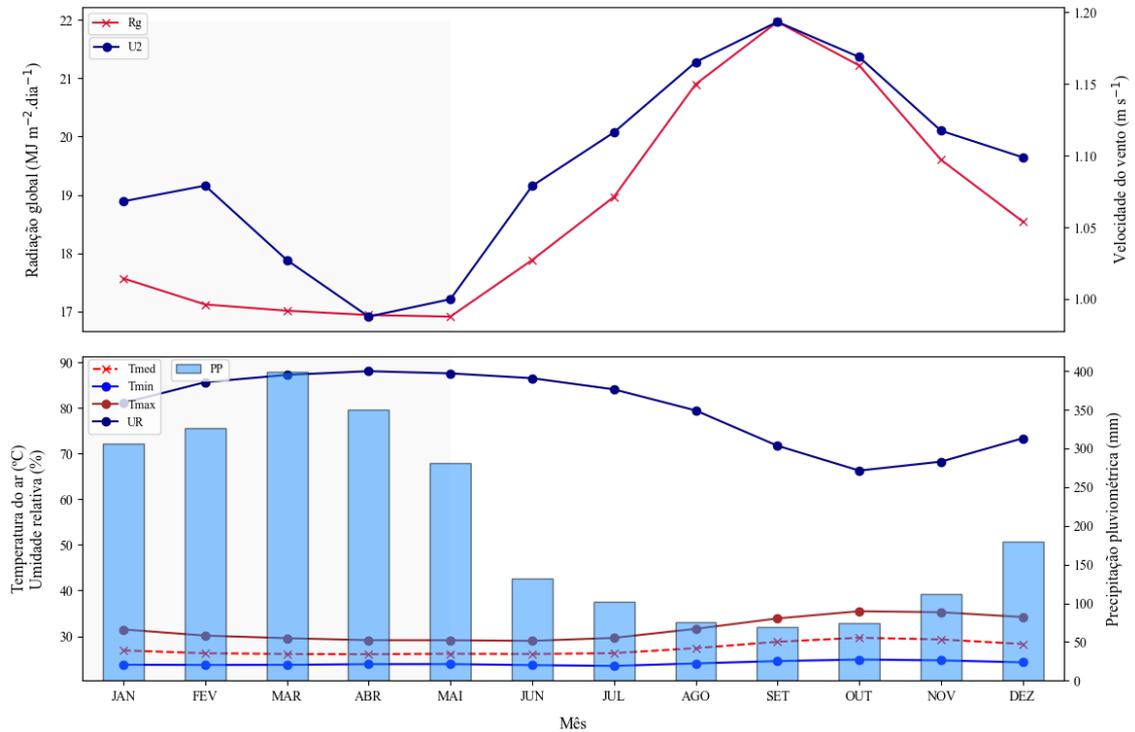
### 3.2.1 Caracterização da área de estudo

O município de Oriximiná, Pará, Brasil ( $-1^{\circ}46'33''$  S;  $-55^{\circ}51'52''$  W), apresenta área territorial de 107.613,8 km<sup>2</sup>, e está localizado na Amazônia Legal (Figura 1). Na área, predominam o latossolo e gleissolo, caracterizada com grandes extensões de vegetação nativa, floresta densa e pelo Rio Amazonas (IBGE 2022).



**Fig. 1** Mapa de localização da área de estudo indicando os locais de instalação das armadilhas Jackson e McPhail em Oriximiná, Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Oriximiná é do tipo “Af”, caracterizado como clima tropical com altitude de 231 m (Alvares et al. 2013). Apresenta médias anuais de radiação solar global incidente, velocidade do vento, precipitação pluviométrica, temperatura máxima, média e mínima do ar e umidade relativa do ar de 18,7 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, 1,1 m s<sup>-1</sup>, 2.407,2 mm, 31,5 °C, 27,3 °C, 24 °C, 80 %, respectivamente (Figura 2).



**Fig. 2** Climatologia com valores médios mensais de radiação solar global incidente (Rg), velocidade do vento (U2), precipitação pluviométrica (PP), temperatura média do ar (Tmed) e umidade relativa do ar (UR) do município de Oriximiná, Pará, Brasil (1981-2023).

O período mais chuvoso do município, compreendido de janeiro a maio, e o menos chuvoso, de junho a dezembro, foram determinados pelo método do balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (Rolim et al. 1998), corroborado por Souza et al. (2017), a partir das características do solo do município (Doorenbos e Kassam 1994; IBGE 2022) e da profundidade efetiva do sistema radicular da mangueira de 0 a 60 cm (Coelho et al. 2001).

### 3.2.2 Monitoramento de *Bactrocera carambolae*

O MAPA, por meio de sua Instrução Normativa nº 28, de 20 de julho de 2017 (Brasil 2017), estabeleceu os procedimentos operacionais para as ações de prevenção, contenção, supressão e erradicação da praga quarentenária presente *Bactrocera carambolae*.

Os levantamentos de detecção para a presença de *B. carambolae* são realizados quinzenalmente pela ADEPARÁ e MAPA, de acordo com as diretrizes do programa em todos os 144 municípios do estado do Pará.

O armadilhamento de cada município foi implantado de acordo com o risco do local de instalação, pelo potencial de introdução, estabelecimento e dispersão da praga, classificados em

área sob quarentena, zona tampão e área sem ocorrência (Brasil 2023) e pela extensão territorial da área urbana arborizada de cada município (Brasil 2017) (Figura 1).

Oriximiná antes do foco, integrava a área classificada como zona tampão, e após o foco passou para classificação de área sob quarentena (Figura 1). Foram instaladas na copa de frutíferas hospedeiras da praga 10 armadilhas do tipo Jackson antes do foco, distribuídas na área urbana entre 1,8 e 2 m do solo, no espaçamento entre armadilhas de 5 km (Froerer et al. 2010; Malavasi et al. 2013), organizadas por códigos específicos que identificam o local de instalação e tipo de armadilha (Figura 1A).

Em 12/09/2023, foi detectado o foco primário de *B. carambolae* em caramboleira no município de Oriximiná. O levantamento de monitoramento na área de estudo, que visa verificar as características e níveis da população da praga e a eficácia da aplicação de medidas de controle (Brasil 2017) que iniciou em 12/09/2023. Em 15/11/2023, obteve-se a última detecção de *B. carambolae* em uma mangueira na área monitorada.

Na ocorrência de *B. carambolae* no território paraense, o Programa Nacional de Erradicação da Mosca-da-Carambola (PNEMC), através da Gerência do Programa de Erradicação da Mosca-das-Frutas (GPEMF) da ADEPARÁ, que coordena e executa as ações de combate aos focos de *B. carambolae* no Pará, a fim de mantê-la restrita ao local detectado, foi acionada para executar o plano emergencial de contingência da praga.

Para a fase de monitoramento da praga, foi calculada a área urbana arborizada de 182 ha, considerando a soma do perímetro da área urbana do município com vegetação potencialmente hospedeira de *B. carambolae* (Brasil, 2024). O cálculo foi realizado por meio de levantamento in loco durante o monitoramento que assegurou verificação direta e acurada do tipo de vegetação presente, além da análise de imagens de satélite da área monitorada, com medições e avaliações visuais para quantificar a área ocupada por hospedeiros a partir de suas geolocalizações. O cálculo permitiu identificar as áreas mais vulneráveis e direcionar as ações de controle de forma mais eficiente.

As áreas para instalação das armadilhas seguiram densidade padrão de 0,4 armadilha Jackson/ha e 0,2 armadilha McPhail/ha (Brasil 2017). Foram instaladas 90 armadilhas do tipo Jackson (para captura de machos) e 36 armadilhas do tipo McPhail (para captura de machos e fêmeas), a fim de delimitar a área-alvo e otimizar as medidas fitossanitárias do combate.

A armadilha do tipo Jackson (Figura 3) consistiu em um delta plástico com base adesiva, pendurado nos galhos das plantas por um suporte e um clip de arame nº 18 que fixa algodão odontológico embebido na solução atrativa sexual à base de paraferomônio metil eugenol e inseticida malationa na proporção de 6:1, respectivamente (Brasil 2017). O paraferomônio atrai

e a malationa intoxica os machos que caem, grudam na base adesiva e morrem intoxicados, o que possibilita a detecção da praga.



**Fig. 3** Monitoramento de *B. carambolae* no município de Oriximiná, Pará, Brasil. A) remoção da armadilha tipo Jackson para inspeção; B) inspeção da armadilha; C) reposição da solução com atrativo sexual e malationa em algodão odontológico para machos na armadilha e D) registro da data de inspeção.

A armadilha do tipo McPhail é um recipiente em forma de “pera” com gancho no topo para pendurá-la na planta (Figura 4A). Apresenta parte superior transparente, base invaginada de cor amarelada que atrai visualmente a mosca, que simula a cor de um fruto maduro na copa da fruteira, contendo 500 ml de atrativo alimentar da levedura *Torula*® a 2,5 % (Figura 4B). A armadilha atrai o inseto pelo odor, que busca fontes de proteína para alimentação e oviposição, que ao tentar voar em direção à luz no topo da armadilha, cai na solução atrativa e morre por exaustão (Malavasi et al. 2013).



**Fig. 4** Monitoramento de *B. carambolae* no município de Oriximiná, Pará, Brasil. A) armadilha do tipo McPhail com atrativo alimentar líquido; B) inspeção da armadilha; C) triagem do material capturado; e D) reposição do atrativo para captura de machos e fêmeas.

As armadilhas foram georreferenciadas e distribuídas em partes sombreadas das plantas frutíferas, protegidas da circulação do vento com disponibilidade e maturação de frutos hospedeiros entre folhagens em locais de potenciais riscos de presença e entrada da praga.

As inspeções nas armadilhas para contagem de adultos foram realizadas de forma escalonada, de acordo com o estabelecido pelo plano de trabalho da ADEPARÁ e MAPA. Na primeira quinzena, a partir da detecção, as inspeções nas armadilhas foram realizadas diariamente. A cada quinze dias, diminuiu-se a frequência para 3, 2 até 1 inspeção por semana.

Foram observadas as características morfológicas de *B. carambolae* (Figura 5) que apresenta até 8 mm de comprimento na fase adulta, com a parte superior do tórax de cor negra, abdome amarelo com listras negras que formam a letra “T” (Malavasi et al. 2013). A asa não tem faixa transversal, o mesonoto tem duas faixas longitudinais amarelas e o escutelo é amarelo (Silva et al. 2004).



**Fig. 5** Amostras de seis espécimes de *B. carambolae* coletadas no município de Oriximiná, Pará, Brasil.

Dentre as medidas adotadas, está a pulverização de isca tóxica que consiste em atrair e matar o espécime por meio de uma solução composta por água, atrativo alimentar e algum inseticida (Godoy et al. 2011). Plantas hospedeiras foram tratadas com isca tóxica (1m<sup>2</sup> de copa), preparada com 9,5 litros de água, 500 ml de proteína hidrolisada e 25 ml do inseticida malationa. Na pulverização costal de hospedeiros de pequeno e médio porte, os bicos foram regulados pela metade, com abertura completa dos bicos nas plantas de grande porte.

Foi realizada a aplicação com pincelamento de inseticida biológico, disponibilizado pelo MAPA, de pronto uso cujo ingrediente ativo é a espinosade, uma mistura de espinosinas

A e D derivada da fermentação da bactéria *Saccharopolyspora spinosa*, na concentração de 0,24 g/L, no caule de hospedeiros potenciais, sem diluição, devido à baixa resistência do produto à chuva (Botton et al. 2014).

A técnica de aniquilamento de machos (TAM) também foi usada, com materiais e agrotóxicos fornecidos pelo MAPA, e consistiu no lançamento de iscas tóxicas em forma de blocos de fibra de coco embebidos em solução preparada na proporção de 6:1, com 30 litros de metil eugenol para 5 litros de malationa, na concentração de 1000 g/L do ingrediente ativo do produto comercial na copa dos hospedeiros. A ação é por contato, reduzindo a população de machos e a possibilidade de acasalamento (Silva et al. 2004). As iscas tóxicas em forma de blocos de fibra de coco, foram aplicadas duas vezes na semana pela particularidade de ocorrência da praga.

Foram recolhidos duas vezes na semana, frutos potencialmente infestados pela praga, de forma manual no solo, na copa dos hospedeiros por poda drástica, telhados de casas e onde fosse observado frutos na área. Os frutos recolhidos foram ensacados em sacos de plástico transparente de aproximadamente 30 kg, resistentes, devidamente amarrados. Em seguida, os sacos foram expostos ao sol por sete dias, e depois enterrados (Brasil 2017). A técnica de coleta e destruição de frutos consiste na mortalidade de larvas e ovos por asfixia sob alta temperatura (Godoy et al. 2011).

A eliminação de hospedeiros potenciais foi realizada, porém, é uma medida impopular que necessita do consentimento dos proprietários dos locais onde há detecção. Ainda, foi feita a amostragem semanal de frutos para investigação dos focos, além de ações contínuas de educação fitossanitária no município, focadas no trânsito, ruas, pontos de entrada do município, meios de comunicação, reuniões, palestras com banners e distribuição de material didático como panfletos e folders.

Os dados de data de detecção, número de adultos capturados e fase fenológica dos hospedeiros foram registrados em campo na planilha de monitoramento da GPEMF. Foram realizadas inspeção, triagem do material capturado, reposição do atrativo, anotação na base da armadilha do tipo Jackson e, eventualmente, troca de armadilha.

Adultos capturados nas armadilhas do tipo McPhail foram enxaguados com água numa peneira, triados em bandeja contendo água limpa para separação (Figura 4C) e acondicionados em frascos de vidro com álcool hidratado a 70 %, com posterior lavagem da armadilha, substituição do atrativo alimentar, sendo instalada novamente na planta (Figura 4D).

Após a coleta, os insetos adultos suspeitos capturados na armadilha do tipo McPhail foram contabilizados pelos técnicos de campo da ADEPARÁ e encaminhados à Superintendência de Agricultura e Pecuária do Pará (SFA/MAPA), em Belém.

Posteriormente, o material biológico foi enviado para identificação oficial no Laboratório Federal de Defesa Agropecuária de Goiânia, Goiás, por técnica molecular, e na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, em Macapá, Amapá, com base nos trabalhos de Drew e Hancock (1994) e Plant Health Australia (2018).

### 3.2.3 Análise dos dados

Os dados do monitoramento e as variáveis ambientais foram submetidos à análise de componentes principais para redução da dimensionalidade e ordenação dos dados, a fim de identificar similaridades, reconhecer padrões, importância e as máximas variâncias da distribuição geral dos dados conduzida na linguagem de programação Python (<https://www.python.org/>, versão 3.7.3), observando-se a adequação da análise pelo teste de Bartlett e índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) (Gomes Junior e Almeida 2017).

Utilizou-se o teste t de Student e a correção de Welch, observando-se os testes de Shapiro-Wilk e Levene para verificar significância diferença na relação entre as médias semanais, quinzenais e mensais de captura de adultos das armadilhas. Foi realizada análise de correlação de Pearson para obter a significância e a relação da flutuação populacional com as demais variáveis do sistema através do software R versão 4.2.2 (R Core Team 2022).

A densidade populacional de *B. carambole* foi calculada pelo índice de moscas capturadas diariamente nas armadilhas (MAD), por meio da equação  $MAD = N/A \times D$ , sendo N, o número de moscas capturadas; A, o número de armadilhas utilizadas; e D, o número de dias de exposição da armadilha no campo (Brasil 2010; Duarte et al. 2015).

Os dados climáticos de temperatura máxima, média e mínima do ar (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C), velocidade do vento ( $m s^{-1}$ ), radiação global ( $MJ m^{-2} dia^{-1}$ ), precipitação pluviométrica (mm) e umidade relativa do ar (%) foram utilizados para análise das condições meteorológicas obtidos da plataforma governamental *National Aeronautics and Space Administration/Prediction of World Wide Energy Resources* (NASA/POWER <http://power.larc.nasa.gov>) com resolução horizontal de 1° latitude-longitude do período de 1981 a 2023 (Monteiro et al. 2018), pois o município não apresenta estação meteorológica de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

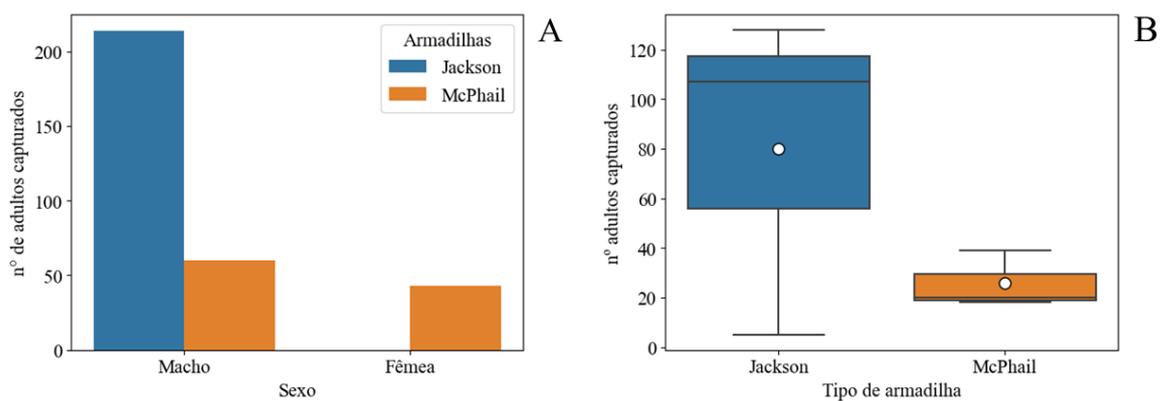
Para as análises com as variáveis climáticas, foram utilizados dados de 19/08/2023 a 12/09/2023 que compreende 25 dias anteriores às ocorrências da praga em Oriximiná. Esse período correspondeu ao tempo de duração média das fases de ovo a adulto da praga (Pasinato et al. 2019). Nesse intervalo, a temperatura média foi de  $31,1 \pm 3,9$  °C, com máxima de 35 °C, umidade relativa do ar de  $62,8 \pm 4,4$  %, houve 5,9 mm de precipitação pluviométrica e velocidade do vento de  $1,4 \pm 0,1$  m s<sup>-1</sup>.

O mapeamento para inferência espacial da ocorrência da praga foi estimado pelo método do inverso do quadrado da distância (IQD) (Silva et al. 2019) no software ArcGis 10.5. A dependência espacial das ocorrências foi analisada pelo Índice de Moran (IM) (Byamukama et al. 2014), por meio do complemento geoestatístico Smart-Map no software QGIS 3.28.12. Para elaboração da rosa dos ventos foi utilizado o software WRPLOT versão 8.0.2.

### 3.3 Resultados

O monitoramento do foco desde a primeira até a última captura teve duração de 64 dias, totalizando 136 inspeções com detecção, resultando na captura total de 317 espécimes de *B. carambolae* nas armadilhas instaladas na área urbana de Oriximiná.

A maior abundância de captura ocorreu nas armadilhas tipo Jackson (67,5 %) com 214 espécimes machos de *B. carambolae*. Nas armadilhas tipo McPhail (32,5 %) foram capturados 103 adultos, sendo 60 machos e 43 fêmeas (Figura 6A).

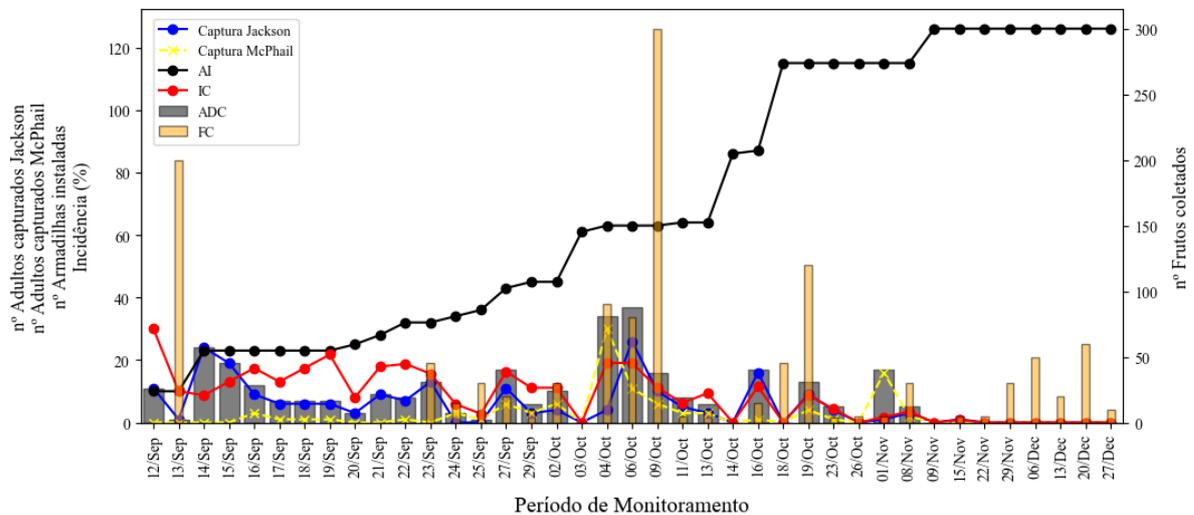


**Fig. 6** Monitoramento de *B. carambolae* no município de Oriximiná, Pará, Brasil de setembro a novembro de 2023. A) captura total de machos e fêmeas em armadilhas tipo Jackson e McPhail; e B) boxplot da captura mensal de adultos em armadilhas tipo Jackson e McPhail (B).

As armadilhas tipo Jackson registraram captura mensal variando entre 5 e 128 espécimes, com média de  $80 \pm 65,8$  (Figura 6B). Registraram, ainda, máximo de 23 moscas por dia, média de 2,4 e variação de 3,3.

As capturas mensais nas armadilhas tipo McPhail apresentaram máxima e média de 39,  $25,7 \pm 11,6$  espécimes, com a captura mínima de 18 adultos (Figura 6B). Elas capturaram máximo de 16 moscas por dia, com média de 2,1 variando em  $\pm 2,6$ .

As maiores incidências foram registradas nos meses de setembro e outubro, com 148 e 146 espécimes de *B. carambolae* capturados, respectivamente, havendo significativo decréscimo populacional em novembro (23 espécimes) (Figura 7).



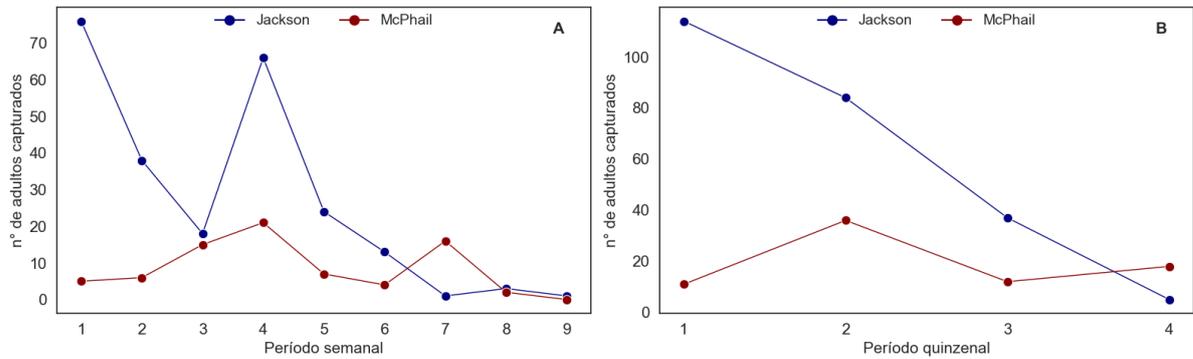
**Fig. 7** Flutuação populacional de *B. carambolae* sob o efeito de medidas de controle fitossanitárias para erradicação no município de Oriximiná, Pará, Brasil, de setembro a novembro de 2023. AI = armadilhas instaladas; IC = incidência nas armadilhas; ADC = adultos capturados; FC = frutos coletados e destruídos.

A incidência da praga nas armadilhas apresentou média de  $10,1 \pm 7,6$ , com valores de máxima e mínima de 30 e 0,8 % de espécimes, respectivamente, com picos populacionais mais significativos de incidências entre os dias 4 e 6 de outubro com expressiva variação diária durante o período de monitoramento (Figura 7).

O aumento da eliminação de frutos potencialmente hospedeiros, atingiu máximo de 300 kg/dia, totalizando 1.059 kg de frutos coletados ao longo de todo o período avaliado. A expansão do armadilhamento, conforme novas detecções eram registradas, e demais medidas fitossanitárias adotadas no combate a praga, resultaram na diminuição e na erradicação de *B. carambolae* em 15 de novembro de 2023, data da última detecção (Figura 7).

Observou-se declínio semanal (Figura 8A) e quinzenal (Figura 8B) da captura de machos aptos a copular nas armadilhas tipo Jackson. Obteve-se, oscilação de crescimento na

captura de 9 machos e 9 fêmeas nas armadilhas tipo McPhail na última quinzena avaliada, quando a captura nas armadilhas tipo Jackson declinava pela quantidade elevada aplicada na área monitorada de paraferomônio metil eugenol, inseticida malationa, assim como as demais medidas fitossanitárias empregadas.

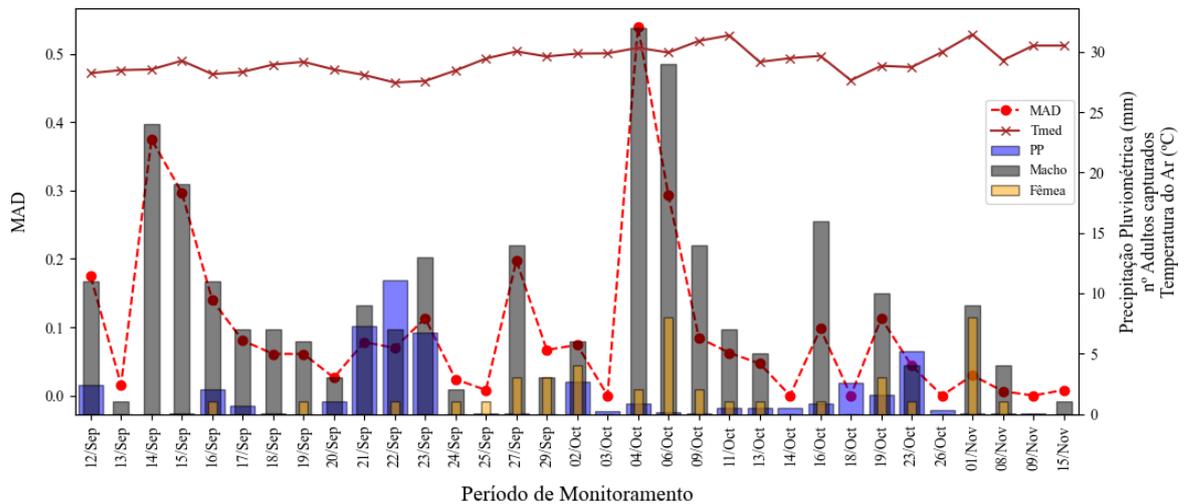


**Fig. 8** Análise da captura de adultos de *B. carambolae* em armadilhas tipo Jackson e McPhail no município de Oriximiná, Pará, Brasil, de setembro a novembro de 2023. A) captura semanal e B) captura quinzenal acumulada.

As armadilhas tipo McPhail registraram 18 adultos de *B. carambolae* na 7<sup>a</sup> semana de monitoramento, sendo maior que a captura registrada nas armadilhas tipo Jackson (5 adultos) (Figura 8A). Porém, obteve-se o registro da última detecção do monitoramento na armadilha tipo Jackson de um macho na mangueira em fase de frutificação na 9<sup>a</sup> semana (Figura 8A).

O teste t indicou que não houve diferença entre as médias do acumulado de captura semanal ( $t = 1,89$ ,  $p = 0,091$ ), quinzenal ( $t = 1,63$ ;  $p = 0,191$ ) e mensal ( $t = 1,41$ ;  $p = 0,287$ ) dos adultos, utilizando atrativos alimentares e sexuais entre as armadilhas testadas. Não houve diferença significativa na captura de machos entre as armadilhas ( $t = 1,80$ ,  $p = 0,21$ ) durante os meses de monitoramento de *B. carambolae*. Não foi possível comparar as médias de captura diária, devido à alternância do registro entre ausência e presença da captura diária entre as armadilhas.

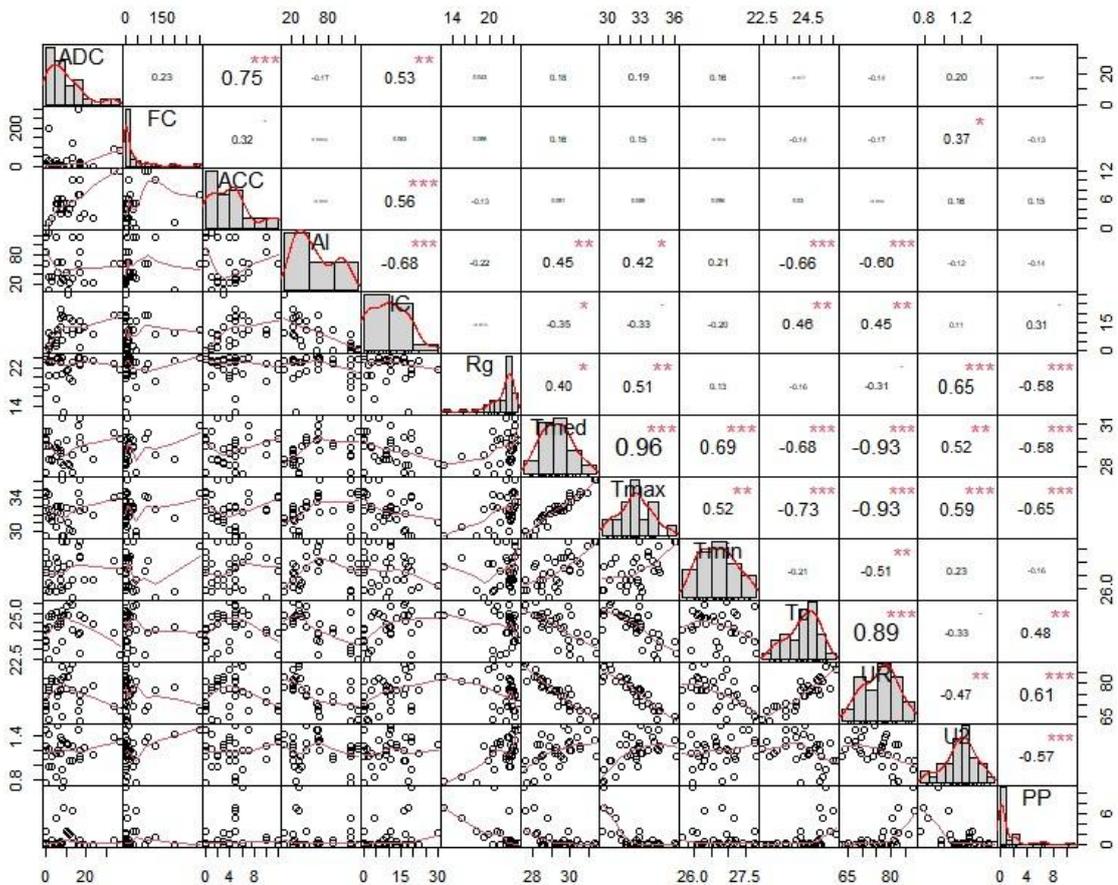
O índice MAD apresentou baixos valores, com máximo de 0,54 mosca/armadilha/dia. Manteve-se um nível de equilíbrio populacional de  $0,1 \pm 0,12$  mosca/armadilha/dia até zero MAD com ações de combate, que indicou a erradicação da praga na área (Figura 9).



**Fig. 9** Variação do índice MAD (mosca/armadilha/dia), temperatura média do ar (Tmed), precipitação pluviométrica (PP) e flutuação temporal diária de *B. carambolae* nas armadilhas tipo Jackson e McPhail no município de Oriximiná, Pará, Brasil, de setembro a novembro de 2023.

Em relação à captura em ambos os tipos de armadilhas, observou-se ainda valores de máxima de machos por dia de 32, com uma média de  $8,3 \pm 8,29$  adultos, e de fêmeas por dia, com uma captura máxima e média de 8 e  $1,3 \pm 2,04$ , respectivamente, onde ambos apresentaram o mínimo de 1 captura durante todo o período analisado (Figura 9).

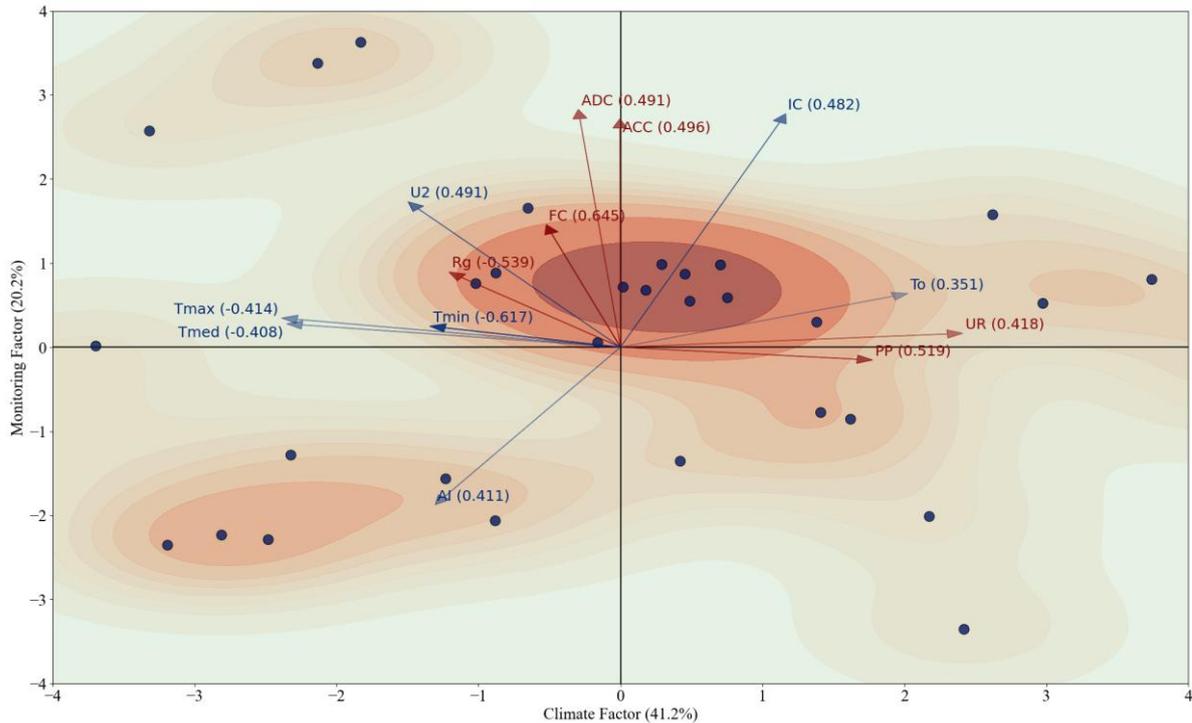
Não foi observada forte correlação entre a incidência nas armadilhas e as variáveis climáticas durante o período menos chuvoso (Figura 10). No entanto, constatou-se significativa associação da incidência de *B. carambolae* nas armadilhas instaladas nas fruteiras com os elementos climáticos temperatura média do ar ( $29,3 \pm 1$  °C), temperatura do ponto de orvalho ( $24,2 \pm 0,8$  °C) e umidade relativa do ar ( $75,8 \pm 6,8$  %), onde observou-se o aumento da temperatura e a redução da umidade relativa do ar no município durante o monitoramento.



**Fig. 10** Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis climáticas e do monitoramento de *B. carambolae* em Oriximiná, Pará, Brasil, de setembro a novembro de 2023. ADC = adultos capturados; FC = frutos coletados e destruídos; ACC = armadilha com captura; AI = armadilhas instaladas; IC = incidência nas armadilhas; Rg = radiação global; Tmed = temperatura média; Tmax = temperatura máxima; Tmin = temperatura mínima; To = temperatura do ponto de orvalho; UR = umidade relativa do ar; U2 = velocidade do vento; PP = precipitação pluviométrica. '.' não significativo; '\*' significativo a 5 % de probabilidade; '\*\*' significativo a 1 % de probabilidade; '\*\*\*' significativo a 0.1 % de probabilidade.

Observa-se no período menos chuvoso do município que a velocidade do vento é maior ( $1,2 \pm 0,2 \text{ m s}^{-1}$ ) em comparação com o período mais chuvoso (Figura 2), sendo esta a variável climática que apresentou melhor correlação com a captura de adultos. Obteve-se ainda, correlação significativa entre as variáveis do armadilhamento (adultos capturados e armadilha com captura) com a incidência nas armadilhas monitoradas (Figura 10).

Os componentes principais CP1 (fator climático) e CP2 (fator monitoramento) explicaram conjuntamente 61,4 % da variância observada no sistema. O fator climático afetou as variáveis em 41,2 % e revelou agrupamento da temperatura do ponto de orvalho, umidade relativa, precipitação pluviométrica na incidência da praga nas armadilhas (Figura 11).



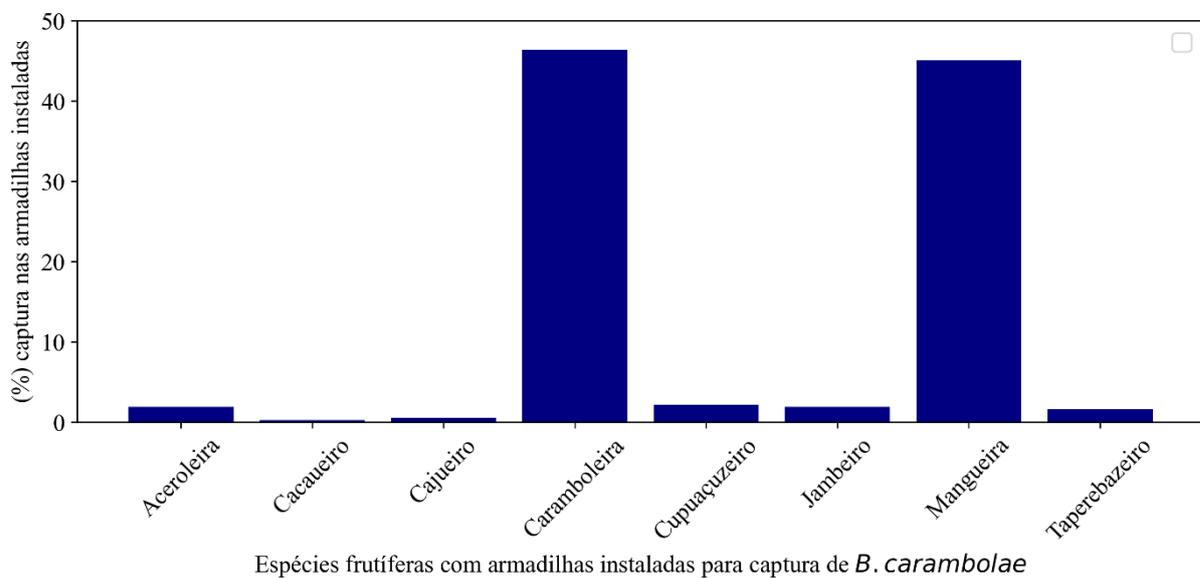
**Fig. 11** Biplot componente principal 1 (fator climático) x componente principal 2 (fator monitoramento), a partir da correlação entre variáveis originais e componentes principais (baseada em matriz de covariância) no monitoramento de *B. carambolae* em Oriximiná, Pará, Brasil. Tmax = temperatura máxima; Tmed = temperatura média; Tmin = temperatura mínima; To = temperatura do ponto de orvalho; U2 = velocidade do vento; Rg = radiação solar global incidente; PP = precipitação pluviométrica; UR = umidade relativa do ar; IC = incidência nas armadilhas; FC = frutos coletados e destruídos; ACC = armadilha com captura; AI = armadilhas instaladas; ADC = adultos capturados. Vetores maiores e de cor vermelha apresentaram impacto significativo no conjunto das variáveis.

As variáveis relacionadas às armadilhas com captura de *B. carambolae* e frutos coletados e destruídos apresentaram similaridade com as demais variáveis ambientais, exceto com armadilhas instaladas, que demonstraram dissimilaridade e correlação significativa em relação à incidência, corroborando que o armadilhamento foi eficaz para capturar e direcionar o monitoramento nas ações de combate de *B. carambolae* no município (Figura 11).

A baixa umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica e a elevada radiação global (Figura 2), apresentaram maior contribuição no conjunto de dados do monitoramento e captura de *B. carambolae* (Figura 11).

A variável coleta e destruição de frutos também apresentou importância no conjunto de dados e correlação com armadilhas com captura (Figura 10). Obteve-se que, 93,1 % das plantas inspecionadas com captura de adultos, apresentaram fase fenológica em frutificação e apenas 6,9 % estavam em fase vegetativa como a aceroleira, taperebazeiro, jambeiro, cupuaçuzeiro e cacauero.

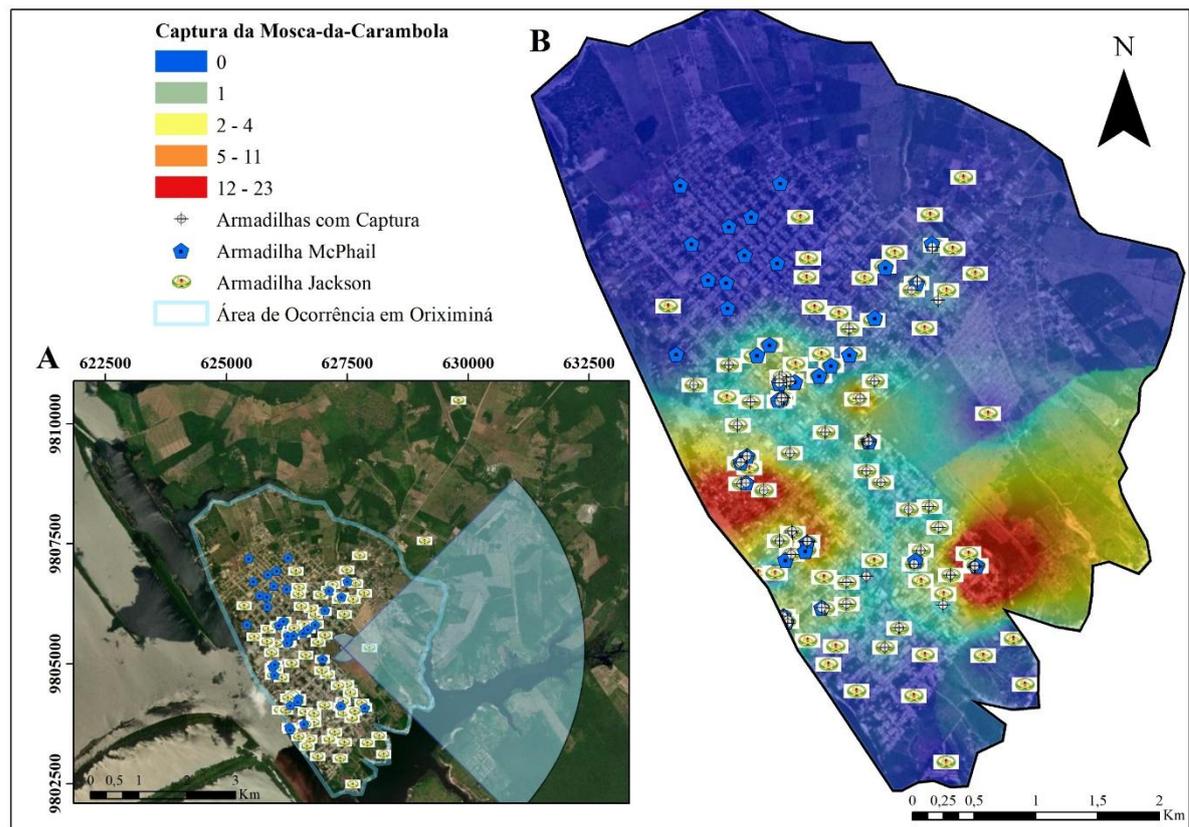
As armadilhas instaladas nas espécies frutíferas que apresentaram capturas de *B. carambolae* foram a caramboleira (*Averrhoa carambola* L.) (46,4 %), mangueira (*Mangifera indica* L.) (45,1 %), cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum* (Wild. ex Spreng.) K.Schum) (2,2 %), aceroleira (*Malpighia emarginata* DC.) e jameiro (*Syzygium malaccense* (L.) Merr. & LMPerry) (1,9 %), taperebazeiro (*Spondias mombin* L.) (1,6 %), cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) (0,6 %) e cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) (0,3 %) (Figura 12). Todas as espécies vegetais com captura, já foram reportadas como hospedeiros oficiais da praga no Brasil (Adaime et al. 2023), exceto o cacauzeiro e o cupuaçuzeiro.



**Fig. 12** Fruteiras com armadilhas instaladas que apresentaram captura de *B. carambolae* durante levantamento de monitoramento no município de Oriximiná, Pará, Brasil, de setembro a novembro de 2023.

A maior captura de moscas de *B. carambolae* nas armadilhas instaladas na área urbana arborizada, em caramboleiras e mangueiras, deveu-se à escolha de locais estratégicos e vulneráveis, à disponibilidade de frutos e à alta densidade populacional da praga, influenciada pelo clima quente e úmido da Amazônia.

A direção predominante do vento no município é de leste para oeste na maior parte do tempo, representando 85 % do total (Figura 13A). A presença de plantas em frutificação como possíveis abrigos, juntamente com as condições ambientais, contribuíram para a aleatoriedade e baixa dependência espacial da praga [IM: 0,092 ( $p > 0,05$ )], que contribuiu para a dispersão do inseto na área monitorada estimada em 3,3 km.



**Fig. 13** Monitoramento de *B. carambolae* com armadilhas tipo Jackson e McPhail no município de Oriximiná, Pará, Brasil, de setembro a novembro de 2023. A) direção do vento na dispersão e B) inferência espacial da captura diária.

Detectou-se alta densidade populacional de *B. carambolae* em regiões próximas aos pontos de entrada do município, especialmente às margens do Rio Amazonas e do Rio Trombetas. A localização das maiores densidades da praga se concentrou em áreas próximas a pontos de intensa movimentação de pessoas, produtos, equipamentos e meios de transporte nas armadilhas instaladas em caramboleiras e mangueiras (Figura 13B).

### 3.4 Discussão

Embora entenda-se a fundamental importância do conhecimento sobre *B. carambolae* para a fruticultura nacional, pesquisas sobre sua dinâmica espaço-temporal, interação com condições ambientais e hospedeiros sob o efeito de medidas fitossanitárias de controle são ausentes na literatura. No estado do Pará, cujo território apresenta risco iminente de dispersão da praga, é necessária a divulgação de informações em condições de campo, para o avanço do controle da praga nas condições climáticas da Amazônia oriental pela vigilância ativa e passiva (Brasil 2023).

As condições ambientais do município foram favoráveis para o ciclo de vida da praga (Figura 2) (Jesus-Barros et al. 2017) e provocaram a abundância observada dos adultos com temperatura máxima de 35 °C em Oriximiná. Além disso, houve elevada disponibilidade de frutos hospedeiros na área monitorada, com diversidade de fruteiras com produção na Amazônia, em maioria na fase fenológica de frutificação e sem tratos culturais.

A disponibilidade de frutos está diretamente relacionada à densidade populacional das moscas-das-frutas (Silva et al. 2004). Picos de *B. carambolae* foram registrados na estação seca, em Roraima, que podem ter relação com o período de frutificação da mangueira e do cajueiro, que são algumas das poucas espécies que frutificam no período seco (Soares et al. 2023).

A variável coleta e destruição de frutos indica a disponibilidade de fruto hospedeiro potencial no ambiente, assim como a busca do inseto por alimento para acasalamento e oviposição, que favorece a detecção da praga pelo armadilhamento.

No período de setembro a novembro, registrou-se precipitação pluviométrica de 47,45 mm, onde valores mais elevados de precipitação ocorreram antes dos picos populacionais de *B. carambolae*, com temperatura média do ar de 29,3 °C e umidade relativa média do ar de 75,8 % (Figura 9). A duração média dos períodos de pupa-adulto e ovo-adulto de *B. carambolae* é de 10 e 25 dias, respectivamente (Pasinato et al. 2019).

Elevadas temperaturas do ar em torno de 35 °C aceleram o desenvolvimento e sobrevivência dos estádios imaturos de *B. carambolae* (Danjuma et al. 2014) e, quando mantidas em clima quente e úmido com temperatura de 26 °C, umidade relativa de 60±10 % e fotoperíodo de 12 horas, a praga apresenta alta fecundidade (1.088,26±167,82) e longevidade, como parte de sua estratégia reprodutiva (Jesus-Barros et al. 2017).

A frequência de captura de moscas-das-frutas tende a ser maior na temperatura de 27 °C e umidade relativa entre 64 a 78 %, pela redução da precipitação pluviométrica (Azevedo et al. 2012). Essas condições são observadas em Oriximiná e podem ter afetado também a dinâmica populacional de *B. carambolae*. A flutuação populacional das moscas-das-frutas foi observada por Duarte et al. (2015), principalmente em meses mais quentes do ano e com ocorrência de precipitação pluviométrica que corroboram as evidências desta pesquisa. Segundo Marchioro (2016), *B. carambolae* tem origem e ocorre em regiões de climas quentes e úmidos (Af e Am) ou em áreas extremamente quentes e áridas (Aw).

De acordo com Ronchi-Teles e Silva (2005), a flutuação temporal das moscas-das-frutas em áreas tropicais está relacionada principalmente à disponibilidade de plantas hospedeiras e não com as variáveis ambientais. O aumento da precipitação pluviométrica promove o florescimento e frutificação das plantas, o que favorece o aumento da população de moscas-

das-frutas. A temperatura, por sua vez, acelera o ciclo das moscas-das-frutas (Danjuma et al. 2014).

A diminuição da umidade do solo no período menos chuvoso pode ter favorecido o aumento no número de insetos capturados (Thomas 2003), como também pode provocar grande mortalidade de pupas e de insetos recém-emergidos, que possuem dificuldade de atravessar solos secos (Baker et al. 1944). Amaral et al. (2021) encontraram aumento na emergência de *B. carambolae* em solo franco-argiloso e arenoso com maior umidade no estado do Amapá.

A baixa precipitação pluviométrica apresentou influência na incidência e captura de *B. carambolae* (Figura 10), uma vez que as larvas presentes nos frutos passam por três instares que, ao cair no solo, penetram-no, onde se transformam em pupas e permanecem até a emergência do adulto (Malavasi et al. 2013).

Baixas correlações entre a flutuação populacional da mosca-das-frutas e as variáveis climáticas durante o período menos chuvoso, foram também observadas por Duarte et al. (2015), com correlação significativa apenas com o elemento meteorológico temperatura mínima.

A abundância de fêmeas de *B. carambolae* registrada foi menor do que a de machos na armadilha tipo McPhail, devido à maior quantidade e às diferentes formas de aplicação do paraferomônio metil eugenol na área monitorada, o qual atrai exclusivamente os machos para as armadilhas instaladas, que busca também por alimento. Porém, cuidados maiores são necessários nas áreas monitoradas com ocorrência de fêmeas, uma vez que, a fêmea causa danos diretos nos frutos e aumenta a densidade populacional da praga. Após a oviposição, eclodem as larvas, que se alimentam da polpa dos frutos e aumentam o nível populacional. Além disso, a praga é longeva, podendo sobreviver por até cinco meses (Jesus-Barros et al. 2017).

Apesar de o cupuaçuzeiro e o cacaueiro não serem frutíferas hospedeiras oficiais da praga de acordo com a relação de espécies hospedeiras da praga estabelecida pela Portaria SDA/MAPA nº 1.007, de 2 de fevereiro de 2024 (Brasil 2024), a captura de *B. carambolae* nas armadilhas instaladas nessas fruteiras que estavam em estágio vegetativo, pode ser atribuída não apenas à abundância da praga, mas também ao microclima presente na copa das plantas, resultado do sombreamento proporcionado pela arquitetura das folhagens (Igawa et al. 2022), que serviu de abrigo a praga ou rota para chegar a outras fruteiras.

A instalação das armadilhas no cupuaçuzeiro e cacaueiro foi realizada pela ausência de hospedeiros e dificuldades no acesso a residências em regiões do município que apresentavam pontos de entrada com potenciais riscos de ocorrência de *B. carambolae*. Essas observações foram realizadas durante o levantamento da área para instalação do sistema de detecção, que se

confirmou com o registro da captura da praga em armadilhas instaladas nas fruteiras não oficiais, por vezes próximas de hospedeiros oficiais em fase fenológica de frutificação.

A isca tóxica de ingestão à base de espinosade aplicada no caule das fruteiras, atraiu os adultos (machos e fêmeas), que consumiram a isca e morreram pelo efeito do inseticida. Corroborando com os resultados de redução de 100 % da infestação das moscas-das-frutas no uso de armadilhas McPhail com espinosade, obtidos por Menezes et al. (2015).

A poda drástica na eliminação de frutos hospedeiros e a eliminação de plantas frutíferas hospedeiras na área monitorada, quando possível, por ser considerada uma medida impopular (Brasil 2017), também contribuíram para a erradicação desta praga polífaga (Adaime et al. 2016).

Além disso, a intensificação da prática eficiente de coleta e destruição de frutos hospedeiros potenciais, caídos no solo, em telhados de casas, também exerceram influência no ciclo de vida de *B. carambolae*. A medida interrompeu o ciclo biológico e eliminou a fonte de reprodução do inseto, ovos e larvas antes da pupação no solo, preventivamente, que contribuiu na redução da população de espécies de moscas-das-frutas e diminuição da incidência nas armadilhas da área-alvo (Figura 7) (Silva et al. 2004; Godoy et al. 2011). Ainda, se faz necessário estudar a preferência de *B. carambolae* por certas espécies vegetais ao longo do ano para direcionar as ações de controle da praga.

A quantidade elevada de machos capturados, especialmente pronunciada entre os adultos sexualmente maduros, deveu-se ao efetivo combate com adoção de medidas de controle, como a aplicação de iscas tóxicas associada a proteína hidrolisada, feromônio sintético metil eugenol e malationa, organofosforado biodegradável que afeta nervos e músculos do inseto (Braga e Valle 2007). A aplicação foi realizada criteriosamente e direcionada para a copa das plantas, de forma a evitar contaminação ambiental e intoxicação humana em condições de elevada precipitação pluviométrica.

A TAM é uma técnica de elevado custo, que pode atrair moscas-das-frutas no raio de 90 a 300 metros, dependendo da velocidade e direção do vento (Iwahashi et al. 1996; Malavasi et al. 2013). A técnica deve ser realizada em intervalos regulares, de forma ininterrupta, e em área ampla, de forma a atingir diferentes gerações de moscas presentes no ambiente, que quando associada a aplicação de isca tóxica, proporciona queda significativa da densidade populacional da praga (Godoy et al. 2011).

Os blocos devem ser distribuídos no espaço e no tempo, de forma que a maioria dos machos sejam expostos ao atrativo e ao inseticida (Midgarden et al. 2016). A desuniformidade no lançamento dos blocos pode tornar a técnica ineficaz na redução populacional da praga.

Foi obtida a razão sexual de 0,42, sendo 1,4 macho para 1 fêmea no período estudado de exposição das armadilhas tipo McPhail no campo. Machos das moscas-das-frutas liberam feromônios sexuais que desencadeiam respostas comportamentais nas fêmeas, atraindo-as para o processo de corte e acasalamento no início da noite, pouco antes do pôr do sol (Malavasi et al. 2013).

O sistema de comunicação entre a praga que estimula seu comportamento como padrões de chamamento, corte e acasalamento pelos atrativos empregados nas armadilhas, auxiliam na aferição da eficácia da captura de adultos nas armadilhas no campo (Vilela e Lucia 2001).

A redução drástica do número de machos, pode ter contribuído para a captura das fêmeas nas armadilhas tipo McPhail, na última quinzena do monitoramento. Esses resultados também podem ser atribuídos ao atrativo alimentar, que demonstrou menor seletividade quando comparado ao atrativo sexual na captura de insetos machos.

Valores menores de captura de moscas-das-frutas nas armadilhas tipo McPhail foram também observadas por Azevedo et al. (2012). Raga e Vieira (2015) constataram que armadilhas com atrativo alimentar como a McPhail, devido também a sua forma esférica associada a cor amarela, capturam mais fêmeas jovens que emergiram dos pupários e precisam de alimento para desenvolver seus ovários com um raio de ação da McPhail entre 1 a 20 metros (Nascimento et al. 2000; Malavasi et al. 2013).

Embora a armadilha tipo McPhail seja amplamente reconhecida como a armadilha padrão e mais comumente empregada em escala comercial para a coleta de adultos de moscas-das-frutas, a armadilha tipo Jackson é a mais utilizada pela ADEPARÁ nos levantamentos fitossanitários, devido ao fato de ser considerada armadilha padrão para a captura de machos, devido ao seu menor custo e sua maior praticidade para a GPEMF. No entanto, a ADEPARÁ utiliza ambas as armadilhas nos levantamentos de monitoramento, que demonstraram eficiência semelhante na detecção de *B. carambolae*.

Destaca-se a importância do contínuo monitoramento pelos atrativos alimentares e sexuais nas armadilhas para a mudança do status da área para foco erradicado. Essa transição ocorre quando, após a última detecção da praga e a implementação de medidas fitossanitárias de controle, não haja ocorrência adicional da mesma por três ciclos de vida da praga, totalizando 378 dias ou 54 semanas sem ocorrência registrada pelo levantamento fitossanitário (Brasil 2017).

A implementação de todas as medidas fitossanitárias delineadas no protocolo do PNEMC (Brasil 2017) para controle de *B. carambolae*, como monitoramento contínuo, coleta e destruição de frutos potenciais, iscas tóxicas contendo atrativos alimentares e sexuais foram

adotadas imediatamente após a detecção inicial e antes do nível de controle com MAD de 0,3 (Azevedo et al. 2005), que contribuíram efetivamente para os baixos valores do índice MAD (Figura 9).

A biodiversidade de fruteiras em diferentes regiões geográficas resulta em uma variação espacial na utilização de frutos pelas moscas-das-frutas (Selivon 2000), que por atingirem a maturidade sexual entre 8 a 12 dias de idade e necessitarem de proteína para alimentação, acasalamento e oviposição, podem voar por longas distâncias na ausência de hospedeiros (Silva et al. 2004). A dinâmica populacional das moscas-das-frutas sofre interferências diretas da disponibilidade de hospedeiros primários, alternativos e das variações dos fatores climáticos (Salles 1995).

A velocidade e direção do vento influencia diretamente na dispersão dos odores dos atrativos alimentares e sexuais, bem como no voo do inseto alado pela área em busca de abrigo, onde o vento é um fator determinante que altera as condições de temperatura, precipitação pluviométrica e favorece a disseminação da mosca-da-fruta a longas distâncias (Gallo et al. 2002).

A mosca-da-fruta *Bactrocera dorsalis* é capaz de percorrer distâncias de 2 a 11,4 km, sendo mais comum sua movimentação em distâncias de 5 km em menos de 1 dia, entre 2 e 6 dias de idade, onde acima de 2 km é considerada longa distância para esta espécie. As condições desfavoráveis do ambiente do período menos chuvoso amazônico, pode ter condicionado que *B. carambolae* buscase abrigo na vegetação nativa em vez de movimentar-se ativamente pelo território (Froerer et al. 2010).

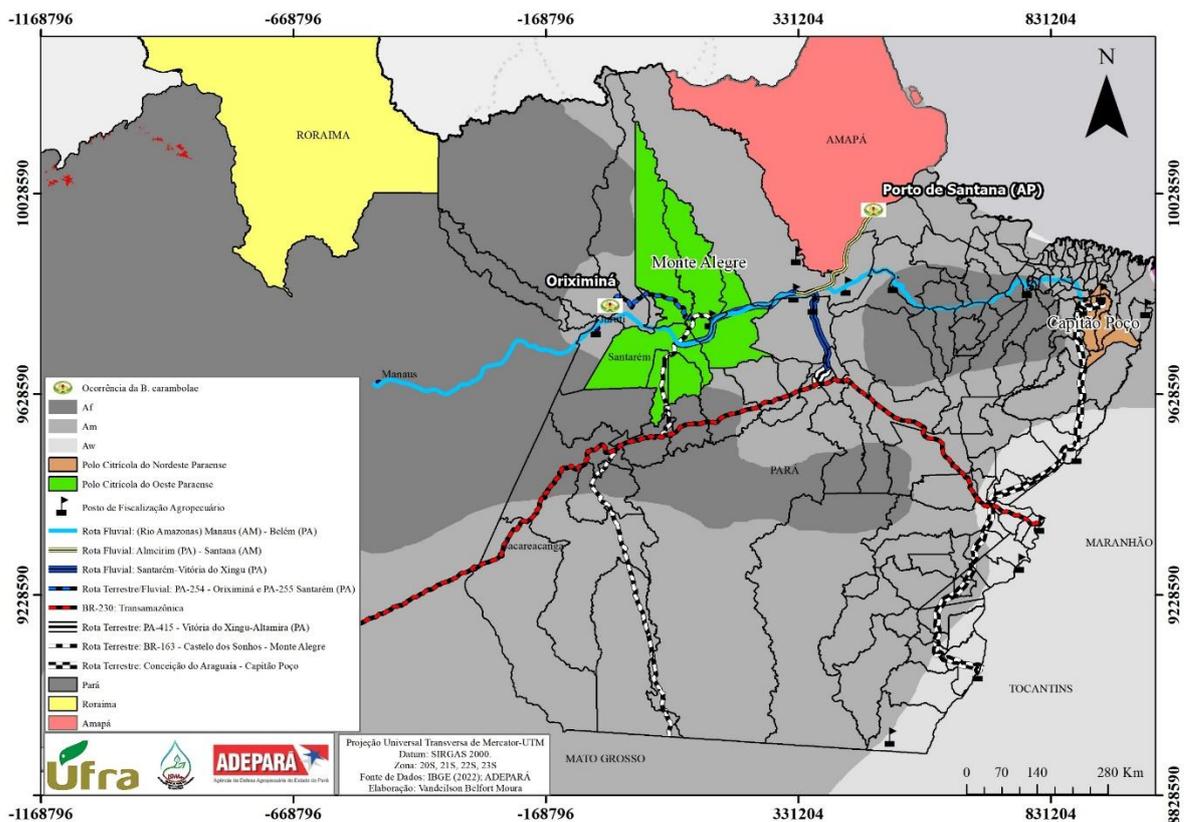
A velocidade e direção dos ventos do município predominante, de leste para oeste, podem ter contribuído para o transporte passivo do inseto, embora tenha sido observada uma baixa captura de *B. carambolae* em áreas mais internas monitoradas em grande parte do armadilhamento na área urbana arborizada (Figura 13).

Edifícios, residências e a infraestrutura viária da área urbana consolidada (Brasil 2021) provavelmente agiram como barreiras naturais, contribuindo para conter o avanço da praga no município monitorado.

O monitoramento de *B. carambolae* enfrentou desafios no município devido à abundância de fruteiras nativas em plantios domésticos, presentes em quintais, sítios e áreas abandonadas sem manejo adequado. Essa situação dificultou o acesso da equipe na execução do controle fitossanitário que elucida a realidade das atividades de levantamento de detecção e de monitoramento no estado do Pará, conforme observado pela ADEPARÁ. Para Sousa et al. (2019), a espécie vegetal hospedeira goiabeira, cultivada ou que cresce espontaneamente em

quintais urbanos, rurais e em beira de estradas, influencia na manutenção e expansão da população de *B. carambolae*.

O município de Oriximiná está localizado na mesorregião noroeste do estado do Pará e faz divisa com os estados do Amapá e Roraima, com presença registrada de *B. carambolae* (Figura 14) (Brasil 2024). Além disso, a área é caracterizada por intenso fluxo de embarcações que transportam pessoas, produtos e equipamentos ao longo do Rio Amazonas e Rio Trombetas que pode facilitar a disseminação da praga para o território paraense por meio do transporte de potenciais frutos hospedeiros (Brasil 2017).



**Fig. 14** Tipos climáticos, rotas de trânsito, posto de fiscalização agropecuária, localização dos polos citrícolas do Pará e locais com ocorrência de *B. carambolae*, no estado do Pará, Brasil.

Conforme apontado por Costa et al. (2023a), há intenso trânsito de pequenas embarcações, em curtas distâncias, diariamente entre os municípios de Saint Georges, na Guiana Francesa, e Oiaoque, no estado do Amapá. Nessa rota, os produtores comercializam frutas *in natura*, que podem potencializar a dispersão da praga no estado do Amapá. Essa movimentação é preocupante, devido ao intenso tráfego de maiores embarcações que ocorrem diariamente entre o Amapá e o Pará pelo Rio Amazonas, principalmente pelo Porto de Santana

(AP), uma vez que, esse meio de transporte é um dos principais meios de locomoção de pessoas e mercadorias nas regiões ribeirinhas da Amazônia Brasileira.

O principal desafio para a defesa fitossanitária no combate de *B. carambolae*, está relacionado ao transporte ativo e comércio de frutos hospedeiros provenientes de regiões infestadas para o Pará, especificamente na zona urbana dos municípios, cuja prática é proibida e fiscalizada pela ADEPARÁ, por meio da Lei nº 7.392, de 07 de abril de 2010, que trata sobre a Defesa Sanitária Vegetal no âmbito do estado do Pará (Pará 2010).

A fiscalização e controle de trânsito em portos, aeroportos e postos de fronteiras e divisas, deve ser permanente e enérgica. No entanto, *B. carambolae* foi detectada em tempo hábil por meio do levantamento fitossanitário de detecção quinzenal, sendo mantida sob o controle no município conforme demonstrado pelo índice MAD. O enfrentamento da praga é crucial para atender às demandas do mercado exportador e promover o desenvolvimento sustentável da cadeia produtiva da fruticultura na Amazônia e no Brasil, que garante menores gastos em programas de controle, impactos à saúde humana e ao meio ambiente (Martin Neto et al. 2016).

Estima-se o custo-benefício de que, a cada R\$ 1 investido pelo governo federal em ações de controle executadas pelo PNEMC, o retorno é de até R\$ 35,70, evitando perda líquida aproximada de R\$ 1 bilhão (Miranda e Adami 2015). O combate à mosca-da-carambola, mantém a alta qualidade dos frutos consumidos internacionalmente e das práticas de manejo da fruticultura brasileira, que são referência em suas técnicas de produção com segurança fitossanitária e alimentar (Marchioro 2016). Contudo, é muito importante manter o monitoramento contínuo nas áreas com ocorrência e informações sobre os levantamentos fitossanitários para segurança quarentenária e o acesso das frutas brasileiras nos mercados internacionais.

A sociedade precisa estar consciente sobre a prevenção da disseminação da praga por meio de frutos hospedeiros, onde elucida-se a relevância da educação fitossanitária como instrumento transformador para a defesa fitossanitária no estado do Pará e no compartilhamento de responsabilidades com a sociedade. Esses resultados podem orientar ações de vigilância e de trânsito, além de, auxiliar programas de controle no enfrentamento, erradicação e restrição territorial de *B. carambolae* na Amazônia.

### **3.5 Conclusão**

As armadilhas tipo Jackson atraem mais moscas *B. carambolae* que as armadilhas tipo McPhail, entretanto, não apresentam diferença quanto a eficiência de captura.

Armadilhas instaladas em plantas de caramboleiras e mangueiras tiveram maior capturas de moscas *B. carambolae*, no período menos chuvoso, que favorece a abundância populacional com baixa dependência espacial e movimentação a longa distância.

Temperaturas média e do ponto de orvalho, umidade relativa do ar, radiação solar, coleta e destruição de frutos e precipitação pluviométrica, possuem correlação significativa com a incidência e dinâmica populacional de *B. carambolae* no município de Oriximiná, no estado do Pará.

O armadilhamento da área urbana arborizada apresenta dissimilaridade com a incidência.

O monitoramento contínuo pelo armadilhamento, a coleta e destruição de frutos, a utilização de iscas tóxicas com atrativos alimentares e sexuais erradicam *B. carambolae* com MAD, que mantém a praga sob controle fitossanitário.

## REFERÊNCIAS

Adaime R, Jesus-Barros CR de, Bariani A, Lima AL, Cruz KR, Carvalho JP (2016) Novos registros de hospedeiros da Mosca-da-Carambola (*Bactrocera carambolae*) no Estado do Amapá, Brasil. Comunicado Técnico 146, Embrapa Amapá, Macapá, pp 5

Adaime R, Pereira JDB, Sousa MSM, Jesus CR, Souza-Filho MF, Zucchi RA (2023) Moscas-das-frutas, suas plantas hospedeiras e parasitoides no estado do Amapá. In: Moscas-das-frutas no Brasil: conhecimento básico e aplicado (vol. 2). Piracicaba: Fealq. pp 51-68

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Goncalves JL de M, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorol. Z. 22:711-728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507

Amaral EJF do, Sousa M do SM de, Santos JEV dos, Costa LM, Melém Júnior NJ, Toledo JJ de, Adaime R (2021) Effect of soil class and moisture on the depth of pupation and pupal viability of *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (1994). Rev. Bras. Entomol. 65:e20200075. <https://doi.org/10.1590/1806-9665-RBENT-2020-0075>

Azevedo FR de, Braga Sobrinho R, Ometto ACF (2005) Estratégias para o estabelecimento e manutenção de áreas livres e de baixa prevalência de moscas-das-frutas. Circular Técnica 22, Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, Ceará, pp 14

Azevedo FR, Gurgel LS, Santos MLL, Silva FB, Moura MAR, Nere DR (2012) Eficácia de armadilhas e atrativos alimentares alternativos na captura de moscas-da-fruta em pomar de goiaba. Arq. Inst. Biol. 79:343-352. doi:10.1590/S1808-16572012000300004

Baker AC, Stone WE, Plummer CC, Mcphail M (1944) A review of studies on the Mexican fruit fly and related Mexican species. Miscellaneous Publication 531, Washington/USDA, pp 155

Belo APD, Rocha LMS, Corrêa JMG, Ferreira RMA, Costa-Neto SV, Sousa MSM, Adaime R, Lemos LN (2020) New host plants records of *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock, 1994 and *Anastrepha* spp. (Diptera: Tephritidae) in Brazil. Entomol. Commun. 2:ec02036. <https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec02036>

Botton M, Nava DE, Araujo ES, Grützmacher AD, Nunes MZ, Machota JRR (2014) Formulações de iscas tóxicas para a supressão populacional da mosca das frutas sulamericana na fruticultura de clima temperado. Agapomi, Vacaria. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1000258/1/BottonAgapomi.pdf>. Acessado em 12 de novembro de 2024.

Braga IA, Valle D (2007) *Aedes aegypti*: inseticidas, mecanismos de ação e resistência. Epidemiol. Serv. Saúde 16:279-293. <http://dx.doi.org/10.5123/S1679-49742007000400006>

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa MAPA nº 20 de 13/07/2010. Estabelece procedimentos a serem adotados para caracterização, implantação, manutenção e reconhecimento da Aplicação de Medidas Integradas em um Enfoque de Sistemas para Manejo de Risco da Praga (SMR) Mosca-das-frutas em cultivos de mangueira (*Mangifera indica*) e com base nas diretrizes das Normas Internacionais de Medidas Fitossanitárias de nº 14. Diário Oficial da União, seção 1, 14 jul. 2010. [https://www.normasbrasil.com.br/norma/instrucao-normativa-20-2010\\_77863.html](https://www.normasbrasil.com.br/norma/instrucao-normativa-20-2010_77863.html). Acessado em 23 de fevereiro de 2024.

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 28, de 20 de julho de 2017. [Estabelece os procedimentos operacionais para as ações de prevenção, contenção, supressão e erradicação da praga quarentenária presente *Bactrocera carambolae* (mosca-da-carambola)]. Diário Oficial da União, seção 1, 26 jul. 2017. <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/cefiti/leg/IN28-2017.pdf>. Acessado em 22 de dezembro de 2023.

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria MAPA nº 627, de 10 de novembro de 2023. [Declara estado de emergência fitossanitária relativo ao risco iminente de dispersão da praga quarentenária presente *Bactrocera carambolae* (mosca-da-carambola) nos Estados do Amapá, Amazonas, Pará e Roraima]. Diário Oficial da União, seção 1, 13 nov. 2023. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mapa-n-627-de-10-de-novembro-de-2023-522497468>. Acessado em 29 de dezembro de 2023.

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria SDA/MAPA nº 1.007, de 2 de fevereiro de 2024. [Altera a relação de espécies hospedeiras da praga quarentenária presente *Bactrocera carambolae*.] Diário Oficial da União, seção 1, 06 fev. 2024. <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-sda/mapa-n-1.007-de-2-de-fevereiro-de-2024-541476536>. Acessado em 21 de fevereiro de 2024.

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria SDA/MAPA nº 940, de 17 de novembro de 2023. [Amplia a Área Sob Quarentena e a Zona Tampão relativa à praga *Bactrocera carambolae* (mosca-da-carambola), no estado do Pará]. Diário Oficial da União,

seção 1, 01 abr. 2019. [https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sanidade-animal-e-vegetal/sanidade-vegetal/PORTARIA\\_SDA\\_MAPA\\_N\\_940\\_DE\\_17\\_DE\\_NOVEMBRO\\_DE\\_2023\\_POR\\_TARIA\\_SDA\\_MAPA\\_N\\_940\\_\\_1\\_.pdf](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sanidade-animal-e-vegetal/sanidade-vegetal/PORTARIA_SDA_MAPA_N_940_DE_17_DE_NOVEMBRO_DE_2023_POR_TARIA_SDA_MAPA_N_940__1_.pdf). Acessado em 11 de dezembro de 2024.

Brasil, Superintendência Federal de Agricultura, Pecuária e Abastecimento no Estado do Pará. Portaria nº 37, de 22 de fevereiro de 2007. [Detecção da praga quarentenária *Bactrocera carambolae* Dipt. Teph (mosca da carambola) no distrito de Monte Dourado, Almeirim – PA]. Diário Oficial da União, seção 1, 23 fev. 2007. <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=14&data=23/02/2007>. Acessado em 20 de fevereiro de 2024.

Brasil. Lei nº 14.285, de 29 de dezembro de 2021. [Altera as Leis nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, 11.952, de 25 de junho de 2009, que dispõe sobre regularização fundiária em terras da União, e 6.766, de 19 de dezembro de 1979, que dispõe sobre o parcelamento do solo urbano, para dispor sobre as áreas de preservação permanente no entorno de cursos d'água em áreas urbanas consolidadas]. Diário Oficial da União, 30 dez. 2021. [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2021/Lei/L14285.htm#art2](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14285.htm#art2). Acessado em 30 de dezembro de 2023.

Byamukama E, Eggenberger SK, Coelho-Netto RA, Robertson AE, Nutter Jr FW (2014) Geospatial and temporal analyses of Bean pod mottle virus epidemics in soybean at three spatial scales. *Phytopathology* 104:365-78. doi: 10.1094/PHYTO-12-12-0323-R.

Cartaxo PH de A, Lopes GN, Gonzaga KS, Santos JP de O, Cartaxo A da SB, Magalhães JVA (2020) *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera:Tephritidae): Riscos para a Fruticultura Brasileira. *Res., Soc. Dev.* 9:e780986608. doi: 10.33448/rsd-v9i8.6608

Coelho EF, Oliveira FDC, Araújo ECE, Vasconcelos LFL, Lima DM (2001) Distribuição do sistema radicular da mangueira sob irrigação localizada em solo arenoso de tabuleiros costeiros. *Rev. Bras. Frutic.* 23:250-256. doi: 10.1590/S0100-29452001000200009

Costa JVTA, Sousa M do SM de, Jesus CR de, Souza-Filho MF de, Costa VA, Silva BM da S e, Oliveira JPM, Adaime R (2023a) New Findings on Carambola Fruit Fly Hosts in South America. *Fla. Entomol.* 106:161-174. <https://doi.org/10.1653/024.106.0303>

Costa JVTA, Sousa M do SM de, Souza-Filho MF de, Adaime R (2023b) *Chrysophyllum cainito* L. (Sapotaceae): novo hospedeiro da mosca-da-carambola no Brasil. *Agrotrópica* 35:161-164. doi: 10.21757/0103-3816.2023v35n2,3p161-164

Costa JVTA, Sousa M do SM de, Souza-Filho MF de, Lemos L do N, Pantoja EV, Nava DE, Adaime R (2024a) First record of papaya as host of carambola fruit fly in Brazil. *Entomological Communications* 6:ec06024. doi: <https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec06024>

Costa JVTA, Sousa MSM, Souza-Filho MF, Murbach CG, Oliveira JPM, Santos TP, Matos AKB, Nava DE, Adaime R (2024b) Carambola fruit fly in Brazil: new host and first record of associated parasitoids. *Florida Entomologist* (in press). doi: <https://doi.org/10.12741/ebrasilis.v17.e1048>

- Danjuma S, Thaochan N, Permkam S, Satasook C (2014) Effect of temperature on the development and survival of immature stages of the carambola fruit fly, *Bactrocera carambolae*, and the Asian papaya fruit fly, *Bactrocera papaya*, reared on guava diet. J. Insect Sci. 14:1-6. doi: 10.1673/031.014.126
- Doorenbos J, Kassam AH (1994) *Efeito da água no rendimento das culturas*. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem 33, Campina Grande, pp 306
- Drew RAI, Hancock DL (1994) The *Bactrocera dorsalis* complex of fruit flies (Diptera: Tephritidae: Dacinae) in Asia. Bulletin of Entomological Research Supplement Series 2: 1-68. doi: <https://doi.org/10.1017/S1367426900000278>
- Duarte RT, Baptista APM, Pazini WC, Galli JC (2015) Population fluctuation of fruit-flies in orchard of guava in Pindorama-SP. Rev. Agrarian. 8:133-138. doi: 10.30612/agrarian.v8i28.2707
- FAO (2021). Anuário Estatístico da FAO – Alimentação e Agricultura Mundial. Roma, Itália. <http://fenix.fao.org/faostat/internal/en/#data>. Acessado em 21 de junho de 2023
- Froerer KM, Peck SL, Mcquate GT, Vargas RI, Jang EB, Mcinnis DO (2010) Long distance movement of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) in Puna, Hawaii: How far can they go?. Am. Entomol. 56:88-94. doi: 10.1093/AE/56.2.88
- Gallo D, Nakano O, Silveira Neto S, Carvalho RPL, Baptista GC, Berti Filho E, Parra JRP, Zucchi RA, Alves SB, Vendramim JD, Marchini LC, Lopes JRS, Omoto C (2002) Entomologia agrícola. Piracicaba, FEALQ, pp 920
- Godoy MJS, Pacheco W da SP, Portal R da R, Pires Filho JM, Moraes LMM de (2011) Programa Nacional de Erradicação da Mosca-da-carambola. In: Silva RA, Lemos WP, Zucchi RA (Eds.). Moscas-das-frutas na Amazônia brasileira: diversidade, hospedeiros e inimigos naturais. Embrapa Amapá, Macapá, pp 133-158
- Gomes Junior SC, Almeida RT de (2017) Análise multivariada aplicada aos estudos clínicos: notas práticas para profissionais de saúde. J. Bras. Ginecol. 1:6-14. doi: 10.5533/JBG-0368-1416-2017110127102
- IBGE (2022) Cidades e Estados 2022. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/oriximina.html>. Acessado em 18 de fevereiro de 2024
- Igawa TK, Toledo PM de, Anjos LJS (2022) Climate change could reduce and spatially reconfigure cocoa cultivation in the Brazilian Amazon by 2050. Plos One 17:e0262729. doi: 10.1371/journal.pone.0262729.
- Iwahashi O, Syamusdin-Subahar TS, Sastrodihardjo S (1996) Attractiveness of methyl eugenol to the fruit fly *Bactrocera carambolae* (Diptera: Tephritidae) in Indonésia. Ann. Entomol. Soc. Am. 89:653-660. doi: 10.1093/AESA/89.5.653
- Jesus-Barros CR de, Mota Júnior LO, Costa AS, Pasinato J, Adaime R (2017) Fecundidade e longevidade de *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae). Biotemas 30:7-13. doi: 10.5007/2175-7925.2017V30N4P7

Lemos LN, Pantoja EV, Chucre CEC, Dalmacio GA, Belo APD, Souza-Filho MF, Adaime R (2024) New host records for Carambola fruit fly and *Anastrepha* spp. in Brazil. Entomological Communications, 6:ec06026. doi: 10.37486/2675-1305.ec06026

Malavasi A, Midgarden D, Sauers-Muller AV (2013) Manual for the control of the carambola fruit fly in South America. Second edition. [https://www.researchgate.net/publication/317182807\\_Manual\\_for\\_the\\_control\\_of\\_the\\_Carambola\\_fruit\\_fly\\_in\\_South\\_America](https://www.researchgate.net/publication/317182807_Manual_for_the_control_of_the_Carambola_fruit_fly_in_South_America). Acessado em 09 de junho de 2024

Marchioro CA (2016) Global potential distribution of *Bactrocera carambolae* and the risks for fruit production in Brazil. PLoS One 11:e0166142. doi: 10.1371/journal.pone.0166142.

Martin Neto L, Galerani PR, Costa JL da S (2016) Pesquisa, desenvolvimento e inovações em face de ameaças sanitárias para a agropecuária brasileira. Pesq. Agropec. Bras. 51:1-8. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000500iii>

Menezes AMS de, Santos OO dos, Melo EA dos SF, Castellani MA, Bittencourt MAL (2015) Levantamento populacional e avaliação de produtos fitossanitários sobre *Anastrepha* (Diptera: Tephritidae) em pomar de *Achras Sapota* (Sapotaceae) no sul da Bahia. Agrotrópica 27:297-302. doi: 10.21757/0103-3816.2015v27n3p297-302

Midgarden D, van Sauers-Muller A, Godoy MJS, Vayssières JF (2016) Overview of the Programme to Eradicate *Bactrocera carambolae* in South America. In: Ekesi S, Mohamed S, Meyer M de. (eds.). Fruit Fly Research and Development in Africa – Towards a Sustainable Management Strategy to Improve Horticulture. Springer International Publishing Switzerland, pp 705-736

Miranda SHG de, Adami AC de O (2015) Métodos quantitativos na avaliação de risco de pragas. In: Defesa Vegeta: fundamentos, políticas e perspectivas. Sociedade Brasileira de Defesa Agropecuária, Belo Horizonte, pp 183-203

Monteiro LA, Sentelhas PC, Pedra GU (2018) Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. Int. J. Climatol. 38:571-1581. <https://doi.org/10.1002/joc.5282>

Morais EGF, Jesus-Barros CR de, Adaime R, Lima AL, Navia D (2016) Pragas de expressão quarentenária na Amazônia. In: Silva NM, Adaime R, Zucchi RA. (Eds.). Pragas Agrícolas e florestais na Amazônia. Embrapa, Brasília, pp 521-559

Nascimento AS, Carvalho RS (2000) Manejo integrado de moscas-das-frutas. In: Malavasi A, Zucchi RA. (Eds.). Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: conhecimento básico e aplicado. Holos, Ribeirão Preto, pp 169-173

Pará, Agência de Defesa Agropecuária do Pará. Lei nº 7.392, de 07 de abril de 2010. [Dispõe sobre a Defesa Sanitária Vegetal no âmbito do Estado do Pará e dá outras providências]. Diário oficial do Estado, 09 abri. 2010. <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=147900>. Acessado em 15 de fevereiro de 2024

Pasinato J, Redaelli LR, Botton M, Jesus-Barros CR de (2019) Biology and fertility life table of *Bactrocera carambolae* on grape and acerola. Rev. Bras. Entomol. 63:217-223. <https://doi.org/10.1016/j.rbe.2019.06.001>

Plant Health Australia (2018) The Australian Handbook for the Identification of Fruit Flies. Version 3.1. Plant Health Australia. Canberra, ACT.

Poltronieri LS, Trindade DR, Santos IP dos (2008) Pragas e doenças de cultivos amazônicos. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Pará, pp 379

R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Austria. Version 4.2.2 [software]. <https://www.R-project.org/>. Acessado em 18 de agosto de 2023

Raga A, Vieira SMJ (2015) Atratividade de proteína hidrolisada de milho em mistura com bórax sobre moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) em gaiolões de campo. Arq. Inst. Biol. 82:1-8. <https://doi.org/10.1590/1808-1657000872013>

Rodrigues CAG, Bezerra B da C, Ishii IH, Cardoso EL, Soriano BMA, Oliveira H de (2002) Arborização urbana e produção de mudas de essências florestais nativas em Corumbá, Embrapa Pantanal, Corumbá, Mato Grosso, pp 26

Rolim G de S, Sentelhas PC, Barbieri V (1998) Planilhas no ambiente Excel™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. Rev. Bras. Agrometeorol. 6:133-137

Ronqui-Teles B, Silva NM da (2005) Flutuação populacional de *Anastrepha Shiner* (Diptera: Tephritidae) na região de Manaus, AM. Neotrop. Entomol. 34:733-741. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2005000500004>

Salles LAB (1995) Bioecologia e controle da mosca-das-frutas sul-americana. Embrapa-CPACT, Pelotas, pp 60

Salmah M, Adam NA, Muhamad R, Lau WH, Ahmad H (2017) Infestation of fruit fly, *Bactrocera* (Diptera: Tephritidae) on mango (*Mangifera indica* L.) in peninsular Malaysia. J. Fundam. Appl. Sci. 9:799-812. doi: 10.4314/JFAS.V9I2S.49

Selivon D (2000) Biologia e padrão de especiação. In: MALAVASI, A.; ZUCCHI, R. A. (Ed.). Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: conhecimento básico e aplicado. Holos, São Paulo, pp 25-28

Silva ASA da, Stosic B, Menezes RSC, Singh VP (2019) Comparison of interpolation methods for spatial distribution of monthly precipitation in the state of Pernambuco, Brazil. J. Hydrol. Eng. 24(3). doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001743

Silva RA, Jordão AL, Sá LAN, Oliveira MRV (2004) Mosca-da-carambola: uma ameaça à fruticultura brasileira. Circular Técnica 31, Embrapa Amapá, Macapá, pp 15

Soares GKA, Fidelis EG, Farias ES, Rodrigues GS, Paes JLA (2023) Range expansion and population dynamics of *Bactrocera carambolae* in Roraima, Brazil. *Crop Prot.* 165:106167. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106167>

Sousa MSM, Santos JCR, Jesus CR, Yokomizo GK, Deus EG, Pereira JF, Adaime R (2019). Goiabeiras comuns contribuem para expansão da área de distribuição de *Bactrocera carambolae* na Amazônia brasileira. In: Pacheco JTR, Kawanishi JY, Nascimento R. (Org.). *Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável 2*. Atena Editora, Ponta Grossa, pp 196-206

Souza EB, Ferreira DBS, Guimarães JTF, Franco VS, Azevedo FTM de, Moraes BC de, Souza PJ de OP de (2017) Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. *Rev. Bras. Climatol.* 21:81-93. doi: <https://doi.org/10.5380/abclima.v21i0.41232>

Thomas DB (2003) Reproductive phenology of the Mexican fruit fly, *Anastrepha ludens* (Loew) (Diptera: Tephritidae) in the Sierra Madre Oriental, Northern Mexico. *Neotrop. Entomol.* 32:385-397. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2003000300002>

Vilela EF, Lucia TMCD (2001) Feromônios de insetos: biologia, química e emprego no manejo de pragas. 2ª ed. Holos, Ribeirão Preto, pp 206

Yong HS, Song SL, Chua KO, Lim PE, Eamsobhana P (2019) Microbiota and potential opportunistic pathogens associated with male and female fruit flies of Malaysian *Bactrocera carambolae* (Insecta: Tephritidae). *Meta Gene* 19:185-192. doi: [10.1016/J.MGENE.2018.12.002](https://doi.org/10.1016/J.MGENE.2018.12.002)

Capítulo submetido para publicação em 28/01/2025 na revista *Ecological Modelling*

#### 4 DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL NO CLIMA PRESENTE E EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DA MONILÍASE DO CACAUEIRO NA AMÉRICA TROPICAL

##### RESUMO

A chegada da monilíase do cacaueiro (*Moniliophthora roreri*) na Amazônia brasileira aumenta o risco de invasão da praga nas áreas produtoras de cacau do Pará, podendo provocar perdas de até 100 % da produção de amêndoas. Assim, objetivou-se identificar e quantificar a adequabilidade bioclimática potencial, futura e rotas de risco no trânsito de *M. roreri* como suporte ao planejamento de ações estratégicas na gestão da defesa fitossanitária do estado do Pará. O modelo de nicho ecológico foi elaborado com 49 pontos de ocorrência da praga na América Tropical, elevação, 5 variáveis bioclimáticas das condições atuais e dos caminhos SSP1-2.6 e SSP5-8.5, nos períodos 2041-2060 e 2081-2100 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados fase 6 (CMIP6) disponíveis no *WorldClim*. O modelo indicou áreas de alto risco bioclimático de invasão em Juruti, Jacareacanga, Terra Santa e Oriximiná e ampla adequação bioclimática potencial nas regiões produtoras de cacau (transamazônica e transcametá). Todos os cenários futuros sugerem aumento da temperatura, redução na precipitação pluviométrica e clima potencial desfavorável no Pará de 5,3 e 3,8 % no caminho SSP1-2.6, e maiores impactos no SSP5-8.5, com 5,7 e 12,12 %, ambos nos períodos de 2041-2060 e 2081-2100, respectivamente, quando comparados a projeção potencial. Haverá áreas produtoras com potencial bioclimático de médio a baixo risco em condições de mudanças climáticas, onde o patossistema poderá sofrer alterações, principalmente na transamazônica. O modelo de nicho ecológico auxilia no planejamento e tomada de decisões para combater *M. roreri*, proteger a sanidade e competitividade da cadeia produtiva cacaueira do estado do Pará.

**Palavras-chave:** *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, *Theobroma cacao*, Modelagem de Distribuição de Espécie, Variabilidade Climática, Amazônia

##### ABSTRACT

The arrival of cacao frosty pod rot (*Moniliophthora roreri*) in the Brazilian Amazon increases the risk of pest invasion in the cocoa-producing areas of Pará, potentially causing losses of up to 100% of almond production. Thus, the objective was to identify and quantify the potential bioclimatic suitability, future scenarios, and risk routes for the spread of *M. roreri* as support for the strategic planning of phytosanitary defense actions in the state of Pará. The ecological niche model was developed with 49 occurrence points of the pest in Tropical America, elevation, and 5 bioclimatic variables from current conditions and SSP1-2.6 and SSP5-8.5 pathways for the periods 2041-2060 and 2081-2100, from the Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) available on *WorldClim*. The model indicated areas of high bioclimatic risk of invasion in Juruti, Jacareacanga, Terra Santa, and Oriximiná, and broad potential bioclimatic suitability in cocoa-producing regions (Transamazon and Transcametá).

All future scenarios suggest an increase in temperature, a reduction in rainfall, and an unfavorable potential climate in Pará of 5.3% and 3.8% along the SSP1-2.6 pathway, with greater impacts under SSP5-8.5, with 5.7% and 12.12%, for the periods 2041-2060 and 2081-2100, respectively, when compared to the potential projection. There will be production areas with medium to low bioclimatic risk potential under climate change conditions, where the pathosystem may undergo alterations, particularly in the Transamazon region. The ecological niche model aids in planning and decision-making to combat *M. roreri*, protecting the health and competitiveness of the cocoa production chain in the state of Pará.

**Keywords:** *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, *Theobroma cacao*, Species Distribution Modeling, Climate Variability, Amazon.

#### 4.1 Introdução

A monilíase é a mais grave doença do cacauzeiro (Van der Vossen, 1997), causada pelo fungo hemibiotrófico [*Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans] (Evans, 1981). A praga pode causar perdas de até 100 % da produção (Pará, 2021), restringir a comercialização de hospedeiros e atacar somente frutos dos gêneros *Theobroma* e *Herrania* (Pará, 2024) em pomares domésticos, áreas extrativistas e lavouras comerciais de cacau e cupuaçu (Brasil, 2024).

Desde seu relato no Equador, em 1917 (Leite *et al.*, 2023), com níveis mais elevados de diversidade genética do fungo na Colômbia (Phillips-Mora *et al.*, 2007), a praga avança nas condições climáticas e ampla faixa de fronteira dos países da América do Sul, Central, Norte e no Caribe. Em 2021, a detecção de *M. roreri* no Brasil, desencadeou a declaração do estado de emergência fitossanitária relativo ao risco iminente de introdução da praga quarentenária ausente (Brasil, 2021).

A entrada de *M. roreri* na Amazônia brasileira, nas divisas dos estados do Acre e Amazonas (Leite *et al.*, 2023), representa uma ameaça fitossanitária de altíssimo risco para as áreas produtoras em expansão de amêndoas de cacau em mais de 60 municípios do estado do Pará (IBGE, 2024). Essa ameaça compromete a bioeconomia paraense, a cadeia global chocolateira, bem como a subsistência e riqueza cultural dos povos da Amazônia (Brasil, 2024).

*Moniliophthora roreri*, disseminado pelo vento, penetra o fruto através da epiderme ou via estômatos, causando manchas de cor verde, amarelada ou marrom escuro, deformação do fruto, podridão da polpa e amêndoas, com produção de até sete bilhões de esporos de coloração branco-amarelada na superfície necrosada do fruto (Ram, 2004; Leite *et al.*, 2023). Os esporos se desprendem como talco dos frutos e são disseminados pelo transporte a longas distâncias

pelo homem (Gramacho *et al.*, 2018) e por demais artigos regulamentados infectados ou infestados da praga (Pará, 2021).

A iminência da introdução do fungo no território paraense impõe desafios ao controle oficial. O intenso fluxo de embarcações no rio Amazonas e transporte terrestre de pessoas e materiais, é capaz de veicular a praga dos estados do Acre e Amazonas, onde há focos da praga com ações de monitoramento e erradicação (Leite *et al.*, 2023), através dos municípios de Juruti e Jacareacanga (PA), localizados no limite da ampla divisa paraense, até áreas produtoras de cacau indenes de *M. royeri* no Pará, cuja fiscalização e inspeção estão sendo intensificadas.

A regionalização de Modelos Climáticos Globais (GCM) através do modelo de nicho ecológico, descreve padrões biológicos relativos aos gradientes ambientais e geográficos pela Modelagem de Distribuição de Espécies (SDM), projetados em um espaço geográfico adequado (Peterson *et al.*, 2011) pelo uso de variáveis ambientais de alta resolução espacial (Fick & Hijmans, 2017).

O mapeamento da adequabilidade bioclimática de habitat, produto do SDM, é uma ferramenta de tomada de decisão que permite identificar vias ativas de ingresso e avaliar a extensão do espaço geográfico (Venette *et al.*, 2010) de regiões específicas da Amazônia oriental que estão em risco potencial de suscetibilidade bioclimática ao ataque de *M. royeri* que é silenciosa, agressiva e devastadora (Brasil, 2024).

Projeções indicam aumento da temperatura para a América do Sul, reduções na umidade do ar (Anjos *et al.*, 2021) e da precipitação na Amazônia com sugestão de mudanças nas zonas adequadas ao cultivo do cacau em um ambiente mais quente e seco (Igawa *et al.*, 2022). Prediz-se, alteração da epidemiologia de doenças de plantas (Trebicki, 2020), cujas condições poderão reduzir áreas adequadas climaticamente e o potencial de disseminação de *M. royeri*.

Neste contexto, compreender a adequabilidade bioclimática do patossistema abaixo da linha do Equador no risco de invasão de *M. royeri* na Amazônia oriental, é uma medida fitossanitária adaptativa preventiva. Ações fitossanitárias planejadas para prevenção e contingência (Pará, 2024), devem minimizar vulnerabilidades das áreas produtoras de cacau do Pará com hospedeiro suscetível, patógeno virulento, alto potencial de dispersão antrópica (Jesus Junior *et al.*, 2003) e clima favorável (Moraes *et al.*, 2012), a fim de, promover o avanço sustentável da cacauicultura frente às mudanças climáticas no Sul Global (IPCC, 2022).

Assim, o objetivo desse trabalho foi identificar e quantificar áreas com adequabilidade bioclimática potencial, áreas de adaptação às mudanças climáticas e rotas de risco de ocorrência de *Moniliophthora royeri* como suporte ao planejamento de ações estratégicas na gestão da defesa fitossanitária do estado do Pará.

## 4.2 Material e Métodos

### 4.2.1 Área de estudo

O estado do Pará possui área total de 1.245.870,704 km<sup>2</sup> (IBGE, 2023). É o maior produtor brasileiro de amêndoas de cacau com 51,81 % da produção total (150.565 t), em uma área plantada estimada de 155.859 ha (IBGE, 2024). Está localizado no bioma amazônico (Figura 1), centro de origem do cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) (Zarrilo *et al.*, 2018), cujo desenvolvimento ocorre em climas quentes e úmidos na faixa latitudinal de 20° N a 20° S (Abdulai *et al.*, 2018).

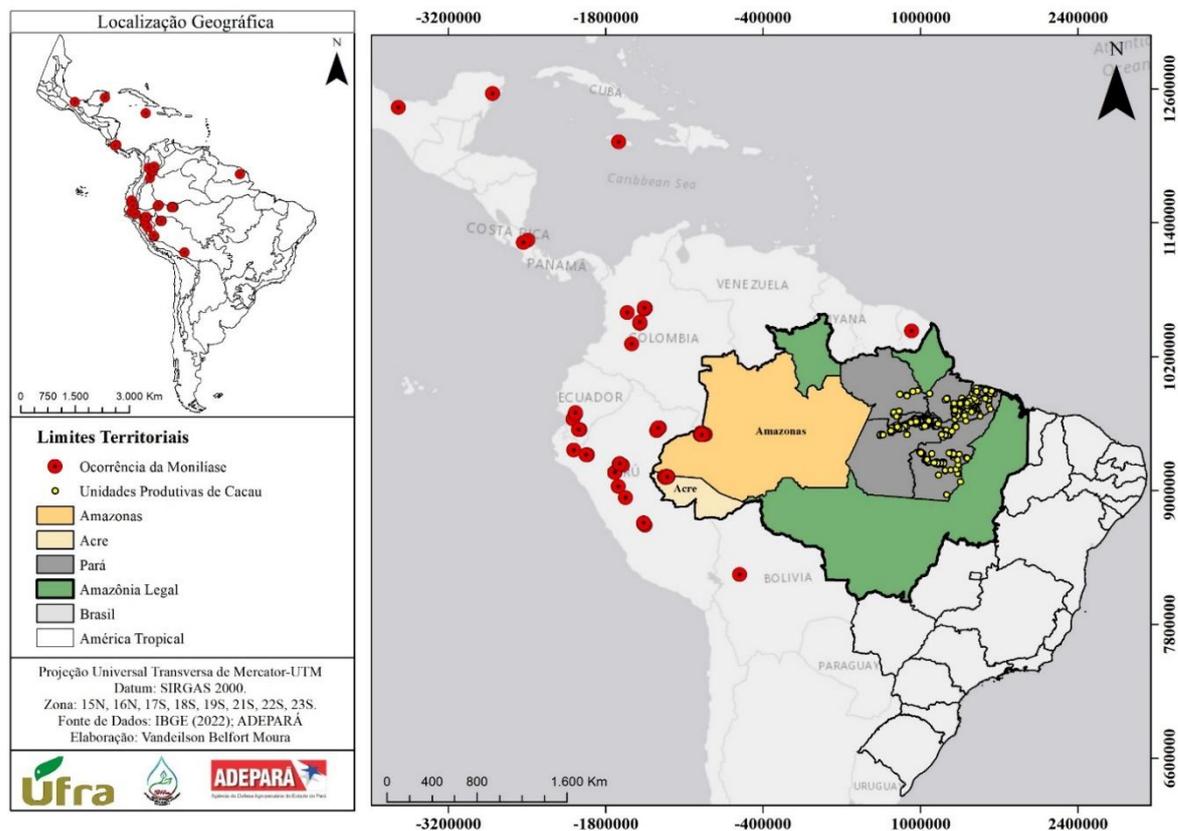


Figura 1. Distribuição espacial das ocorrências de *M. roreri* na América Tropical e prevalência das unidades produtivas de cacau no Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

O Pará apresenta seis regiões produtoras de cacau: Sudoeste (113.355 t), Sudeste (13.546 t), Baixo Amazonas (10.528 t), Nordeste (7.736 t), Metropolitana de Belém (1.137 t) e Marajó (73 t). Estima-se, a participação de 27.800 produtores, produtividade média de 960 a 1.097 kg<sup>-1</sup> e a geração de mais de 340 mil empregos pela cultura no Brasil (IBGE, 2023).

O clima do estado do Pará é classificado conforme Koppen com tipos climáticos “Af”, “Am” e “Aw”. Apresenta altitude de 61, 107 e 180 m, temperaturas médias anuais de 27,7, 27,5 e 27,3 °C, máximas de 29,4, 29,4, 29,2 °C, mínimas de 24,1, 24, 25,2 °C e radiação média anual de 227, 215 e 161 W/m<sup>2</sup>, respectivamente (Alvares *et al.*, 2013). Possui regime mais chuvoso (janeiro a maio) e menos chuvoso (julho a novembro) com características climáticas diferenciadas entre os dois regimes sazonais e variabilidade espaço-temporal na Amazônia oriental (Souza *et al.*, 2017).

#### 4.2.2 Dados de ocorrência de espécies

As ocorrências de *M. royeri* utilizadas nesta pesquisa para mapear e identificar as áreas geográficas com presença e ausência através de coordenadas geográficas (Figura 1), são resultantes de levantamentos fitossanitários de detecção e ações de erradicação de focos da praga na América tropical nos estados do Acre e Amazonas.

Ainda, foram obtidas ocorrências no repositório de biodiversidade *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) (<http://www.gbif.org/>) (GBIF, 2023), publicações oficiais (Brasil, 2021; Amazonas, 2022; Leite *et al.*, 2023) e da Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará (ADEPARÁ), que atua em ações conjuntas com o Ministério da Agricultura e Pecuária e a Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC).

Os 439 pontos de ocorrência de *M. royeri* passaram por seleção. Ocorrências sem coordenadas geográficas, valores imprecisos e duplicados foram removidos da análise, reduzindo-se para 49 ocorrências totais que abrangeram os países da Colômbia, Costa Rica, Guiana Francesa, Jamaica, México, Bolívia, Equador, Peru e Brasil (Acre e Amazonas).

Da base de dados da ADEPARÁ, foram obtidas coordenadas geográficas de 1.113 unidades produtivas (UP's) do cacaueiro em 64 municípios no Pará, sem ocorrência oficial da praga. A autarquia executa a vigilância epidemiológica preventiva da praga através de técnicos de campo, cadastra, fiscaliza e inspeciona pragas quarentenárias incidentes no cacaueiro e cupuaçuzeiro (Pará, 2022).

Os levantamentos fitossanitários, possibilitam a comercialização das amêndoas (Pará, 2021), além de servir como mecanismo de rastreabilidade para atestar a comprovação da origem dos produtos da cadeia produtiva do cacau e cupuaçu (Pará, 2024).

#### 4.2.3 Dados ambientais e cenários de mudanças climáticas

A partir do *download* do banco de dados do *WorldClim* versão 2.1 (<https://worldclim.org/>) foram obtidas as variáveis climáticas, 19 variáveis bioclimáticas e a elevação com *downscaling* e correção do viés. Todas com 30 arco-segundos de resolução espacial (aproximadamente 1km x 1km). Os valores são derivados de médias mensais de temperatura e precipitação da normal de 1970-2000 (Fick & Hijmans, 2017) que capturam variações climáticas anuais e fatores limitantes, conhecidos por influenciar a distribuição das espécies (Slater *et al.*, 2012).

Os dados históricos das variáveis bioclimáticas para locais de ocorrência de *M. roreri* na América tropical foram recortados. Em seguida, foi realizada análise de correlação de Pearson (Figura 2), a fim de obter as variáveis bioclimáticas com correlação menor que 0,7 para reduzir efeitos de multicolinearidade, além de considerar o significado biológico para a praga (Rodda *et al.*, 2011). Variáveis que apresentam correlações fortes promovem redução da eficiência entre os preditores e aumento de incertezas na predição de ocorrências no espaço para outras áreas geográficas (Marco Júnior & Nóbrega, 2018).

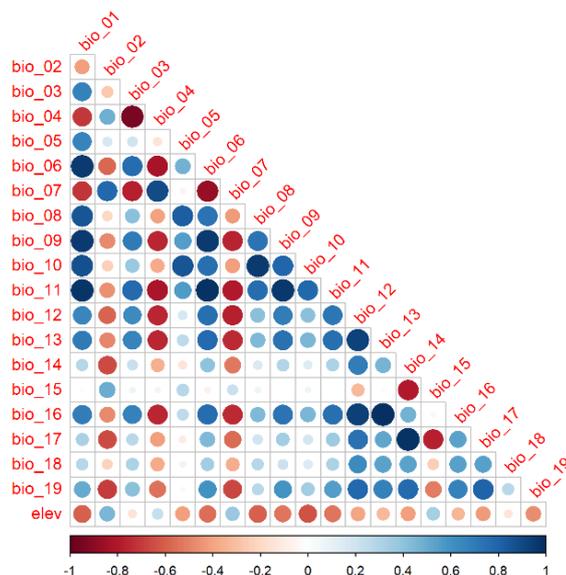


Figura 2. Matriz de correlação entre as 19 variáveis bioclimáticas e elevação na ocorrência de *M. roreri* na América tropical.

As cinco variáveis bioclimáticas selecionadas e com importância para previsão de *M. roreri* foram: bio2 = Variação diurna média (°C), bio4 = Sazonalidade da Temperatura (desvio padrão  $\times 100$ ), bio5 = Temperatura máxima do mês mais quente (°C/10), bio15 = Sazonalidade da Precipitação (Coeficiente de Variação), bio18 = Precipitação do trimestre mais quente

(mm/trimestre), além da elevação (Fick & Hijmans, 2017). As cinco variáveis bioclimáticas selecionadas afetam o desenvolvimento de *M. royeri* (Rio-Ruiz, 2004).

Dados climáticos de direção e velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) dos municípios de Tabatinga (Amazonas) e Cruzeiro do Sul (Acre) com ocorrência de *M. royeri*, foram obtidos por informações de satélite e modelo de assimilação MERRA-2 do período de 1981 a 2022 da plataforma *National Aeronautics and Space Administration/Prediction of World Wide Energy Resources* (NASA/POWER) (<http://power.larc.nasa.gov>), com resolução horizontal de 1° latitude-longitude (Monteiro *et al.*, 2018), devido aos municípios não possuírem estação meteorológica de superfície disponível. A análise da rosa dos ventos foi conduzida no software WRPLOT View versão 8.0.2.

Foram projetados os cenários potencial e das forçantes radiativas SSP1-2.6 e SSP5-8.5 das variáveis bioclimáticas selecionadas que consideram os avanços da sociedade e das preocupações com a adaptação climática que assumem um aumento na forçante radiativa relativa ao período pré-industrial de 2.6 e 8.5  $\text{W/m}^2$ , respectivamente, até o fim do século (Fick & Hijmans, 2017).

O primeiro cenário, representa caminho otimista com práticas sustentáveis, focado no desenvolvimento humano, investimento em saúde e educação, rápido crescimento econômico, transição energética e instituições bem estruturadas, com aquecimento global abaixo de 3 °C. Porém, o segundo cenário é um caminho menos sustentável de forçante radiativa de alta categoria e emissão de gases do efeito estufa (GEE), com aumento da temperatura média global de 5 °C (O'Neill *et al.*, 2016).

A escolha dos cenários futuros deveu-se às sugestões de redução da produção agrícola mundial até 2050 (Baldos *et al.*, 2020) de 10 a 25 % (FAO, 2016), principalmente em regiões pobres que provocará insegurança alimentar na redução da oferta e aumento no preço de alimentos (Rosegrant *et al.*, 2012).

A fim de reduzir as incertezas na previsão, foram utilizados 7 Modelos Climáticos Globais (GCM) dos períodos de 2041-2060 e 2081-2100 dos cenários futuros do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) fase 6. Os modelos que melhor simulam em conjunto para a América do Sul Tropical (Tabela 1) com menor viés foram: ACCESS-CM2, CMCC-ESM2, EC-Earth3-Veg, INM-CM5-0 e IPSL-CM6A-LR para precipitação FIO-ESM-2-0 e MPI-ESM1-2-HR para temperatura (Dias & Reboita, 2021, Oliveira *et al.*, 2023).

Tabela 1. Resolução horizontal (longitude x latitude) e referências dos modelos do CMIP6.

| Modelo        | Lat x Lon | Referência                     |
|---------------|-----------|--------------------------------|
| ACCESS-CM2    | 192x144   | Dix <i>et al.</i> (2019)       |
| CMCC-ESM2     | 288 x 192 | Peano <i>et al.</i> (2020)     |
| EC-Earth3-Veg | 512x256   | EC-Earth Consortium (2019)     |
| FIO-ESM-2-0   | 288x192   | Song <i>et al.</i> (2019)      |
| INM-CM5-0     | 180x120   | Volodin <i>et al.</i> (2019)   |
| IPSL-CM6A-LR  | 144x143   | Boucher <i>et al.</i> (2018)   |
| MPI-ESM1-2-HR | 384x192   | Jungclaus <i>et al.</i> (2019) |

#### 4.2.4. Procedimentos da modelagem de distribuição de *Moniliophthora roreri*

A fim de, mitigar as incertezas pela sensibilidade das variáveis e do tamanho da área geográfica de distribuição de ocorrência da praga geradas pelo emprego exclusivo de um único algoritmo e GCM, foi elaborado o Modelo Consensual de Previsão da Monilíase (MCPM).

O MCPM, foi obtido através do cálculo da média aritmética das estimativas da adequabilidade de dez modelos pelos algoritmos, a partir de cada variável bioclimática selecionada dos GCM's com *True Skill Statistic* (TSS) maior que 0.7 (Esser *et al.*, 2019; Thuiller *et al.*, 2019). O parâmetro estatístico, minimiza o erro, equilibra a precisão e a robustez para cada algoritmo na previsão potencial e futura na ocorrência de *M. roreri* na América Tropical (Figura 3).

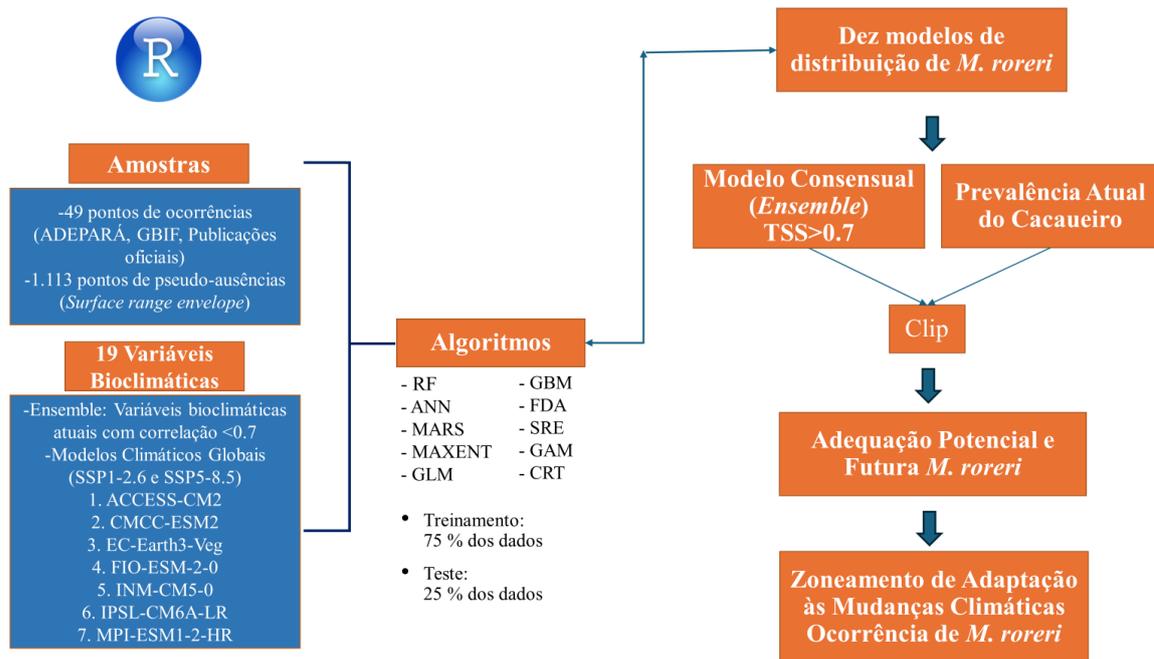


Figura 3. Resumo dos procedimentos metodológicos da modelagem de distribuição de *M. royeri* para a América Tropical.

O MCPM foi obtido pelos algoritmos *Random Forest* (RF), *Artificial Neural Network* (ANN), *Multivariate Adaptive Regression Splines* (MARS), *MaxENT* (Máxima entropia), *Generalized Linear Models* (GLM), *Generalized Boosted Regression Models* (GBM), *Flexible Discriminant Analysis* (FDA), *Surface Range Envelope* (SRE), *Generalized Additive Models* (GAM), *Classification and Regression Trees* (CRT). Os algoritmos calcularam a similaridade ambiental entre os locais de ocorrência para áreas sem ocorrência, e foram treinados com 75 % e testados com 25 % das amostras.

Para o processo de modelagem foram utilizadas as seguintes bibliotecas: *usdm* (Naimi & Araujo, 2016), *corrplot* (Friendly, 2002), *colorRamps* (Keitt, 2008), *FactoMineR* (Le *et al.*, 2008), *psych* (Revelle & Condon, 2019), *randomForest* (Breiman, 2001), além de *caret*, *factoextra*, *RStoolbox*, *raster*, *viridis*, *dismo*, *kernlab* e *rJava*. As análises foram conduzidas no software R, versão 4.2.2 (R Core Team, 2022).

#### 4.2.5 Análise dos dados

O parâmetro estatístico direto de qualidade do modelo *Under the Curve* (AUC), foi utilizado para avaliar o desempenho e capacidade discriminatória dos algoritmos em dividir a área em adequado e não adequado, e quantificar a probabilidade de classificar corretamente, e representar no eixo y a sensibilidade (presença verdadeira), e eixo x a proporção de

especificidade (ausências verdadeiras) (Radosavljevic *et al.*, 2014). Valores de 0,5 indicam que o modelo não teve melhor desempenho do que aleatório; valores entre 0,5 e 0,7 indicam mau desempenho; entre 0,7 e 0,9 indicam desempenho razoável ou moderado, enquanto valores de 0,9 a 1 indicam alto desempenho (Peterson *et al.*, 2011).

A TSS não é afetada pela prevalência e tamanho das amostras, considera e atribui pesos iguais aos erros de omissão (ausência falsa) e comissão (presença falsa) com valores entre -1 a +1, que compara o número de classificação correta, menos aquelas atribuídas aleatoriamente com valores inferiores a zero (Allouche *et al.*, 2006).

#### 4.2.6 Análises espaciais

Para análise espacial dos dados da adequação bioclimática de *M. royeri*, foi recortada as projeções dos cenários potencial e futuro do Modelo Consensual de Previsão da Monilíase (MCPM) Para o estado do Pará, a fim de, quantificar de forma detalhada pelo mapeamento, via sistema de informação geográfica (SIG), áreas sob baixo, médio e de alto risco bioclimático de introdução da praga.

Os dados não atenderam ao pressuposto de normalidade da distribuição gaussiana pelo teste de Shapiro-Wilk. A fim de comparar as estimativas de adequabilidade bioclimática potencial e futura dos cenários escolhidos do CMIP6 (Fick & Hijmans, 2017), foi aplicado teste de Kruskal-Wallis e Dunn com correção de Bonferroni, ao nível de 5 % de significância, para verificar diferenças estatisticamente significativas entre as medianas das amostras. As análises foram conduzidas no software R, versão 4.2.2 (R Core Team, 2022) e na linguagem de programação Python (<https://www.python.org/>, versão 3.7.3).

A partir da distribuição espacial da prevalência atual das áreas produtoras de cacau e da adequabilidade bioclimática potencial estimada pelo MCPM, foram mapeadas e estabelecidas as principais rotas de risco de trânsito com existência de pontos de ingresso de produtos vegetais, oriundos de regiões com presença da praga em diferentes modais do território paraense e os postos de fiscalização agropecuária através do software ArcGis 10.5.

### 4.3 Resultados e Discussão

#### 4.3.1 Condições ambientais das áreas de ocorrência da monilíase e produtoras de cacau na América Tropical

Os locais de ocorrência de *M. roreri* apresentaram médias anuais de radiação solar global, velocidade do vento, precipitação pluviométrica, temperatura máxima, média e mínima do ar de  $13,8 \pm 1,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ,  $0,95 \pm 0,46 \text{ m s}^{-1}$ ,  $2.114,19 \pm 419,51 \text{ mm}$ ,  $30,2 \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $25,2 \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $20,2 \pm 1,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente.

Ocorrências de *M. roreri* foram observadas em regiões com precipitação pluviométrica anual de 780 a 5.500 mm e temperatura do ar entre 18 a 28 °C (Phillips-Mora *et al.*, 2006). Condições quentes e secas, com umidade entre 71 a 74 %, iniciam o ciclo de *M. roreri* (Álvarez *et al.*, 2014).

A liberação dos esporos de *M. roreri* ocorre entre 10 e 15 horas em temperaturas superiores a 26 °C e umidade relativa menor que 80 % (Porrás & Gonzales, 1984), e sedimentam na copa das plantas a noite (Ram, 1989). No entanto, a germinação e penetração dos conidiósporos ocorre com umidade relativa do ar acima de 80 % na temperatura ótima de 22 a 30 °C (Evans, 1981; Orea *et al.*, 2017), sendo necessário haver água livre entre 6 e 10 horas (Campuzano, 1982).

A esporulação de *M. roreri* é correlacionada positivamente com a temperatura máxima, e as exigências microclimáticas ao longo do ciclo do fungo podem variar (Leandro-Muñoz *et al.*, 2017), devido ao longo período de estocagem (270 dias), incubação (3 a 8 semanas), latência (2 a 3 semanas) e sobrevivência do patógeno por um ano ou mais no fruto mumificado, que compreende o ciclo secundário da praga (Ram, 1989). O ciclo de *M. roreri* depende das condições locais e da suscetibilidade do hospedeiro, variando de  $60 \pm 5$  dias em clones suscetíveis e  $73 \pm 8$  dias em clones resistentes (Gramacho *et al.*, 2018).

A direção do vento no município de Tabatinga é predominantemente oriunda do Leste (E), seguida da direção Norte (N) com velocidade média de  $0,3 \text{ m s}^{-1}$  e máxima de  $0,9 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 4). No município de Cruzeiro do Sul, há predominância de ventos do Sul (S) e Norte (N) com velocidade média de  $0,2 \text{ m s}^{-1}$  e máxima de  $5,7 \text{ m s}^{-1}$ .

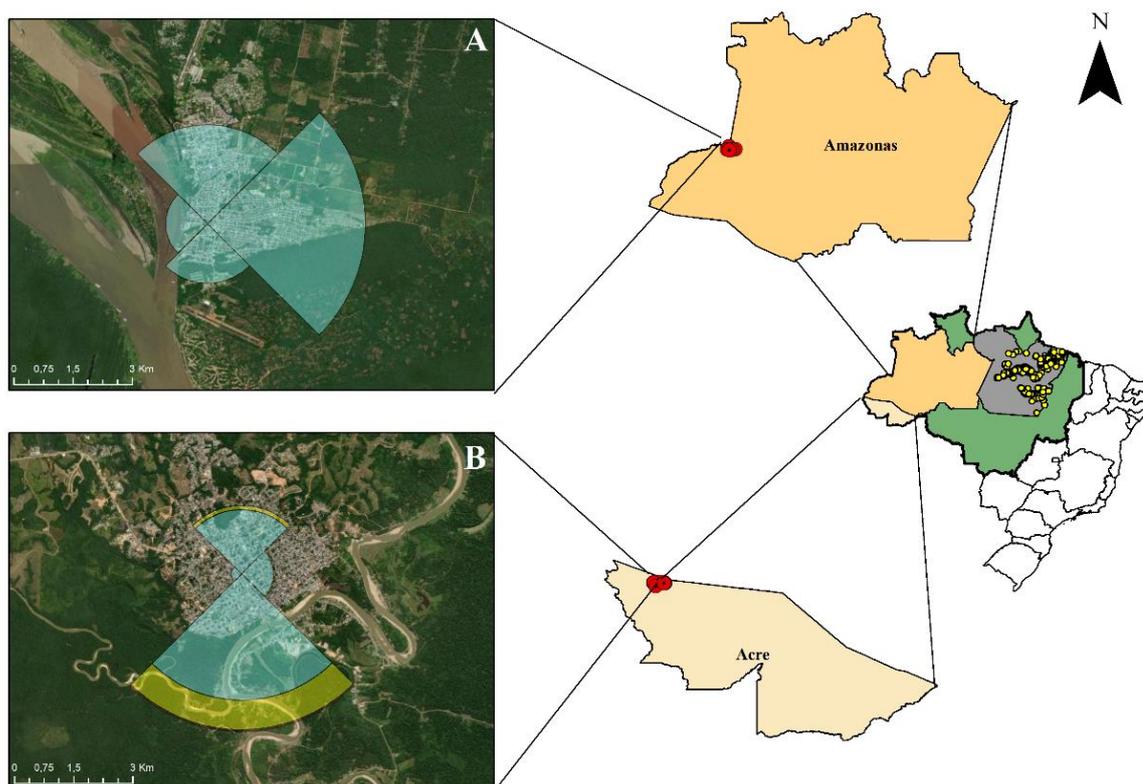


Figura 4. Rosa dos ventos no raio de 1000 m indicando a direção e velocidade do vento nos municípios de Tabatinga, no estado do Amazonas (A), e Cruzeiro do Sul, no estado do Acre (B) com ocorrência de *M. rozeri*.

Na região equatorial, os ventos alísios úmidos, que fazem parte da circulação de Hadley, sopram de leste para oeste devido à rotação da Terra (efeito Coriolis). Esses ventos sopram de sistemas de alta pressão nos hemisférios norte e sul em direção às zonas de baixa pressão, que formam a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no equador. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é uma faixa de convergência que se estende do sul da Amazônia até o Atlântico Sul, principalmente durante o verão austral, e influencia os ventos alísios da Amazônia. Quando os ventos alísios encontram cadeias montanhosas, como os Andes, a umidade é forçada a subir, resfriando-se e condensando-se (Souza *et al.*, 2016).

Os conídios, devido ao peso, podem atingir até 100 m de altitude e permanecer suspensos na atmosfera por até quatro dias, podendo ser dispersos para outras plantas a uma distância de 1 km (Evans, 1981) a 780 km, principalmente pelo vento, até a superfície de outros frutos (Sgrillo, 2010). Os esporos são removidos dos frutos mumificados no topo das árvores e transportados pela chuva de forma descendente para outros frutos e partes do cacauero (Ram, 1989).

As condições ambientais atuais nas UP's de cacau no Pará, apresentam precipitação pluviométrica, velocidade do vento, temperatura máxima, média e mínima do ar de

1.991,6±251,35 mm, 1,45±0,27 m s<sup>-1</sup>, 30,4±1,2 °C, 25,6±0,7 °C, 20,6±1,1 °C, respectivamente. Essas condições são extremamente favoráveis e estão associadas às necessidades energéticas e fisiológicas do patógeno (Orea *et al.*, 2017).

A ampla distribuição do avanço de *M. royeri* pela América tropical (Figura 1) e sua entrada no Brasil indicam locais com ocorrência de 6 a 2.802 m de altitude, com uma média de 279±330,3 m, superiores aos valores observados por Phillips-Mora *et al.* (2006), que variaram de 0 a 1.520 m. As UP's de cacau apresentam, em média, 151,3±81,5 m de altitude, variando de 0 a 601 m. Variáveis relacionadas à altitude ou topografia podem promover variações substanciais nas condições climáticas locais na região multifacetada amazônica, e sua inclusão é esclarecedora na modelagem de distribuição de espécies (Thuiller *et al.*, 2019).

#### 4.3.2 Modelagem da distribuição potencial e futura de *M. royeri* no estado do Pará

As previsões conjuntas dos algoritmos na ocorrência de *M. royeri* na América Tropical apresentaram boa capacidade. No teste, os valores de TSS variaram de 0,37 a 0,73, com uma média de 0,60±0,09. A curva AUC resultante da avaliação das previsões de presença (sensibilidade) e ausência (especificidade) no treinamento foi de 0,94±0,01 e no teste de 0,91±0,04, sendo considerada excelente. Essas medidas demonstram o alto desempenho discriminatório dos algoritmos utilizados na estimativa pelo Modelo Consensual de Previsão da Monilíase (MCPM) na grande área estudada.

O valor da AUC no teste indica que o MCPM apresenta baixa probabilidade de *overfitting* (Warren & Seifert, 2011) para discriminar entre as condições climáticas da América Tropical, realizar a transferibilidade, restrição espaço-temporal e classificação da presença e ausência de *M. royeri* baseado nos valores de adequação bioclimática.

A previsão do MCPM sugere alta probabilidade de condições adequadas potenciais para *M. royeri* no território paraense, com valores variando de 0,07 a 0,99 e média de 0,30±0,19 (Figura 5). O teste de Kruskal-Wallis identificou diferença estatisticamente significativa entre as estimativas do cenário potencial e as projeções futuras ( $p < 0.05$ ). Não houve diferença significativa entre as projeções futuras, no entanto, sugere-se maiores perdas de adequação bioclimática no caminho SSP5-8.5 com valores de 0,004 a 0,47 e média de 0,07±0,06.

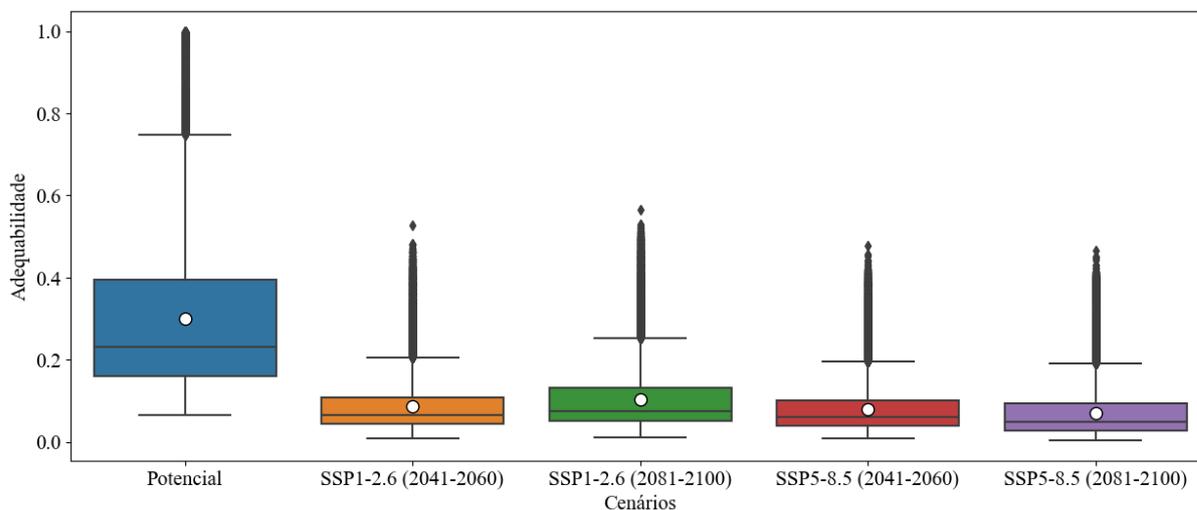


Figura 5. Adequabilidade bioclimática potencial e futura para ocorrência de *Moniliophthora roreri* no estado do Pará nos cenários com as forçantes radiativas SSP1-2.6 e SSP5-8.5 nos períodos de 2041-2060 e 2081-2100.

As projeções do MCPM revelaram distribuição potencial consideravelmente menor do que a anteriormente conhecida para a praga no Pará. A favorabilidade para *M. roreri* na região Norte deve-se à elevada umidade e temperatura do ar, com clima mais favorável de novembro a maio, picos entre abril e junho, e maior suscetibilidade do estágio de frutificação do cacau de fevereiro a julho (Moraes *et al.*, 2012).

O estado do Pará apresenta período mais chuvoso de janeiro a maio (Souza *et al.*, 2017), condição que apresenta correlação significativa com a incidência e severidade de *M. roreri* nos frutos do cacau (Rio-Ruiz, 2004). Períodos de maior precipitação favoreceram picos de frutos doentes na Costa Rica de 5 a 6 meses após o estágio de floração (Porrás & Gonzales, 1984) e a incidência de 3 a 4 meses após a ocorrência do fenômeno no Equador (Desrosiers *et al.*, 1955), sendo fator ambiental determinante de 27 epidemias de *M. roreri* (Aranzazu, 1982).

Observou-se comportamento no aumento da temperatura e diminuição da precipitação pluviométrica nas UP's de cacau do estado do Pará e nas áreas com adequação bioclimática potencial para a ocorrência de *M. roreri* sugerido pelo MCPM. A variação diurna média (bio2) apresentou diminuições de 0,66, 0,61, 0,54 e 0,19 °C nos caminhos SSP1-2.6 (2041-2060), SSP1-2.6 (2081-2100), SSP5-8.5 (2041-2060), SSP5-8.5 (2081-2100), respectivamente. Essa diminuição decorrerá do aumento das temperaturas mínimas mais acentuado do que o das máximas, o que reduz a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas diárias.

Seguindo a mesma sequência dessas projeções, a sazonalidade da temperatura (bio4) apresentou desvio padrão de 46,20, 33,85, 64,56, 109,42, e a sazonalidade da precipitação (bio15) teve coeficientes de variação de 2,34, 0,85, 2,75 e 1,95, respectivamente. A temperatura

máxima do mês mais quente (bio5) aumentou 2,79, 2,72, 4,03 e 7,63 °C nos caminhos analisados. Porém, identificou-se que a precipitação do trimestre mais quente (bio18) diminuiu 46,19, 37,36, 50,54, 53,48 mm/mês nos caminhos estudados.

#### 4.3.3 Mapeamento e quantificação das áreas bioclimáticas adequadas a invasão de *M. royeri* no estado do Pará

O Modelo Consensual de Previsão da Monilíase (MCPM) sugeriu uma ampla distribuição bioclimática potencial para *M. royeri* no território paraense, totalizando 1.238.177,9 km<sup>2</sup>, onde 25,27 % dessa área apresenta alto risco, 74,73 % médio risco e 0,002 % baixo risco de favorabilidade para estabelecimento da praga (Tabela 2).

Tabela 2. Quantificação das áreas potenciais e das zonas de adaptação as mudanças climáticas sob risco bioclimático de ocorrência de *Moniliophthora royeri* no estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

| Risco                       | Potencial |       | SSP1-2.6    |       | SSP1-2.6    |       | SSP5-8.5    |      | SSP5-8.5    |       |
|-----------------------------|-----------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|------|-------------|-------|
|                             |           |       | (2041-2060) |       | (2081-2100) |       | (2041-2060) |      | (2081-2100) |       |
| Área (km <sup>2</sup> ) / % |           |       |             |       |             |       |             |      |             |       |
| <b>Baixo</b>                | 29.3      | 0.002 | 29.3        | 0.002 | 14.6        | 0.001 | 0.0         | 0    | 29.3        | 0.002 |
| <b>Médio</b>                | 925290.9  | 74.73 | 990723.7    | 80.01 | 972394.8    | 78.5  | 995422.2    | 80.4 | 1075383.2   | 86.85 |
| <b>Alto</b>                 | 312857.7  | 25.27 | 247514.5    | 19.99 | 265746.6    | 21.5  | 242761.2    | 19.6 | 162746.4    | 13.14 |
| <b>Total</b>                | 1238177.9 | 100   | 1238267.4   | 100   | 1238156.0   | 100   | 1238183.4   | 100  | 1238158.8   | 100   |

A projeção do MCPM indica que todas as mesorregiões do estado do Pará poderão sofrer com a invasão da praga, sendo o Baixo Amazonas, Marajó e o Sudoeste paraense as áreas com maiores potenciais de estabelecimento de *M. royeri*, seguidas do Sudeste, Nordeste paraense e da Região Metropolitana de Belém (Figura 6).

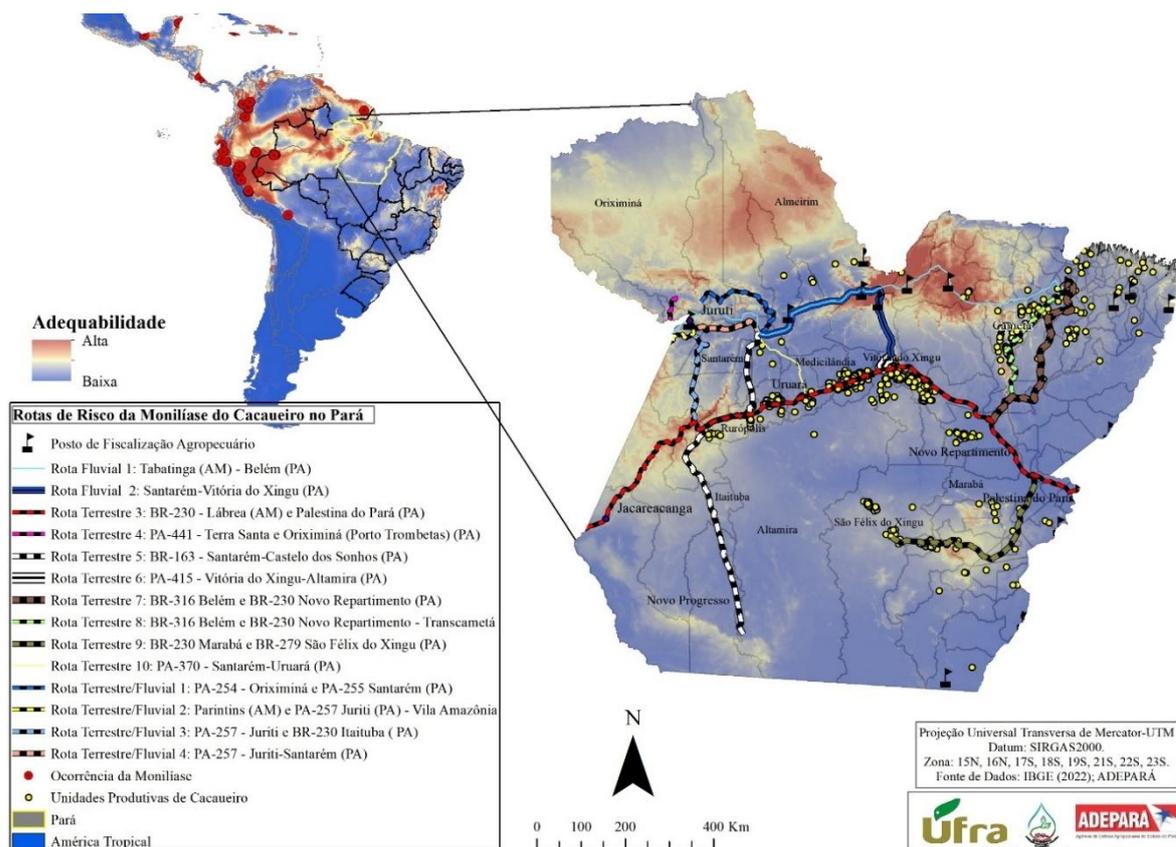


Figura 6. Distribuição da adequabilidade potencial de habitat da ocorrência de *Moniliophthora roreri* e rotas de riscos intermunicipais terrestres e fluviais prospectadas de ingresso e disseminação da monilíase no estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

As regiões de divisa com os estados do Amazonas, Roraima e Amapá, por apresentarem florestas nativas e um ambiente quente e úmido na Amazônia oriental, assim como em outras regiões do estado do Pará, favorecem o ciclo de *M. roreri* (Leandro-Muñoz *et al.*, 2017). Os componentes dos GCM's escolhidos, constituídos pela atmosfera, terra, oceano, gelo marinho, aerossol, carbono e vegetação, mostraram capacidade para representar o patossistema.

Grande parte das áreas de alto risco estimadas pelo MCPM no Baixo Amazonas e Marajó não apresentam prevalência significativa na produção atual de amêndoas de cacau no Pará (Figura 6). Porém, essas áreas podem ter hospedeiros nativos (cacauí, cupuí, macambo e cacau-jacaré), que são fontes potenciais de disseminação de *M. roreri* (Leite *et al.*, 2023) e podem se tornar áreas de expansão da cultura no futuro (Igawa *et al.*, 2022).

O modelo indicou uma adequação bioclimática potencial que varia de baixa a alta nas áreas produtoras. Recomenda-se maior atenção às prospecções nas UP's nos municípios de Rurópolis, Placas, Uruará, Medicilândia, Altamira, Anapu, Senador José Porfírio e Vitória do Xingu (Figura 6).

Esses municípios estão localizados na Transamazônica, situada na região central do estado do Pará (BR-230), que concentra 85 % da produção do cacau paraense em onze municípios ao longo de 700 km e atravessa a Floresta Amazônica. Destacam-se na produção de amêndoas os municípios de Medicilândia (55.965 t), Uruará (17.100 t), Anapu (12.156 t), Placas (10.000 t), Brasil Novo (7.230 t) e Altamira (5.426 t) (IBGE, 2023), todos favoráveis à praga.

A Transcametá, localizada na mesorregião nordeste do estado, apresenta maior favorabilidade para a ocorrência da praga em comparação com a Transamazônica, com riscos identificados principalmente nos municípios de Baião, Oeiras do Pará, Mocajuba, Cametá, Igarapé-Miri, Limoeiro do Ajuru, Abaetetuba e Moju. Municípios importantes na produção de cacau no estado, como Tomé-Açu e Acará (Nordeste), e Novo Repartimento e Tucumã (Sudeste), apresentam riscos bioclimáticos potenciais que variam de médio a alto.

A porcentagem da distribuição espacial futura de *M. royeri* estimada pelo MCPM para o território paraense nos períodos de 2041-2060 e 2081-2100 no caminho SSP1-2.6 será de 19,9 e 21,5 % com alto risco, e de 80 e 78,5 % com médio risco, respectivamente (Tabela 2).

As projeções do caminho SSP5-8.5 preveem redução e condições menos favoráveis para a praga (Figura 7). Sugere-se baixos percentuais nos cenários futuros, concordantes com menor potencial para *M. royeri* na maior parte do estado, com áreas de alto risco de 19,6 e 13,14 % e percentuais de áreas com médio risco de 80,4 e 86,85 % nos períodos de 2041-2060 e 2081-2100, respectivamente (Tabela 2).

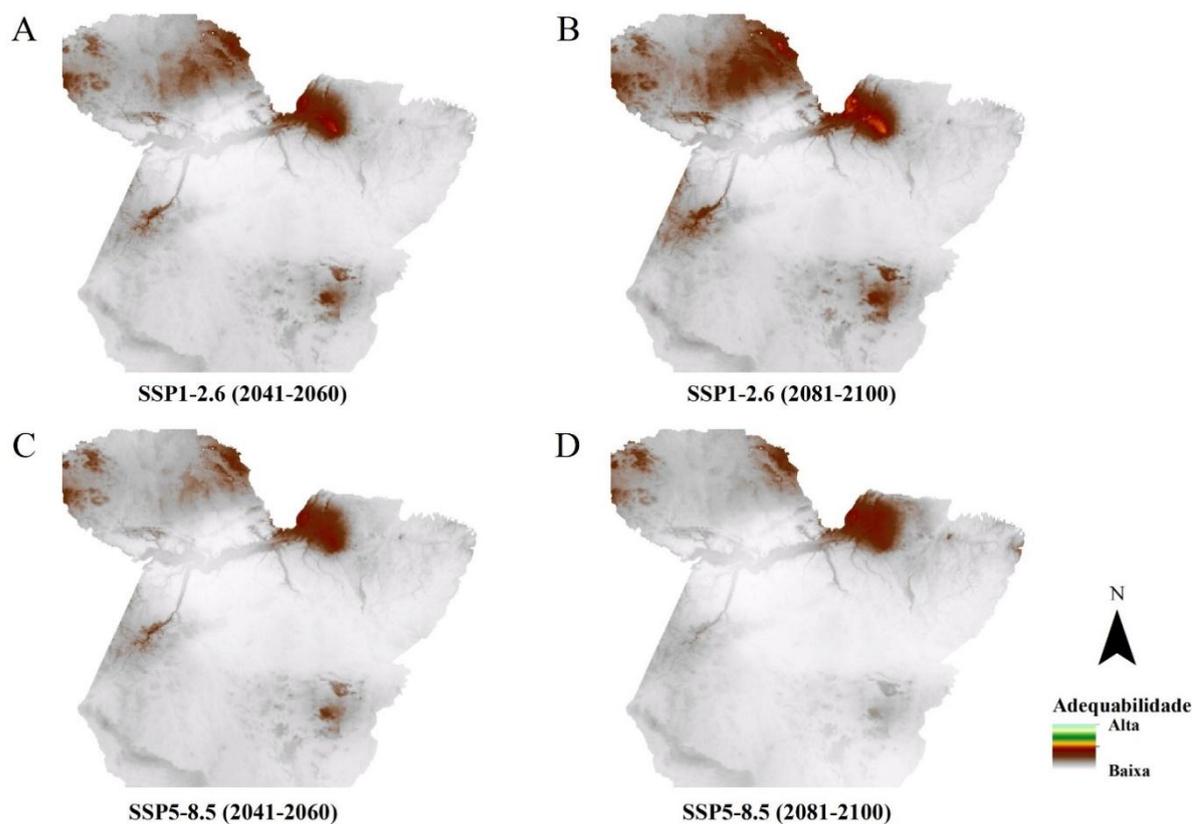


Figura 7. Distribuição das áreas de adaptação às mudanças climáticas da adequabilidade bioclimática de habitat na ocorrência de *Moniliophthora roreri* para o estado do Pará. (A) SSP1-2.6 (2041-2060), (B) SSP1-2.6 (2081-2100), (C) SSP5-8.5 (2041-2060), (D) SSP5-8.5 (2081-2100). Regiões com cores mais frias indicam baixa, e regiões com cores mais quentes indicam alta adequação bioclimática potencial.

Como o caminho SSP1-2.6 é otimista e prevê um caminho onde haverá práticas sustentáveis e menores níveis de desmatamento e aquecimento no futuro, o modelo sugere diminuição da adequação média de 5,3 % em 2041-2060 e de apenas 3,8 % em 2081-2100, com redução nas áreas consideradas de alto risco quando comparadas ao estimado para o cenário climático potencial.

Reduções mais intensas do potencial bioclimático de *M. roreri* são pronunciadas principalmente nas principais regiões produtoras de cacau no caminho SSP5-8.5, com aumento de áreas desfavoráveis de 5,7 e 12,12 % para os períodos 2041-2060 e 2081-2100, respectivamente, e diminuição significativa das áreas de alto risco (Tabela 2).

Moraes *et al.* (2012) observaram aumento de áreas em condições desfavoráveis à monilíase no território brasileiro em cenários de mudanças climáticas, principalmente em projeções de elevadas emissões de GEE no período de 2020 a 2080.

O principal fator responsável por esses resultados é a acentuada diminuição da umidade relativa esperada nos cenários futuros para a América do Sul (Anjos *et al.*, 2021). Na Colômbia,

a intensidade da monilíase e seu controle foram menos eficientes em áreas secas do que em áreas de floresta tropical (Aranzazu, 1982).

O fungo pode germinar na faixa de 10 a 40 °C, porém depende da disponibilidade de água livre no fruto para seu desenvolvimento (Ram, 1989) e de temperatura relativamente baixa e alta umidade para ocorrer infecção de frutos pelo patógeno (Evans, 1981; Aranzazu, 1982; Porras & Gonzales, 1984).

O ambiente quente e seco, com umidade relativa maior que 80 % e temperatura entre 20 e 28 °C, é propício para liberação, dispersão, infecção, penetração e esporulação do fungo (Leandro-Muñoz *et al.*, 2017), que apresenta alta viabilidade quando seco e resistência à luz ultravioleta (Ram, 1989) podendo sobreviver em temperaturas de até 55 °C (Albuquerque *et al.*, 2005).

Os cenários futuros indicam que, embora haja uma tendência de desfavorabilidade para *M. royeri*, ainda haverá áreas pontuais com problemas bioclimáticos potenciais em todas as regiões do estado (Figura 7). A Transamazônica é a região que mais sofrerá perdas em termos de adequação bioclimática, enquanto o Marajó, Baixo Amazonas e o Sudeste serão as regiões que mais ganharão.

Porém, maiores áreas não recomendadas para o plantio de cacau no futuro estarão no Sudeste paraense com previsão de redução no volume de chuva (Souza *et al.*, 2016), onde haverá perdas de produção e nas áreas de expansão da cultura (Igawa *et al.*, 2022). Poderão ocorrer mudanças na resistência do hospedeiro e no espectro de ação do patógeno, tornando necessário o desenvolvimento de variedades de cacau resistente às novas condições climáticas e *M. royeri* (Eastburna *et al.*, 2011; Moraes *et al.*, 2012).

Clones como CCN-51 e PS-1319 são amplamente utilizados nas áreas de plantio no estado do Pará, e demonstram alta produtividade, resistência à vassoura-de-bruxa e podridão-parda (Alexandre *et al.*, 2015). No entanto, ainda não existem clones no Brasil com resistência efetiva e duradoura para *M. royeri*, apenas clones com resistência parcial (Leite *et al.*, 2023).

O desenvolvimento de resistência horizontal é um processo que requer tempo, devido à natureza perene da cultura e à necessidade de seleção recorrente de fontes de resistência (Gramacho *et al.*, 2018). A Amazônia possui extensa e valiosa reserva de variabilidade genética do cacau para melhoramento da espécie (Coral, 1988).

O cacau possui resistência quantitativa à monilíase, exibindo variação na intensidade da doença entre diferentes genótipos, podendo ser alterado pelas condições ambientais (Van Der Plank, 1984; Rios-Ruiz, 2004; Phillips-Mora *et al.*, 2007). As mudanças climáticas globais podem reduzir a eficácia da resistência genética do cacau à monilíase,

resultando em mutações genéticas e no surgimento de novas raças de *M. royeri* adaptadas às novas condições climáticas (Moraes *et al.*, 2012).

As temperaturas do ar mais elevadas nos cenários futuros, combinadas com longos períodos de seca, provocam estresse no cacauieiro. A maior evapotranspiração demandada pela atmosfera, que aumenta o déficit de água no solo (Laderach *et al.*, 2013), poderá interferir na produtividade (Niether *et al.*, 2018), afetar a virulência e capacidade de dispersão do patógeno.

Os sistemas agroflorestais são uma estratégia adaptativa (Vliet & Giller, 2017) para reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência dos cacauicultores da Amazônia em cenários de mudanças climáticas (Zomer *et al.*, 2016). No entanto, o microclima criado por esses sistemas de produção pode favorecer o desenvolvimento de *M. royeri* no futuro, cujos impactos das mudanças climáticas nos ecossistemas são complexos e requerem a consideração de diversos fatores relacionados à emissão de GEE (Helm, 2020).

#### 4.3.4 Rotas de trânsito com vias de ingresso e vulnerabilidade na dispersão de *M. royeri* no território paraense

Os conídios são viáveis por um ano ou mais na presença ou ausência de um hospedeiro (Ram, 1989), e podem ser disseminados a curtas distâncias pelo vento e a grandes distâncias entre regiões e países pela intervenção humana, principalmente pelo transporte ilegal de frutos (Orea *et al.*, 2017; Brasil, 2024).

Nas áreas consideradas de alto risco para a ocorrência da praga, além de compreender os espaços geográficos de divisa que permitem a entrada em áreas com hospedeiro (Figura 6), há um intenso trânsito de pessoas, produtos e equipamentos que ameaçam a biossegurança do Pará, pois podem veicular a praga através de frutos e sementes infectadas de cacau, cupuaçu e outros artigos regulamentados (Pará, 2021).

A partir do mapeamento da adequabilidade e do risco associado ao transporte de material vegetal doente ou aparentemente sadio, foram estabelecidas 17 rotas ativas de risco como prováveis vias de trânsito pelo contato direto e indireto com material veiculador de *M. royeri* na região Norte do Brasil, sendo 3 fluviais, 10 terrestres e 4 terrestre/fluvial (Figura 8).

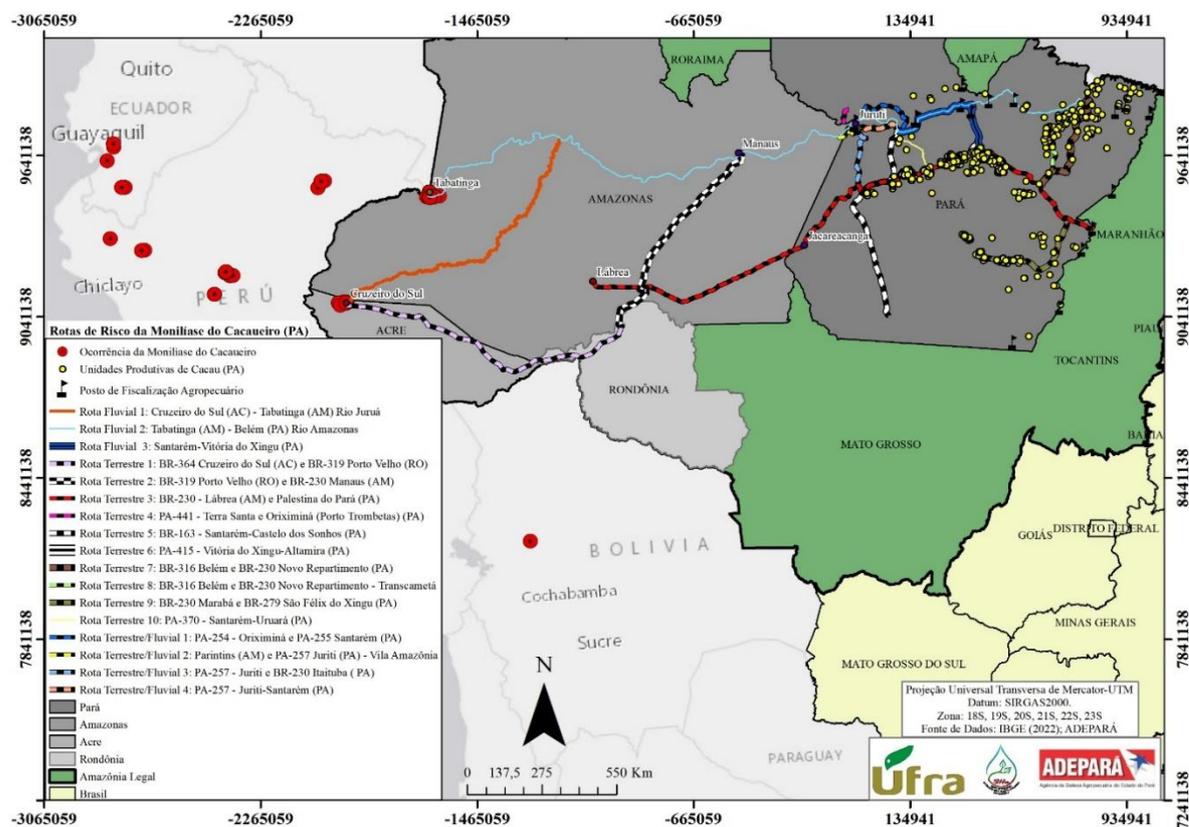


Figura 8. Rotas de riscos terrestres e fluviais interestaduais e intermunicipais de disseminação da monilíase do cacau na região norte do Brasil, Amazônia Legal.

As principais rotas de entrada de material disseminador da praga no Pará localizam-se na região noroeste, em Jacareacanga pela BR-230, e em Juruti, Terra Santa e Oriximiná por meio dos modais terrestre e fluvial através do rio Amazonas (Figura 6). Estas rotas possuem grandes fluxos de embarcações com tráfego humano e comercial que conectam os estados do Amazonas e Pará, com passagens em Santarém e Monte Alegre, rumo a Belém, e possuem postos de fiscalização agropecuária ao longo da rota (Figura 8).

Foram identificadas 6 rotas interestaduais na região Norte. A primeira, partindo de Cruzeiro do sul no Acre, que segue pelo Alto rio Juruá até sua foz no rio Amazonas em direção a Manaus, onde há intenso comércio de amêndoas de cacau e sacarias de farinha de mandioca para o Pará (Rota fluvial 1). Pela BR-364 até a entrada no território paraense por Jacareacanga (Rota Terrestre 1), e através da BR-230 desde Lábrea (AM), percorrendo toda Transamazônica até Palestina do Pará (PA) (Rota Terrestre 3).

A Rota fluvial 2, que liga Tabatinga (AM) a Juruti e Oriximiná (PA) pelo rio Amazonas tem aproximadamente 2.000 km de extensão, e apresenta potencial capacidade no trânsito de dispersar *M. royeri*, pois o modal fluvial é um dos principais meios de locomoção nas regiões ribeirinhas usada pelos amazônidas. Já na Rota Terrestre/Fluvial 2 que liga Parintins (AM) a

Juruti (PA) pela PA-257, está localizada a Vila Amazônia, que abriga grandes áreas com cultivo de cupuaçu e registra intenso trânsito entre os dois estados.

No Pará, foram identificadas 10 rotas intermunicipais (Figura 6), destacando-se Juruti com via de acesso (PA-257) para Itaituba (BR-230) (Rota Terrestre/Fluvial 3), Santarém (Rota Terrestre/Fluvial 4) e Terra Santa a Oriximiná (Porto Trombetas) (Rota Terrestre 4) pela PA-441, além da Rota Terrestre/Fluvial 1 de Oriximiná (PA-254), que também tem destino para Santarém através da PA-255.

O município de Santarém, localizado na região noroeste do Pará, recebe embarcações das áreas com foco de *M. royeri* e que despacham diversos materiais e pessoas com bagagens para todas as demais regiões do Pará pela BR-163 (Rota Terrestre 5) e a Transuruará (Rota Terrestre 10) pela PA-370 que liga Santarém para o município de Uruará que são vias importantes de escoamento para a Transamazônica (BR-230).

A Rota Fluvial 3, que conecta Santarém a Vitória do Xingu por embarcação e a Rota Terrestre 6 (PA-415), apresentam transporte de pessoas e mercadorias com destino a Altamira (BR-230), sendo vias de trânsito que requerem atenção especial do controle oficial.

Observa-se que, a partir dessas principais vias de trânsito como potenciais corredores de passagem para a entrada de *M. royeri*, a malha logística territorial converge para a Rodovia Transamazônica (BR-230), que abriga as principais áreas produtoras de amêndoas de cacau no Pará (Figura 8).

Na região sudeste, destaca-se a possível entrada da praga pela BR-316 em Belém e a BR-230 de Novo Repartimento-Transcarnetá (Rota Terrestre 7 e 8), onde há um significativo quantitativo de UP's de cacau plantadas na região nordeste do Pará. Ainda no Sudeste paraense, o município de Marabá (BR-230) pode servir de passagem da praga para São Félix do Xingu através da BR-279 (Rota Terrestre 9) que apresenta uma forte cadeia produtiva de amêndoas, composta por cooperativas que fomentam e fortalecem a economia local da cadeia cacauífera no estado.

A ocorrência na Guiana Francesa (Figura 1) é um alerta de rota de alto de invasão pelo Amapá que é uma região de ingresso de diversas pragas como a vassoura-de-bruxa da mandioca, mosca-da-carambola, bicudo da acerola e a broca da mangueira.

Há evidências do alto risco potencial de disseminação da praga no trânsito de material infectado pela mediação humana, que após a construção de uma rodovia entre o noroeste do Peru e Equador em 1988, *M. royeri* foi constatada no Peru, localizado na região leste a Cordilheira dos Andes, que era considerada barreira natural de contenção da praga para a Amazônia (Leite *et al.*, 2023).

Sacarias, ferramentas, roupas, calçados, plásticos, itens pessoais e material propagativo vegetal de hospedeiros e não hospedeiros, além do próprio corpo humano (Gramacho *et al.*, 2018), podem transportar os esporos de *M. royeri* através de rotas ativas de disseminação passiva em diversos municípios do Pará e nos estados que compõem a Amazônia Legal brasileira (Figura 8).

No estado do Pará, é proibida a entrada, o trânsito e o comércio de materiais vegetais (frutos, sementes, mudas, hastes) das espécies dos gêneros *Theobroma* e *Herrania* bem como de outras plantas hospedeiras de *M. royeri* provenientes de estados com ocorrência da praga, podendo o vendedor, o transportador e o adquirente da carga serem autuados, ter a carga apreendida e estar sujeitos a outras medidas legais (Pará, 2024).

Para o trânsito intermunicipal e/ou interestadual de sementes, mudas, frutos ou quaisquer partes propagativas de espécies vegetais hospedeiras, o transportador deve comprovar a origem através de nota fiscal e termo de conformidade. As partidas de amêndoas de cacau fermentadas e secas devem ser acondicionadas em sacarias novas e acompanhadas do certificado de classificação do produto como Tipo 1 ou Tipo 2, além da nota fiscal da sacaria (Pará, 2021; Pará, 2022). A fermentação dificulta o ciclo de *M. royeri* (Estrela Junior *et al.*, 2023) com a temperatura da massa de amêndoas variando entre 45 e 50 °C (Brito, 2000).

O transporte fluvial irregular de portos privados e clandestinos, pistas de pouso, fluxo migratório intenso, e trânsito agropecuário terrestre, aéreo e hidroviário, além da comercialização de produtos em feiras urbanas, são vias ativas potenciais para a introdução e disseminação de *M. royeri* no Pará. Outro desafio do controle oficial é o quebraimento comunitário do cacau nas comunidades ribeirinhas. Esses fatores dificultam o combate à praga na região amazônica, e o trabalho de erradicação pode variar desde regiões que comercializam o cacau, até áreas onde os próprios produtores erradicam as plantas voluntariamente devido à falta de finalidade comercial do cacau em determinadas regiões.

A praga foi detectada no fundo de quintal de residências e chácaras na área urbana dos municípios de Cruzeiro do Sul e Mâncio Lima, no estado do Acre, e em comunidades isoladas pela floresta amazônica nas áreas de várzeas do Rio Solimões, em Tabatinga e Benjamin Constant, no Amazonas (Amazonas, 2022; Brasil, 2024). Nas áreas de detecção, foram observadas plantas acima de 50 anos, de até 7 m de altura, pequenos plantios de produtores com pouca tradição agrícola, altamente afetados pela vassoura-de-bruxa, e um microclima de alta umidade e sombreamento que favorecem o ciclo do patógeno (Leite *et al.*, 2023).

A potencial adequabilidade bioclimática do Pará que favorece o patógeno representa uma ameaça à produção de cacau, semelhante à observada em outros países da América tropical

onde a doença se disseminou rapidamente (Rios-Ruiz, 2004). A falta de estudos sobre patógenos antagonistas de *M. royeri* no território brasileiro, justificada pela ausência da praga, pode agravar a doença desde sua introdução (Moraes *et al.*, 2012), tornando necessária a convivência com a praga.

Práticas integradas eficazes para o manejo de doenças fúngicas no cacau e na prevenção de *M. royeri* incluem: monitoramento regular, higienização de ferramentas, uso de barreiras físicas, manejo da sombra com podas regulares e drásticas para rebaixamento da copa, renovação dos pomares, aplicação de calda sulfocálcica ou bordalesa e fungicidas no período crítico de infecção, tratamento de casqueiros com solução de ureia a 15 %, melhoria da adubação, remoção semanal e amontoa de frutos, além de uso de variedades resistentes (Brasil, 2024).

A praga pode ser confundida com as doenças fúngicas vassoura-de-bruxa, podridão parda, antracnose e o cancro de *Lasiodiplodia* (Siviero *et al.*, 2022). A exposição do fruto afetado por 48 horas em câmara úmida é suficiente para distinguir a infecção por *M. royeri*, (Leite *et al.*, 2023) que pode auxiliar no trabalho de campo em casos suspeitos.

A comercialização das amêndoas do Pará, com a possível entrada de *M. royeri* em regiões onde a doença ainda não está presente, como o sul do estado da Bahia, enfrentará desafios. A Bahia possui infraestrutura de beneficiamento e exportação de produtos “brutos” como massa, manteiga e pó oriundos das amêndoas de cacau, e conta com moageiras multinacionais como Barry Callebaut, Cargill e Olam, além da indústria chocolateria em Ilhéus (Dantas *et al.*, 2020).

A verticalização da cadeia produtiva cacauera no Pará deverá ser intensificada para minimizar problemas na comercialização das amêndoas, caso ocorra uma mudança no status fitossanitário da praga quarentenária para a classificação de presente no Brasil. É importante considerar a importação de cacau de áreas produtoras, como a África Ocidental, que, no entanto, tem enfrentado condições climáticas adversas e doenças em plantios velhos, resultando no aumento dos preços do cacau no mercado financeiro (Monié & Remane, 2022).

Quando há ocorrência oficial de *M. royeri*, a erradicação do patógeno é dificultada devido à alta adaptabilidade e agressividade da praga, que parece depender menos de variáveis climatológicas com progressão rápida no tempo e espaço (Rios-Ruiz, 2004). Após o trabalho de erradicação e a última detecção da praga, se não houver novas detecções de frutos infectados durante duas safras da cultura, as ações fitossanitárias de contingência na área sob quarentena podem ser concluídas e a praga considerada erradicada (Brasil, 2020).

A modelagem e o mapeamento de vulnerabilidades climáticas e territoriais, simplificam o ambiente, comunicam resultados, potencializam o diálogo e compartilham responsabilidades (Garrett *et al.*, 2021), contribuindo para a biossegurança e o desenvolvimento sustentável da produção cacaueteira e outros hospedeiros suscetíveis na Amazônia oriental.

Estes são mecanismos essenciais para apoiar planos nacionais e estaduais emergenciais, alocação de recursos, análise de impactos locais e globais, e a tomada de decisões para ações de prevenção e erradicação de *M. royeri* na defesa fitossanitária do território paraense. Além disso, podem mitigar impactos negativos e desequilíbrios na cadeia produtiva do cacau, evitando prejuízos aos agricultores, que podem enfrentar perdas socioeconômicas e ambientais na restrição da comercialização dos produtos pela quarentena.

A intensificação de medidas de controle no trânsito, visando detectar material suspeito, especialmente de regiões onde a monilíase ocorre, é urgente. Ações de educação fitossanitária também devem ser priorizadas em portos, aeroportos, rodoviárias, barreiras móveis e postos de controles nas rodovias, fronteiras e divisas vulneráveis. Caso não sejam implementadas, a entrada da praga no Pará será apenas uma questão de tempo.

#### 4.4 Conclusões

O modelo de distribuição de *M. royeri* indica elevado potencial bioclimático em todas as mesorregiões do estado do Pará com alto risco de invasão nos municípios de Juruti, Terra Santa, Oriximiná e Jacareacanga.

As regiões de prevalência na produção de cacau no Pará apresentam de baixa a alta adequação bioclimática potencial para ocorrência de *M. royeri*.

Haverá aumento das áreas com potencial bioclimático de médio a baixo risco para *M. royeri* no território paraense nas regiões produtoras de cacau nos cenários de mudanças climáticas, com maior redução no caminho SSP5-8.5 do que o previsto para SSP1-2.6.

A transamazônica é a região que mais sofrerá perdas de adequabilidade bioclimática, com menor risco a praga e sugestão de maior resiliência no Marajó, Baixo Amazonas e Sudeste Paraense.

O mapeamento espaço-temporal dos ambientes e rotas de trânsito podem subsidiar tomadas de decisão estratégicas no controle oficial da praga no território paraense, garantindo a fitossanidade e o desenvolvimento sustentável da cadeia produtiva do cacau, além de informar sobre a biodiversidade e os ecossistemas diante das mudanças climáticas projetadas para Amazônia oriental.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CMIP e aos demais centros que disponibilizaram os dados para o estudo.

## REFERÊNCIAS

Abdulai, I., Vaast, P., Hoffmann, M.P., Asare, R., Jassogne, L., Piet, V.A., Reimund, P.R., Graefe, S., 2018. Cocoa agroforestry is less resilient to sub-optimal and extreme climate than cocoa in full sun. *Glob. Chang. Biol.* 24, 273–286. <https://doi.org/10.1111/gcb.13885>.

Albuquerque, P.S.B., Bastos, E.D.M.N.L., Silva, S.D.V.M., 2005. Doenças do cacauzeiro (*Theobroma cacao*). In: Kimati, H., Amorim, L., Rezende, J.A.M., Bergamin Filho, A., Camargo, L.E.A. (Ed.). *Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 2, 151–163.

Alexandre, R.S., Chagas, K., Marques, H.I.P., Costa, P.R., Cardoso Filho, J., 2015. Caracterização de frutos de clones de cacauzeiros na região litorânea de São Mateus, ES. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 19 (8), 785-790. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p785-790>.

Allouche, O., Tsoar, A., Kadmon, R., 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *J. Appl. Ecol.* 43, 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>.

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Goncalves, J.L. de M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil, *Meteorol. Z.* 22 (6), 711-728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

Álvarez, J.C., Martínez, S.C., Coy, J., 2014. Estado de la moniliasis del cacao causada por *Moniliophthora roreri* en Colombia. *Acta Agron.* 63, 388-399. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n4.42747>.

Amazonas, Agência de Defesa Agropecuária e Florestal do Estado do Amazonas, 2022. Portaria nº 393 de 21 de dezembro de 2022. [Dispõe sobre a recente detecção da praga quarentenária *Moniliophthora roreri* - Monilíase do Cacau no Estado do Amazonas nos municípios de Tabatinga/AM e Benjamin Constant/AM, fronteira com os países de Peru e Colômbia (Tríplice fronteira). *Diário oficial do Estado*, 21 dez. 2022. [file:///C:/Users/vande/Downloads/diario\\_am\\_2022-12-21\\_completo.pdf](file:///C:/Users/vande/Downloads/diario_am_2022-12-21_completo.pdf). (accessed 7 February 2024).

Anjos, L.J.S., Souza, E.B. de, Amaral, C.T., Igawa, T.K., Toledo, P.M. de, 2021. Future projections for terrestrial biomes indicate widespread warming and moisture reduction in forests up to 2100 in South America. *Glob. Ecol. Conserv.* 25, e01441. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01441>.

Aranzazu, H.F., 1982. La moniliasis del cacao. In: Tercera Reunion del Comité Consultivo de Sanidad Vegetal, 3. Caracas. Anais. pp. 22-26.

Baldos, U.L.C., Fuglie, K.O., Hertel, T.W., 2020. The research cost of adapting agriculture to climate change: A global analysis to 2050. *Agric. Econ.* 51 (2), 207-220. <https://doi.org/10.1111/agec.12550>.

Boucher, O., Denvil, S., Levavasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M., Meurdesoif, Y., Cadule, P., Devilliers, M., Ghattas, J., Lebas, N., Lurton, T., Mellul, L., Musat, I., Mignot, J., Cheruy, F., 2018. IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20180803. Earth System Grid Federation [online]. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1534>

Brazil, Ministério da Agricultura e Pecuária. 2024. Diálogos para prevenção da monilíase. Secretaria de Defesa Agropecuária. Departamento de Serviços Técnicos. Setor de Educação Sanitária – Brasília, DF: MAPA/DAS/DTEC/SEDUC/2024. pp. 165. il. color.

Brazil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2020. Instrução Normativa nº 112, de 11 de dezembro de 2020. [Institui o Plano Nacional de Prevenção e Vigilância de *Moniliophthora roreri* - PNPV/Monilíase]. Diário Oficial da União, seção 1, 15 dez. 2020. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sanidade-animal-e-vegetal/sanidade-vegetal/planos-de-contingencia-pragas-ausentes/INSTRUONORMATIVAN112DE11DEDEZEMBRODE2020.pdf>. (accessed 9 July 2024).

Brazil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2021). Portaria MAPA nº 249, 4 de agosto de 2021. [Declara estado de emergência fitossanitária relativo ao risco iminente de introdução da praga quarentenária ausente *Moniliophthora roreri* nos estados do Acre, Amazonas e Rondônia]. Diário Oficial da União, seção 1, 06 ago. 2021. <https://portal.in.gov.br/web/dou/-/portaria-mapa-n-249-de-4-de-agosto-de-2021-336635127>. (accessed 6 February 2024).

Breiman, L., 2001, *Random Forests*, *Machine Learning* 45 (1), 5-32.

Brito, E.S., 2000. Estudo de mudanças estruturais e químicas produzidas durante a fermentação, secagem e torração de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao* L.) e propostas de tratamento para o melhoramento de sabor. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas.

Campuzano, H., 1982. Influencia de la temperatura y la humedad en la germinación de esporas de *Monilia roreri*. In: International Cocoa Research Conference, 8, Proceedings. Cocoa Producer Alliance, 493-497.

Coral, F., 1988. Asesoría técnica em mejoramiento genético del cacao al proyecto AD/PER/86/458: Desarrollo de la producción del cacao en la región de Tingo María. Peru. Reporte Técnico.

Dantas, P.C.C., Pires, M. de M., Uetanabaro, A.P.T., Gomes, A. da S., Pereira, A.C., 2020. O mercado de chocolate no sul da Bahia: estrutura, produção e comercialização. *Desenvolv. Reg. Debate*. 10, 56-75. doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v10i0.2373>.

Desrosiers, R., Von Buchwald, A., Bolaños, C., 1955. Effect of rainfall on the incidence of *Monilia* pod rot in Ecuador. *FAO, Plant Prot. Bull.* 3, 161-164. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.074>.

Dias, C.G., Reboita, M.S., 2021. Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America. *Rev. Bras. Geogr. Fís.* 14 (3), 1282-1295. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1282-1295>.

Dix, M., Bi, D., Dobrohotoff, P., et al. 2019. CSIRO-ARCCSS ACCESS-CM2 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191108. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4271>.

Eastburna, D.M., Mcelroneb, A.J., Bilginc, D.D., 2011. Influence of atmospheric and climatic change on plant–pathogen interactions. Influence of atmospheric and climatic change on plant–pathogen interactions. *Plant Pathol.* 60, 54-69. doi: 10.1111/j.1365-3059.2010.02402.x.

Ec-Earth Consortium (EC-Earth). 2019. EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200225. Earth System Grid Federation [online]. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4706>.

Esser, L.F., Saraiva, D.D., Jarenkow, J.A., 2019. Future uncertainties for the distribution and conservation of *Paubrasilia Echinata* under climate change. *Acta Bot. Bras.* 33, 770-776. <https://doi.org/10.1590/0102-33062019abb0173>.

Estrela Junior, A. da S., Solís, K., Sobrinho, C.C. de M., Garzón, A.I., Peñaherrera, S., Vera, D.I., Bonilla, J.L.S., Moraes, W.B., Laranjeira, D., Gramacho, K.P., 2023. Viability of *Moniliophthora roreri* on Cocoa Beans Under Microfermentation and Long-Term Survival on Carrier Materials. *Plant Dis.* 107 (11). <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-22-2630-RE>.

Evans, H.C., 1981. Pod rot of cacao caused by *Moniliophthora* (*Monilia*) *roreri*. *Phytopathol. Pap.* 24, 44.

Fick, S.E., Hijmans, R.J., 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37 (12) 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016. Climate is changing. Food and agriculture must too. <http://www.fao.org/3/a-i5758e.pdf>. (accessed 26 May 2023).

Garrett, K.A., Nita, M., Wolf, E.D. de, Esker, P.D., Gomez-Montano, L., Sparks, A.H., 2021. Plant pathogens as indicators of climate change. *Clim. Change.* 499-513. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00024-4>.

GBIF - Global Biodiversity Information Facility, 2023. Database: *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans - GBIF Occurrence Download [Internet]. <https://doi.org/10.15468/dl.ae9hph>. (accessed 25 July 2023).

Gramacho, K.P., Albuquerque, P., Novais, C.B., Lopes, U.L., Sobrinho, C.C.M., 2018. *Moniliophthora roreri* (Cif & Par.) (Agaricales: Marasmiaceae) In: Priorização de Pragas Quarentenárias ausentes no Brasil. Fidelis, E.G., Lohmann, T.R., Silva, M.L. da, Parizzi, P., Laranjeira, F.F., (Eds.). Brasília, DF: Embrapa. pp. 497.

Helm, D., 2020. The Environmental Impacts of the Coronavirus. *Environ. Resour. Econ.*, 76 (1), 21-38. doi: 10.1007/s10640-020-00426-z.

Igawa, T.K., Toledo, P.M. de, Anjos, L.J.S., 2022. Climate change could reduce and spatially reconfigure cocoa cultivation in the Brazilian Amazon by 2050. *PLOS One*, 17 (1), e0262729. doi: 10.1371/journal.pone.0262729.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola 2023. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>. (accessed 26 June 2024).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Produção Agrícola Municipal 2022. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>. (accessed 4 August 2023).

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability 2022. Geneva: IPCC. pp. 3670.

Jesus Junior, W.C., Bergamin Filho, A., Amorim, L., Vale, F.X.R., 2003. Sistemas de auxílio à tomada de decisão no manejo de doenças de plantas. *Rev. An. Patol. Plant.* 11, 133-193.

Jungclaus, J., Bittner, M. Wieners, K.H., et al. 2019. MPI-M MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190710. Earth System Grid Federation. doi: 10.22033/ESGF/CMIP6.6594.

Keitt, T.H., 2008. Coherent ecological dynamics induced by large scale disturbance. *Nature* 454, 331-334.

Laderach, P., Martinez-Valle, A., Schroth G., Castro N., 2013. Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world's leading producer countries, Ghana and Côte d'Ivoire. *Clim. Change.* 119, 841-854. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0774-8>.

Le, S., Josse, J. Husson, F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software.* 25 (1), 1-18. <https://www.jstatsoft.org/v25/i01/>

Leandro-Muñoz, M.E., Tixier, P., Germon, A., Rokotobe, V., Phillips-Mora, W., Maximova, J., Avelino, J., 2017. Effects of microclimatic variables on the symptoms and signs onset of

*Moniliphthora roreri*, cau sal agent of *Moniliophthora* pod rot in cacao. PLOS One, 12 (10), e01844638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.01844638>.

Leite, R.S.V., Albuquerque, P.S.B. de, Gasparotto, L., Bravin, M.P., Amorim, J.F.F. de, Brito, A.M. de, Ferreira, A.F.T.A.F., 2023. Monilíase do cacauzeiro e cupuaçuzeiro. Embrapa Amazonas. Comunicado Técnico 166. pp.17.

Marco Júnior, P. de, Nóbrega, C.C., 2018. Evaluating collinearity effects on species distribution models: An approach based on virtual species simulation. PLOS One, 13 (9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202403>.

Michael Friendly, 2002. Corrgrams: Exploratory displays for correlation matrices. The American Statistician, 56, 316-324.

Monié, F., Remane, M.A., 2022. A África Ocidental diante das mudanças climáticas globais: impactos, mobilizações e políticas públicas. Entrevista com Djiby Sambou. Boletim GeoÁfrica, 1 (1), 16-24. <https://doi.org/10.59508/geoafrica.v1i1.51600>.

Monteiro, L.A., Sentelhas, P.C., Pedra, G.U., 2018. Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. Int. J. Climatol. 38, 1571-1581. doi: 10.1002/joc.5282.

Moraes, W.B., Jesus Júnior, W.C. de, Peixoto, L. de A., Moraes, W.B., Furtado, E.L., Silva, L.G. da, Cecílio, R.A., Alves, F.R., 2012. An analysis of the risk of cocoa moniliasis occurrence in Brazil as the result of climate change. Summa Phytopathol. 38 (1), 30-35. <https://doi.org/10.1590/S0100-54052012000100005>.

Naimi, B., Araujo, M.B. 2016. sdm: uma plataforma R reproduzível e extensível para modelagem de distribuição de espécies, Ecografia, 39, 368-375. doi: 10.1111/ecog.01881

Niether W., Armengot L., Andres C., Schneider M., Gerold G., 2018. Shade trees and tree pruning alter throughfall and microclimate in cocoa (*Theobroma cacao* L.) production systems. Ann. For. Sci. 75. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0723-9>.

O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Vuuren, D.P.V., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B.M., 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geosci. Model Dev. 9, 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.

Oliveira, D.M. de, Ribeiro, J.G.M., Faria, L.F. de, Reboita, M.S., 2023. Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico. Rev. Bras. Geogr. Fís. 16 (1), 116-133. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p116-133>.

Orea, M.D.D., Romero-Cortes, T., Lopez-Perez, P.A., Espana, V.H.P., Ramirez-Lepe, M., Cuervo-Parra, J.A., 2017. Current Status of Cocoa Frosty Pod Rot Caused by *Moniliophthora roreri* and a Phylogenetic Analysis. Plant Pathol. J. 16, 41-53. doi: 10.3923/ppj.2017.41.53.

Pará, Agência de Defesa Agropecuária do Pará, 2021. Portaria n° 7.481, de 18 de novembro de 2021. [Dispõe sobre o trânsito a cultura do cacauzeiro e do cupuaçuzeiro no estado do Pará, e dá outras providências correlatas]. Diário oficial do Estado, 19 nov. 2021. <https://www.ioepa.com.br/portal/#3>. (accessed 7 February 2024).

Pará, Agência de Defesa Agropecuária do Pará, 2022. Portaria n° 7.833 de 05 de dezembro de 2022. [Dispõe sobre a cultura do cacauzeiro e do cupuaçuzeiro no estado do Pará, e dá outras providências correlatas]. Diário oficial do Estado, 06 dez. 2022. <https://www.ioepa.com.br/portal/#3>. (accessed 27 June 2024).

Pará, Governo do Estado do Pará, 2024. Decreto n° 3.954, de 28 de maio de 2024. [Dispõe sobre a entrada, o trânsito e o comércio de materiais vegetais (frutos, sementes, amêndoas, mudas, hastes) das espécies dos gêneros *Theobroma* e *Herrania*, no Estado do Pará]. Diário oficial do Estado, 28 mai. 2024. <https://www.ioepa.com.br/portal/#2>. (accessed 27 June 2024).

Peano, D., Lovato, T., Materia, S., 2020. CMCC-ESM2 modelo de saída preparado para CMIP6 LS3MIP land-hist. Versão 20200715[1]. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.13204>.

Peterson, A.T., Soberón, J., Pearson, R.G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., Araújo, M.B., 2011. Ecological niches and geographic distributions. Princeton Univ. Press. pp. 314. doi: 10.1515/9781400840670.

Phillips-Mora, W., Aime, M.C., Wilkinson, M.J., 2007. Biodiversidade e biogeografia do patógeno do cacau (*Theobroma cacao*) *Moniliophthora roreri* na América tropical. Plant Pathol. 56 (6), 911-922. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01646.x>.

Phillips-Mora, W., Coutiño, A., Ortiz, C.F., López, A.P., Hernández, J., Aime, M.C., 2006. First report of *Moniliophthora roreri* causing frosty pod rot (moniliasis disease) of cacao in Mexico. Plant Pathol. 55, 584. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01418.x>.

Porras, V.H., Gonzales, L.C., 1984. Epifitiología de la moniliasis del cacao (*Monilia roreri*) y su relación con el ciclo de producción en la zona de Matina, Costa Rica. Fitopatol., 19, 78-84.

R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Version 4.2.2 [software]. <https://www.R-project.org/>. (accessed 18 August 2023).

Radosavljevic, A., Anderson, R.P., 2014. Making better Maxent models of species distribution: complexity, overfitting and evaluation. J. Biogeogr. 41, 629-643. doi: 10.1111/jbi.12227.

Ram, A., 1989. Biology, Epidemiology and Control of Moniliasis (*Moniliophthora roreri*) of cacao. Imperial College. PH.D. Thesis. University of London.

Ram, A., Valle, R.R., Gardini, E.A., 2004. Monília do cacauzeiro. São Paulo: Fundação Cargill. pp. 36.

Revelle, W., Condon, D.M., 2019. Reliability from alpha to omega: A tutorial. *Psychological Assessment*, 31, 12, 1395-1411. <https://doi.org/10.1037/pas0000754>. <https://psyarxiv.com/2y3w9/> Preprint available from PsyArxiv

Rios-Ruiz, R.A., 2004. Epidemiologia e manejo da monilíase do cacauero no Peru. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa.

Rodda, G.H., Jarnevich, C.S., Reed, R.N., 2011. Challenges in identifying sites climatically matched to the native ranges of animal invaders. *PLOS One*, 6 (2), e14670. doi: 10.1371/journal.pone.0014670.

Rosegrant, M.W., Tokgoz, S., Bhandary, P., 2012. The new normal? A tighter global agricultural supply and demand relation and its implications for food security. *Am. J. Agric. Econ.* 95 (2) 303-309. <https://doi.org/10.1093/ajae/aas041>.

Sgrillo, R., 2010. Modelos Matemáticos para Simular a Introdução e Dispersão da Monilíase do Cacauero no Brasil. Relatório (Pós-doutorado). ESALQ/USP.

Siviero, A., Macedo, P.E.F. de, Moreira, G.T.S., 2022. Doenças em cacauero e cupuaçuzeiro no Acre. *Agrotropica*, 34 (2), 159-164. <https://repositorio-dspace.agricultura.gov.br/bitstream/1/2047/1/01033816.2022v34n2p159164.pdf>. doi:10.21757/0103-3816.2022v34n2p159-164.

Slater, H., Michael, E., 2012. Predicting the current and future potential distributions of lymphatic filariasis in Africa using maximum entropy ecological niche modelling. *PLOS One*, 7 (2), e32202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032202>.

Song, Z., Qiao, F., Bao, Y., Shu, Q., Song, Y., Yang, X., 2019. FIO-QLNM FIO-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191209. Earth System Grid Federation [online]. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.9199>.

Souza, E.B., Ferreira, D.B.S., Guimarães, J.T.F., Franco, V.S., Azevedo, F.T.M. de, Moraes, B.C. de, Souza, P.J. de O.P. de, 2017. Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. *Rev. Bras. Climatol.* 21 (1), 81-93. doi: 10.5380/abclima.v21i0.41232.

Souza, E.B. de, Carmo, A.M.C., Moraes, B.C., Nacif, A., 2016. Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal Brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo RegCM4. *Rev. Bras. Climatol.* 18 (1), 293-304. doi:10.5380/ABCLIMA.V18I0.43711.

Thuiller, W., Gue'Guen, M., Renaud, J., Karger, D.N., Zimmermann, N.E., 2019. Uncertainty in ensembles of global biodiversity scenarios. *Nat. Commun.* 10, 1-9. doi: 10.1038/s41467-019-09519-w.

Trebicki, P., 2020. Climate change and plant virus epidemiology. *Virus Res.* 286, 198059. doi: 10.1016/j.virusres.2020.198059.

Van Der Plank, J.E., 1984. Disease resistance in plants. Orlando: Acad. Press. pp. 194.

Van Der Vossen, H.A., 1997. Strategies of variety improvement in cocoa with emphasis on durable disease resistance. An external review prepared for INGENIC. International Group for Genetic Improvement of Cocoa, Reading.

Venette, R.C., Kriticos, D.J., Magarey, R.D., Koch, F.H., Baker, R.H.A., et al. 2010. Pest risk maps for invasive alien species: a roadmap for improvement. *BioScience*, 60, 349-362. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.5.5>.

Vliet, J.A.V., Giller, K.E., 2017. Chapter five - mineral nutrition of cocoa: a review. In: Sparks, D.L. (ed). *Advances in agronomy*. New York: Acad. Press. 141 (5), 185-270. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.017>.

Volodin, E., Mortikov, E., Gritsun, A., Lykossov, V., Galin, V. et al. (2019). INM INM-CM5-0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190610. Earth System Grid Federation [online]. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5081>.

Warren, D.L., Seifert, S.N., 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecol. Appl.* 21 (2), 335-342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>.

Zarrillo, S., Gaikwad, N., Lanaud, C., Powis, T., Viot, C., Lesur, I. et al. 2018. The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. *Nat. Ecol. Evol.*, 2, 879-1888. doi: 10.1038/s41559-018-0697-x.

Zomer, R., Neufeldt, H., Xu, J., Ahrends, A., Bossio, D., Trabucco, A., Noordwijk, M.V., Wang, M., 2016. Global tree cover and biomass carbon on agricultural land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Sci. Rep.* 6 (29987), 1-12. doi: 10.1038/srep29987.

## 5 CONCLUSÕES GERAIS

No estado do Pará, ainda não haviam sido realizados estudos sobre a dinâmica espaço-temporal de populações de pragas quarentenárias em focos e suas relações com as condições climáticas atuais e de mudanças climáticas, medidas fitossanitárias e a ação humana como mecanismos de gestão da defesa fitossanitária.

O clima amazônico favorece a ocorrência da mancha-preta-dos-citros, mosca-da-carambola e da monilíase do cacaueiro. Hospedeiros suscetíveis potenciais, vasta extensão territorial e o trânsito de pessoas e materiais vegetais potencializam a disseminação dessas pragas em rotas de risco no estado do Pará.

Inspecções em áreas cítricas devem ser intensificadas no período menos chuvoso, quando os sintomas de severidade de mancha-preta-dos-citros, na sua fase assexuada, são mais evidentes. O comportamento aleatório das pragas, em escala municipal, e ampla adequabilidade bioclimática, reforça a necessidade de fiscalizações de trânsito e educação fitossanitária para evitar o transporte de material contaminado, devido à vulnerabilidade do território paraense.

A identificação de áreas propícias para a comercialização de mudas e frutas, bem como a sazonalidade da incidência e prevalência de pragas, auxilia na elaboração de estratégias de controle e programas de manejo eficazes de prevenção e resiliência dos cultivos e agricultores no pré e pós-colheita, diante das mudanças climáticas no Pará.

Os mecanismos estatísticos de análise da dinâmica espaço-temporal das pragas e suas relações com as condições climáticas atuais e futuras demonstradas nesta tese podem apoiar políticas públicas alinhadas com a Agenda 2030, visando uma gestão sustentável e adaptativa das cadeias produtivas de frutas hospedeiras de pragas quarentenárias, essenciais para a bioeconomia do Pará, subsistência dos povos originários na Amazônia e a segurança agrícola nacional.

## **Recomendações**

Parcerias com o setor privado, público e o terceiro setor, intensificação de fiscalização de trânsito, educação fitossanitária, qualificação contínua do corpo técnico para identificação imediata das pragas para controle e erradicação através dos levantamentos fitossanitários em todo o estado do Pará, com ênfase para as regiões identificadas com adequabilidade bioclimática para cada praga estudada nesta tese.

Estímulo a políticas públicas e incentivos para a produção de mudas de frutíferas certificadas no estado do Pará, na tentativa de inibir a compra de material propagativo de outros estados com ocorrência de pragas quarentenárias.

## **Limitações**

Com esta tese, entende-se a necessidade da criação de um banco de dados digital de registro dos levantamentos fitossanitários com análises contínuas de focos do estado que permitirá a geração de informação ao órgão e à sociedade sobre as ações da gestão fitossanitária no território paraense, sendo importante a integração com outros órgãos defesa vegetal.

Para estudos futuros, sugere-se a coleta de campo com informações nas planilhas do levantamento de detecção e de monitoramento da severidade das doenças com metodologias estabelecidas para cada praga com sistemas informatizados.

Sugere-se estudos voltados para níveis de infestação de insetos-praga, inimigos naturais, identificação dos frutos coletados para detectar situações singulares das pragas nas condições amazônicas e contabilizar o total de quilogramas de frutos de cada espécie vegetal hospedeira, assim como materiais e métodos alternativos mais eficientes para levantamento fitossanitário e erradicação da mosca-da-carambola, onde armadilhas com diferentes atrativos são decisivos para maior acuidade na detecção, monitoramento e controle da praga.

Para a modelagem bioclimática de distribuição de espécies, ressalta-se a importância de máquinas com capacidade de processamento maior de dados da modelagem climática global, que por vezes são uma das principais limitações nessas análises para previsões futuras. Faz-se necessária, a interpretação com cautela de qualquer transferência extrapolativa do modelo, como a expansão de condições climáticas adequadas para o Pará, onde não há registros da presença da monilíase. Isso ressalta a importância de considerar as limitações dos modelos em áreas onde os dados são escassos, ausentes e a seleção de variáveis ambientais, onde mesmo com métodos robustos, ainda haverá incertezas associadas aos modelos de previsão com abordagem correlativa.

Essas limitações destacam a complexidade e os desafios associados à modelagem da distribuição potencial de espécies e à previsão de impactos da mudança climática na agricultura da Amazônia. É essencial abordar essas questões para melhorar a precisão, exatidão e a utilidade dos modelos, a fim de garantir a eficácia de medidas fitossanitárias adaptativas para a gestão fitossanitária.