



ZONEAMENTO CLIMÁTICO DA PINTA PRETA DOS CITROS NO ESTADO DE SÃO PAULO: DESAFIOS E ADAPTAÇÕES FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Pedro Antonio Lorençone¹

João Antonio Lorençone²

Guilherme Botega Torsoni³

Claudiomir Silva Santos⁴

Rafael Fausto de Lima⁵

Lucas Eduardo de Oliveira Aparecido⁶

Mudanças Climáticas

Resumo

Este estudo realizou o zoneamento climático para a pinta preta dos citros, causada pelo fungo *Guignardia citricarpa*, no estado de São Paulo, considerando cenários atuais e futuros de mudanças climáticas. A citricultura paulista, líder mundial na produção de laranjas, enfrenta desafios significativos devido a problemas fitossanitários, exacerbados pelas mudanças climáticas. Utilizando dados climáticos e de cobertura do solo, foram analisados diferentes cenários socioeconômicos (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) em intervalos temporais que vão de 2021 a 2100. Os resultados mostraram que, no cenário atual, 42,53% do estado é altamente favorável ao desenvolvimento da pinta preta, com a necessidade de práticas de manejo rigorosas. No entanto, com o aumento das emissões de gases de efeito estufa, as áreas altamente favoráveis diminuem drasticamente, enquanto as áreas inaptas para o fungo aumentam. No cenário mais extremo (SSP5-8.5), apenas 4,67% do estado permanece altamente favorável ao fungo até o final do século, com 33,29% do território classificado como inapto. Esses achados destacam a necessidade urgente de estratégias de adaptação na citricultura paulista para enfrentar as condições climáticas futuras. A implementação de práticas agrícolas adaptativas, o desenvolvimento de variedades de citros mais resistentes e políticas agrícolas focadas na mitigação dos impactos climáticos serão cruciais para garantir a sustentabilidade da produção de citros em São Paulo nas próximas décadas.

Palavras-chave: Citricultura; Pinta Preta; Zoneamento Climático; Mudanças Climáticas; São Paulo.

¹Aluno do Curso de graduação em agronomia, Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Departamento de Agrometeorologia, pedro.lorencone@estudante.ifms.edu.br

²Aluno da graduação em agronomia, Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Departamento de Agrometeorologia, joao.lorencone@estudante.ifms.edu.br

³Prof. Dr. Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Departamento de Agrometeorologia, guilherme.torsoni@ifms.edu.br

⁴Prof. Dr. Instituto Federal do Sul de Minas – Departamento de Ciências Ambientais, claudiomir.silva@muz.ifsuldeminas.edu.br

⁵Mestrando em produção vegetal pela Universidade Estadual Paulista - Jaboticabal, departamento de agrometeorologia, rafael.lima@unesp.br

⁶Prof. Dr. Instituto Federal do Sul de Minas – Departamento de Agrometeorologia, lucas.aparecido@muz.ifsuldeminas.edu.br

REALIZAÇÃO



INTRODUÇÃO

Dentre a produção agrícola destacam-se as seguintes frutas cítricas: laranja, limão, tangerina, toranja e destaque como a principal do estado de São Paulo que se coloca como o maior produtor desta fruta no Brasil e no mundo (FUNDECITRUS, 2024). O Estado de São Paulo ou mais especificamente este território conhecido como cinturão da laranja que abrange o Triângulo Mineiro e o Sudoeste Mineiro respondem por uma proporção significativa da produção nacional: estimada em 12 milhões de toneladas de laranja para a safra 2023/24 (FUNDECITRUS, 2024). Esse resultado vem reafirmar mais uma vez o protagonismo desempenhado por São Paulo neste segmento contribuindo significativamente para o mercado cítrico internacional — especialmente o de suco de laranja (RODRIGUES et al., 2023).

O cultivo de limão em São Paulo é uma parcela importante da economia estadual e nacional – com produção avaliada em cerca de US\$ 14 bilhões por ano – fazendo isso com eficiência de recursos por ter área cultivada relativamente pequena (568.132 hectares) (IBGE, 2023). A atividade destaca a viabilidade em termos econômicos, ambientais e sociais do estado devido à sua escala. A produção está fortemente comprometida por uma variedade de desafios; especialmente aqueles relacionados a problemas fitossanitários como a pinta preta que causa a doença do fungo *Guignardia citricarpa* atuando negativamente na produção em qualidade e quantidade (NASCIMENTO; VALDEBENITO-SANHUEZA; BENDER, 2022).

O controle da pinta preta é importante para garantir frutos de qualidade, um dos pré-requisitos para a competitividade do setor agroindustrial cítrico paulista nos mercados internacionais com compradores comprovadamente exigentes MARTÍNEZ-MINAYA et al., 2015. Informações sobre fatores que favorecem o desenvolvimento desta doença no Estado de São Paulo e seu adequado controle é um pré-requisito essencial para a redução de riscos e a sustentabilidade a longo prazo da economia cítrica nesta região (SILVA-PINHATI et al., 2009).

As alterações climáticas acrescentam mais uma dificuldade aos laranjais e permitem que o impacto de doenças, como a pinta preta, seja grave. O aumento das temperaturas e as mudanças no desenvolvimento da precipitação, juntamente com uma melhor frequência de eventos climáticos



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

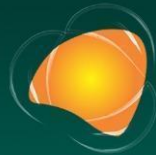
máximos, podem ajudar a oferecer condições ainda mais favoráveis para o desenvolvimento de patógenos.

O fungo *Guignardia citricarpa* tem seu ciclo de vida acelerado em ambientes mais quentes e úmidos. Consequentemente, a precipitação muda a preferência pela dispersão de esporos nos ventos, aumentando assim a propagação de doenças e prolongando os períodos em que as infecções latentes abundam. As condições também serão mais favoráveis às mudanças populacionais da minadora-das-folhas do que se sabia anteriormente. O aumento da pressão do inóculo (e consequentemente das taxas de infecção) com a propagação dos esporos devido às mudanças na precipitação também favorece as doenças fúngicas nas condições em que se desenvolvem. Isto apenas complicaria ainda mais a situação, a menos que medidas drásticas fossem aplicadas numa fase inicial.

Assim, o zoneamento de favorabilidade climática para a pinta preta dos citros, considerando as particularidades do estado de São Paulo e os cenários de mudanças climáticas, se torna uma ferramenta vital para orientar a expansão e a gestão dos pomares, contribuindo para a redução do risco de incidência da doença e para a continuidade da liderança paulista na produção citrícola global (FRANCO; DE GOES; PEREIRA, 2020). Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi realizar o zoneamento de favorabilidade climática para a pinta preta dos citros no estado de São Paulo, considerando os cenários de mudanças climáticas.

METODOLOGIA

O estudo foi concentrado no estado de São Paulo, o maior produtor de citros do Brasil e do mundo, com uma extensão territorial de aproximadamente 248.222 km². São Paulo é conhecido por sua diversidade geográfica, incluindo áreas de planalto, serras e vastas regiões agrícolas, o que contribui para uma rica variedade de microclimas favoráveis ao cultivo de citros (RODRIGUES et al., 2023).



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

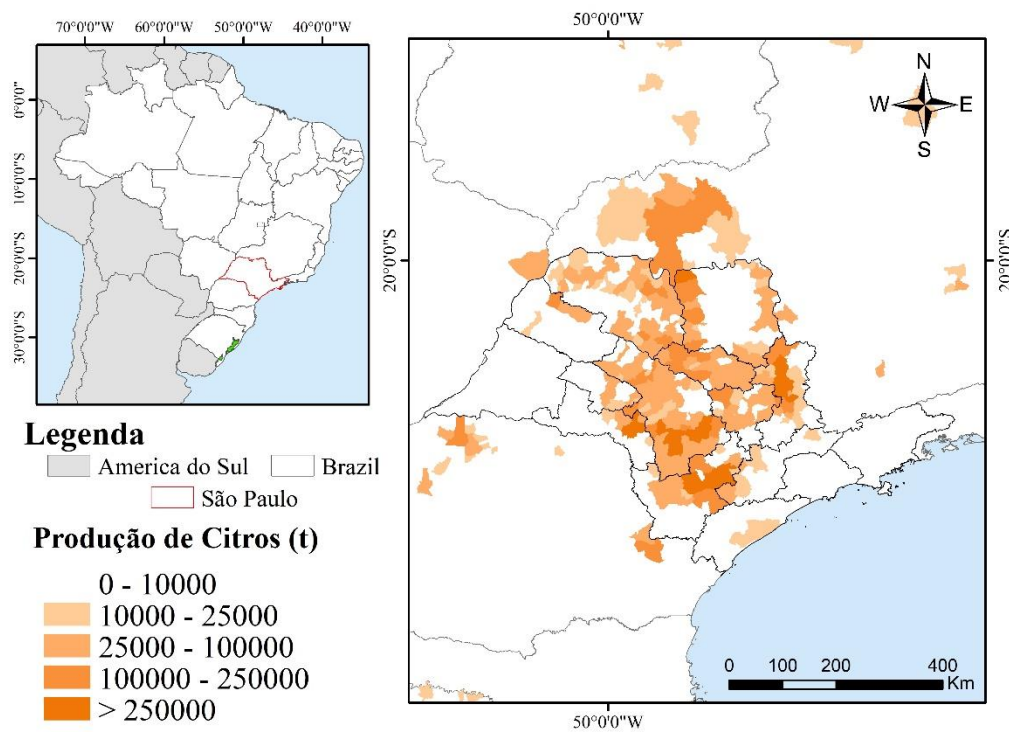
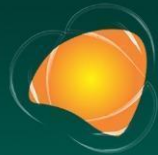


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e produção de citros. Fonte: IBGE, (2023).

Os dados climáticos atuais e projetados sob cenários de mudanças climáticas foram obtidos pela plataforma WorldClim 2.1 (<https://www.worldclim.org/>), utilizando o modelo IPSL-CM6A-LR (BOUCHER et al., 2020) do Institute Pierre-Simon Laplace Climate Modelling Centre (IPSL CMC) da França, com resolução de 30 segundos (aproximadamente 1 km²). Esse modelo, que integra a fase seis do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) do IPCC, foi selecionado por sua capacidade de fornecer projeções climáticas detalhadas para a região (LURTON et al., 2020).

Foram utilizadas as variáveis temperatura média mensal do ar (°C) e precipitação média mensal (mm) para diferentes cenários de Caminhos Compartilhados Socioeconômicos (SSP): SSP-1 2.6, SSP-2 4.5, SSP-3 7.0 e SSP-5 8.5 (RIAHI et al., 2017), analisados em quatro intervalos temporais distintos (2021-2040, 2041-2060, 2061-2081 e 2081-2100). Esses dados foram coletados na plataforma WorldClim e utilizados para prever a aptidão climática no estado de São Paulo para o cultivo de *Citrus sinensis* e o desenvolvimento do fungo *Guignardia citricarpa*.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

As variáveis climáticas selecionadas foram definidas com base nas necessidades específicas de *Citrus sinensis*: Temperatura do Ar (Tar) média anual e Precipitação Anual (Prec) total. As classes de aptidão climática para o cultivo de citros foram estabelecidas através da combinação dessas variáveis climáticas (GALVAÑ et al., 2022; MARTÍNEZ-MINAYA et al., 2015). Os valores da chave climática para o fungo *Guignardia citricarpa* foram adaptados e apresentados de forma específica para as condições climáticas do estado de São Paulo, como ilustrado na Tabela 2.

Tabela 1. Características climáticas ótimas a incidência de *Guignardia citricarpa*. Fonte: Adaptado de Galvan et al. (2022); Martínez-Minaya et al. (2015).

Classes	Temperatura do Ar - Tair (°C)	Precipitação Anual - Prec (mm)
Relativamente Favorável	< 18 e >26	>1500
Relativamente Favorável	< 18 e >26	1000 - 1500
Desfavorável	< 18 e >26	<1000
Favorável	20-24	>1500
Altamente Favorável	20-24	1000 - 1500
Relativamente Favorável	20-24	<1000
Relativamente Favorável	18-20 e 24-26	>1500
Favorável	18-20 e 24-26	1000 - 1500
Relativamente Favorável	18-20 e 24-26	<1000

Os dados de cobertura do solo utilizados neste estudo foram adquiridos através do produto 'MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V061', fornecido pela NASA's Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) através do Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/med12q1v061/>). Esses dados apresentam uma resolução espacial de 500 metros e abrangem o período do ano de 2022.

Foi utilizada a banda 1 que segue a classificação do uso do solo de Annual International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) classification, as seguintes classes: Florestas de Coníferas Perenes, Florestas de Folhas Largas Perenes, Florestas de Coníferas Decíduas, Pântanos Permanentes, Áreas Urbanas e Construídas, Neve e Gelo Permanentes, Terras Áridas e Corpos d'Água foram unidas, pois não possuem condições para o cultivo de citros, formando a classe de zoneamento: Não Cultivável.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Foram empregados dados provenientes de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para realizar a interpolação espacial abrangendo todo o território brasileiro, utilizando o método de Kriging (KRIGE, 1951) com um modelo esférico e uma resolução de 0,25°. O Kriging é amplamente reconhecido na comunidade científica por sua eficácia na interpolação de dados (CARVALHO; ASSAD; PINTO, 2012). Esta abordagem permitiu a obtenção de um zoneamento de favorabilidade da *Guignardia citricarpa* para todo Brasil, nos diferentes cenários e períodos de mudanças climáticas. O software Quantum GIS (QGIS) 3.16.4 foi empregado para a produção dos mapas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados climáticos projetados para o estado de São Paulo revelam tendências significativas nas variáveis de precipitação e temperatura média anual (Figura 3). No cenário atual, a precipitação média anual é de aproximadamente 1336,50 mm, o que fornece um parâmetro de comparação para os cenários futuros. As projeções indicam uma leve variação na precipitação, com valores oscilando entre 1291,40 mm no cenário SSP5-8.5, caracterizado por um caminho de desenvolvimento intensivo em carbono, e 1344,77 mm no cenário SSP1-2.6, que representa uma trajetória de sustentabilidade. Essa variação sugere que, embora a precipitação possa sofrer alterações, as mudanças não são drásticas, mas há uma tendência geral de ligeira diminuição em cenários com maiores emissões de gases de efeito estufa.

Por outro lado, a temperatura média anual apresenta um aumento significativo em todos os cenários projetados. Partindo de uma média de 20,97°C no cenário atual, as temperaturas futuras variam entre 22,35°C no cenário SSP1-2.6 e 27,38°C no cenário SSP5-8.5. O aumento mais acentuado é previsto nos cenários de altas emissões, como o SSP5-8.5, que projeta um aquecimento global mais severo. Esse aumento de temperatura tem implicações diretas para a agricultura no estado de São Paulo, especialmente para a citricultura, que pode enfrentar desafios relacionados ao estresse térmico nas plantas e à intensificação dos ciclos de vida de pragas e doenças, como a pinta preta dos citros.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

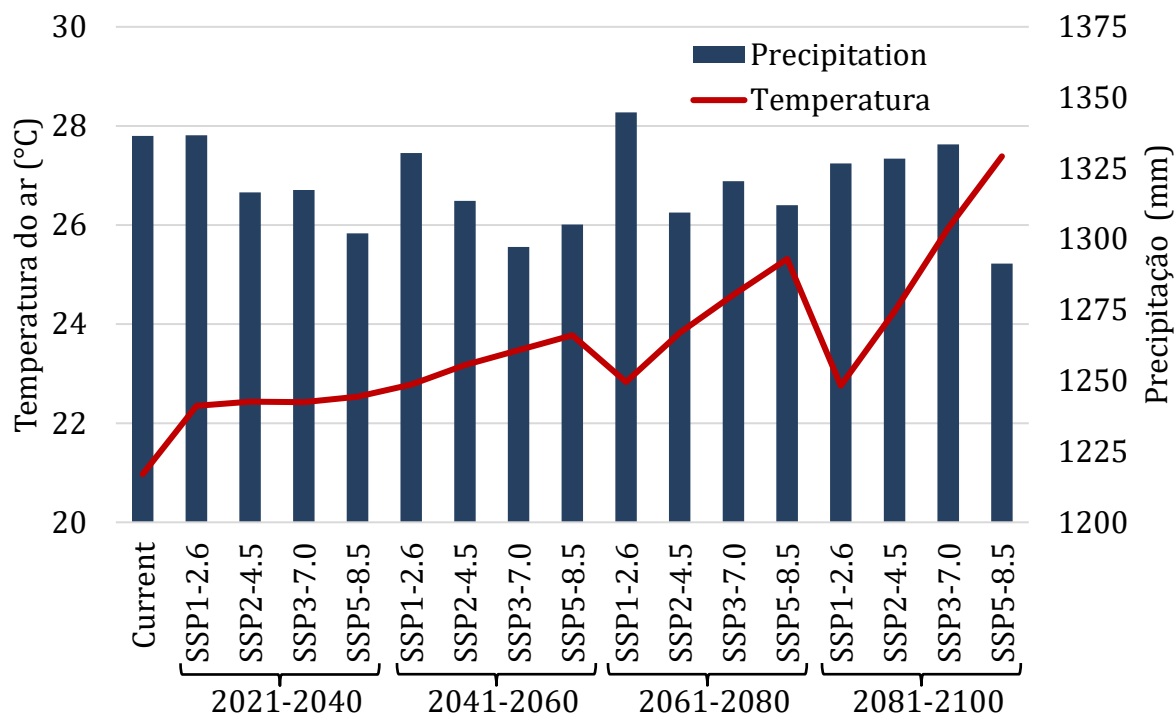
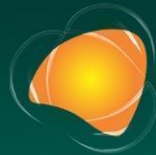


Figura 2. Variação climática nos possíveis cenários de mudanças climáticas para o estado de São Paulo

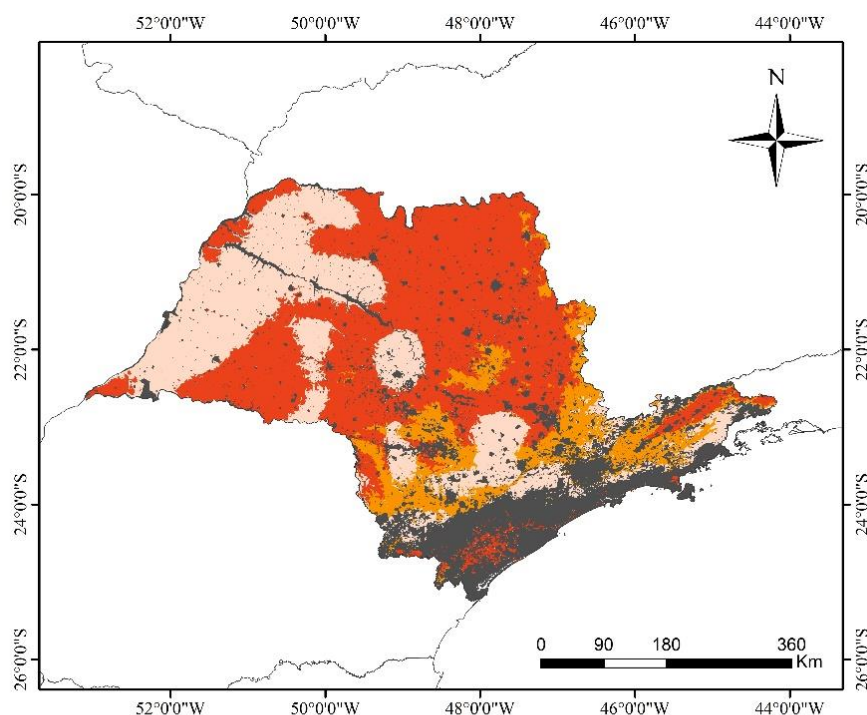
O zoneamento do fungo *Guignardia citricarpa* para o estado de São Paulo indicou 42,53% da área total do estado como altamente favorável à doença. Essas áreas de cor vermelha no mapa fornecem as condições climáticas mais favoráveis para o crescimento e disseminação do fungo, exigindo atividades com insumos consideráveis para um manejo pesado, de modo a reduzir o patógeno e suas repercussões na produção de citros (Figura 3).

Além disso, 10,70% do território é considerado favorável, onde as condições climáticas ainda permitem o desenvolvimento do fungo, embora com menor intensidade em comparação às áreas de alta favorabilidade. Nessas regiões, representadas em laranja, o risco permanece significativo, e medidas preventivas continuam sendo necessárias. A faixa de 26,38% da área é classificada como relativamente favorável, indicada em bege no mapa. Nestas áreas, o risco é moderado, mas a vigilância e o manejo contínuos são importantes para evitar a disseminação da doença, embora com menor intensidade que nas áreas de alta e média favorabilidade.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

A pesquisa afirma ainda que 20,31% da região paulista está imprópria para o cultivo de citros (destacado em cinza). A justificativa poderia ser que as restrições ambientais não favorecem a produção de citros, a não ser questões relacionadas com a adequação climática da pinta preta. Surpreendentemente, nenhuma das regiões foi inadequada em relação aos fatores climáticos, indicando que, embora a adequação climática varie, a maior parte de São Paulo pode cultivar citros sob diferentes níveis de risco de doenças (mancha preta).



*Zoneamento *Guignardia citricarpa**

- Altamente Favorável
- Favorável
- Relativamente Favorável
- Desfavorável
- Não cultivável

Figura 3. Zoneamento climático para a doença pinta preta dos citros para o clima atual no estado de São Paulo.

As projeções para o período 2021-2040 indicam estabilidade na proporção de áreas altamente favoráveis ao desenvolvimento de *Guignardia citricarpa* no cenário SSP1-2.6 em 42,53%. Isto sugere que, sob uma trajetória de desenvolvimento sustentável com baixas emissões, as condições climáticas que favorecem a incidência da pinta preta poderiam permanecer relativamente constantes (Figura 4).



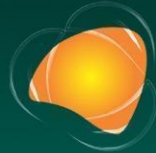
EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Entretanto, para cenários de maior emissão como SSP2-4.5 e SSP3-7.0, isso diminui para 34,54% e 34,83% da proporção de áreas altamente favoráveis ao fungo, respectivamente. Para o cenário mais extremo, o SSP5-8,5 cai ainda mais para 31,03%. Ao mesmo tempo, aumenta a área classificada como relativamente favorável quanto à dispersão do risco de infestação pelas diferentes regiões do estado: atingindo 32,77% no SSP2-4,5, 32,03% no SSP3-7,0 e 35,81% no SS. P5 -8,5 .

Para o período 2041-2060, a diminuição de áreas altamente favoráveis ao desenvolvimento do fungo torna-se mais acentuada. No cenário SSP1-2.6, a proporção destas áreas cai para 36,87%, enquanto para áreas altamente favoráveis nos cenários SSP2-4.5 e SSP3-7.0, diminui para 27,75% e 22,63%, respectivamente. No SSP5-8,5, a favorabilidade elevada diminui ainda mais para 21,71%. Nesse período aparecem áreas classificadas como impróprias para o desenvolvimento da mancha preta, com 0,81% no SSP3-7.0 e 4,14% no SSP5-8.5 – indicando que as condições climáticas passariam a limitar significativamente a viabilidade do fungo em determinadas zonas do estado.

Entre 2061-2080, para os cenários de altas emissões como SSP3-7.0 e SSP5-8.5, há uma queda acentuada nas áreas altamente favoráveis ao fungo: 15,68% e 10,01%, respectivamente. Por outro lado, observa-se um aumento considerável de áreas impróprias para o fungo de desenvolvimento da mancha preta: 21,48% no SSP3-7.0 e 23,87% no SSP5-8.5. Estas mudanças indicam condições climáticas menos favoráveis para a propagação do fungo em algumas novas áreas, mas não afectariam as já adequadas – excepto com uma variedade mais resistente para gerir o controlo de doenças e causar impactos negativos no sistema de produção de laranja.

Por último, para o cenário mais extremo, SSP5-8,5, durante o período 2081-2100, regista-se uma diminuição dramática em áreas altamente favoráveis (4,67% do estado) para o fungo. Nesse cenário, a inadequação da mancha preta atinge 33,29% do território paulista. Este resultado implicaria um futuro onde as condições climáticas não seriam mais tão propícias ao desenvolvimento da ferrugem em São Paulo - algo que poderia paradoxalmente funcionar como uma mitigação parcial dos riscos fitossanitários, mas por outro lado exigiria intervenções radicais para adaptação do manejo agrícola da



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

produção de laranja sob novas condições climáticas.

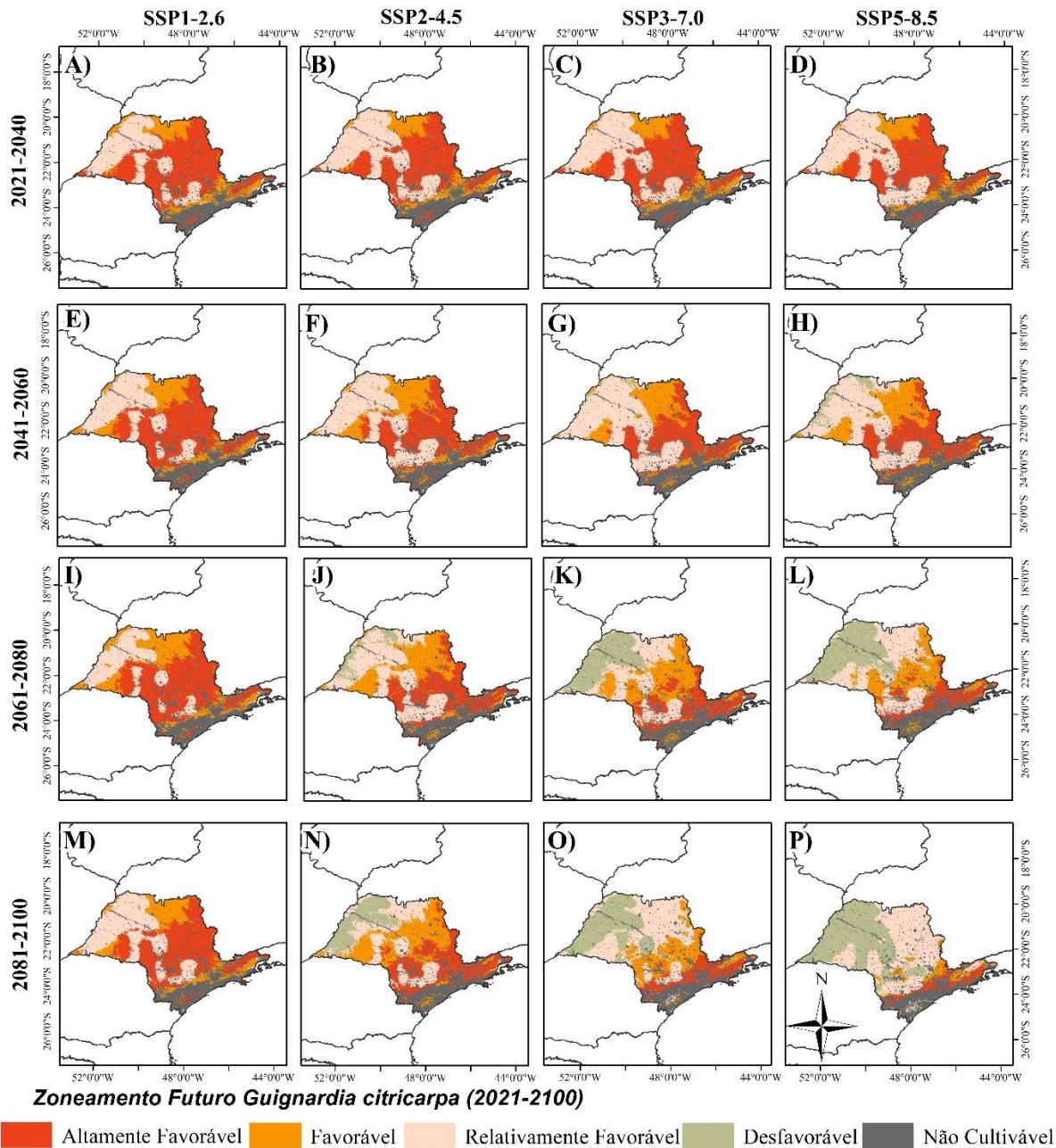


Figura 4. Zoneamento climático para a doença pinta preta dos citros para os diferentes períodos (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100) e cenários de mudança climática (SSP-1 2.6, SSP-2 4.5, SSP-3 7.0 e SSP-5 8.5).



CONCLUSÕES

Os achados do presente estudo chamam a atenção para as dificuldades que a citricultura no futuro poderá ter no Estado de São Paulo devido às mudanças climáticas, principalmente no que diz respeito ao controle da *Guignardia citricarpa*, agente causador da mancha preta dos citros. O zoneamento climático realizado mostra que no cenário atual 42,53% do estado é altamente favorável ao desenvolvimento da doença, exigindo práticas intensivas de manejo para seu controle. Mas as projeções indicam que com um aumento nas emissões de gases com efeito de estufa esta percentagem diminui substancialmente enquanto as áreas com relativa favorabilidade e inadaptação aumentam. Em cenários extremos como SSP5-8.5, a alta favorabilidade cai para apenas 4,67% no final do ano, contra uma expansão de 33,29% em áreas inadequadas – o que sugeriria condições climáticas menos propícias (mas mais desafiadoras) para o fungo, bem como outros problemas que virão para a citricultura.

Essas descobertas enfatizam a necessidade premente de estratégias de adaptação no cinturão citrícola de São Paulo, em cenários climáticos futuros. A diminuição de áreas com alta favorabilidade ao fungo pode aliviar parte do risco fitossanitário, mas também pode exigir mudanças em larga escala nas práticas agrícolas para manter a produtividade e a qualidade dos citros. A adoção de práticas de manejo resilientes, o cultivo de variedades cítricas mais resistentes e políticas agrárias que reduzam o impacto relacionado às mudanças climáticas serão fundamentais para garantir a sustentabilidade futura da produção de laranja em São Paulo daqui a algumas décadas.

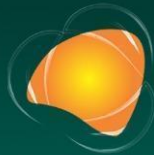
REFERÊNCIAS

CARVALHO, J. R. P. DE; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1235–1242, 2012.

FRANCO, D.; DE GOES, A.; PEREIRA, F. D. FONTES E CONCENTRAÇÕES DE FUNGICIDAS CÚPRICOS NO CONTROLE DA MANCHA PRETA DOS CITROS. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 01, p. 1–8, 2020.

GALVAÑ, A. et al. Climate suitability of the Mediterranean Basin for citrus black spot disease (*Phyllosticta citricarpa*) based on a generic infection model. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 19876, 2022.

REALIZAÇÃO



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

IBGE, I. B. D. G. E. E. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA: Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2020>>. Acesso em: 28 jan. 2024.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 52, n. 6, p. 119–139, 1951.

LURTON, T. et al. Implementation of the CMIP6 Forcing Data in the IPSL-CM6A-LR Model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 4, abr. 2020.

MARTÍNEZ-MINAYA, J. et al. Climatic distribution of citrus black spot caused by *Phyllosticta citricarpa*. A historical analysis of disease spread in South Africa. **European journal of plant pathology**, v. 143, p. 69–83, 2015.

NASCIMENTO, F. V.; VALDEBENITO-SANHUEZA, R. M.; BENDER, R. J. Inorganic solar filters incorporated to carnauba wax and incidence of citrus black spot on tangerine. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, p. e02927, 2022.

RIAHI, K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153–168, jan. 2017.

RODRIGUES, M. G. F. et al. Global methylation in ‘Valencia’ orange seedlings associated with rootstocks and Huanglongbing. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e277679, 2023.

SILVA-PINHATI, A. DA et al. Citrus black spot: epidemiology and management. 2009.

REALIZAÇÃO