



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

THAIANE SOEIRO DA SILVA DIAS

**PRODUTIVIDADE DE *Citrus* NA AMAZÔNIA ORIENTAL: RELAÇÕES COM O  
CLIMA ATUAL, RISCO SOCIOAMBIENTAL RELATIVO AOS EVENTOS  
EXTREMOS E MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS  
FUTURAS**

BELÉM-PA  
2023

THAIANE SOEIRO DA SILVA DIAS

**PRODUTIVIDADE DE *Citrus* NA AMAZÔNIA ORIENTAL: RELAÇÕES COM O CLIMA ATUAL, RISCO SOCIOAMBIENTAL RELATIVO AOS EVENTOS EXTREMOS E MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutora em Ciências Ambientais.

Área de concentração:

Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa:

Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Orientador: Dr. Everaldo Barreiros de Souza

Coorientadora: Dra. Maria de Lourdes P. Ruivo

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

- D541p Dias, Thaianie Soeiro da Silva.  
Produtividade de *Citrus* na Amazônia Oriental : relações com o clima atual, risco socioambiental relativo aos eventos extremos e modelagem dos impactos das mudanças climáticas futuras / Thaianie Soeiro da Silva Dias.  
— 2023.  
128 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza  
Coorientação: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2023.
1. Agricultura e Clima. 2. Amazônia. 3. Produtividade de Citrus. 4. Risco Climático. 5. Modelagem ambiental . I. Título.

CDD 577.5098115

---

**THAIANE SOEIRO DA SILVA DIAS**

**PRODUTIVIDADE DE *Citrus* NA AMAZÔNIA ORIENTAL: RELAÇÕES COM O CLIMA ATUAL, RISCO SOCIOAMBIENTAL RELATIVO AOS EVENTOS EXTREMOS E MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito para obtenção do Título de Doutora em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental Na Amazônia

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Aprovada em: 31/05/2023.

**Banca Examinadora:**



---

Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Orientador  
Doutor em Meteorologia/  
Universidade Federal do Pará



---

Prof. Marcos Adami – Avaliador Interno  
Doutor em Sensoriamento Remoto  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais



---

Prof. Luciano Jorge Serejo dos Anjos - Avaliador Interno  
Doutor em Ciências Ambientais  
Universidade Federal Rural da Amazônia



---

Prof. Alan Cavalcanti da Cunha - Avaliador Externo  
Doutor em Engenharia Civil - Hidráulica e Saneamento  
Universidade Federal do Amapá



---

Prof. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza - Avaliador Externo  
Doutor em Agronomia - Meteorologia Agrícola  
Universidade Federal Rural da Amazônia

*Primeiramente, esta tese é dedicada a Jesus, que me concedeu saúde e força para enfrentar todos os desafios desta jornada. À minha amada mãe, Eliete, cujos conselhos sábios e encorajamento incansável foram a minha bússola. À minha irmã, Tharine, cuja força e determinação são uma fonte constante de inspiração. E à minha sobrinha, Ana Carolina, cujo amor e alegria iluminam cada dia da minha vida. A todos vocês, meu mais profundo agradecimento.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grata a Jesus. Ele deu-me vida, a oportunidade de escrever e desenvolver esta pesquisa. Ele é a nossa fonte, refúgio e fortaleza. Tudo vem d'ele, é por Ele e para Ele! A Ele seja toda a Glória.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer à minha família. A minha amada mãe, Eliete, é a pessoa que, apesar de todas as lutas físicas, me ensinou o caminho em que eu deveria seguir. Obrigada por todas as orações e apoio na vida acadêmica, sem ti não teria tido este objetivo. À minha irmã, Tharine, e seu marido, Marco, que sempre estiveram ao meu lado e têm sido o meu apoio em tempos de dificuldades. Ao meu pai, Dilson que sempre foi para mim uma fonte de caráter, dignidade e disciplina.

Em terceiro lugar, gostaria de expressar minha gratidão aos meus professores e mentores, especialmente ao professor Dr. Everaldo B. de Souza, por me guiar em minhas jornadas acadêmicas e por confiar em minha pesquisa (IC, TCC, Dissertação e Tese). Agradeço também aos professores desta banca examinadora: ao Dr. Alan Cunha pela valiosa revisão, ao Dr. Paulo Jorge e Dr. Marcos Adami pelas sugestões valiosas, e ao Dr. João Athayde e Dr. Adriano Souza pela disposição a participação desta avaliação. Um agradecimento especial ao Dr. Luciano Jorge por responder generosamente às minhas perguntas e forneceu imagens que ajudaram a melhorar minha análise científica. Por fim, gostaria de agradecer a todos aqueles que me ajudaram a consolidar as ideias apresentadas aqui.

Em quarto lugar, agradeço aos professores Dra. Maria Ruivo e Dr. Alberto Cruz por me permitirem participar no projeto “Contribuições para o uso racional da água de irrigação na cultura da Lima Ácida 'Thaiti' Citrus latifolia (Yu. Tanaka)” em plantios comerciais, associado ao CITROPAR. Estou desapontada por não ter conseguido o que estava planejado para o projeto, e devo isso a eles.

Em quinto, gostaria de agradecer a todos os meus amigos na vida acadêmica (Turma PPGCA 2012 e 2019). Em particular, o encorajamento e entusiasmos de Davison, a sensibilidade de Vânia e a Waléria foram mais úteis para mim do que se pode imaginar.

Em sexto, gostaria de agradecer ao Museu Goeldi, Embrapa e à Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, pela estrutura e pelos ensinamentos dos professores do programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. Agradeço também ao PROPESP e ao CNPq pelo apoio financeiro à minha pesquisa. Sou grata ao IBGE, NOAA, CRU, CHIRPS,

MODIS, INPE, MAPBIOMAS e outras instituições pelo fornecimento e manipulação de dados (R, Grads e SIG).

Por fim, gostaria de agradecer a todos meus amigos, líderes e pastores, principalmente os pastores Alacy e Jandira. Eles nos encorajaram e nos inspiraram a percorrer a milha extra. Muito obrigada a toda a Catedral da Família e todo os voluntários dos Descobridores que estão construindo ou construíram comigo esta bela vocação e devoção de ensino.

Com os melhores cumprimentos,

Thaiane Dias

*“Por meio das provas aprendemos a conhecer as nossas próprias debilidades. Mas também a fidelidade de Deus” - John Nelson Darby*



## RESUMO

No contexto da fronteira agrícola dentro do território amazônico, a produção dos citrus (limão e laranja) tem se destacado em termos socioeconômicos e ambientais. Nesta tese, três diferentes abordagens científicas foram desenvolvidas para elucidar: i) as relações entre a produtividade de citrus e os padrões de variabilidade climática (precipitação e temperatura do ar) e desmatamento sobre a Amazônia oriental durante as últimas décadas; ii) o risco socioambiental da produtividade de *Citrus* em decorrência dos eventos extremos de precipitação da Amazônia oriental; e iii) os impactos dos diferentes cenários futuros de mudanças climáticas na distribuição das áreas potenciais de ocorrência da espécie *Citrus sinensis* sobre a Amazônia Legal Brasileira. Os resultados mostraram evidências de que fatores naturais (variabilidade climática e eventos extremos de precipitação) e fatores antrópicos (desmatamento) influenciam diretamente a produtividade dos cítricos em diversas áreas da Amazônia oriental. Além disso, as projeções indicam que as mudanças climáticas podem impactar negativamente a distribuição das principais áreas de ocorrência da espécie *Citrus* ao longo da Amazônia legal Brasileira.

**Palavras-chaves:** agricultura e clima; Amazônia; produtividade de *citrus*; risco climático; modelagem ambiental; mudanças climáticas.

## ABSTRACT

In the context of the agricultural frontier within the Amazonian territory, the production of citrus (lime and oranges) has been relevant in socioeconomic and environmental terms. In this thesis, three different scientific approaches were developed to elucidate: i) the relationships between citrus productivity and climate variability (rainfall and air temperature) and deforestation patterns in eastern Amazonia during the last decades; ii) the socio-environmental risk of citrus productivity due to extreme precipitation events in eastern Amazon; and iii) the impacts of different future scenarios of climate change on the distribution of potential areas of occurrence of the species *Citrus sinensis* over the Legal Brazilian Amazon. The results showed evidence that natural factors (climate variability and extreme precipitation events) and anthropic factors (deforestation) directly influence citrus productivity in several areas of eastern Amazonia. In addition, projections indicate that climate change can negatively impact the distribution of the main occurrence areas of the *Citrus* species throughout the Brazilian Legal Amazon.

**Keywords:** agriculture and climate; Amazon; citrus productivity; climate risk; environmental modeling; climate change.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - a) Laranjeira durante a brotação de primavera, emitindo ramos reprodutivos (ramos com flores) e ramos apenas vegetativos; b) Tipos de brotação dos citros: broto vegetativo (1), broto reprodutivo unifloral com folhas (2), broto reprodutivo multifloral com folhas (3) broto reprodutivo unifloral sem folhas, (4) broto reprodutivo multifloral sem folhas (5).....	23
Figura 2 - Fase da Planta e do fruto.....	27
Figura 3 - Evolução mundial da produtividade da laranja.....	28
Figura 4 - a) Números de casos no estado do Pará e b) <i>boxplots</i> das variáveis: Inundação (INU), secas (SEC) e Enxurradas (ENX), no período de 1979 a 2016.....	32
Figura 5 - O aquecimento observado é causado por emissões de atividades humanas, com o aquecimento por gases de efeito estufa parcialmente mascarado pelo resfriamento pelos aerossóis.....	34
Figura 6 – Mudanças anual da temperatura, precipitação e umidade do solo.....	35
Figura 7 - Distribuição espacial das tendências de precipitação nas 30 estações sobre a tendências positivas, negativas e neutras baseadas no valor do TAU de Mann-Kendall, sendo que os círculos destacam as tendências com significância estatística, conforme legenda na base da figura.....	37
Figura 8 - Interdisciplinaridade é a chave para compreensão complexa do mundo.....	39
Figura 9 - Mapa da área de estudo do nordeste do Pará, os círculos com ponto preto indicam os 37 municípios selecionados, as cores indicam os 5 clusters uniformes.....	46
Figura 10 - Estrutura metodológica da pesquisa.....	49
Figura 11 - Precipitação climatológica (mm/mês), média de 1981 a 2018, da região nordeste do Pará .....	51
Figura 12 - Temperatura máxima (°C) climatológica (média de 1981 a 2018), da região nordeste do Pará.....	52
Figura 13 - Climatologia sazonal (média 1981/2018) de precipitação - PRP e de Temperatura máxima – TMAX sobre o nordeste do Pará durante as estações: verão (A) DJF, outono (B) MAM, inverno (C) JJA e primavera (D) SON. As escalas de cores indicam a magnitude de PRP em mm e de TMAX em °C.....	53
Figura 14 - Variabilidade anual (1981/2018) de (a) precipitação - PRP (mm) e de (b) Temperatura máxima – TMAX (°C) sobre o nordeste do Pará.....	55

Figura 15 - Teste de Mann- Kendall (MK) na série de dados de precipitação - PRP (mm), nas escalas anual e sazonal (DJF, MAM, JJA e SON). As escalas de cores indicam os sinais do teste MK.....	57
Figura 16 - Teste de Mann-Kendall (MK) na série de dados de temperatura máxima - TMAX (°C), nas escalas anual e sazonal (DJF, MAM, JJA e SON). As escalas de cores indicam os sinais do teste MK.....	58
Figura 17 - Variação nos últimos 15 anos, médias nas décadas de (1989 a 2003) e (2004 a 2018) na série de dados de precipitação - PRP, para escala anual e sazonal. As escalas de cores indicam os valores de variação delta.....	60
Figura 18 - Variação nos últimos 15 anos, médias das décadas de (1989 a 2003) e (2004 a 2018) na série de dados de temperatura máxima - TMAX, escala anual e sazonal. As escalas de cores indicam os valores de variação delta.....	61
Figura 19 - Distribuição espacial da produtividade de laranja (a), "limão" (b), taxa de desmatamento (c) e ET (d) ao longo de 15 anos (2004 a 2018).....	64
Figura 20 - Modelo de regressão linear (PCR) mostrando a relação das variáveis ambientais no Eixo 1 (PRP, TMAX, ET e Desmatamento) e a produtividade de citros no Eixo 2 (laranja e "limão"), onde Moran's Index: 0,014, R <sup>2</sup> ajustado é 77%, AIC laranja: 395,68 e AIC limão: 392,78.....	64
Figura 21 - Área de estudo e dos 24 principais municípios produtores de ( <i>Citrus</i> ) do Pará, numerado por código municipal e circulado em laranja.....	77
Figura 22 - Perfil de produção brasileira de citros.....	78
Figura 23 - Estrutura metodológica da pesquisa.....	80
Figura 24 - Evolução da produtividade de ( <i>Citrus</i> ) nos 24 municípios produtores do Pará, de acordo com os períodos de 5 anos (1994-1998, 1999-2003, 2004-2008, 2009-2013 e 2014-2018) .....	83
Figura 25 - Caracterização dos índices climáticos, a) SPI e b) índices oceano-atmosfera (IOS, NINO3.4, GRAD, AMM), correspondentes aos períodos quinquenais 1994-1998, 1999-2003, 2004-2008, 2009-2013 e 2014-2018.....	85
Figura 26 - Matriz de Correlação de Spearman ( <i>rho</i> ) entre as variáveis ambientais e produtividade de <i>Citrus</i> .....	86
Figura 27 - Distribuição das áreas susceptíveis ao risco de PROD laranja no período de chuvas extremas de 2014 a 2018.....	87

Figura 28 - Distribuição das áreas susceptíveis ao risco de PROD “limão” no período de chuvas extremas de 2014 a 2018.....	87
Figura 29 - Área de estudo mostrando a topografia da Amazonia Legal (Acre, Pará, Amazonas, Roraima, Rondônia, Amapá e Mato Grosso e o norte do estado de Tocantins, e a oeste do meridiano do estado do Maranhão) e a América do Sul. Bem como, as ocorrências de distribuição de espécie de laranja ( <i>Citrus Sinensis</i> ) em pontos azul claro.....	100
Figura 30 - Processo geral do modelo ensemble de distribuição de espécies.....	102
Figura 31 - Desempenho dos modelos de adequação de espécie de <i>Citrus</i> avaliados por diferentes métricas.....	104
Figura 32 – Importância das variáveis bioclimáticas.....	105
Figura 33 - Área de adequabilidade da laranja ( <i>Citrus sinensis</i> ) sob o clima atual (A) e cenários dos SSPs (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 e 5- 8.5) até ao ano 2040 (B), sendo adequação ótima (em cor verde escuro), adequação moderada (em cor verde claro), adequação baixa (em cor azul claro) e inadequada (em cor cinza).....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais doenças encontradas na produção de citros .....	26
Tabela 2 - Resumos de tendências da temperatura do ar no Brasil. ....	36
Tabela 3 - Organização da tese de acordo com os objetivos específico.....	41
Tabela 4 - Lista de métricas estatísticas .....	50
Tabela 5 - Coeficientes da Regressão Linear da TMAX.....	55
Tabela 6 - Classificações do índice SPI .....	81
Tabela 7 - Matriz de pontuação emparelhada através de critérios.....	82
Tabela 8 - Áreas em diferentes categorias de risco e produtividade de <i>Citrus</i> .....	87
Tabela 9 – Critério de desempenho dos métodos de avaliação, as características de funcionamento do receptor (ROC/AUC) e a habilidade estatística verdadeira (TSS)	103
Tabela 10 - Mudanças nas áreas de aptidão dos cítricos nos anos de 2040, 2060, 2080 e 2100 sob os cenários dos SSPs (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 e 5- 8.5) em comparação com o clima atual.....	107

## LISTA DE SIGLAS

ADEPARÁ	Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará
ANA	Agência Nacional de águas
CEASA	Centrais de Abastecimento
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group Infrared Precipitation With Stations</i>
CHPClim	<i>The Climate Hazards Group's Precipitation Climatology</i>
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPC	<i>Climate Prediction Center</i>
CRU	<i>Climatic Reseach Unit</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENSO	El Niño E Oscilação Sul
FAOT	<i>Food and Agriculture Organization of The United Nations</i>
FIDE	Formulário de Informações do Desastre
GBIF	<i>Global Biodiversity Information Facility</i>
GCM	Modelos climáticos globais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança Do Clima
LI	Linhas de Instabilidade
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NCDC	<i>National Climatic Data Center Climáticos</i>
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PAM	Pesquisa Agropecuária Municipal
PRODES	Projeto de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia
REFLORAMAZ	Reflorestamento da Amazônia
RegCM	Modelos climáticos regionais
SAFs	Sistemas Agroflorestais
SDM's	Modelagem de Distribuição de Espécies
SINPDEC	Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil
USDA	<i>U.S. Department of Agriculture</i>

ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical



## LISTA DE SÍMBOLOS

AHP	Análise hierárquico
AIC	Critério de informação de Akaike
AMM	Índice do módulo meridional do atlântico
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
AWC	Capacidade de água
CTA	<i>Classification Tree Analysis</i>
DELTA	Variação
ELEV	Altitude
ET	Evapotranspiração
FDA	<i>Flexible Discriminant Analysis</i>
GBM	<i>Generalized Boosting Model or usually called Boosted Regression Trees</i>
GLM	<i>Generalized Linear Model</i>
GRAD	Gradiente
IC	Índice de Consistência
IR	Índice randômico
IV	Índice de vegetação
K ou MK/ Z	Mann-kendall
LAI	Índice de área foliar
MARS	<i>Multiple Adaptive Regression Splines</i>
MAXENT.PHILLIPS	<i>Maximum Entropy</i>
MNP	Pressão média do nível do mar
MORAN'S I	Índice de autocorrelação espacial de Moran
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
PCA	Análise de Componentes Principais
PCR	Regressão de Componentes Principais
PROD	Produtividade
PRP	Precipitação
RC	Razão de Consistência
RF	<i>Random Forest</i>
ROC	Características operacionais do receptor

SIR	Área irrigada
SLOPE	Inclinação
SOI	Índice de oscilação sul
SPI	Índice de precipitação padronizada
SRE	<i>Surface Range Envelop</i>
SST	<i>Sea Surface Temperature</i>
TMAX	Temperatura máxima
TOPO	Derivação topográficas
TSS	Habilidade estatística verdadeira
WOA	<i>Weighted overlay analysis</i>
$\lambda_{\max}$	Lambda máximo

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b>	21
1.1	Cultura dos citros e risco para a produção	22
1.2	Climatologia, vulnerabilidades e riscos climáticos	29
1.3	Questão da pesquisa	38
1.4	Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa	38
1.5	Objetivos	40
1.5.1	Objetivo Geral	40
1.5.2	Objetivo Específicos	40
1.6	Estrutura da tese	41
<b>CAPITULO 2</b>	<b>RELAÇÕES ENTRE O CLIMA ATUAL E O DESMATAMENTO NA PRODUTIVIDADE DE CITRUS NO NORDESTE DO PARÁ (AMAZONIA ORIENTAL)</b>	42
2.1	Introdução	44
2.2	Material e métodos	46
2.2.1	Área de Estudo	46
2.2.2	Dados	47
2.2.3	Procedimentos metodológicos	48
2.3	Resultados e discussão	50
2.3.1	Climatologia mensal no Nordeste do Pará	50
2.3.2	Climatologia sazonal sobre o Nordeste do Pará	52
2.3.3	Variabilidade interanual de precipitação e temperatura	54
2.3.4	Tendências climáticas do Nordeste do Pará	55
2.3.5	Relação de impacto ambiental nos últimos 15 anos	61
2.4	Conclusão	65
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>RISCOS SOCIOAMBIENTAIS DA PRODUTIVIDADE DOS CITROS NO NORDESTE DO PARÁ: APLICAÇÃO DE MULTICRITÉRIOS PARA CHUVAS EXTREMAS</b>	72
3.1	Introdução	74
3.2	Material e métodos	76
3.2.1	Área de estudo	76
3.2.2	Dados	78
3.2.3	Métodos	79

3.2.4	Definição de produtividade e SPI .....	80
3.2.5	Correlação Spearman e processo de análise hierárquico (AHP) .....	81
<b>3.3</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>83</b>
3.3.1	Comportamento da produtividade cítrica nos municípios produtores do Pará .....	83
3.3.2	Análise dos índices climáticos .....	83
3.3.3	Avaliação dos riscos socioambientais associados a evento de chuvas extremas .....	85
3.3.4	Produtividade de citrus sob risco de chuvas extremas .....	86
<b>3.4</b>	<b>Discussão</b> .....	<b>88</b>
<b>3.5</b>	<b>Recomendação e limitação</b> .....	<b>89</b>
<b>3.6</b>	<b>Conclusão</b> .....	<b>90</b>
<b>CAPÍTULO 4    MODELAGEM DE ÁREAS ADEQUADAS PARA LARANJA                   (CITRUS SINENSIS) DIANTE DOS CENÁRIOS FUTUROS                   DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AMAZONIA LEGAL .....</b>		<b>96</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>98</b>
<b>4.2</b>	<b>Material e métodos</b> .....	<b>99</b>
4.2.1	Área de estudo .....	99
4.2.2	Espécies e dados ambientais .....	100
4.2.3	Procedimentos de modelagem ensemble .....	101
<b>4.3</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>103</b>
4.3.1	Performance de modelos de estimativas de citrus .....	103
4.3.2	Importância da variável preditora .....	104
4.3.3	Projeção atual e futura .....	105
4.3.4	Mudanças de áreas adequadas de citrus sinensis .....	108
<b>4.4</b>	<b>Discussão</b> .....	<b>108</b>
<b>4.5</b>	<b>Implicação, recomendação e limitação da adequabilidade da laranja</b> .....	<b>111</b>
<b>4.6</b>	<b>Conclusão</b> .....	<b>111</b>
<b>CAPÍTULO 5    CONCLUSÃO GERAL .....</b>		<b>116</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultados chaves: impactos e implicações</b> .....	<b>116</b>
<b>5.2</b>	<b>Conclusão integrada</b> .....	<b>117</b>
<b>5.3</b>	<b>Limitações da metodologia utilizada e recomendações</b> .....	<b>118</b>
<b>5.4</b>	<b>Considerações finais</b> .....	<b>119</b>

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>120</b>
<b>APÊNDICE A- FIGURAS .....</b>	<b>128</b>

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, o cultivo de citros foi introduzido durante o período da colonização portuguesa a partir de 1530, com as primeiras mudas a iniciarem a produção do fruto. Contudo, só cerca de 400 anos mais tarde, no início do século XX, é que se tornou economicamente significativo. Inicialmente, a fruta era utilizada apenas para consumo *in natura*, e só nos anos 60 é que a produção industrial de suco de laranja começou a ser exportada (Siqueira; Salomão, 2017).

Os dados estatísticos do Brasil indicam que os três maiores produtores de laranja por regiões e estados estão concentrados na região Sudeste (87%), seguido pelo Sul (7%) e Nordeste (7%): São Paulo (77%), Paraná (5%) e Bahia (4%). Em termos de produção de limões por regiões e estados, a região Sudeste (86%) e São Paulo (79%) destacam-se com maior concentração, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019). A Região Norte é a quarta maior produtora de citros do Brasil, mas representa apenas 1% da produção total do país. Essa baixa participação é explicada pelo fato de que muitos municípios da região não apresentam condições climáticas e fitossanitárias favoráveis ao cultivo de citros (Ribeiro; Silva; Ribeiro, 2006). Contudo, dentro do estado do Pará, o município de Capitão Poço é promissor pelas características climáticas adequadas, além de possuir grandes áreas de terra (Alves *et al.*, 2015).

A região vive um novo ciclo de expansão das suas áreas de plantação, estimulado principalmente pela criação do Centro de Citricultores do Nordeste Paraense. De acordo com o Decreto n.º 1943 e a consideração das instruções normativas n.º 3/2008, 53/2008, 37/2016, que deram segurança jurídica e legitimidade às ações de inspeção e controle, segundo Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará (ADEPARÁ, 2017).

Este desenvolvimento do polo cítrico regional também indicou o surgimento de novo arranjo de produção, Sistemas Agroflorestais (SAFs), mantendo as culturas cítricas (laranja, limão e tangerina) e expandindo outros frutos (açai, muruci, maracujá e caju). Este novo arranjo levou ao crescimento populacional de espécies e à produção de frutos, de acordo com o projeto de Reflorestamento da Amazônia (Refloramaz, 2019). No entanto, as produtividades de frutos cítricos vêm declinando ao longo dos anos (IBGE, 2019), devido ao aumento da incidência de pragas e doenças, bem como às mudanças climáticas.

Neste contexto, uma das preocupações mais relevantes dos produtores relativamente à perda de produtividade é o risco do clima e de fenômenos climáticos extremos, como mencionado em Guerreiro Neto e Figueira (2022). Um exemplo disso ocorreu em 2015 no município do Capitão Poço, onde ocorreram chuvas anômalas, causando inundações e afetando o cultivo de certas culturas agrícolas, impossibilitando inclusive a saída e o comércio durante este acontecimento climático atípico (FIDE, 2015). Essa situação criou um contexto de extrema insegurança para as famílias que vivem nas zonas rurais.

### **1.1 Cultura dos citros e risco para a produção**

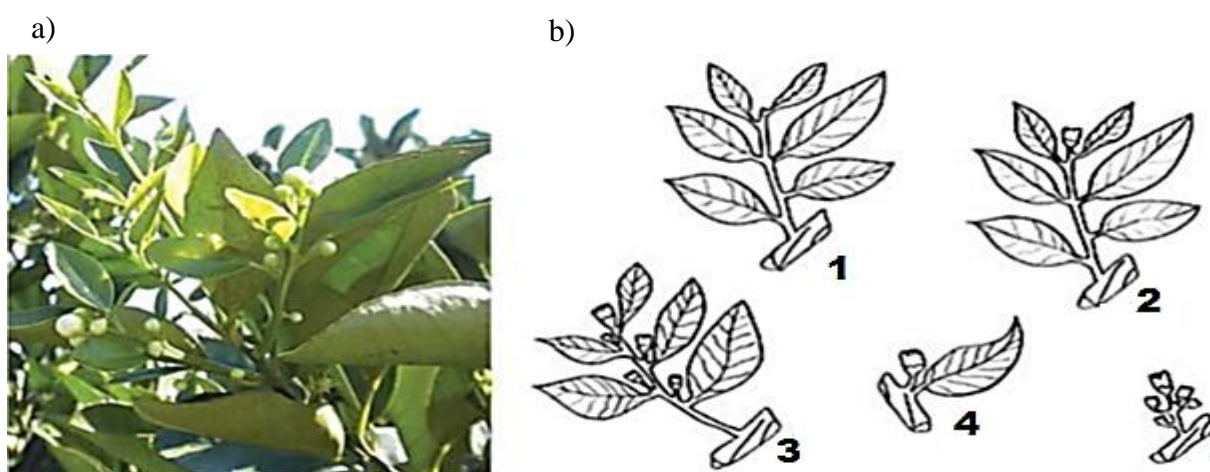
Acredita-se que as espécies cítricas são originárias da China e do sudeste asiático tropical e subtropical. No entanto, existem dúvidas sobre estas origens. Isto é devido à grande diversidade de espécies encontradas no mundo.

*Citrus* é o nome da espécie de um membro da família Rutaceae. As abundâncias de *Citrus* são devidas à forma natural e híbridas (Singh *et al.*, 2021). De acordo com o estudo de Wu *et al.*, (2018) encontraram 3 espécies verdadeiras: *C. reticulata*, (tangerina), *C. maximum* (pomelo), e *C. medica* (limão). Destas três, os híbridos economicamente importantes são: laranjas (*Citrus sinensis*), limões verdadeiros (*Citrus limon*) e limas. Entre as limas, são bem conhecidas a *C. aurantifolia* (limão galego) e a *C. latifolia* (lima ácida "Tahiti") (Bastos *et al.*, 2015; Zhong; Nicolosi, 2020; EMBRAPA, 2020). No Brasil, a lima ácida "Tahiti" é conhecida popularmente como "limão", mas não é um limão. É o resultado de um cruzamento entre a espécie *C. limon* (limão siciliano) e *C. aurantifolia*. É, portanto, sem sementes (Christiano, 2003).

O processo de brotação e floração ocorre na primavera (setembro no hemisfério sul), quando a planta apresenta ramos vegetativos e reprodutivos (Figura 1a). Os brotos dos citros são classificados de acordo com a presença ou não de flores nos ramos e com o número de flores e folhas, como: broto vegetativo (Figura 1b1) broto reprodutivo unifloral com folhas (Figura 1b2), broto reprodutivo multifloral com folhas (Figura 1b3) broto reprodutivo unifloral sem folhas (Figura 1b4), e broto reprodutivo multifloral sem folhas (Figura 1b5). Os demais ápices de crescimento ocorrem no verão (dezembro) e outono (março), quando os ramos são geralmente mais compridos, mais vigorosos, com folhas cada vez maiores e não produzem flores, a não ser que condições climáticas indutivas ao florescimento ocorram antes da brotação das plantas (Siqueira; Salomão, 2002; Mattos Junior, 2005; EMBRAPA, 2020).

A frutificação dura até meados do inverno (junho). Estudos sugerem que os processos genéticos são expressos ao longo de um período relativamente longo. Este período está dividido em 3 fases: A fase I é um intervalo de cerca de dois meses de divisão celular e crescimento lento. Isto inclui o período entre a anteses (abertura das flores) e a queda de junho. A fase II dura de quatro a seis meses, durante os quais o fruto sofre um grande aumento de tamanho devido ao alargamento celular e à acumulação de água. Finalmente, na fase III, é o período de maturação, o crescimento é interrompido e os frutos passam por um processo não-climatérico (Iglesias *et al.*, 2007).

Figura 1 - a) Laranjeira durante a brotação de primavera, emitindo ramos reprodutivos (ramos com flores) e ramos apenas vegetativos; b) Tipos de brotação dos citros: broto vegetativo (1), broto reprodutivo unifloral com folhas (2), broto reprodutivo multifloral com folhas (3) broto reprodutivo unifloral sem folhas, (4) broto reprodutivo multifloral sem folhas (5)



Por curiosidade, muitos pesquisadores apontam para a experiência das mudas entre os níveis de nutrientes e as condições de estresse de salinidade. Este é um processo mais comum que ocorre em regiões áridas e semi-áridas. Brito *et al.* (2014a) e Moreira (2016) mostraram que em diferentes níveis de salinidade da água de irrigação, as combinações copa/porta-enxertos/genótipos apresentavam uma maior ou menor condutividade eléctrica, o que pode levar a uma diminuição ou a um aumento da fitomassa. Entretanto, com o uso de água de boa qualidade e conhecimento dos limites de salinidade e tolerância das plantas, é possível utilizar água com baixa salinidade e evitar problemas com a redução de produtividade (Dias; Blanco, 2010).

Sabe-se que, as plantas cítricas crescem bem em regiões onde a precipitação anual varia entre 900 e 1.500 mm, desde que seja distribuída de forma regular. Se chover em excesso, o sistema radicular pode ficar danificado e a qualidade dos frutos pode sofrer. A amplitude



térmica óptima para o desenvolvimento da planta situa-se entre 23 e 32°C, com uma umidade relativa elevada (Siqueira; Salomão, 2017; EMBRAPA, 2020). Por outro lado, as áreas adequadas para o desenvolvimento de *Citrus* para o tipo de solos são: franco-arenosos ou areno-argilosos. Estes solos são bem arejados e bem drenados, ligeiramente ácidos, com um pH entre 5,5 e 6,5. A textura do solo determina a reação e a quantidade de aplicação de fertilizantes para provocar uma alteração na concentração de nutrientes na folha. Por outras palavras, quanto mais pesado for o solo, mais tempo será capaz de manter os nutrientes do que um solo leve ou arenoso, que deve ser aplicado anualmente (Siqueira; Salomão, 2002; EMBRAPA, 2020).

Segundo Maluf, Matzenauer e Caiaffo (1999), foi encontrado um risco elevado para a produtividade da lima ácida Tahiti (*Citrus latifolia*) no Brasil quando a precipitação foi inferior a 300 mm/ano e as temperaturas máximas foram superiores a 36°C a 39°C, onde a taxa respiratória foi superior à taxa de fotossíntese e o baixo rendimento vegetal foi registrado. Assim, estudos de risco de produtividade sugerem cautela durante as ondas de seca. Além disso, o estudo de Caldana (2020) sobre o zoneamento de risco agroclimático para espécies frutíferas na Bacia do Rio Paraná também destaca a importância de considerar fatores climáticos, como precipitação, temperatura e geada, ao avaliar o risco para o cultivo de espécies frutíferas na região.

Neste contexto, a perda de produtividade e a demanda de água nas plantações é uma das principais preocupações dos produtores. Uma das formas de estudar esses dois fatores é através da utilização de índices de vegetação (IV), como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Os IV são medidas radiométricas sem dimensão, geradas por transformações matemáticas que exploram as propriedades multiespectrais dos instrumentos de detecção remota, tais como *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). O NDVI é o mais utilizado para o índice de área foliar (LAI) e caracterização de biomassa de formações florestais (Barbino *et al.*, 2021).

A aplicação dos IV para estudar a necessidade hídrica e a produtividade das plantações é baseada na forte resposta de absorção vermelha da clorofila combinada com uma forte reflectância (NIR) das folhas. Quando a produção de clorofila é reduzida por fatores bióticos (doença, danos causados por insetos) ou abióticos (nutrição, salinidade, estresse hídrico), há um aumento da reflectância vermelha e uma diminuição do NDVI (Gago *et al.*, 2015).

Estudos tem demonstrado que o NDVI é um indicador confiável de estresse hídrico em diferentes culturas agrícolas (Afonso *et al.*, 2017; Vanella *et al.*, 2020; Yildirim; Asik., 2018; Dikici, 2022). No entanto, é importante ressaltar que a relação entre estresse hídrico e

NDVI não é linear, e pode ser influenciada por outros fatores, como a temperatura, a luminosidade e o tipo de solo (Glenn; Tabb, 2019).

Apesar das limitações, o uso de índices de vegetação para estudar a necessidade hídrica e a produtividade das plantações é uma ferramenta valiosa para os produtores rurais. O monitoramento dessas variáveis através de imagens de satélite pode ajudar a identificar áreas com potencial de perda de produtividade, permitindo que medidas de manejo sejam tomadas para evitar prejuízos.

Sublinha-se que a evapotranspiração em espécies cítricas é da maior importância para avaliar as necessidades de água da cultura e para otimizar a eficiência da água utilizada. Apesar dos avanços nas técnicas de sensoriamento remoto (RS), ainda existem limitações e desafios na aplicação dessas técnicas em certas culturas cítricas. Contudo, Ippolito *et al.* (2023) observaram resultados altamente precisos em termos de dinâmica do teor de água no solo e evapotranspiração real da cultura sob condições de campo.

Quando algumas culturas cítricas apresentam perdas de evapotranspiração durante a estação seca, dependendo do coeficiente de redução aplicado (Carvalho *et al.*, 2020), essa situação pode agravar os surtos de doenças (Brugnara; Castilhos; Sabião, 2022). As principais pragas e doenças documentadas que podem prejudicar economicamente a produção de citros são: melanose, rubelose, gomose e cancro de citros (Tabela 1). As principais propagações dessas doenças são devidas às condições ambientais, como excesso de temperatura, umidade e precipitação (Siqueira; Salomão, 2017). Além disso, estudos recentes têm identificado novas ameaças à indústria de citros, como o *Citrus yellow vein clearing virus* (CYVCV), que é o agente causador da doença *Citrus yellow vein clearing* (CYVC) e pode causar danos significativos à produção (Liu *et al.*, 2020).

Tabela 1 - Principais doenças encontradas na produção de citros

Doença	Causa	Estudo	Necessidade
Melanose ( <i>Diaporthe citri</i> )	Manchas na casca do Fruto	Bettioli <i>et al.</i> (1994) Fonseca, Goes e Pereira (2019)	Limpeza Poda de ramos Uso de fungicidas Isolamento por oxicloreto de cobre
Rubelose ( <i>Corticium salmonicolor</i> )	Escamamento e rompimento da casca dos ramos, com a morte das extremidades.	Bettioli <i>et al.</i> (1994) Souza (2006)	Poda e queima dos galhos afetados 30 cm a 40 cm. Limpeza e arejamento fungicidas e acaricida em mistura com adubo foliar Variabilidade Genética
Gomose ( <i>Phytophthora sp.</i> )	Lesões na casca do colo do tronco.	Medina Filho (2003)	Retirada da casca. Utilização de plantas resistentes Phytophthora clones parasíticos.
Cancro cítrico ( <i>Xanthomonas axonopodis pv. Citri</i> )	Lesões necróticas marrons, salientes e ásperas, visíveis cerca de duas semanas após a infecção durante os estádios iniciais de desenvolvimento.	Massari e Júnior (2006) Longhini <i>et al.</i> (2019)	Erradicação da planta contaminada e plantas vizinhas suspeitas. Uso de composto químico

Como mencionado anteriormente, os cítricos são uma cultura altamente modificada em termos de características do fruto. A produção é reconhecida por grupos: porta-enxertos, fertilização e gestão de irrigação.

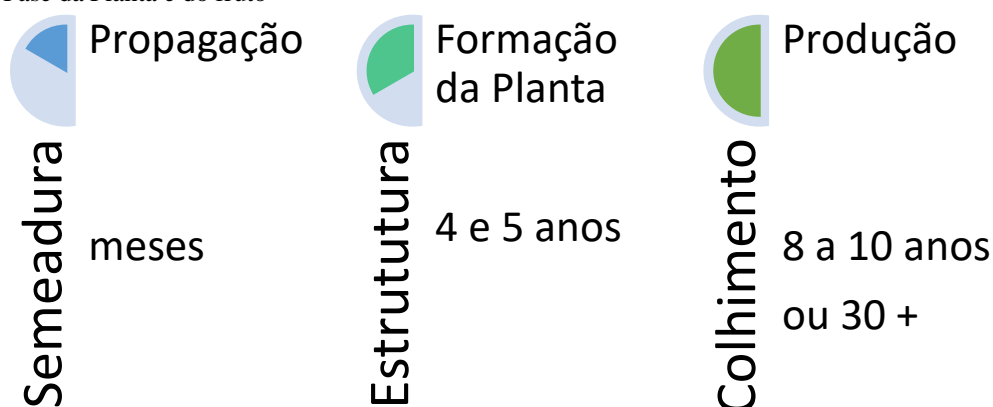
Os riscos de produção relacionados ao solo, à exportação de nutrientes pelos frutos comercializados e à imobilização de nutrientes (fixados nas raízes, caule e folhas) são razões para a necessidade de fertilização cuidadosa em pomares cítricos (EMBRAPA, 2020). No entanto, a aplicação excessiva de fertilizantes pode ser prejudicial para o solo em pomares cítricos. Por exemplo, o aumento na aplicação anual de nitrogênio (média de 712 kg N ha<sup>-1</sup>), fósforo (média de 364 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) e potássio (média de 565 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>) resultou no empobrecimento do magnésio do solo em 89% dos pomares de citros (Yuheng *et al.*, 2022). Além disso, a deficiência de magnésio pode provocar lignificação, alargamento e rachaduras nas folhas cítricas (Xin *et al.*, 2021).

A Figura 2 mostra o tempo necessário para produzir os cítricos (Siqueira; Salomão, 2017). As plantas com um elevado fator idade têm uma certa necessidade de fertilização e água, que pode variar de acordo com a espécie e o clima (Carvalho *et al.*, 2020), bem como pesados custos financeiros (Souza, 2001). Por exemplo, um produtor com uma área equivalente a 300 ha estima uma despesa anual líquida de R\$ 13.990,00 (R\$ ha<sup>-1</sup>) de demanda de água relacionada com a produção de “Tahiti” (Santos Júnior; Frizzone; Paz, 2014). Portanto, é necessário realizar

estudos nas áreas de produção para avaliar a influência da irrigação e fertilização, com o objetivo de identificar as melhores práticas para aumentar a produtividade e reduzir os custos. Dada a falta de incentivos financeiros para a mecanização e apoio técnico à plantação adequada, isso pode exacerbar o declínio da produção de citros (Alves *et al.*, 2015; Carneiro, 2018).

De acordo com estudos recentes, a irrigação e a fertilização são componentes importantes da produção comercial de citros na maioria das regiões produtoras do mundo. A irrigação é necessária para repor adequadamente a água do solo perdida através da evaporação e transpiração, enquanto os fertilizantes substituem os nutrientes removidos durante a colheita e através da lixiviação e mantêm o crescimento e vigor das árvores (Carvalho *et al.*, 2021). No entanto, a aplicação excessiva de fertilizantes pode ser prejudicial para o solo em pomares cítricos (Boaretto *et al.*, 2023).

Figura 2 - Fase da Planta e do fruto



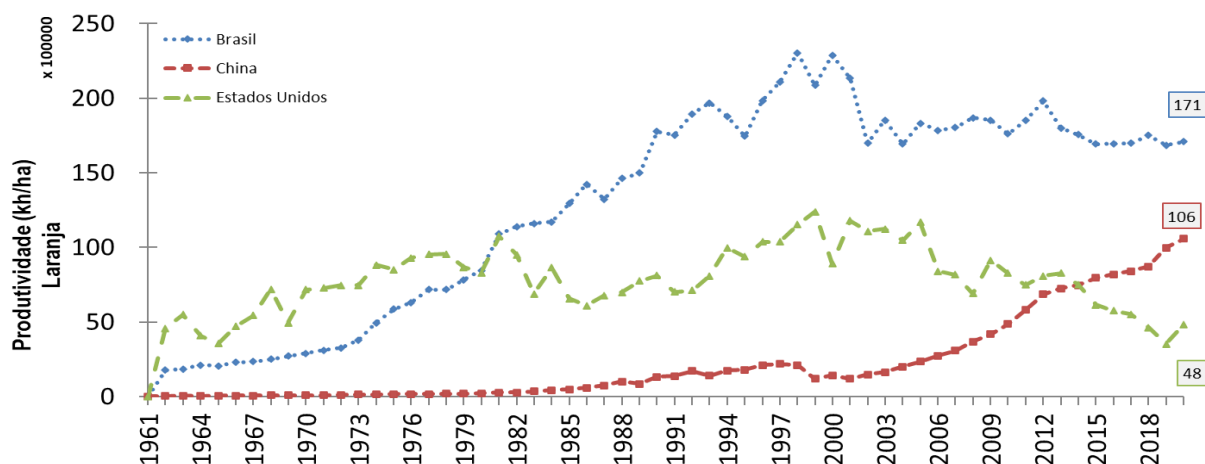
Fonte: adap. de Siqueira e Salomão (2017)

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), a Ásia está em primeiro lugar (47%), seguida da África (44%). As Américas estão em terceiro lugar, com 8% da produção de cítricos (FAO, 2019).

Com os mesmos dados anteriores, a produtividade das laranjas no Brasil está em primeiro lugar, com 171 (x 10000 kg ha<sup>-1</sup>) da produtividade do mundo, seguida da China e dos Estados Unidos (Figura 3). Segundo Neves, Trombin e Kalaki (2017), mais de três mil cidades brasileiras, dos quais quase 400 municípios estão no estado de São Paulo, geram mais de duzentos mil empregos diretos e indiretos. Devido à importância da laranja no consumo mundial, existem várias exigências fitossanitárias no mercado de exportação de vários países (especialmente os Estados Unidos) que consomem a laranja processada industrialmente. O Brasil consome o produto *in natura* de cerca de mil caixas de laranjas de 40,8 kg cada, cerca de

30% da produção nacional. Os restantes 70% da produção nacional são transformados em suco de laranja, dos quais 98% são exportados, gerando receitas importantes para o país de cerca de US \$ 1,5 a 2,5 mil milhões de dólares por ano.

Figura 3 - Evolução mundial da produtividade da laranja



Fonte: (FAO, 2019)

Segundo os dados do último inquérito realizado pelo IBGE, a produção de laranja no Brasil é caracterizada pela região Sudeste com a maior percentagem de produção por hectare, equivalente a 80% da produção brasileira (Araújo; Nicolella, 2018). A região Nordeste é o segundo maior produtor, com 6,4% da produção, seguida pelo Sul, com 6,3%, e pela região Norte, com 2,3%. Os menores produtores são o Sul e o Centro-Oeste, com 2% e 0,89% da produção, respectivamente. Por outro lado, a produção de lima ácida "Tahiti", reconhecida pelo IBGE como "limão", segue o seu padrão (IBGE, 2019).

Na comparação da produção de citros no Brasil em relação à Região Norte durante os anos de 1984 a 2018, a produção de laranja e "limão", teve uma tendência crescente nos períodos de cinco anos de 1984 e 1989. Por outro lado, a partir de 1994, mostrou uma produção em declínio. Esta diminuição pode ser devida a vários fatores de risco de produção, sendo os principais os relacionados com o clima, solos, fitossanidade e porta-enxertos (Ribeiro; Silva; Ribeiro, 2006) e outro pela abertura de áreas cultiváveis (IBGE, 2019), tendo em conta que houve crescimento do consumo (Barros; Barros; Cypriano, 2016) e o crescimento da produção pelas exigências dos processos industriais (Silva, 2018). Nos últimos cinco anos (2014 a 2018) tem havido um ligeiro aumento da quantidade de limões na região Norte. Isto deve-se ao apoio financeiro que tem sido prestado durante estes anos na região dos pólos do Pará, Capitão Poço e Monte Alegre (ADEPARÁ, 2017).

Outro ponto a considerar no Pará é a sazonalidade dos preços em função da safra ou entressafra. É o caso da cultura da laranja que apresenta preços mais baixos nos meses de novembro a fevereiro, com um preço mínimo por atacado de R\$ 1,00/kg. Por outro lado, os preços mais elevados ocorrem nos meses de março a outubro. O preço máximo é de R\$ 2,00/kg, conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021). Por outro lado, nos meses de maior oferta (janeiro-junho), a lima acida “Tahiti” tem um preço médio pago ao produtor de R\$ 12/SACO de 20 quilos (kg) e, no período de menor oferta (julho-dezembro), preço médio de R \$ 30 / SACO, de acordo com a Centrais de Abastecimento do Estado do Pará (CEASA, 2021).

## 1.2 Climatologia, Vulnerabilidades e Riscos Climáticos

Nesta seção, serão apresentadas algumas características gerais da climatologia, variabilidade, e a atual discussão sobre as mudanças climáticas como uma questão de vulnerabilidade e risco climático.

*Climatologia*: define-se como estado médio da atmosfera numa dada porção de tempo e em determinado lugar. Em síntese, a climatologia é o resultado de um dado específico (variável meteorológica em relação algum espaço geográfico) durante um período de aproximadamente de 30 anos ou mais (Ayoade, 1996).

*Variabilidade Climática*: refere-se às variações no estado médio e outras estatísticas (como desvio padrão a ocorrência de extremos, etc.) do clima em todas as escalas espaciais e temporais, além de eventos climáticos individuais (IPCC, 2013).

*Evento climático extremo (ou fenômenos meteorológicos extremos)*: refere-se a um evento raro em determinado lugar e época do ano. [...]. Por definição, as características de um evento climático extremo podem variar de um lugar a outro em sentido absoluto. Um comportamento extremo do tempo pode se classificar como evento climático extremo quando persiste durante certo tempo [...] (IPCC, 2013).

*Mudança climática*: mudança no estado do clima que pode ser identificada (por exemplo, com testes estatísticos) nas variações do valor médio e/ou na variabilidade das suas propriedades, que persiste durante longos períodos de tempo, geralmente decênios ou períodos maiores. A mudança climática pode ser por processos *internos naturais* ou *forçamentos externos* [...] (IPCC, 2013)

*Risco climático (Climate risk)* é entendido, de acordo com a Agência das Nações Unidas para Redução de Riscos de Desastres (UNISDR, 2009), como a probabilidade de ocorrência de um perigo climático, a exposição de sistemas naturais e humanos a esses perigos e a vulnerabilidade desses sistemas aos mesmos.

*Vulnerabilidade*: é o grau de suscetibilidade de um sistema aos efeitos adversos da mudança climática, ou sua incapacidade de administrar esses efeitos, incluindo variabilidade climática ou extremos. Vulnerabilidade é função do caráter, dimensão e taxa de variação climática ao qual um sistema é exposto, sua sensibilidade e capacidade de adaptação. (IPCC, 2001)

É importante salientar que a floresta Amazônica desempenha um papel relevante no sistema climático à escala global e regional (Nobre *et al.*, 1991). Isto, por sua vez, influencia o

ciclo hidrológico (Marengo; Souza Junior, 2018). A forma como a floresta interage com a atmosfera na regulação da água na bacia hidrográfica é explicada pelo transporte de umidade do ar da região Amazônica pelos ventos alísios do oceano Atlântico tropical que favorecem a ocorrência de precipitação. Desta forma, a floresta tropical produz uma evaporação intensa. Recicla a umidade do ar. Uma grande parte desta evaporação é depois devolvida à bacia do rio Amazonas sobre a forma de chuva.

Por isso, a variável mais importância ao clima amazônico é a precipitação pluviométrica (Moraes *et al.*, 2005; Souza; Kayano; Ambrizzi, 2005). A Amazônia apresenta uma sazonalidade climática pronunciada, com a precipitação anual máxima a ocorrer durante os meses do verão e outono austral (de dezembro a maio) e a precipitação anual mínima a ocorrer durante os meses de inverno e primavera (de junho a novembro) (Souza; Kayano; Ambrizzi, 2004). A elevada pluviosidade está associada a sistemas meteorológicos, tais como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS); Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e também das Linhas de Instabilidades (LI) (Cohen; Dias; Nobre, 1995).

No entanto, existem vários mecanismos oceano-atmosfera que podem causar variações climáticas em diferentes escalas de tempo e espaço. Por exemplo, do *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) são processos físicos que ocorrem na zona equatorial do Oceano Pacífico Tropical, onde as águas superficiais são quentes e frias durante períodos de dois a sete anos (Kiladis e Diaz, 1989; Trenberth e Hoar, 1996). Os episódios de El Niño são caracterizados pela manifestação de anomalias positiva de *Sea Surface Temperature* (SST) sobre o Pacífico centro-leste. São também caracterizados por ventos alísios mais fracos do que o normal e *Southern Oscillation Index* (SOI) negativo. Estas condições inibem a convecção tropical na ZCIT. O resultado é uma configuração pluviométrica deficitária sobre a Amazônia Oriental e o Nordeste do Brasil. Essas condições são invertidas durante os episódios de La Niña, cujas condições favorecem a convecção e o aumento da precipitação (Souza *et al.*, 2016, 2017).

Por conseguinte, são utilizados o *Southern Oscillation Index* (SOI) e os índices de *Sea Surface Temperature* do Oceano Pacífico (SST). O SOI é um indicador numérico do desenvolvimento e intensidade do *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) e é calculado utilizando as diferenças de pressão média do nível do mar (MNP) entre o Taiti e Darwin, com base numa análise mensal para definir os valores altos e baixos do SOI relacionados com as fases fria (La Niña, SOI+) e quente (El Niño, SOI-) do fenômeno ENSO proposto por Lim *et al.* (2016). Por outro lado, os valores de anomalias da (SST) amplamente utilizado são os

seguintes: Niño:  $\geq 0,5$  °C; Neutro: - 0,5 °C a 0,5 °C; e La Niña:  $\leq -0,5$  °C (Meyers *et al.*, 1996; Souza; Rocha, 2014; Souto *et al.*, 2019).

Sobre outro assunto, não se pode esquecer o Dipolo do Oceano Atlântico. É usualmente conhecido como o Gradiente Térmico Inter-hemisférico sobre o Atlântico Intertropical. Esse sistema modula durante o outono austral e foi descoberto por (Hastenrath; Greichscar, 1993; Nobre; Shukla, 1996) e caracteriza-se pela manifestação simultânea de anomalias SST com configuração espacial oposta sobre as bacias norte e sul do Atlântico Tropical. Esse mecanismo é também responsável pela modulação da precipitação e das bandas de nuvens que estão associadas à ZCIT. Logo, o Módulo Meridional Atlântico (AMM) e gradiente (GRAD) são índices que se referem ao sinal do dipolo atlântico (positivo/negativo) e têm uma relação de diminuição/aumento da precipitação (Santos, Melo; Brito, 2016; Nóbrega; Santiago, 2016; Silva *et al.*, 2020).

Neste contexto, Souza, Kayano e Ambrizzi (2005) classificaram os cenários climáticos extremos como “favorável” (La Niña no Pacífico e anomalias de SST negativa/positiva no Atlântico Norte/Sul) e “desfavoráveis” (El Niño no Pacífico e TSM anormalmente positiva/negativa no Atlântico Norte/Sul), cujos padrões de circulação atmosférica/oceânica intensificam ou inibem a convecção tropical da ZCIT.

Além disso, as interações oceano-atmosfera no Pacífico podem ser melhoradas através do estudo das teleconexões ENSO. Os três oceanos são importantes para os sinais (ENSO) de acordo com Zhang, Luo e Li, (2019). Mas não vou entrar nesta discussão. Mas gostaria de salientar que, desde então, o foco da observação de vários eventos ENSO foi alargado à análise da precipitação e temperatura. Vários índices são utilizados atualmente para classificar os eventos. Os mais importantes destes foram mencionados acima.

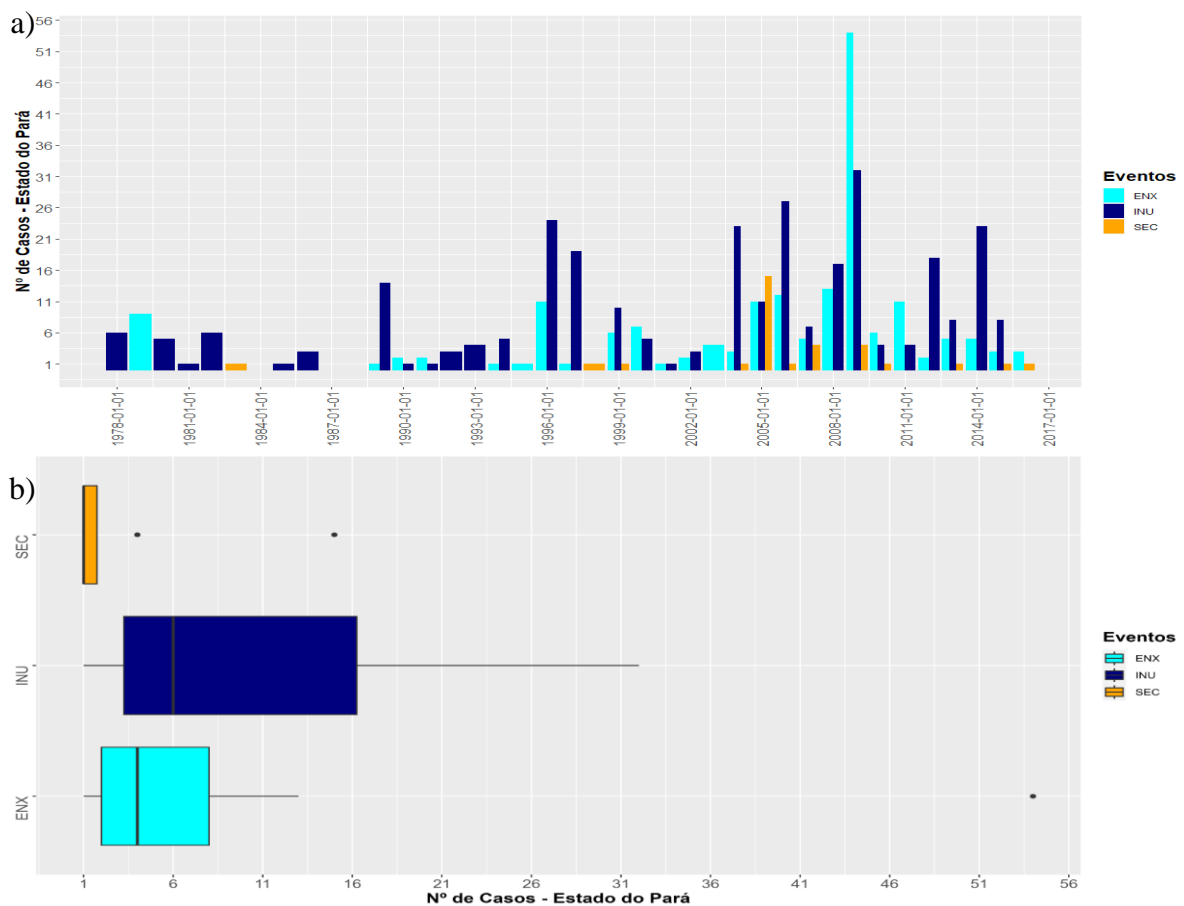
Em termos de eventos climáticos extremos, estudos anteriores investigaram os impactos das cheias/inundações e secas/estiagens na Amazônia e em outras regiões do Brasil. Na bacia amazônica, foram relatados fenômenos extremos com secas em 2005 e 2010 (Serrão; Santos; Lima, 2014; Nascimento *et al.*, 2020; MARENGO *et al.*, 2008) e grandes inundações em 2008/2009 (Marengo *et al.*, 2012a; Nina; Szlafsztein, 2018), 2012 (Marengo *et al.*, 2013b; Espinoza *et al.*, 2013) e 2014 (Espinoza *et al.*, 2014). A seca também foi observada no Brasil e a nível mundial em 2014/2015 e 2016 (Coelho; Cardoso; Firpo, 2016; Su *et al.*, 2018) e anos 1997/1998 e 2009/2010 (Takahashi *et al.*, 2011).

O Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (2020) compilou a informação sobre situações de emergência na modalidade de desastres relacionados com eventos meteorológicos



e hidrológicos nos estados brasileiros no período de 1979 a 2016. Os dados extraídos para o estado do Pará mostraram que em 2005, 15 municípios do Pará foram registrados em situações de seca extrema, e em 2009, foram observados 54 municípios em casos de inundações e chuvas intensas (Figura 4a). Em resumo, a Figura 4b mostra que o número de casos notificados no Pará está na faixa (81%) de inundações (INU), secas (SEC) apresentou uma baixa frequência de casos neste período (2%), e enxurradas ou chuvas intensas (ENX) uma faixa de (17%) registradas no Pará.

Figura 4 - a) Números de casos no estado do Pará e b) *boxplots* das variáveis: Inundação (INU), secas (SEC) e Enxurradas (ENX), no período de 1979 a 2016



Fonte: Sistema nacional de proteção e defesa civil. Org. da própria Autora.

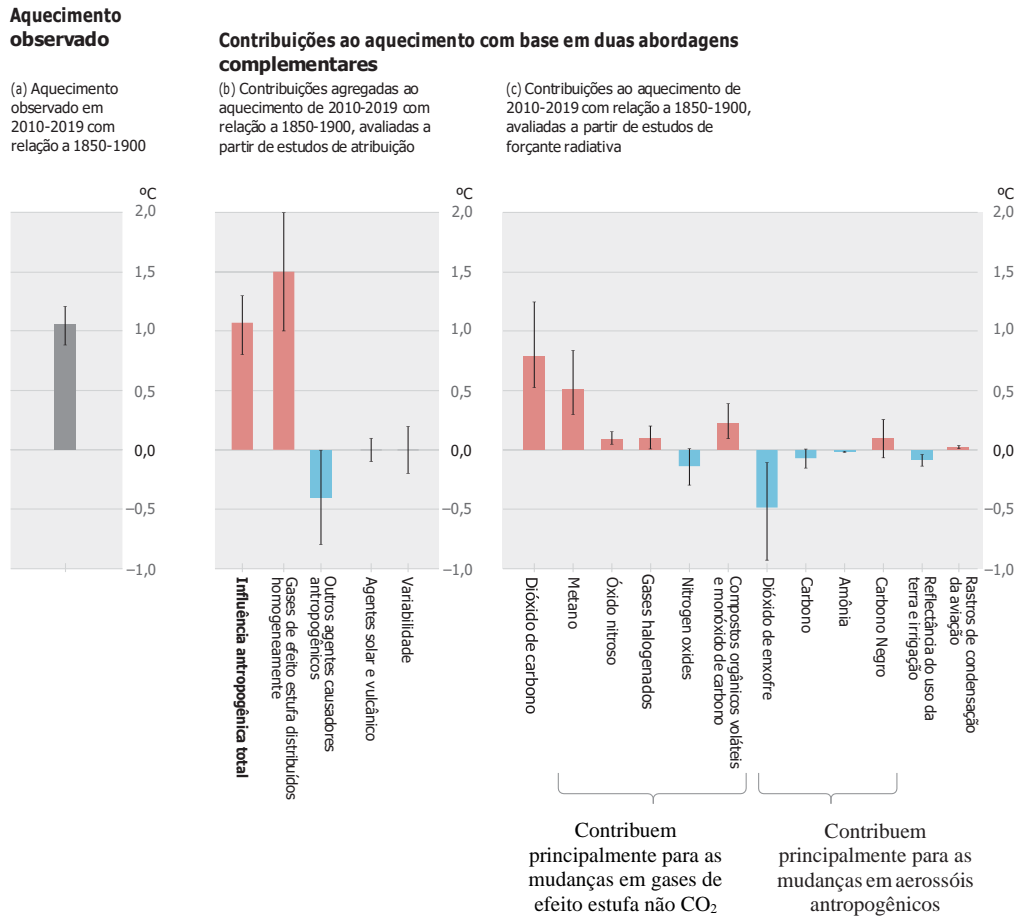
Marengo *et al.* (2008) reportaram a exposição ao perigo e vulnerabilidade para o ano de 2005. Os principais afluentes do rio Amazonas mostraram níveis fluviométricos abaixo do nível médio normal e anomalias de precipitação negativas no ano 2004/05. Certamente, o fenômeno (El Niño) teve um impacto na população ribeirinha, tanto em zonas rurais como urbanas. Houve relatos de impactos na pesca, transportes fluviais e aéreos, saúde e agricultura (Anderson *et al.*, 2011).

Em contraste, Silva Junior (2010), analisando o ano de 2009, destacou as inundações mais graves na região do Baixo Amazonas: Municípios como Santarém, Óbidos e Alenquer tiveram as suas estradas inundadas e as suas atividades de rotina (agências bancárias, comércio e escolas) afetadas pela inundação do rio Amazonas. Rodrigues e Szlafsztein (2009) constataram que os produtores das comunidades do Projeto de Assentamento (PA) e do Projeto de Assentamento Extrativo (PAE) no município de Alenquer sofreram perdas de produção significativas devido às chuvas intensas.

Segundo (Marengo *et al.*, 2013a) falta a aceitação de que as frequentes catástrofes naturais, tais como inundações e secas que estão agora a ocorrer são produtos das mudanças climáticas. “As frequências de eventos extremos têm agravado os problemas socioambientais na Amazônia, devido à estreita relação e interação entre o homem e a natureza, cuja abordagem científica requer uma nova análise, permitindo uma percepção mais ampla e mais sistêmica, interdisciplinar”.

Neste contexto, as mudanças climáticas são uma grande preocupação para a sociedade no século XXI. Isto tem sido amplamente relatado nos documentos de base científica do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), no Quarto Relatório de Avaliação (IPCC AR4, 2007), no Quinto Relatório de Avaliação (IPCC AR5, 2013), e agora no Sexto Relatório de Avaliação (IPCC AR6, 2021). AR6 indica que as atividades humanas estão aumentando o aquecimento global. Os eventos climáticos extremos, incluindo ondas de calor, chuvas fortes, e secas, estão a tornar-se mais frequentes e severos em todo o mundo. Os resultados, resumidos na (Figura 5 e 6), indicam que o efeito das emissões antropogênicas globais aqueceu a temperatura do ar à superfície em média 1,1°C. O aquecimento sobre os continentes tem sido mais pronunciado (1,6°C). Os gases com efeito de estufa contribuíram com 1,6°C do aquecimento. Os aerossóis contribuíram com 0,5°C do arrefecimento, e as contribuições naturais foram inferiores a 0,1°C. Globalmente, a precipitação continental tem aumentado desde 1950. No entanto, algumas regiões sofreram reduções significativas da precipitação.

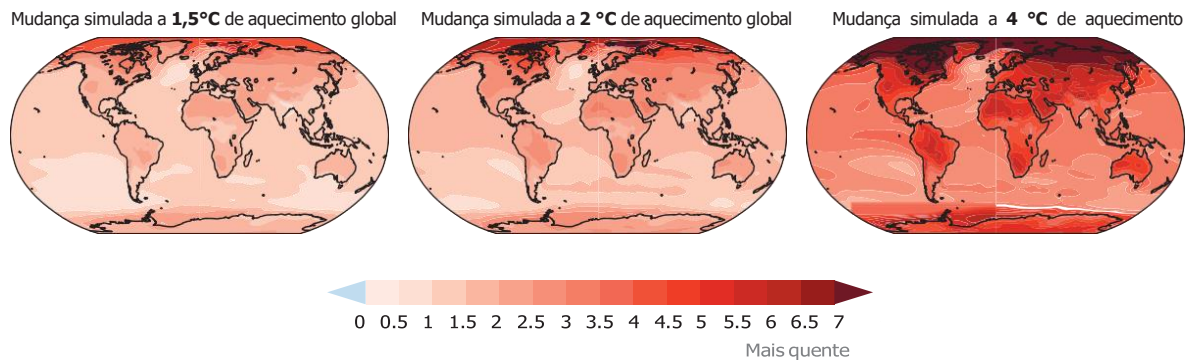
Figura 5 - O aquecimento observado é causado por emissões de atividades humanas, com o aquecimento por gases de efeito estufa parcialmente mascarado pelo resfriamento pelos aerossóis



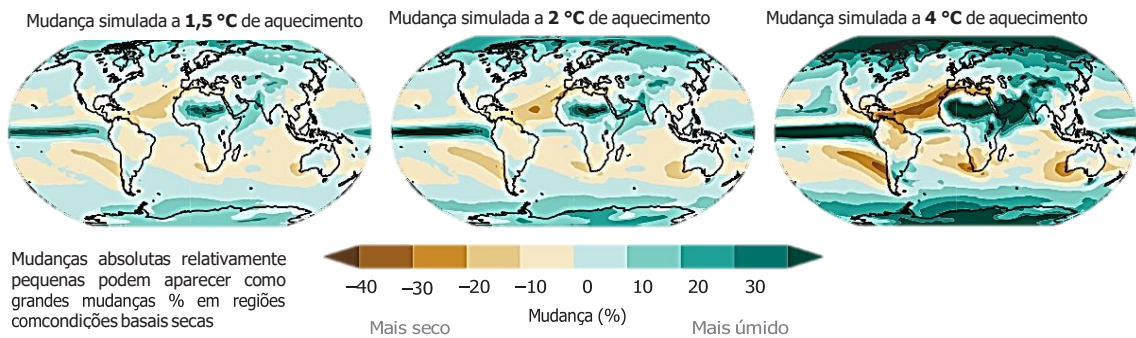
Fonte: (IPCC, 2021)

Figura 6 – Mudanças anual da temperatura, precipitação e umidade do solo.

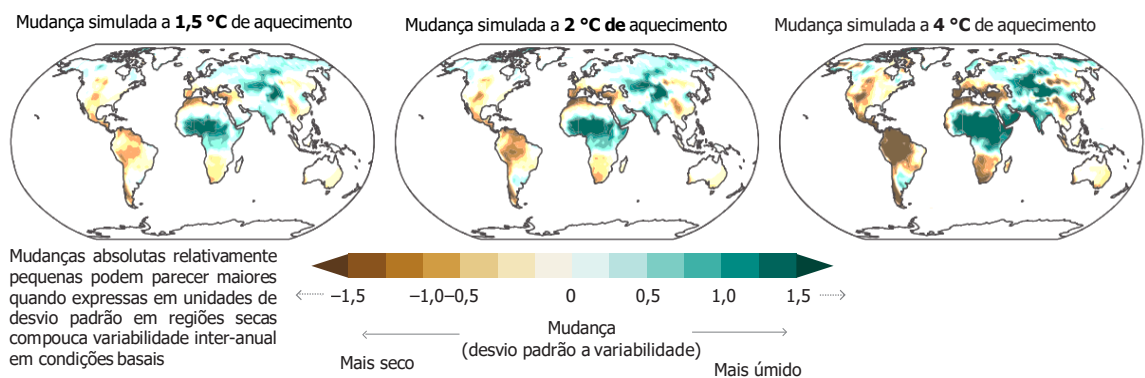
a) Mudança média anual de temperatura (°C) em relação a 1850-1900



b) Mudança média anual de precipitação (%) em relação a 1850-1900



c) Mudança anual média na umidade total da coluna do solo (desvio padrão)



Em qualquer caso, vale a pena mencionar os estudos de alguns pesquisadores que já apontaram o aumento da temperatura do ar e a tendência de precipitação, como se pode ver na Tabela abaixo:

Tabela 2 - Resumos de tendências da temperatura do ar no Brasil.

Elemento Meteorológico	Período	Valor da Tendência	Referência
Temperatura do ar (TAR)	1940 – 1975	+0,4 e +0,6 °C	IPCC (2001)
	1976 – 2000	+0,6 e +0,8 °C	IPCC (2001)
	100 anos	+0,56°C	Victoria <i>et al.</i> (1998)
	100 anos	+0,85°C	Marengo e Soares (2003)
Temperatura (TMÍN) e Temperatura (TMÁX), em nível regional.	Mínima 1951-2002	+1,4 °C por década de TMIN; +0,4 e +0,6 °C por década de TMÁX.	Marengo <i>et al.</i> (2007)
	Máxima		
Temperatura (TMED)	média 1961- 1990	+0,75 °C	Marengo e Camargo (2008)
Temperatura (TMÍN) e Temperatura (TMÁX), em Macapá.	Mínima 1968– 2020	TMax (76,6%), TMin (68,9%), Tx10p (60,5%), TXx (57%), Tx90p (54,3%), TNx (51,8%), Tn90p (49,2%), Tn10p (49%). Tais variações desses índices demonstram que a zona urbana da capital amapaense apresenta tendência de dias e noites mais quentes, temperaturas mínimas e máximas mais elevadas, bem como dias e noites frias anuais menos frequentes.	Moreira, Cunha e Costa (2021)
Temperatura (TMÍN) e Temperatura (TMÁX) na Bacia do rio Xingu, Amazônia Brasileira,	Mínima 1980 a 2013	0,5°C na temperatura média (CWD)	Lucas <i>et al.</i> (2021)
	Máxima		
Temperatura (TMÍN) e Temperatura (TMÁX) na Amazônia Legal.	Mínima 1973-2013	0,04 °C por ano	Almeida <i>et al.</i> (2017)
	Máxima		
Temperatura (TMÍN) e Temperatura (TMÁX) em Belém e Manaus, Pará.	Mínima 1969-2018	Manaus, TMAX de 1,0 °C (1999-2008) e TMIN de 1,8°C (2009-2018)	Dias <i>et al.</i> (2021)
	Máxima	Belém, TMAX de 0,8°C (1999-2008) e TMIN de 0,6°C (1989-1998)	

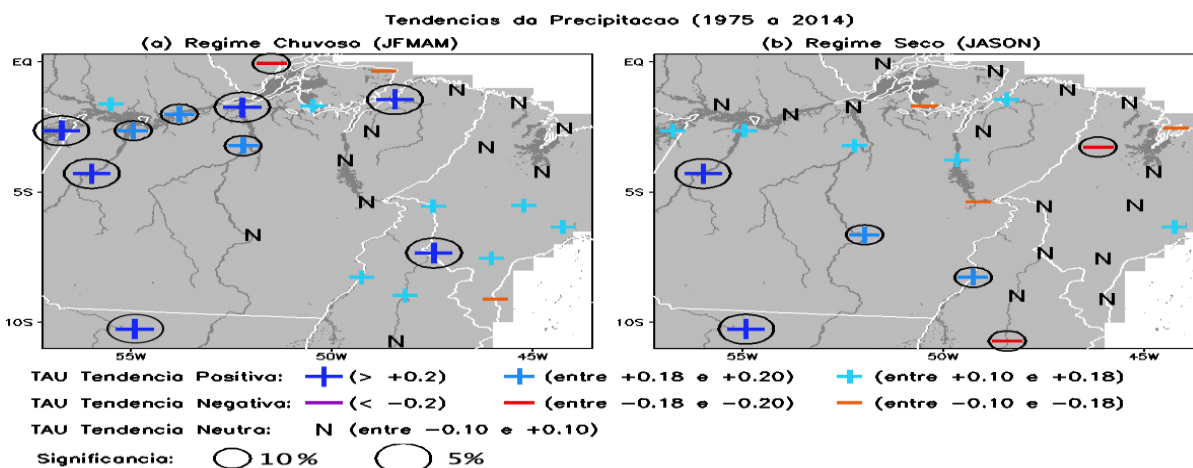
Para a precipitação, (Costa; Foley, 2000) indicou uma tendência neutra durante um período de 20 anos (1976-1996). Haylock *et al.* (2006) realizaram análises de dados observados para o Brasil entre 1960 e 2000 e identificaram tendências de precipitação positivas no Sul e Sudeste e tendências negativas no Nordeste.

Marengo (2009) indicou que a região Amazônica não tem tendência tanto no setor norte como no sul. Isto porque a precipitação é variável, pelo que não é consistente e unidirecional. Os resultados da precipitação e os índices fluviométricos mostram uma variabilidade na escala interanual a inter-decadal no período de 1902 a 2008. No entanto, especialmente para os estados de Rondônia, Mato Grosso e Tocantins. Souza e Rocha (2014) mostraram uma diminuição da precipitação - associada à intensificação dos extremos secos e ao recuo dos extremos úmidos - na estação chuvosa. Também, no trimestre de setembro-novembro da estação seca, foram observadas tendências negativas na maioria dos estados da Amazônia.

Souza *et al.* (2017) replicaram as análises das tendências de precipitação para o estado do Pará, e nas suas observações mostraram que para o regime chuvoso, há sinais de um aumento sistemático da precipitação, especialmente no oeste, centro e nordeste do Pará e no norte do Tocantins. Durante o regime seco, há sinais de tendências positivas significativas no oeste/sudeste do Pará, contudo, foi salientado que os padrões de neutralidade (sem tendências) em grande parte do Maranhão e em alguns setores do norte/nordeste do Pará, como mostrado na (Figura 7).

Tendo em conta o que foi apresentado, verifica-se que o ambiente urbano e rural na Amazônia Legal é plural. Isto revela que cada Cidade, Estado e País tem as suas próprias contradições espaciais e socioambientais. Assim, assume-se que as vulnerabilidades e riscos serão acentuados durante eventos extremos de chuva e seca. Isto irá afetar a população, a economia e os meios de subsistência.

Figura 7 - Distribuição espacial das tendências de precipitação nas 30 estações sobre a tendências positivas, negativas e neutras baseadas no valor do TAU de Mann-Kendall, sendo que os círculos destacam as tendências com significância estatística, conforme legenda na base da figura



Fonte: Souza *et al.* (2017)

### 1.3 Questão da pesquisa

Nas últimas décadas, a produtividade de citrus tem mostrado uma tendência negativa (IBGE, 2020). Uma das principais razões para o declínio da produtividade dos cítricos está relacionada com fenômenos climáticos, principalmente a variabilidade interanual associada ao El Niño, La Niña e o Dipolo Atlântico. À medida que estes fenômenos se tornam mais frequentes, as perdas e danos nas atividades agrícolas tornam-se mais visíveis (González-Orozco *et al.*, 2020). A pergunta principal é: Será o clima o principal fator responsável pela redução da produtividade de *Citrus*? e a seguinte questão é: Como a variabilidade climática pode ter um impacto na produtividade dos cítricos? Quais são os fatores socioambientais mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas? E no futuro (até 2100), quais serão os impactos das mudanças climáticas sobre a espécie (por exemplo, *Citrus sinensis*)?

### 1.4 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa

A pesquisa em questão possui uma justificativa sólida, uma vez que se fundamenta na interdisciplinaridade necessária para abordar os múltiplos aspectos relacionados aos citros, incluindo as esferas climática, social e ambiental. Os citros são influenciados tanto por fatores bióticos quanto abióticos, sendo o uso de porta-enxertos tolerantes a esses fatores crucial para obter uma produtividade e crescimento satisfatórios. Entretanto, recentemente, tem-se observado uma preocupante tendência de queda na produtividade de frutos cítricos no Brasil, como reportado pelo (IBGE,2019).

Shafqat *et al.* (2021) destacam que as condições de déficit hídrico afetam negativamente o crescimento e amadurecimento dos frutos de citros, resultando em frutos menores, mais ácidos e árvores menos produtivas. Além disso, o aumento das temperaturas pode levar à queda prematura dos frutos antes da colheita, impactando ainda mais a produtividade.

O relatório do IPCC AR6 de 2021 alerta sobre o aumento das temperaturas, o que é motivo de preocupação para os agricultores, conforme Resende (2006) já havia indicado. O IPCC projeta cenários de temperaturas elevadas e secas extremas, representando um sério risco para a agricultura e a economia do país.

A interdisciplinaridade desta pesquisa é essencial, pois busca compreender os diversos níveis de impacto socioambiental das mudanças climáticas. Isso não se limita apenas à caracterização e quantificação das perdas, mas também à análise das variações climáticas que

afetam as plantas, incluindo aspectos relacionados à fisiologia, morfologia e disponibilidade de água. Além disso, é crucial considerar as interações no contexto social e econômico, uma vez que esses fatores desempenham um papel fundamental.

Os resultados dessa pesquisa podem fornecer contribuições práticas para mitigar os impactos das mudanças climáticas, especialmente no que diz respeito à seca e às inundações, promovendo, assim, a produtividade das lavouras e garantindo a segurança alimentar.

Em resumo, a justificação desta pesquisa se baseia na necessidade premente de compreender os impactos socioambientais das mudanças climáticas na produtividade dos citros. A interdisciplinaridade é fundamental para abordar essa questão de forma abrangente e eficaz, envolvendo campos de conhecimento como a agronomia, a climatologia, a economia e a sociologia. A colaboração entre essas áreas é essencial para encontrar soluções sustentáveis e resilientes para os desafios enfrentados pela agricultura de citros diante das mudanças climáticas.

Figura 8 - Interdisciplinaridade é a chave para compreensão complexa do mundo



Fonte: Elaborado pela Autora



## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo Geral

Analisar as relações entre a variabilidade climática regional e a produtividade de citrus (laranja e limão) na Amazônia oriental nas últimas três décadas, bem como avaliar os riscos socioambientais relacionados aos eventos extremos de precipitação. Além disso, foi desenvolvido um estudo de modelagem ambiental para investigar os impactos das mudanças climáticas futuras na distribuição espacial das principais áreas de ocorrência da espécie *Citrus sinensis* sobre o domínio da Amazônia Legal Brasileira.

### 1.5.2 Objetivo Específicos

- i. Analisar as relações entre a variabilidade e tendências climáticas (precipitação e temperatura do ar), padrões de desmatamento e a produtividade de citrus (laranja e limão) na Amazônia Oriental durante as últimas três décadas;
- ii. Avaliar os riscos socioambientais da produtividade de citrus relacionados especificamente aos eventos extremos de precipitação da Amazônia oriental;
- iii. Desenvolver um estudo de modelagem ambiental para investigar os impactos dos diferentes cenários futuros de mudanças climáticas na distribuição geográfica das áreas potenciais de ocorrência da espécie *Citrus sinensis* sobre a Amazônia Legal Brasileira.

## 1.6 Estrutura da tese

Tabela 3 - Organização da tese de acordo com os objetivos específicos.

CONTEÚDO	HIPÓTESES PRINCIPAIS
<p><b>CAPÍTULO 2 - RELAÇÕES ENTRE O CLIMA ATUAL E O DESMATAMENTO NA PRODUTIVIDADE DE CITRUS NO NORDESTE DO PARÁ (AMAZONIA ORIENTAL)</b></p>	<p>⇒ A produtividade dos cítricos é reduzida por uma diminuição da precipitação e um aumento da temperatura máxima, o que sugere a hipótese de que o desmatamento possa estar associado a esse fenômeno.</p>
<p><b>CAPÍTULO 3 - RISCO SOCIOAMBIENTAL DA PRODUTIVIDADE DOS <i>Citrus</i> NO NORDESTE DO PARÁ: APLICAÇÃO DE MULTICRITÉRIOS PARA CHUVAS EXTREMAS</b></p>	<p>⇒ As chuvas extremas afetam as áreas de cultivo de cítricos e aumentam os riscos socioambientais.</p>
<p><b>CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DE ÁREAS ADEQUADA PARA O CULTIVO DE (<i>Citrus</i>) MEDIANTE AOS CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AMAZONIA LEGAL</b></p>	<p>⇒ As áreas adequadas da espécie (<i>Citrus</i>) serão reduzidas em cenários futuros de mudanças climáticas na Amazônia Legal.</p>
<p><b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO GERAL</b></p>	<p>⇒ O clima é um dos principais fatores que influenciam a redução da produtividade dos citros. No entanto, a probabilidade de impactos agrícolas pode também ser aumentada por fatores antropogênicos e naturais (desmatamento e chuvas extremas).</p>

A tese está organizada em cinco capítulos. O **primeiro capítulo** serviu para introduzir a pesquisa, as referências, a questão pesquisa, a justificativa e os objetivos. O **segundo capítulo** tem uma abordagem explicativa multivariada da climatologia, variabilidade e tendências climáticas no nordeste do Pará, no que diz respeito à produtividade dos frutos (laranja e limão) e desmatamento. O **terceiro capítulo** apresenta os riscos socioambientais à produtividade da *Citrus* e os índices climáticos e perfil de risco à produtividade em caso de chuvas extremas. O **quarto capítulo**, apresenta os resultados da pesquisa que analisa a modelagem de adequabilidade de *Citrus sinenses* face as mudanças climáticas futuras. Por fim, o **quinto capítulo** conclui fornecendo respostas diretas à principal questão de pesquisa e subquestões, limitações da pesquisa e recomendações.

## **CAPÍTULO 2 RELAÇÕES ENTRE O CLIMA ATUAL E O DESMATAMENTO NA PRODUTIVIDADE DE *Citrus* NO NORDESTE DO PARÁ (AMAZONIA ORIENTAL)<sup>1</sup>**

**Resumo:** Este estudo analisou os padrões temporais e espaciais das séries temporais de Precipitação (PRP) e Temperatura máxima (TMAX) de 37 municípios proporcionalmente distribuídos no nordeste do Pará (Amazônia Oriental), no período de 1981 a 2018 (37 anos). Para identificar os impactos das mudanças climáticas, foram utilizados dados ambientais de produtividade de laranja e limão (IBGE), evapotranspiração (ET) e desmatamento (PRODES) dos últimos 15 anos. A abordagem não paramétrica adotada, especificamente o teste de Mann-Kendall (MK), foi aplicada juntamente com a análise da variação delta em dois períodos distintos: 1989-2003 e 2004-2018, totalizando 15 anos. Essas análises foram realizadas para estimar as tendências anuais e sazonais, além de detectar variações por meio do uso de *heatmap* e *boxplots*. Para compor o estudo das mudanças climáticas, foi aplicada a Análise de Componentes Principais (PCA) às variáveis ambientais e, para testar a hipótese, foi utilizada a Regressão de Componentes Principais (PCR). Os resultados obtidos revelaram uma tendência positiva crescente nas séries temporais anuais e sazonais de TMAX ao longo de 37 anos, sendo mais significativas durante a estação seca. Em relação à PRP, os resultados mostraram variações significativas em diversas regiões, tanto positivas quanto negativas. Nas escalas anuais e sazonais, áreas como a R5, no nordeste do Pará, apresentaram tendências positivas, enquanto tendências negativas de diminuição da PRP foram observadas nas áreas costeiras do Pará (R1). Com base nos resultados da PCA e PCR, foi possível estabelecer a associação entre os dados de desmatamento e temperaturas máximas mais elevadas. Além disso, a produtividade da laranja mostrou correlação com PRP e ET, enquanto PRP e ET foram considerados fatores limitantes para a produtividade do limão.

**Palavras-chave:** componentes principais; desmatamento; precipitação; produtividade; regressão de componentes principais; temperatura máxima; tendência; variabilidade.

---

<sup>1</sup> Submetido a Revista RGBF, Qualis A2.

## **RELATIONSHIPS BETWEEN CURRENT CLIMATE AND DEFORESTATION ON CITRUS PRODUCTIVITY IN NORTHEASTERN PARÁ (EASTERN AMAZONIA)**

**Abstracts:** This study analyzed the temporal and spatial patterns of time series data for Precipitation (PRP) and Maximum Temperature (TMAX) in 37 municipalities proportionally distributed in northeastern Pará (Eastern Amazon) during the period from 1981 to 2018 (37 years). In order to identify the impacts of climate change, environmental data on orange and lime productivity (IBGE), evapotranspiration (ET), and deforestation (PRODES) from the last 15 years were used. The non-parametric approach adopted, specifically the Mann-Kendall test (MK), was applied along with the delta variation analysis in two distinct periods: 1989-2003 and 2004-2018, totaling 15 years. These analyses were conducted to estimate annual and seasonal trends, as well as to detect variations through the use of heatmaps and boxplots. To compose the study of climate change, Principal Component Analysis (PCA) was applied to environmental variables, and Principal Component Regression (PCR) was used to test the hypothesis. The results revealed a growing positive trend in annual and seasonal time series data for TMAX over 37 years, with the most significant trends occurring during the dry season. Regarding PRP, the results showed significant variations in various regions, both positive and negative. At annual and seasonal scales, areas such as R5 in northeastern Pará exhibited positive trends, while negative trends in decreased PRP were observed in the coastal areas of Pará (R1). Based on the results of PCA and PCR, it was possible to establish an association between deforestation data and higher maximum temperatures. Additionally, lime productivity showed a correlation with PRP and ET, while PRP and ET were considered limiting factors for lime productivity.

**Keywords:** principal components; deforestation; precipitation; productivity; principal component regression; maximum temperature; trend; variability.

## 2.1 Introdução

A floresta amazônica é conhecida por desempenhar um papel relevante no sistema climático global e regional, mantendo os ciclos hidrológicos e de carbono (Souza; Rocha, 2014). Estudos observacionais têm colaborado para identificar variações no regime de chuvas devido a esse papel da Amazônia como reguladora da água e transportadora de umidade dentro ou fora da região (Marengo; Souza Junior, 2018).

O Pará, localizado na parte oriental da Amazônia brasileira. Abrange uma área de 1.245.870,707 km<sup>2</sup> (IBGE, 2021). Os gradientes climáticos mais importantes são a precipitação e a temperatura do ar. Nesse contexto, o regime regional de precipitação é modulado por sistemas de grande escala como a Zona Convergente Intertropical (ZCIT), a Zona Convergente do Atlântico Sul (ZCAS) e as Linhas de Instabilidade - LI (Souza; Rocha, 2014). Esses sistemas operam durante a estação chuvosa dominante na primeira metade do ano (dezembro a maio), quando são registradas as maiores precipitações do ano. Os sistemas de menor escala contribuem para a formação e distribuição da precipitação durante a estação seca, principalmente na segunda metade do ano (junho a novembro), quando ocorre a precipitação mínima (Souza; Rocha, 2014; Sodré *et al.*, 2015; Azevedo *et al.*, 2017).

Em situação diferente, (Souza; Kayano; Ambrizzi, 2005) identificaram dois cenários climáticos de grande escala que poderiam modular o clima amazônico brasileiro de acordo com as condições Oceânico-Atmosféricas tropicais: "favorável" - presença de La Niña, coincidindo com um padrão de anomalias negativas da temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico e anomalias positivas no Atlântico Sul; e "desfavorável" – presença de El Niño, coincidindo com um padrão de anomalias TSM positivas no Pacífico e anomalias negativas no Atlântico Sul. Tais cenários causam mudanças significativas na circulação atmosférica e nos padrões de convecção tropical, resultando na intensificação ou inibição das ZCIT, formando um padrão de precipitação significativamente abundante (cenário favorável) ou deficiente (cenário desfavorável) sobre a Amazônia oriental e Nordeste do Brasil.

Outro elemento importante do clima relacionado à influência das atividades naturais e antrópicas é a temperatura do ar. O estudo climático de mudança aponta para uma frequência cada vez maior de dias secos e ondas de calor severas (Marengo; Souza Junior, 2018). Esse aumento nos dias secos pode ser explicado, em parte, pelo impacto na circulação atmosférica regional e pelas alterações na vegetação da floresta amazônica. Segundo Sierra *et al.* (2022), as áreas desmatadas perturbam significativamente o balanço energético. No entanto, atribuir essas mudanças exclusivamente ao desmatamento não é uma tarefa simples. Evidências sugerem que há uma influência adicional do aquecimento tropical tanto no Pacífico quanto no Atlântico

(Espinoza *et al.*, 2019; Leite-Filho; Costa; Fu, 2020) que o desmatamento tropical está causando reduções significativas na precipitação observada, acrescentando mais evidências aos desafios enfrentados pelo clima global.

Diante disso, os gradientes climáticos são indicadores importantes e muito debatidos no meio científico-político das mudanças climáticas globais (IPCC, 2021). O foco de muitos estudos observacionais tem sido a detecção de tendências de longo prazo e a identificação de aumentos/diminuições em eventos extremos em diferentes escalas de tempo (Moreira; Cunha; Costa, 2021; Moreira *et al.*, 2020). Por exemplo, pesquisadores têm abordado e aplicado o teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) (Mann, 1945; Kendall, 1948) a séries de dados hidrológicos (Santos *et al.*, 2020) e climatológicos (Soares; Nóbrega; Galvêncio, 2018). Além de estudos sobre o impacto das anomalias climáticas da Amazônia, desmatamento e produtividade agrícola (Souza; Rocha, 2014; Souza *et al.*, 2017, Ferreira; Souza; Oliveira, 2020).

As fruticulturas são sensíveis às mudanças climáticas. O aumento da temperatura, do dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>) e da frequência e intensidade de climas extremos podem ter um impacto na produtividade das culturas (FAO,2022). Por exemplo, o aumento da temperatura pode levar a uma redução na produtividade das culturas, pois as plantas podem não ser capazes de fotossintetizar eficientemente em temperaturas mais altas (Carneiro, 2018). O aumento do CO<sub>2</sub> também pode afetar negativamente as culturas, pois pode levar a uma mudança na composição química das frutas e vegetais, tornando-os menos nutritivos (USDA,2022). Os climas extremos, como secas, inundações e ondas de calor, também podem danificar os cultivos e reduzir a produtividade (IPCC,2021).

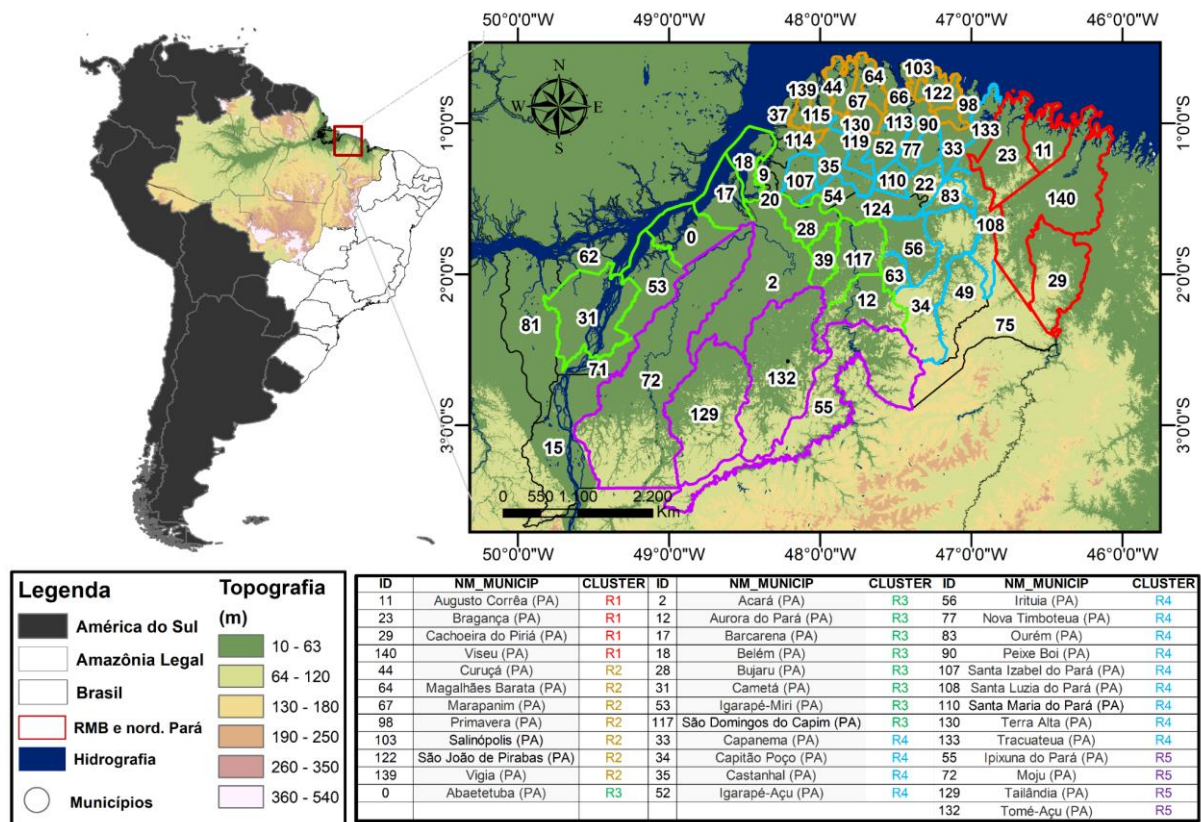
Este estudo apresenta uma análise exploratória dos fatores que influenciam o clima, a produtividade de frutas (*Citrus sinensis* e *Citrus latifolia*) e taxa de desmatamento na Amazônia Oriental. Os principais objetivos foram: (i) Reavaliar a compreensão da distribuição mensal, sazonal e interanual da precipitação e da temperatura máxima, (ii) detectar e avaliar o padrão espacial da precipitação e as tendências da temperatura máxima usando o teste MK, (iii) Determinar a variação (delta) do clima anual e sazonal, e (iv) Verificar o impacto ambiental na produtividade citrícola, levando em consideração o período 2004-2018, considerando o desmatamento com um dos fatores influenciadores.

## 2.2 Material e Métodos

### 2.2.1 Área de estudo

A área de estudo centrou-se na Amazônia oriental, especificamente na parte nordeste do estado do Pará, composta por duas mesorregiões: a região metropolitana de Belém (MRB) e a região nordeste paraense (NP) (Figura 9). 37 municípios foram selecionados para representar similaridades climáticas e ambientais, como taxas de desmatamento medidas pelo Projeto de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia (PRODES) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (disponível em: <http://www.obt.inpe.br./OBT/sujeitos/programas/amazonia/prodes>) e produtividade de frutos de laranja (*Citrus sinensis*) e lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia*), conhecida como “limão” (IBGE, 2020), que resultou em 5 clusters uniformes em todo o estado, como mostrado na figura abaixo.

Figura 9 - Mapa da área de estudo do nordeste do Pará, os círculos com ponto preto indicam os 37 municípios selecionados, as cores indicam os 5 clusters uniformes



A variabilidade espacial e temporal da precipitação regional no Pará é causada pela formação de nuvens, principalmente do tipo convectivo, *cúmulos e cumulonimbus*, principalmente no litoral do Pará, com penetração em direção ao continente, no eixo Belém - Tailândia e também em direção ao Nordeste e Ilha de Marajó, devido à dinâmica atmosférica

oceânica associada a sistemas climáticos de grande escala (ZCIT e ZCAS) e LI's de mesoescala. Estes são responsáveis pela distribuição da precipitação média mensal e anual na Amazônia Oriental, definida como o período mais úmido os meses de dezembro a maio (com máximo de chuvas em março) e o menos chuvoso os meses de junho a novembro (com mínimos registrado em outubro), sendo os meses de transição (abril e novembro) (Souza; Rocha, 2014; Souza *et al.*, 2017).

Segundo a escala de Köppen, o clima do Pará é do tipo "A", com três subtipos climáticos (Af, Am e Aw) designado para climas tropicais com altos índices pluviométricos e temperaturas mínimas média de 18 °C. A precipitação (PRP) anual da região nordeste do Pará varia entre de 2.250 mm/ano a 3.000 mm/ano. No período chuvoso de dezembro a maio, a média diária da (PRP de 11,2 mm/dia) com umidade alta (86%) e temperaturas mais baixas (mínima de 24°C e máxima de 31,7°C), enquanto que o período de junho a novembro é marcado pelo regime tipicamente menos chuvoso ou seco (PRP de 3 mm/dia) com umidade mais baixa (79,7%) e temperaturas mais elevadas (mínima de 24,3°C e máxima de 33,1°C), de acordo com (Dias *et al.*, 2019).

### 2.2.2 Dados

Os dados de precipitação utilizados no estudo consistem em médias mensais de precipitação, disponíveis para a região que inclui os 37 municípios maiores produtores do estado do Pará (Figura 8). A resolução espacial é de 5 km, abrangendo uma área geográfica de 50°S a 50°N para o período de janeiro de 1981 a dezembro de 2018 (37 anos). Os dados foram obtidos do *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS). De acordo com Funk *et al.* (2015) esta série é formada a partir de várias fontes de informação tais como, *The Climate Hazards Group's Precipitation Climatology* (CHPClim); Observações de satélites com espectroscopia de infravermelho termal (*Thermal Infrared*, TIR), geoestacionárias quase globais da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA); Centro de Previsão Climática (CPC); *National Climatic Data Center Climáticos* (NCDC); *Coupled Forecast System* da NOAA, versão 2 (CFSv2) e dados observacionais de estações meteorológicas, disponíveis em (<ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/>).

Os dados mensais de temperatura do ar do conjunto CRU Versão 2.1 (Fick; Hijmans, 2017) foram também utilizados neste estudo para medir a associação com evento de chuvas extremas relacionados com a produtividade dos Citrus. Assim, os pontos de grade de temperatura máxima do ar na região de produtividade das culturas foram extraídos durante o



período de tempo (1981 a 2018). Mais informações sobre os dados originais podem ser encontradas em (<https://www.worldclim.org/data/index.html>).

Os dados agrícolas correspondem às culturas cítricas (laranja e “limão”) consistem em produtividade - PROD (em t/ha) foram obtidos a partir da base de dados da Pesquisa Agropecuária Municipal (PAM) do (IBGE), com ênfase nos municípios mencionados na (Figura 9), dados disponíveis de 2004 a 2018 (quinze anos).

Outros dados foram: 1) desmatamento, PRODES oferecido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); e 2) evapotranspiração (ET) oferecido pelo (Running; Mu; Zhao, 2019) de oito dias para 500 metros ([https://developers.google.com/earthEngine/datasets/catalog/MODIS\\_006\\_MOD16A2](https://developers.google.com/earthEngine/datasets/catalog/MODIS_006_MOD16A2)). De 2004 a 2018, quando a data de medição seguiu a escala anual.

### 2.2.3 Procedimentos Metodológicos

Uma breve descrição do procedimento de análise é apresentada na Figura 10. As análises do comportamento das variáveis climáticas (precipitação - PRP e temperatura máxima - TMAX) foram realizadas em um ponto da grade na série de médias mensais, correspondente ao período de 1981 a 2018, para os 37 municípios do nordeste paraense (Figura 9). Em seguida, foram calculadas as médias sazonais, durante os meses de verão, de dezembro a fevereiro (DJF), outono, de março a maio (MAM), inverno, de junho a agosto (JJA) e primavera, de setembro a novembro (SON). As imagens foram geradas com o pacote de software *heatmap* (R Core Team, 2017).

Além disso, a variabilidade anual (PRP e TMAX) foi analisada usando a técnica *Boxplot* de Tukey *et al.* (1977). Essa ferramenta gráfica forneceu cinco medidas dos dados: a média, o primeiro e o terceiro quartis, o mínimo e o máximo (PRP e TMAX) e possíveis outliers (valores discrepantes na série de dados).

Em seguida, para investigar as tendências positivas/negativas ou crescentes/decrescentes dos gradientes climáticos, o teste não paramétrico de Mann-Kendall (K ou MK) (Mann, 1945; Kendall, 1948) foi aplicado aos dados da série temporal (PRP e TMAX) nas escalas sazonal e anual (Santos *et al.*, 2020; Soares *et al.*, 2018), com significância de 5% ( $p < 0,05$ ) (Souza *et al.*, 2017) e  $|Z| > 1,96$  (Liang *et al.*, 2014; Ding *et al.*, 2018).

Também foi analisada a variação (delta) ou diferença, onde foi calculada a média de cada período anual e sazonal de PRP e TMAX, com média de 15 anos dos seguintes intervalos: (1989 a 2003) e (2004 a 2018). Os valores obtidos foram utilizados para a avaliação das

mudanças climáticas nos últimos anos, informações são apresentadas na Tabela 4 (Souza; Rocha, 2014; Dias *et al.*, 2021).

Por fim, foi aplicada a análise de componentes principais (PCA). O PCA é uma abordagem holística para determinar a dinâmica de todas as variáveis em um sistema sob observação (Gorgoglione; Gioia; Iacobellis, 2019). Tem como objetivo reduzir a dimensionalidade e revelar padrões. Ele separa as variáveis importantes em combinações complexas. Assim, os principais fatores foram separados para comparar as variáveis predictoras (PRP, TMAX, ET e DESMATAMENTO) e as variáveis dependentes (PROD de citros). Foi necessário usar a Regressão de Componentes Principais (PCR) para testar a hipótese de que um aumento no TMAX e no desmatamento diminuirá a produtividade dos citros. O pacote *FactorMineR* (Lê; Josse; Russon, 2008) foi utilizado nos objetos contínuos.

Figura 10 - Estrutura metodológica da pesquisa

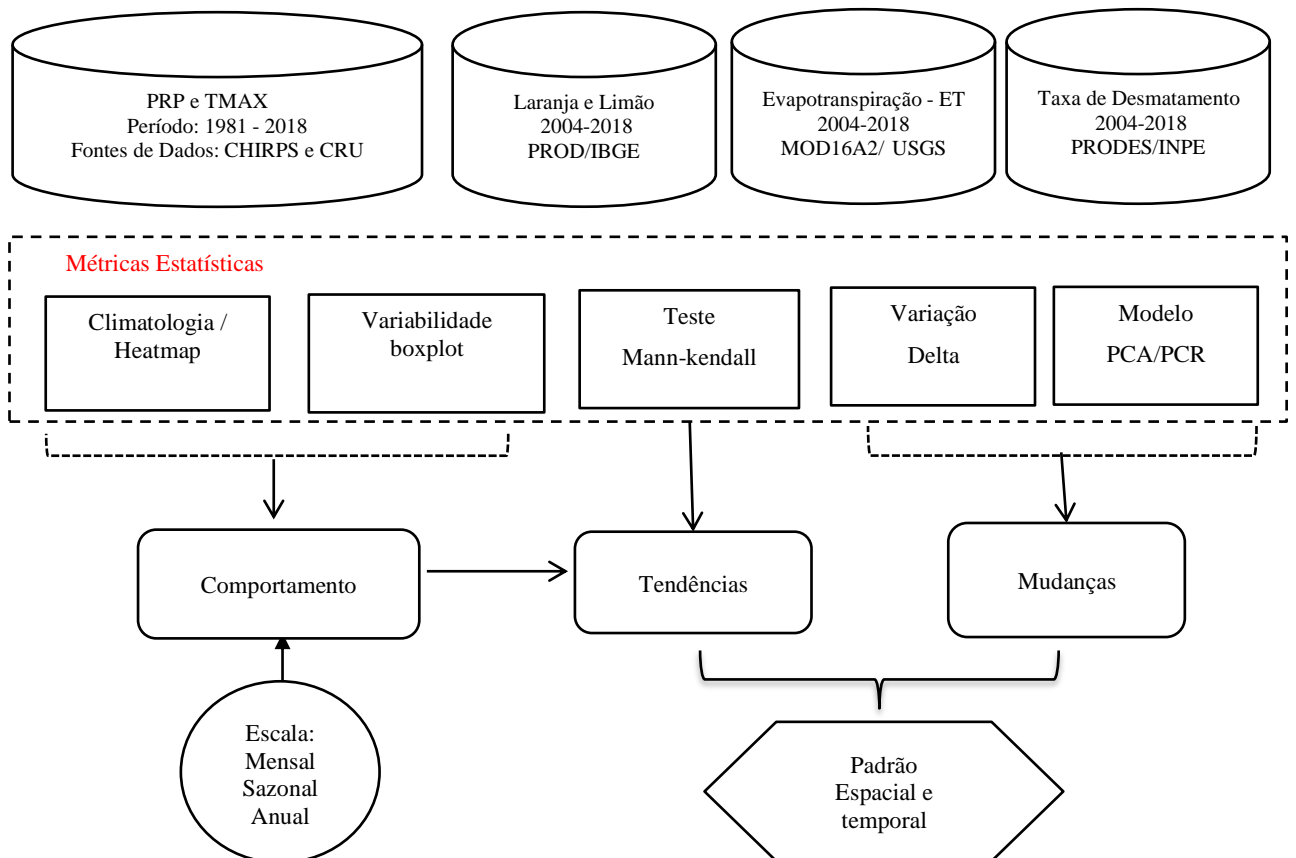


Tabela 4 - Lista de métricas estatísticas

Métrica	Equação	Descrição
Varição (Delta)	$\Delta x_n = \frac{\sum_{i=ano\ Inicial}^{j=ano\ Final} x \ t_f}{n} - \frac{\sum_{i=ano\ inicial}^{j=ano\ final} x \ t_o}{n}$ $\Delta x_{n=15} = \frac{\sum_{2004}^{2018} PRP \ t_f}{15} - \frac{\sum_{1989}^{2003} PRP \ t_o}{15}$ $\Delta x_{n=15} = \frac{\sum_{2004}^{2018} TMAX \ t_f}{15} - \frac{\sum_{1989}^{2003} TMAX \ t_o}{15}$	x = Variáveis Meteorológicas; PRP = Precipitação; TMAX = Temperatura Máxima; t = tempo em escala anual e sazonal; f= final e 0= inicial. n= 15, tamanho da amostra de 15 anos.

## 2.3 Resultados e Discussão

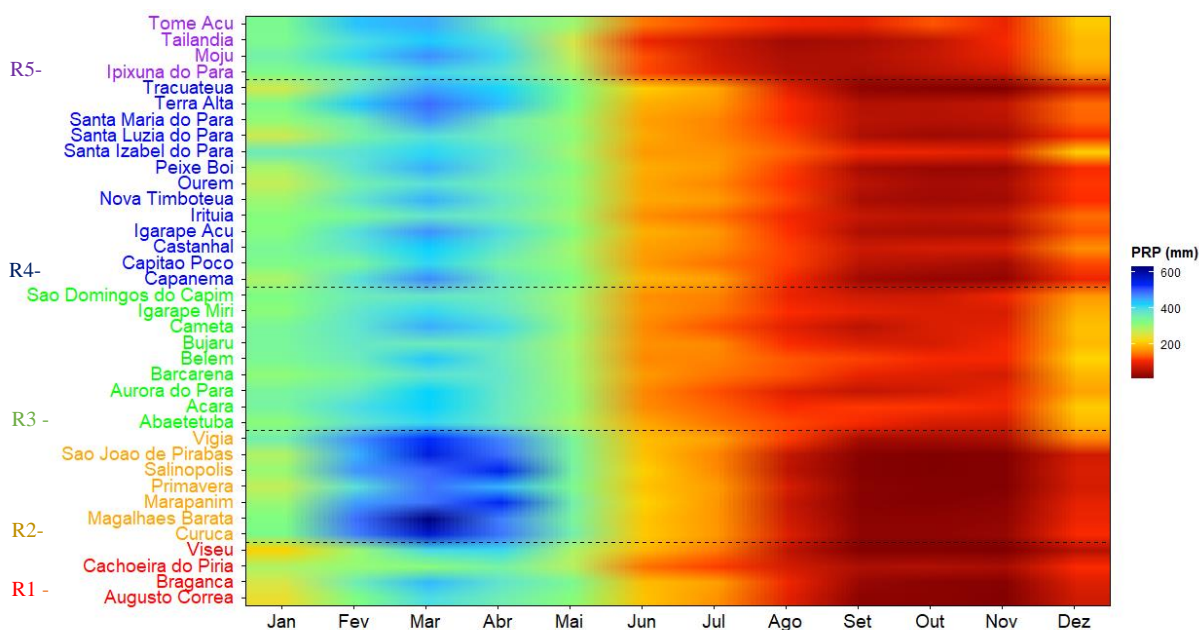
### 2.3.1 Climatologia mensal no nordeste do Pará

A precipitação climatológica mensal no nordeste do Pará para o período de 1981 a 2018 é mostrada na Figura abaixo. Utilizando o método de clusterização k-means, foi possível identificar cinco regiões com base em suas semelhanças ambientais. Essas regiões têm diferentes regimes de precipitação ao longo dos anos. Estudos anteriores também identificaram regiões com diferentes regimes de precipitação na Amazônia oriental, incluindo três regiões no estado do Pará e quatro regiões na região norte. (Azevedo *et al.*, 2017; Menezes; Fernandes; Rocha, 2015; Santos, Lucio; Silva, 2015).

Os meses de maior precipitação (acima de 400 mm - em tons de azul escuro) ocorrem nos meses de fevereiro, março e abril, com maior incidência nas regiões R2 e R4, com deslocamento temporal para a região R5 durante os meses de janeiro a abril. Por outro lado, os meses com menor precipitação (menos de 200 mm - na cor vermelho escuro) são os meses de setembro, outubro e novembro nas regiões R1, R2 e R4, em R5 e R3 acontecem em julho, agosto e setembro (Menezes; Fernandes; Rocha, 2015; Souza *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2017; Azevedo *et al.*, 2017).

Esse regime pluviométrico pode ser causado pela ação dos sistemas meteorológicos, uma vez que a ZCIT opera nos trópicos, é parte integrante da circulação geral da atmosfera e se espalha com faixas de nuvens *cumulonimbus* no Pará. Isso resulta em maiores precipitação durante os meses de dezembro a maio (Figura 11), a estação chuvosa, e menores precipitação durante os meses de junho a novembro, a estação seca. A pouca chuva que ocorre é causada por efeitos termodinâmicos locais. Estes incluem brisas marítimas e ondas de leste causadas por correntes de ventos alísios. As chuvas que se iniciam durante a transição seca/chuvosa (junho/novembro) são formadas por nuvens convectivas (Bastos *et al.*, 2002; Albuquerque *et al.*, 2010; Souza; Rocha, 2014; Souza *et al.*, 2017).

Figura 11 - Precipitação climatológica (mm/mês), média de 1981 a 2018, da região nordeste do Pará



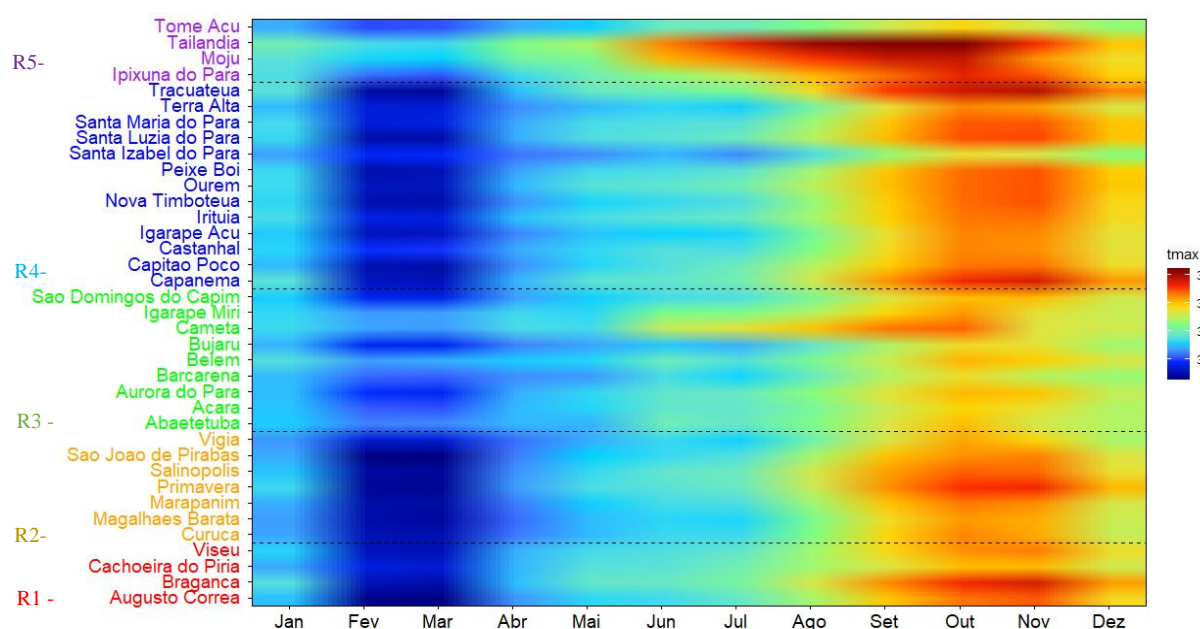
A (Figura 12) apresenta a climatologia da temperatura máxima (TMAX - °C). Verificam-se valores de TMAX mais baixos (inferiores a 30° C) durante os meses de fevereiro a março, concentrados nas regiões R1, R2 e R4. Por outro lado, os valores mais elevados de TMAX (superiores a 32° C) são registrados nos meses de setembro, outubro e novembro, abrangendo as regiões R1, R2 e R4. Nas regiões R3 e R5, esses picos ocorrem nos meses de agosto, setembro e outubro. Esses resultados estão em consonância com a variabilidade das precipitações, uma vez que as temperaturas máximas mais baixas coincidem com a estação chuvosa, enquanto as temperaturas mais altas ocorrem durante a estação seca (Dias *et al.*, 2019).

Entende-se que elevadas temperaturas estão associadas à incidência de radiação solar, na qual uma significativa parcela dessa energia se converte em calor latente, através da evapotranspiração, enquanto outra parte se converte em calor sensível, aquecendo atmosfera (Bastos *et al.*, 2002; Rodrigues *et al.*, 2013). Além disso, outros fatores podem contribuir para o aumento da temperatura, como as dinâmicas oceano-atmosféricas previamente mencionadas, que diminuem a atividade convectiva, reduzindo, assim, a formação de nuvens de chuva. Também devemos considerar a influência da alteração no uso do solo, do desmatamento e das queimadas, que afetam os efeitos biogeofísicos locais, entre outros aspectos (Winckler *et al.*, 2019).

A região R5 (exemplo de Moju e Tailândia) e R3 (Cametá) apresentam comportamento distintos ao longo dos anos, estabelecendo um regime seco nos meses de julho a novembro e

um regime chuvoso de dezembro a abril. Essa tendência está em concordância com as observações da Figura 11, que se caracteriza por uma baixa variabilidade na precipitação durante a estação chuvosa e um prolongado período de estiagem. No entanto, vale ressaltar que os municípios na região R5 estão entre os mais afetados pelo desmatamento (PRODES, 2022), conforme apontado por Lopes *et al.* (2020) e Pimenta *et al.* (2018). Isso se deve, em grande parte, à expansão das atividades agrícolas e pecuárias.

Figura 12 - Temperatura máxima (°C) climatológica (média de 1981 a 2018), da região nordeste do Pará



### 2.3.2 Climatologia sazonal sobre o nordeste do Pará

A fim de estudar os aspectos climatológicos sazonais da região, foram calculadas as médias sazonais de PRP e TMAX nos trimestres de verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON) para o período de 1981 a 2018 (Figura 13).

No trimestre de verão (DJF) sobre o nordeste do Pará, perto da costa de Marajó, são observados valores médios de precipitação de 200 a 400 mm (Figura 13a). Tais valores de precipitação estão associados à ZCIT. Este fenômeno tem um impacto direto na quantidade de precipitação que é restrita nestas zonas (Souza; Rocha, 2014; Ferreira; Souza; Oliveira, 2020). Durante este período, os valores de isotermas TMAX de 31°C a 32°C foram observados (Dias *et al.*, 2019).

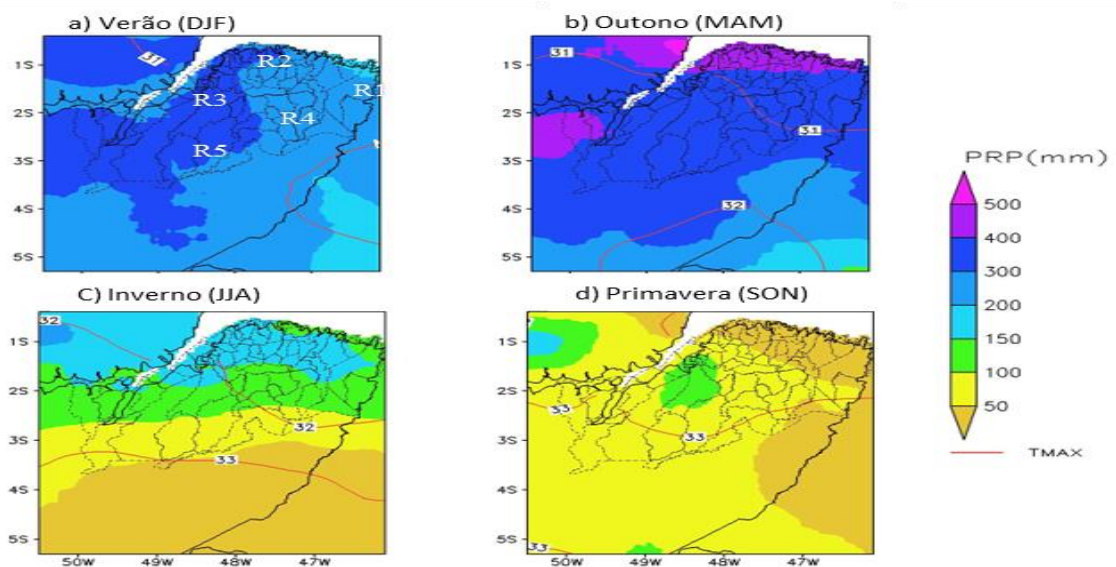
Durante o Outono (MAM), são observados valores máximos de PRP superiores a 400 mm nos municípios localizados no nordeste do Pará e parte de Marajó. Isso confirma as evidências de estudos anteriores (Nobre; Shukla, 1996; Souza; Kayano; Ambrizzi, 2004) que

explicam esses níveis elevados de transações devido à atuação da ZCIT, que atingem sua posição mais austral em março, justificando a elevada precipitação observada no Pará. Assim, são também observadas isotermas do TMAX (31 °C a 32 °C) (Figura 13b).

O trimestre de inverno (JJA) é caracterizado pelo período seco, a intensidade da precipitação é menor no nordeste do Pará, especialmente na parte sudeste, cujo registro de precipitação ocorre abaixo dos 50 mm (ao contrário do trimestre MAM, que apresenta valores muito superiores). No setor costeiro de Marajó, a pluviosidade oscila entre 150 e 200 mm de chuva. A isoterma TMAX mostra valores entre 32° e 33°C (Figura 13c). No trimestre da Primavera (SON), a redução da precipitação continua em grande parte do nordeste do Pará, apresentando valores abaixo dos 100 mm. As exceções são os municípios localizados no RMB, que apresentam valores entre 100 e 150 mm. O valor máximo do TMAX é de 33 °C no R5 (Figura 13d).

Isto deve-se à precessão do eixo da Terra, onde o ramo descendente da circulação de Hadley domina sobre os trópicos brasileiros, o que inibe a formação de nuvens convectivas, privando a região de estudo da precipitação dos sistemas de grande escala (Coelho; Cardoso; Firpo, 2016). Contudo, a convecção local, as linhas de instabilidade e as perturbações ondulatórias a leste podem ser responsáveis pelas poucas chuvas observadas na região (Souza; Ambrizzi, 2003).

Figura 13 - Climatologia sazonal (média 1981/2018) de precipitação - PRP e de Temperatura máxima – TMAX sobre o nordeste do Pará durante as estações: verão (A) DJF, outono (B) MAM, inverno (C) JJA e primavera (D) SON. As escalas de cores indicam a magnitude de PRP em mm e de TMAX em °C



### 2.3.3 Variabilidade interanual de precipitação e temperatura

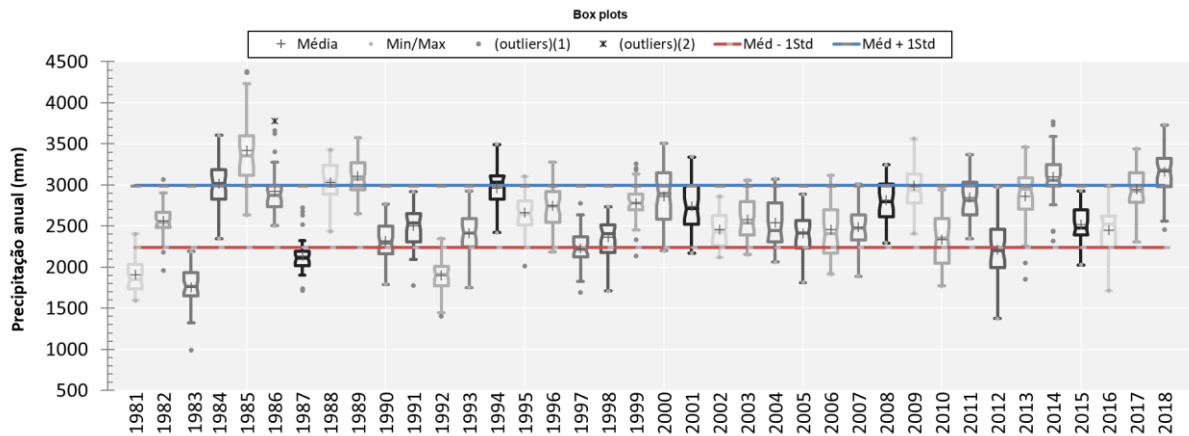
Durante o período analisado, a média anual de PRP na região nordeste do Pará variou entre 2250 mm/ano e 3000 mm/ano (Figura 14A). É importante destacar a presença de valores atípicos e desvio padrão (Std) que indicam a ocorrência de eventos climáticos extremamente chuvosos (valores acima da linha azul) e secos (valores abaixo da linha vermelha). Notavelmente, os anos de 1981, 1982, 1983, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1992, 1994, 1997, 1999, 2013, 2014 e 2018 se destacam nesse contexto.

Esses valores extremos podem ser explicados pela influência de eventos El Niño-Oscilação Sul (ENSO). O ENSO é um fenômeno climático que ocorre na zona equatorial do Oceano Pacífico tropical, onde as águas superficiais são frias e quentes por um período de anos (Kiladis; Diaz, 1989; Trenberth; Hoar, 1996). Nesse sentido, as precipitações variam em ciclos de 2 a 3 anos e de 5 a 7 anos. É digno de nota que os anos 82/83 e 97/98 foram fortemente afetados pelos eventos El Niño, resultando em baixas taxas de ocorrência e sendo classificados como anos extremamente secos. Em contraste, os anos 85/86 e 88/89 foram associados às características de La Niña e características como anos de atividades chuvosas (Albuquerque *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2015; Tavares *et al.*, 2018).

O aumento da temperatura máxima (TMAX) na região nordeste do Pará, tem sido atribuído a vários fatores, incluindo fenômenos climáticos, mudança no uso e cobertura do solo e aumento da concentração dos GEE na atmosfera (Marengo *et al.*, 2013b, Souza; Rocha, 2014; Gomes *et al.*, 2015; Winckler *et al.*, 2019; Gatti *et al.*, 2021). A análise de regressão dos valores de TMAX mostrou que a TMAX está aumentando a uma taxa entre 0,223 e 0,772 por ano (ver Figura 14B e Tabela 5). Esse aumento pode acarretar uma série de impactos negativos no meio ambiente e na sociedade, como secas, inundações, incêndios florestais e doenças. É importante tomar medidas para mitigar o aumento da TMAX, como reduzir as emissões de gases causadores do efeito de estufa e proteger as florestas.

Figura 14 - Variabilidade anual (1981/2018) de (a) precipitação - PRP (mm) e de (b) Temperatura máxima - TMAX (°C) sobre o nordeste do Pará

a) Precipitação (mm)



b) Temperatura máxima (TMAX °C)

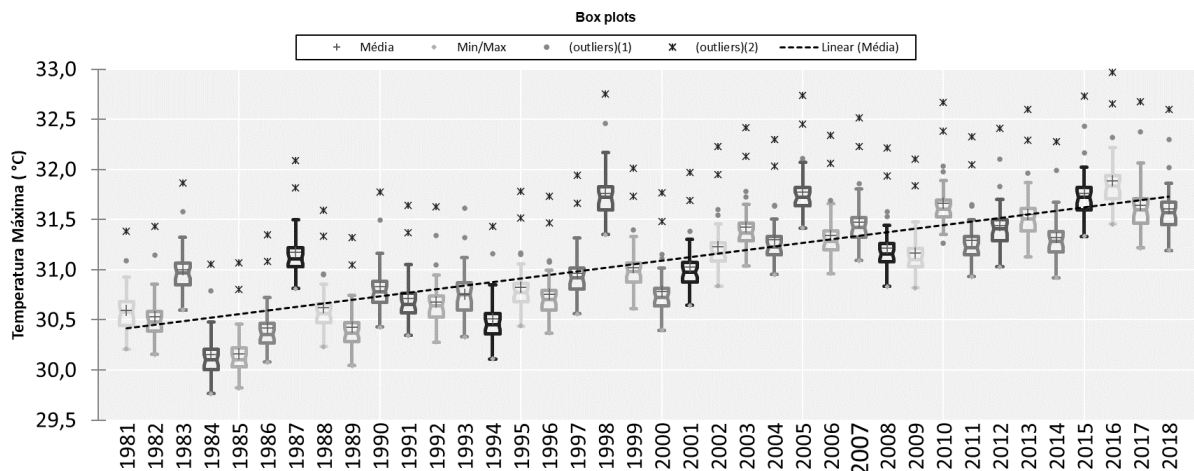


Tabela 5 - Coeficientes da Regressão Linear da TMAX

Fonte	Valor	Erro padrão	t	Pr >  t	Limite inferior (95%)	Limite superior (95%)	p-values Nível significância
Intercepto	0,238	0,245	0,971	0,338	-0,259	0,735	°
Mínimo	0,772	0,074	10,449	<b>&lt;0,0001</b>	0,622	0,922	***
Máximo	0,223	0,067	3,345	<b>0,002</b>	0,088	0,359	**

Nível significância:  $0 < *** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < . < 0.1 < ° < 1$

### 2.3.4 Tendências climáticas do nordeste do Pará

Na análise do aspecto anual da precipitação (painel superior esquerdo), foram observadas tendências significativamente positivas, segundo o teste MK, trazendo aumento de precipitação ( $p < 0,05$ ) em várias localidades na região R3 em quatro municípios: Acará (2), Aurora do Pará (12), Barcarena (17), Igarapé-Miri (53) e na região R5 Ipixuna do Pará (55) e



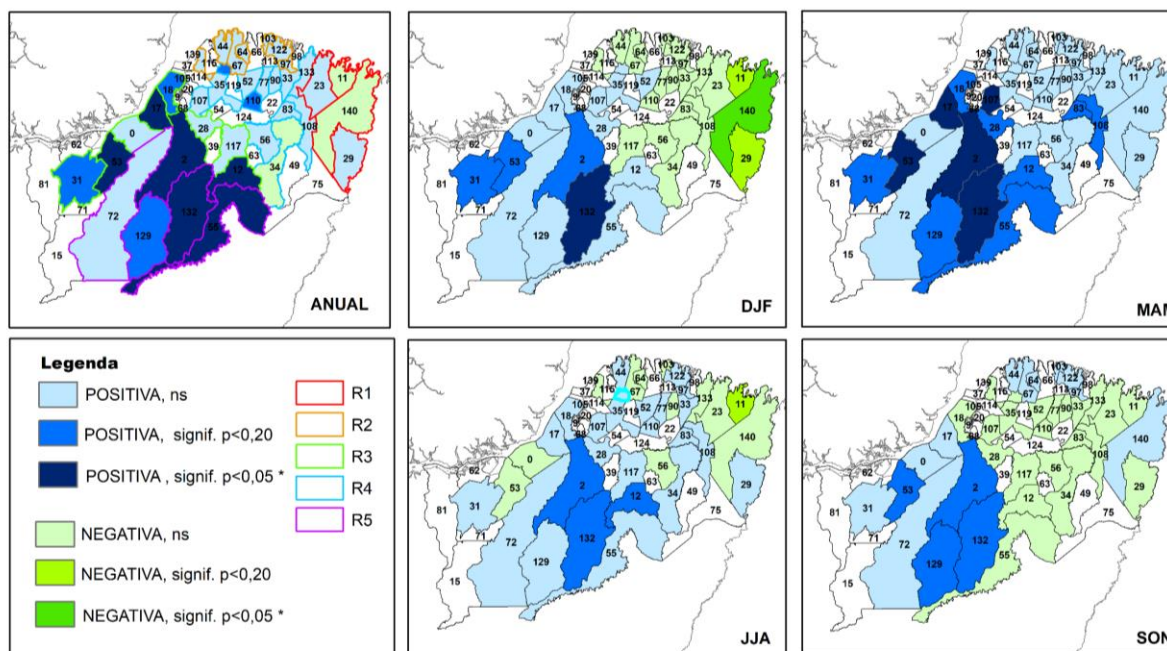
Tomé-Açu (132). Também foi observado um aumento significativo ( $p < 0,20$ ) da precipitação na R2 em Santa Maria do Pará (110), na região R3 nos municípios de Bujaru (28) e Cametá (31), na região R4 em Terra alta (130) e na região R5 em Tailândia (129) (Figura 15).

No que se refere à análise sazonal, durante o trimestre do DJF (painel central superior), foi constatada uma tendência significativamente positiva de ocorrência ( $p < 0,05$ ) na região de R5 - município de Tomé-Açu (132) e uma tendência negativa significativa na região de R1 (município de Viseu -140). Também foram observados sinais significativos de tendência negativa ( $p < 0,20$ ) na região R1 em Augusto Corrêa (11) e Cachoeira do Piriá (29), e tendência positiva significativa na região R3 Acará (2), Igarapé-miri (53) e Cametá (31). O trimestre do MAM mostra tendências positivas significativas ( $p < 0,05$ ) na região R3 em Acará (2), Barcarena (17) e Igarapé-Miri (53), na região R4 em Santa Isabel do Pará (107) e na região R5 em Tomé-Açu (132). Também foram observadas tendências positivas significativas ( $p < 0,20$ ) em áreas: R3 em Aurora do Pará (12), Belém (18), Bujaru (28) e Cametá (31); R4 em Ourém (83) e Santa Luzia do Pará (108); R5 em Ipixuna do Pará (55) e Tailândia (129) (painel superior direito).

No trimestre JJA (painel de fundo central), observou-se uma tendência positiva significativa de precipitação ( $p < 0,20$ ) na região R3 nos municípios de Acará (2) e Aurora do Pará (12), na região R5 em Tomé-Açu (132), e uma tendência negativa de precipitação significativa na região R1 no município de Augusto Corrêa (11). E no trimestre SON (painel inferior direito), foram observadas tendências positivas significativas ( $p < 0,20$ ) de precipitação na região R3 em Acará (2) e Igarapé-Miri (53), na região R5 em Tailândia (129) e Tomé-Açu (132).

Em geral, as tendências de precipitação MK indicam um padrão heterogêneo, positivo em áreas pontuais nas regiões R3 e R5, localizadas no nordeste do Pará, e negativo nas regiões R1, R2 e R4, localizadas na zona costeira do Pará. Os resultados apontam para mudanças no aspecto sazonal, onde se observou um aumento significativo do PRP no regime seco em pontos localizados na mesorregião nordeste do Pará, e uma tendência para a diminuição do PRP no regime chuvoso na região costeira do Pará. Essas tendências de diminuição/aumento podem estar associadas a sistemas de grande escala ou ser influenciadas pelo ENSO (Santos; Oliveira, 2017; Souza; Rocha, 2014; Souza *et al.*, 2017; Ferreira *et al.*, 2020).

Figura 15 - Teste de Mann- Kendall (MK) na série de dados de precipitação - PRP (mm), nas escalas anual e sazonal (DJF, MAM, JJA e SON). As escalas de cores indicam os sinais do teste MK



\*Valor de nível de significância de 5% para  $|Z| > 1,96$  ( $p < 0,05^*$ ), de acordo com (Liang *et al.*, 2014; Ding *et al.*, 2018)

Os resultados do cálculo do teste MK aplicado à série de TMAX são mostrados na (Figura 16), anual e sazonal (DJF, MAM, JJA e SON). As TMAX anuais (painel superior esquerdo) mostraram tendências positivas significativas ( $p < 0,05$ ) em todos os municípios. Os resultados são consistentes com estudos anteriores que mostraram um aumento nas temperaturas máximas em todo o mundo (IPCC, 2021; Trenberth *et al.*, 2014).

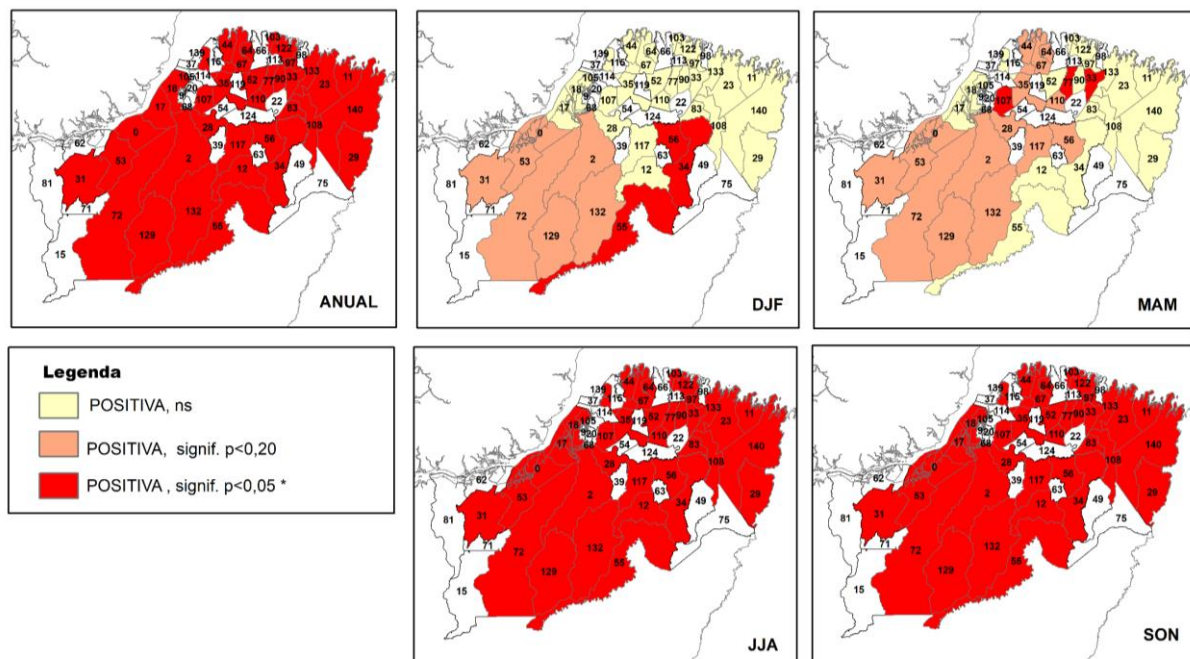
No período chuvoso, o trimestre DJF (painel central superior), foram encontradas tendências positivas significativas ( $p < 0,05$ ) de aumento (aquecimento) da TMAX na região R4 em Capitão Poço (34) e Irituia (56), na região R5 em Ipixuna do Pará (55) e tendências positivas significativas ( $p < 0,20$ ) da TMAX sobre a região R3-Abaetetuba (0), Acará (2), Cametá (31) e Igarapé-miri (53), região R5-Moju (72), Tailândia (129) e Tomé-Açu (132).

No trimestre do MAM (painel superior direito), as tendências positivas significativas ( $p < 0,05$ ) foram registradas na região R4 em Capanema (33), Nova Timboteua (77) e Santa Izabel do Pará (107); as outras tendências positivas significativas ( $p < 0,20$ ) foram registradas nas regiões: R2 em Curuçá (44), Magalhães Barata (64) e Marapanim (67), na região R3 em Abaetetuba (0), Acará (2), Bujaru (28), Cametá (31), Igarapé-miri (53) e São domingos do Capim (117); na região R4 em Castanhal (35), Irituia (56), Santa Maria do Pará (110), Terra Alta (130) e; R5 em Moju (72), Tailândia (129) e Tomé-Açu (132).

Durante o período seco, nos trimestres JJA e SON, as tendências significativas ( $p < 0,05$ ) foram positivas em toda a região do estudo (painéis: central inferior e inferior direita).

Os resultados mostram um aumento sistemático do sinal de tendência de temperatura máxima no nordeste do Pará. Este aumento da TMAX pode levar a uma seca mais severa, o que pode prejudicar a agricultura e a pesca. Também pode aumentar o risco de incêndios florestais, que podem destruir propriedades e causar danos à saúde humana (Nobre; Sellers; Shukla, 1991; Dias; Ribeiro; Nunes, 2007; Sampaio *et al.*, 2007; Liesenfeld; Vieira; Miranda, 2016; Marengo *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2020). Tal situação pode também afetar os ciclos hidrológicos e de carbono, contribuindo para a ocorrência dos eventos El Niño e La Niña (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016; Almeida *et al.*, 2017).

Figura 16 - Teste de Mann-Kendall (MK) na série de dados de temperatura máxima - TMAX (°C), nas escalas anual e sazonal (DJF, MAM, JJA e SON). As escalas de cores indicam os sinais do teste MK



\*Valor de nível de significância de 5% para  $|Z| > 1,96$  ( $p < 0,05^*$ ), de acordo com (Liang *et al.*, 2014; Ding *et al.*, 2018)

Na Figura 17 (painel superior esquerdo), correspondente à diferença entre o período de (1989 a 2003) e (2004 a 2018) para a escala anual da série PRP, observamos um valor de precipitação positiva, com crescimento superior a 150 mm (em tons de azul escuro) em algumas áreas da região R3 e R4 do nordeste do Pará, por outro lado, as regiões costeiras do Pará, na região R1 - Augusto Corrêa (11), Bragança (23) e Viseu (140), região R2 - Primavera (97) e região R4 - Capanema (33) e Peixe Boi (90), que mostram uma diminuição da precipitação de 70 mm (valor negativo em verde claro). Estes resultados estão de acordo com o teste MK, que

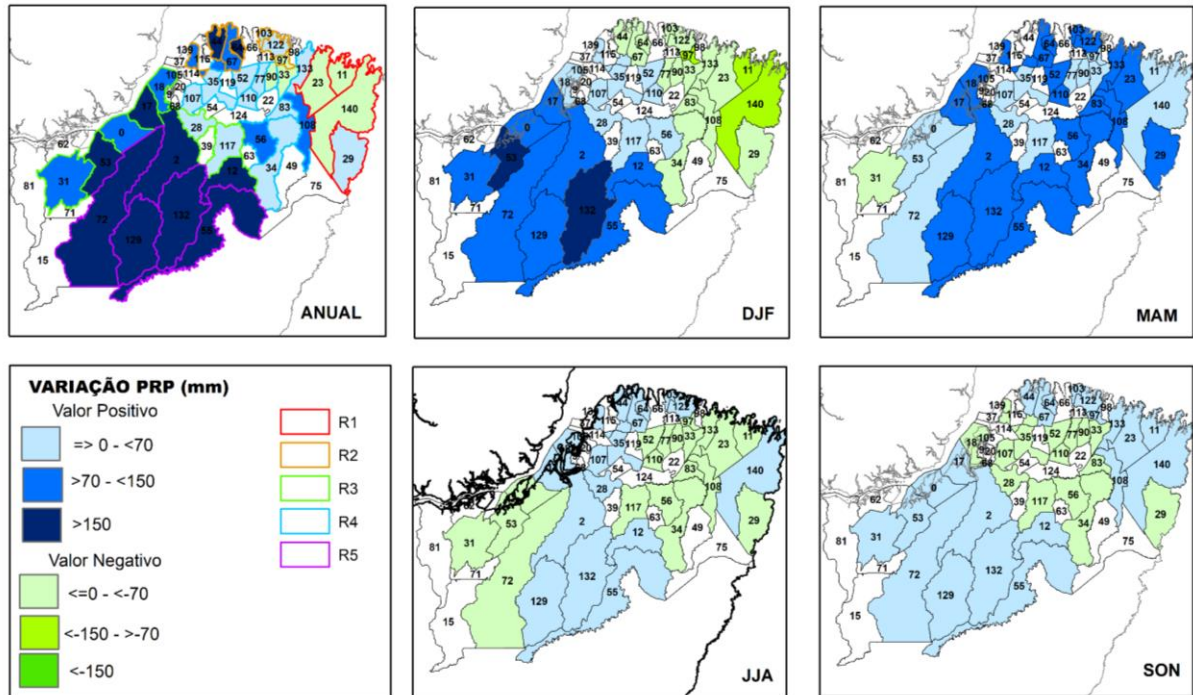
mostra uma tendência decrescente a uma escala anual para estas localidades.

Para a estação chuvosa, no trimestre DJF (painel central), a variação do PRP mostra um valor positivo (acima de 70 mm - em tons azuis) em grande parte do nordeste do Pará. O valor negativo do PRP (inferior a 150 mm - em tons de verde claro) é realçado nas regiões: R1 em Augusto Corrêa (11), Bragança (23), Cachoeira do Piriá (29) e Viseu (140); na região R2 em Curuçá (44), Magalhães Barata (64), Primavera (97), Salinópolis (103) e São João de Pirabas (122); na região R4 em Capanema (33), Capitão Poço (34), Nova Timboteua (77), Ourém (83), Peixe Boi (90), Santa Luzia do Pará (108) e Tracuateua (133). Esta flutuação de PRP crescente e decrescente durante este trimestre pode ser explicada pela formação e inibição de nuvens convectivas associadas a sistemas climáticos de grande escala. Neste contexto, o trimestre MAM (painel à direita-cima) que é marcado pelos máximos pluviométricos provocados pela ZCIT, observou-se variação positiva de PRP em todos os municípios, com exceção de Cametá (31) que mostrou sinal negativo de diminuição de PRP.

Em contraste, no regime seco, JJA (painel médio inferior) e SON (painel inferior direito) mostram valores negativos de PRP (abaixo de 70 mm - em tons de verde claro) na maioria da região, mas os resultados mostram valores positivos de PRP (aumento até 70 mm - em tons de azul claro) em certos locais no nordeste do Pará e na faixa litorânea do Pará.

Os resultados da variação do PRP mostram que nos últimos 15 anos o regime pluviométrico sofreu alterações nos aspectos anuais e sazonais, especialmente no aspecto sazonal. Destacamos a região costeira do Pará (região R1, R2 e R4) e o regime de pluviosidade - DJF. Estes mostram valores negativos de PRP, indicando pouca formação de nuvens de chuva convectivas. Em contraste, observa-se um aumento da precipitação durante a estação seca do SON. Isto significa que a atividade convectiva tende à formação de nuvens de chuva. Portanto, a diminuição/aumento do PRP no regime chuvoso/seco é uma indicação de uma redução/aumento da variabilidade anual, como em (Ferreira; Souza; Oliveira, 2020).

Figura 17 - Variação nos últimos 15 anos, médias nas décadas de (1989 a 2003) e (2004 a 2018) na série de dados de precipitação - PRP, para escala anual e sazonal. As escalas de cores indicam os valores de variação delta

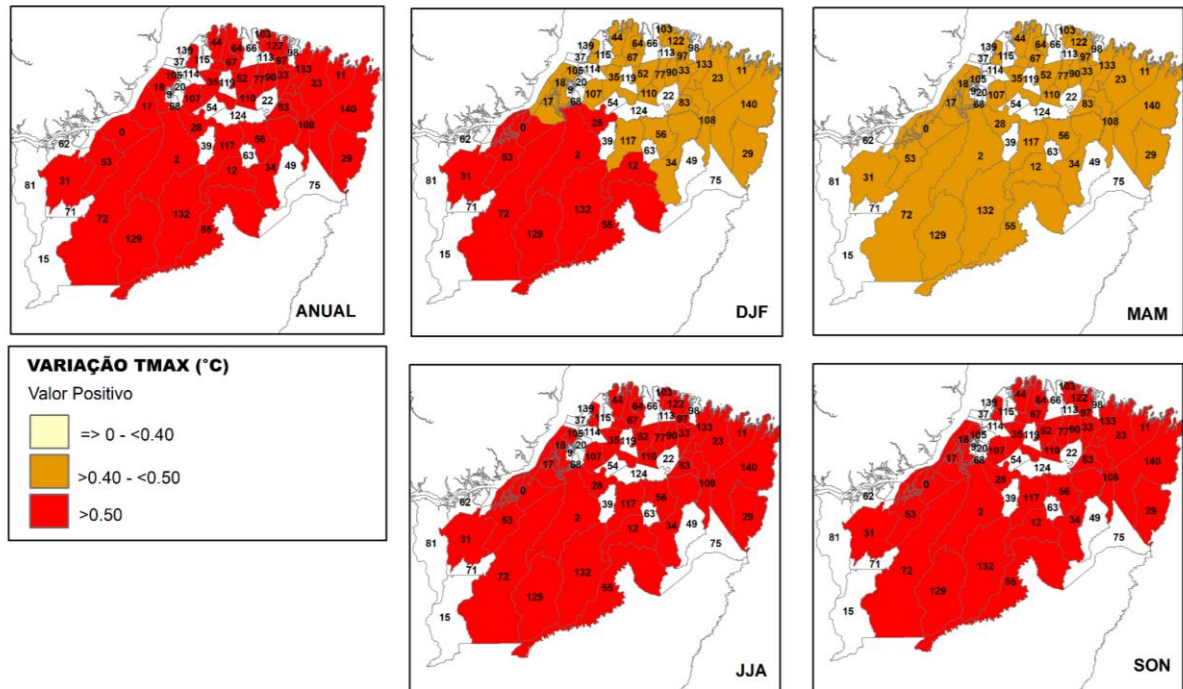


A TMAX exhibe variações positivas nos últimos 15 anos para a escala anual (Figura 18, painel superior esquerdo). Isto mostra um aumento de temperatura de mais de 0,5 °C em praticamente toda a região do estudo.

Na estação chuvosa, os trimestres DJF (painel superior central) e MAM (painel superior direito) mostram valores positivos com um aumento de 0,5 °C e até 0,4 °C, respectivamente (em tons de laranja). Apesar dos sistemas meteorológicos em funcionamento durante este período, é visível um aumento da TMAX na região. Por outro lado, os períodos secos de JJA (painel de fundo médio) e SON (painel de fundo direito) mostram um valor mais elevado de variação de temperatura com valores máximos de 0,6°C e 0,9°C (em tonalidades de vermelho escuro).

Por conseguinte, a análise da variação do TMAX prova que a região experimentou um aumento considerável da temperatura máxima nos últimos tempos (15 anos) e vários fatores podem influenciar o crescimento, fatores naturais e antrópicos, mencionados nesta investigação.

Figura 18 - Variação nos últimos 15 anos, médias das décadas de (1989 a 2003) e (2004 a 2018) na série de dados de temperatura máxima - TMAX, escala anual e sazonal. As escalas de cores indicam os valores de variação delta



### 2.3.5 Relação de impacto ambiental nos últimos 15 anos

A Figura 19 exhibe a distribuição dos dados de PROD da laranja (A), “limão” (B), taxa de desmatamento (C) e ET (D) durante o período de 15 anos (2004 a 2018). Como complemento ao estudo das mudanças climáticas observadas nesta investigação, pergunta-se quais as variáveis climáticas (PRP, TMAX e ET) associadas com a questão ambiental (desmatamento) influenciam a redução da PROD dos cítricos. O PCA e o PCR foram utilizados para testar esta hipótese (Figura 20).

Na (Figura 19a), observa-se claramente que a maior PROD laranja (t/ha em vermelho) está concentrada na região R4. Os 10 principais municípios produtores são: Terra Alta (130), Capitão Poço (34), Irituia (56), Ourém (83), Santa Izabel do Pará (107), Ipixuna do Pará (55), Igarapé-Açu (52) e Peixe-Boi (90), excluindo Barcarena (17) e Aurora do Pará (12), localizados na região R3 (IBGE,2020). Por outro lado (Figura 19b), as dez principais produtividades de “limão” (t/ha em tons de vermelho e amarelo) são: Ourém (83), Capitão Poço (34), Irituia (56) e Santa Izabel do Pará (107) na região R4, com exceção de Tailândia (129) na região R5 e Acará (2), Bujaru (28) e Cametá (31) na região R3. Esse aumento poderia estar relacionado com vários fatores (área, porta-enxertos, irrigação, fertilização, controlo e pulverização de pragas e doenças, etc.).

Observa-se que, de acordo com a taxa de desmatamento ( $\text{km}^2$ ) (Figura 19c), os municípios com a maior taxa de desmatamento estão concentrados nas regiões R1, R4 e R5. Estas regiões são adjacentes ao arco de desmatamento. De acordo com Fearnside e Graça (2009), a fronteira é caracterizada pela dinâmica das atividades agrícolas e pecuárias, bem como a expansão de áreas desenvolvimento socioeconômicos (Sathler; Adamo; Lima, 2018).

Em contraste, as taxas de ET (Figura 19d) mostram os 10 valores mais baixos de ET nos municípios de Cachoeira do Piriá (29), Augusto Corrêa (11) e Viseu (140) na R1, Tracuateua (133), Ourém (83), Peixe-Boi (90), Terra Alta (130), e Igarapé-Açu (52) na R4 e, Tailândia (129) na R5. Consequentemente, partes destes municípios apresentam taxas de desmatamento médias e altas (Figura 19d). Isto confirma o resultado da redução do PRP (Figura 17, painel superior esquerdo), especialmente no município de Viseu (140).

Com base nesse conhecimento geoespacial e nos parâmetros de variação climática, os resultados das variáveis ambientais que influenciam a PROD dos cítricos são apresentados na (Figura 20). O resultado da PCA revela que a soma dos três primeiros componentes principais da PCA explica 72,5% da variação total. A dimensão 1 é a que melhor explica as variáveis ambientais que afetam a produtividade dos cítricos, sendo a ET a variável mais relacionada ( $r=0,78$ ), seguida pelo PRP ( $r=0,74$ ). Por outro lado, a TMAX ( $r=-0,57$ ) é seguida pelo desmatamento ( $r=-0,49$ ). Portanto, os modelos PCR indicam que os valores positivos de PC1 (variáveis ambientais x PROD cítrica) representam localidades com maior PRP e ET, enquanto os valores negativos indicam localidades com maior TMAX e desmatamento.

É importante notar que a produção de laranjas não é irrigada na região em questão (ADEPARÁ, 2017), o que torna a dependência das chuvas (PRP) e da evapotranspiração (ET) ainda mais crucial para determinar a produtividade cítrica. A disponibilidade de água é um fator crítico para o desenvolvimento das plantas cítricas, e a falta de irrigação torna essas culturas particularmente sensíveis às variações na precipitação (Silva Junior *et al.*, 2023)

Além disso, o estudo de Leite-Filho *et al.* (2021) revelou que o desmatamento reduz a precipitação e as produtividades agrícolas na Amazônia brasileira. A perda de floresta em até 55-60% dentro das células da grade de 28 km aumenta a precipitação, mas em escalas maiores, como células de grade de 224 km, a relação entre perda florestal e chuvas é mais linear, com uma constante redução da precipitação à medida que a floresta é perdida. Isso pode afetar negativamente a agricultura de certas culturas, em regiões onde a redução das chuvas devido à perda florestal é mais acentuada, como no sul e sudoeste da Amazônia, corroborando os resultados de Deutsch *et al.* (2018) e Smith, Baker e Spracklen, (2023).

Por outro lado, o aumento do PRP e da ET contribuiu para a diminuição da PROD de "limão". Conforme Ferreira, Souza e Oliveira (2020), a alta variabilidade da precipitação está relacionada a mecanismos oceânicos-atmosféricos que favorecem sistemas climáticos, como ZCIT, linhas de instabilidade e agrupamentos convectivos, que podem atuar em certos municípios do Pará ao longo de toda a estação.

A diminuição da produtividade de "limão" associada ao aumento das chuvas pode ser explicada pelo fato de que essas chuvas ocorreram em um período inadequado para o cultivo dessa fruta. Em regiões tropicais e subtropicais, onde muitos limoeiros são cultivados, há uma estação de chuvas e uma estação seca bem definidas. Os limoeiros geralmente preferem um regime de chuvas que inclui um período chuvoso para fornecer água suficiente para o crescimento e um período de estiagem para estimular a frutificação. A falta de um período seco adequado pode levar ao excesso de umidade no solo, o que pode prejudicar o desenvolvimento das raízes e causar problemas como a proliferação de doenças fúngicas (Hardy, 2004)

Se as chuvas aumentam durante o período de frutificação dos limoeiros, isso pode levar a problemas como a diluição do suco, rachaduras nos frutos e maior suscetibilidade a doenças. Além disso, o excesso de umidade pode dificultar a polinização e a formação adequada dos frutos, de acordo com Shafqat *et al.* (2021).

Portanto, a diminuição na produção de limões em resposta ao aumento das chuvas pode estar relacionada ao fato de que essas chuvas ocorrem em um período crítico para o ciclo de crescimento e frutificação dos limoeiros, interferindo negativamente nas condições ideais para o cultivo dessa cultura. É importante considerar que o período específico em que essas chuvas ocorrem pode variar de acordo com a localização geográfica, mas geralmente está relacionado à estação de chuvas na região em questão.

No entanto, é importante considerar os resultados do estudo recente de Silva Junior *et al.* (2023), que analisou a dinâmica da energia e da água na produção de "limão" na Amazônia Oriental. O estudo descobriu que 63% da energia disponível foi usada pelo calor latente no período mais chuvoso, enquanto 60% foi usada durante o período menos chuvoso. O consumo de água do "limão" durante o experimento foi de 1599 mm, com uma média diária de 3,70 mm dia<sup>-1</sup>, enquanto o valor médio do coeficiente da cultura (Kc) foi 1.41. Esses resultados permitem o design de protocolos adequados de fornecimento de água para a cultura no principal polo cítrico na região amazônica.



Figura 19 - Distribuição espacial da produtividade de laranja (a), "limão" (b), taxa de desmatamento (c) e ET (d) ao longo de 15 anos (2004 a 2018)

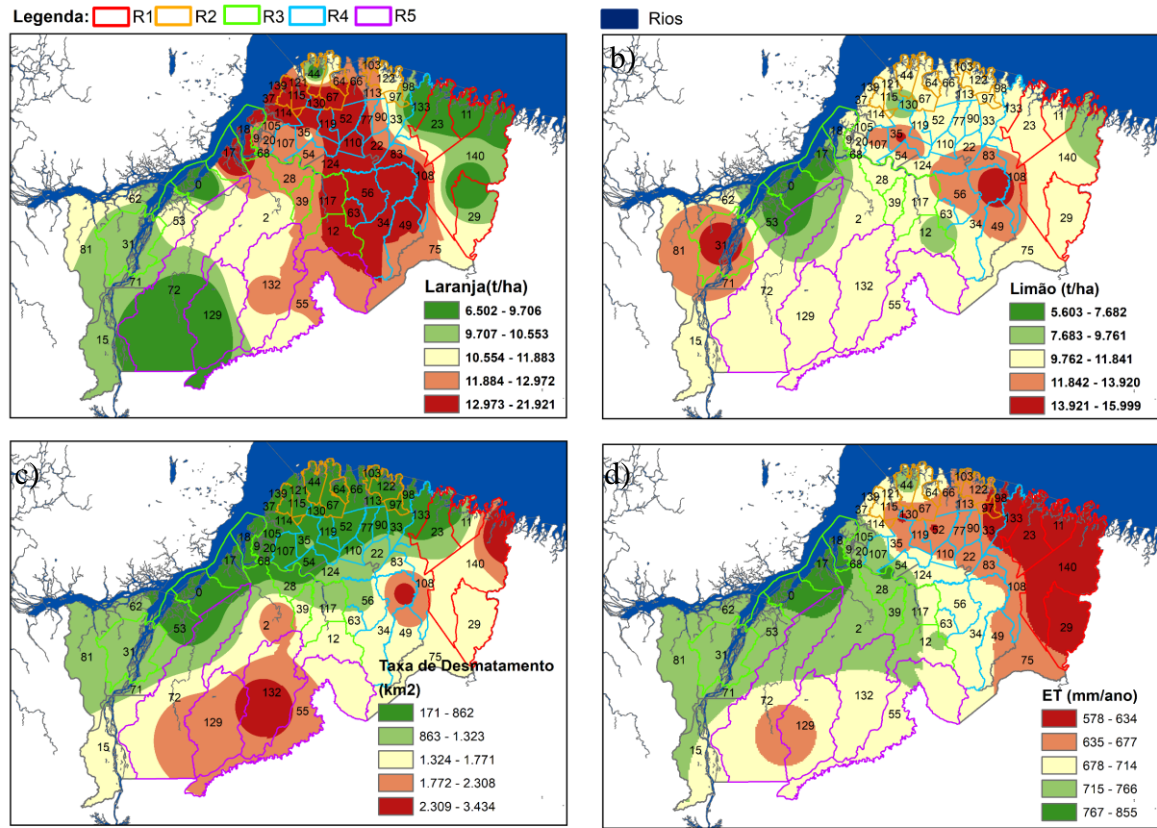
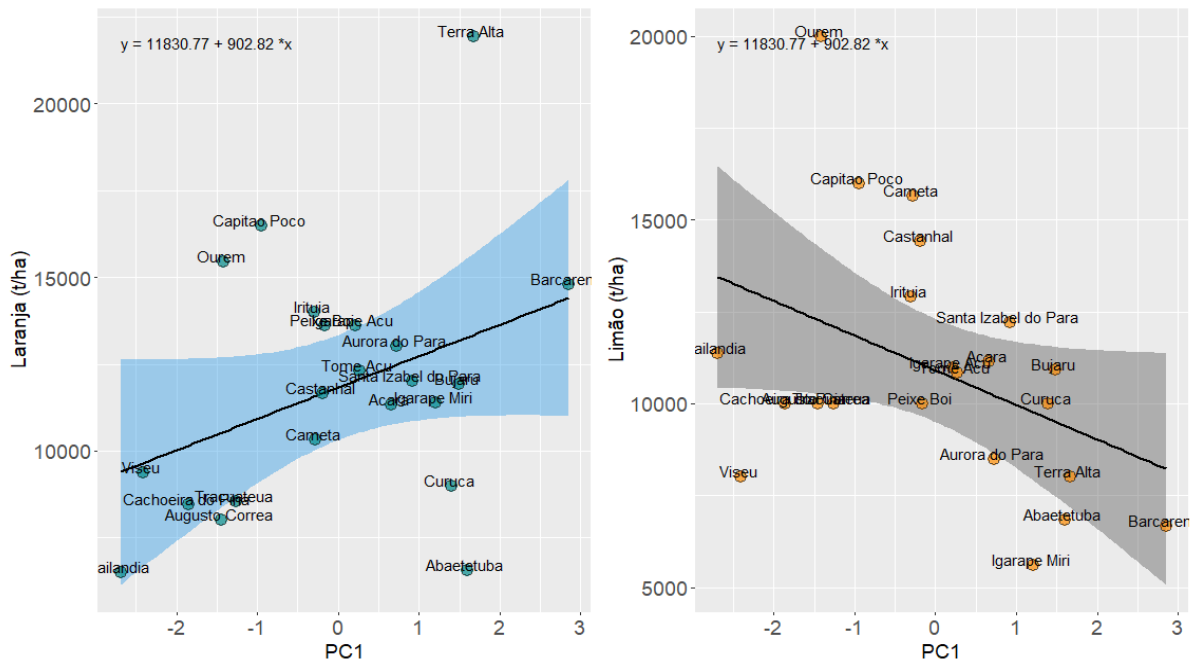


Figura 20 - Modelo de regressão linear (PCR) mostrando a relação das variáveis ambientais no Eixo 1 (PRP, TMAX, ET e Desmatamento) e a produtividade de citros no Eixo 2 (laranja e “limão”), onde Moran's Index: 0,014, R<sup>2</sup> ajustado é 77%, AIC laranja: 395,68 e AIC limão: 392,78



## 2.4 Conclusão

1. Identifica-se os períodos mais chuvosos e mais secos, correspondentes ao período de estudo de 1981 a 2018. A estação das chuvas ocorre nos meses de dezembro a maio e a estação seca nos meses de junho a novembro.
2. A alta variabilidade temporal e espacial da precipitação na região se tornou evidente. As regiões R1, R2 e R4 apresentaram valores de precipitação sazonais mais baixos, resultando em uma tendência negativa significativa ( $Z < -1,96$ ,  $p < 0,05$ ) e delta ( $\Delta < 150$  mm). Enquanto isso, os municípios nas regiões R3 e R5 exibiram tendências positivas significativas na precipitação ( $Z > 1,96$ ,  $p < 0,05$ ) e ( $\Delta > 150$  mm).
3. As tendências do TMAX mostraram um forte domínio crescente nas séries temporais anuais e nas séries temporais sazonais. A maioria das tendências estatisticamente significativas foram observadas na estação seca ( $Z > 1,96$ , valor de  $p < 0,05$ ). Além disso, uma magnitude crescente ( $\Delta > 0,50$ ) foi observada na maioria dos municípios ao longo dos 15 anos.
4. A PCA mostra que a soma dos três primeiros componentes principais explica 72,5% da variância total dos dados originais. A dimensão 1 é a única que explica as variáveis ambientais que têm um impacto na produtividade dos cítricos. Neste caso, ET foi a variável mais relacionada ( $r = 0,78$ ), seguida por PRP ( $r = 0,74$ ). Em contrapartida, TMAX ( $r = -0,57$ ) foi seguido de desflorestação ( $r = -0,49$ ).
5. É evidente que a região com maior PROD dos citros está concentrada na região R4, e adicionalmente se agruparam as áreas desflorestadas entre R5 e R1. No entanto, alguns municípios produtores de laranja são negativamente influenciados pelos parâmetros de desmatamento e TMAX. Estes mostram uma relação positiva com o PRP (aumento) e o ET. No que diz respeito à PROD do “limão”, o comportamento é diferente, algumas localidades têm tendência a diminuir com o PRP e ET, apesar do aumento do TMAX e do desmatamento.
6. Portanto, o modelo PCR evidenciou que o aumento do desmatamento e do TMAX pode afetar a produtividade dos cítricos. Isto apoia os estudos sobre as mudanças climáticas e o seu impacto na produtividade dos frutos no Pará. Além do mais, o modelo é aceitável, pois não apresenta autocorrelação através dos índices de precisão (o índice de Moran: 0,014; R2 ajustado é de 77%; AIC laranja: 395,68 e AIC de “limão”: 392,78).

## Referências

- AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO PARÁ. **Decreto nº.1943 do Governo do Estado**. Criação de dois polos citrícolas no Pará. 2017. Disponível em: <http://www.adepara.pa.gov.br/sites/default/files/Decreto%201943%20de%2021%20de%20de%20de%202017%20-%20Cria%C3%A7%C3%A3o%20dos%20polos%20Citrícolas.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2020.
- ALBUQUERQUE, Monik Fernandes de *et al.* Precipitação nas mesorregiões do estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 6, n.6, p.151-168, 2010. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v6i0.25606>
- ALMEIDA, C. T. *et al.* Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. **International Journal of Climatology**, v.37, n.4, p. 2013–2026. 2017.
- AZEVEDO, Franklin Thiago Mota *et al.* Prognóstico sazonal de precipitação regionalizada na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n.5, p. 1520-1534, 2017.
- BASTOS, Therezinha Xavier *et al.* Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos. **Embrapa Amazônia Oriental**. Belém-PA, 2002. Documentos (Infoteca-E).
- CARNEIRO, Renan do Vale. **Experiências de recuperação florestal praticadas por agricultores familiares**. 2018. 129f. Dissertação (Mestrado em Agriculturas Familiares e desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Pará, Belém- PA. 2018.
- COELHO, Caio A.S.; CARDOSO, Denis H. F.; FIRPO, Mári A.F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.125, n.3-4, p.769-784, 2016.
- DEUTSCH, Curtis A. *et al.* Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. **Science**, v.361, n. 6405, p.916-919. 2018.
- DIAS, Pedro Leite da Silva; RIBEIRO, Wagner Costa; NUNES, Luci Hidalgo. Contribution to understanding the regional impacts of global change in South America. São Paulo: **Instituto de Estudos Avançados**. 2007. 412p.
- DIAS, Thaiane Soeiro da Silva *et al.* Estimativa climática sazonal da produtividade de açaí (*Euterpe Oleracea* Mart.) no estado do Pará - cenários futuros. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.2, p.517-533. 2019.
- DIAS, Thaiane Soeiro da Silva *et al.* Urban environment and the air temperature trend: The case of the metropolis of Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n.1, p.159-171, 2021.
- DING, Zhiyong; WANG, Yuyang; LU, Ruijie. An analysis of changes in temperature extremes in the three river headwaters region of the Tibetan plateau during 1961–2016. **Atmospheric Research**, v. 209, p. 103-114. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.003>
- ESPINOZA, Jhan Carlo *et al.* Contrasting north-south changes in amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). **Climate dynamics**, v.52, n.9-10, p. 5413-5430. 2019 <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- FEARNSIDE, Philip M.; GRAÇA, Paulo Maurício Lima de Alencastro. Br-319: A rodovia Manaus-Porto Velho e o impacto potencial de conectar o arco de desmatamento à Amazônia Central. **Novos Cadernos NAEA**, v.12, n.1, p. 19-50. 2009. <http://dx.doi.org/10.5801/ncn.v12i1.241>

- FERREIRA, Douglas Batista da Silva; SOUZA, Everaldo Barreiros de; OLIVEIRA, Juarez Ventura de. Identificação de extremos de precipitação em municípios do estado do Pará e sua relação com os modos climáticos atuantes nos Oceanos Pacífico e Atlântico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.27, n.16, p. 197-222. 2020. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.64630>
- FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. Worldclim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of food and agriculture**. 2022.
- FUNK, Chris *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- GATTI, Luciana V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n.7867, p. 388–393. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- GOMES, Ana Carla *et al.* Análise estatística das tendências de elevação nas séries de temperatura média máxima na Amazônia Central: estudo de caso para a região do oeste do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.17, n.11, p.82-97, 2015. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.42898>
- GORGOGNONE, Angela; GIOIA, Andrea; IACOBELLIS, Vito. A framework for assessing modeling performance and effects of rainfall-catchment-drainage characteristics on nutrient urban runoff in poorly gauged watersheds. **Sustainability**, v.11, n.18, e4933. 2019. <https://doi.org/10.3390/su11184933>
- HARDY, Sandra. Growing lemons in Australia—a production manual. *In*: New South Wales (ed), Australia: **NSW Department of Primary Industries**, 2004.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/igarape-miri/pesquisa/16/12705?tipo=grafico&indicador=12710> . Acesso em: 16 jun. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades – Panorama - Território e ambiente**. Brasil, 2021.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *In*: MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* (ed.). Cambridge University Press. In Press, 2021. 3949p.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, Juan C. *et al.* Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, e33130, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep33130>
- KENDALL, Maurice George. **Rank correlation methods**. 1948.
- KILADIS, George N.; DIAZ, Henry F. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v.2, n. 9, p.1069-1090. 1989.
- LÊ, Sébastien; JOSSE, Julie; HUSSON, François. FactoMineR: an r package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n.1, p. 1-18. 2008.

- LEITE-FILHO, Argemiro Teixeira; COSTA, Marcos H.; FU, Rong. The Southern Amazon rainy season: the role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. **International Journal of Climatology**, v.40, n.4, p.2328–2341. 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6335>
- LEITE-FILHO, Argemiro Teixeira *et al.* Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v.12, n.1, e2591. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>
- LIANG, Kang *et al.* Variability of temperature extremes in the yellow river basin during 1961–2011. **Quaternary International**, v.336, p. 52–64. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.02.007>
- LIESENFELD, Marcus Vinicius Athaydes; VIEIRA, Gil ; MIRANDA, Ires Paula de Andrade. Ecologia do fogo e o impacto na vegetação da Amazônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n.88, p. 505-517, 2016.
- LOPES, Sabrina Borges Alcântara *et al.* Análise multitemporal de imagens de sensores remotos: expansão da dendeicultura no município de Tailândia–Pará (1985–2015). In: PONTES, Altem. Nascimento; ROSÁRIO, Alessandro Silva do (org.). **Ciências Ambientais: Climatologia, Geotecnologias, Mineração e Estudos de Monitoramento**. Belém: Eduepa, 2020. 166p.
- MANN, Henry B. Non-parametric test against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, v.13, n.3, p. 245-259, 1945.
- MARENGO, José Antonio; SOUZA JUNIOR, Carlos. Mudanças climáticas: impactos e cenários para a Amazônia. São Paulo: **ALANA**, 2018.
- MARENGO, José Antonio *et al.* Changes in climate and land use over the Amazon Region: current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, e228, 2018. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>
- MARENGO, José Antonio *et al.* Two contrasting severe seasonal extremes in tropical south America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013b. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00642.1>
- MENEZES, Franciane Pantoja; FERNANDES, Lindemberg Lima; ROCHA, Edson José Paulino da. O uso da estatística para regionalização da precipitação no estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, n.11, p. 66-71, 2015.
- MOREIRA, Pedro Hugo Oliveira; CUNHA, Alan Cavalcanti da; COSTA, Antônio Carlos Lola da. Índice de tendências climáticas de longo prazo em área urbana na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 06, p. 3378-3393, 2021.
- MOREIRA, Pedro Hugo Oliveira *et al.* Variação microclimática em sítios urbanos com diferentes níveis de cobertura vegetal como subsídio à formação de ilha de calor. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 7, p. 3254-3274, 2020.
- NOBRE, Carlos A.; SELLERS, Piers J.; SHUKLA, Jagadish. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v. 4, n. 10, p. 957-988, 1991. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2)
- NOBRE, Paulo; SHUKLA, John. Variations of SST, Wind stress and rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v.9, n.10, p.2464-2479, 1996. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2)

OLIVEIRA, Juarez Ventura de *et al.* Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. **Urban Climate**, v. 31, e100579, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100579>

PIMENTA, Lianne *et al.* Dinâmica do uso e cobertura da terra nos municípios prioritários: uma análise no município de Moju, Pará no período de 2008 a 2014. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, v. 1, n. 14, p. 267-281, 2018.

PROJETO DE MONITORAMENTO DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA LEGAL. **Taxa do desmatamento da Amazônia legal a partir de 2004**. Divisão de processamento de imagens - DPI / OBT / INPE. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/geonetwork/srv/api/records/a5220c18-f7fa-4e3e-b39b-feeb3ccc4830>. Acesso em: 15 out. 2022.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R **Foundation for Statistical Computing**, 2017.

RODRIGUES, Juliana Chagas; SOUZA, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de; LIMA, Renata Trindade de. Estimativa de temperaturas basais e exigência térmica em mangueiras no nordeste do estado do Pará. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n.1, p. 143-150, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000100017>

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. **MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]**. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>. Acesso em: 13 out. 2019

SAMPAIO, Gilvan *et al.* Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 17, L17709, 2007. <https://doi.org/10.1029/2007GL030612>

SANTOS, Carlos Antonio Costa dos.; OLIVEIRA, Verônica Gabriella de. Trends in extreme climate indices for Pará State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n.1, p.13-24, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778632120150053>

SANTOS, Eliane Barbosa; LUCIO, Paulo Sergio; SILVA, Cláudio Moisés Santos e. Análise de tendência da precipitação diária na Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n.4, p. 1041-1052. 2015.

SANTOS, Thais Vieira dos *et al.* Mann-Kendall test applied to hydrological data—performance of TFPW and CV2 filters on trend analysis. **Ciência e Natura**, v. 42, e87. 2020. <https://doi.org/10.5902/2179460X41928>

SATHLER, Douglas; ADAMO, Susana B.; LIMA, Everton E. C. Deforestation and local sustainable development in Brazilian Legal Amazonia: an exploratory analysis. **Ecologia e Sociedade**, v. 23, n. 2, e30, 2018. <https://www.jstor.org/stable/26799094>

SHAFQAT, Waqar *et al.* Heat shock protein and aquaporin expression enhance water conserving behavior of citrus under water deficits and high temperature conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 181, e104270, 2021.

SIERRA, Juan Pablo *et al.* Deforestation impacts on Amazon-Andes hydroclimatic connectivity. **Climate Dynamics**, v. 58, n. 9, p. 2609-2636, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06025-y>

SILVA JUNIOR, Alberto Cruz da *et al.* Energy Balance, Water Demand, and Crop Coefficient of Acid Lime in the Oriental Amazon. **Water**, v. 15, n. 6, e1239, 2023.

SMITH, C.; BAKER, J.C.A; SPRACKLEN, D.V. Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. **Nature**, v. 615, p. 270–275. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05690-1>

SOARES, Deivide Benicio; NÓBREGA, Ranyére Silva; GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano. Indicadores climáticos de desertificação na bacia hidrográfica do rio Pajeú, Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22., n. 14, p.363-380, 2018. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.58557>

SODRÉ, Giordani Rafael Conceição *et al.* Teleconexões oceânicas nos padrões climáticos da amazônia oriental: análises dos últimos 40 anos (1974-2013). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, n.11, p. 52-66. 2015. <https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.38113>.

SOUSA, Adriano Marlison Leão *et al.* Variabilidade espaço-temporal da precipitação na Amazônia durante eventos ENSO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, n.1, p. 015-029. 2015.

SOUZA, Everaldo Barreiros de; AMBRIZZI, Tércio. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. **Climanálise**, v.1, p. 1-20, 2003.

SOUZA, Everaldo Barreiros de; KAYANO, Mary Toshie; AMBRIZZI, Tércio. The regional precipitation over the eastern amazon/northeast Brazil modulated by tropical pacific and atlantic SST anomalies on weekly timescale. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.3, p.325-336, 2004.

SOUZA, Everaldo Barreiros de; KAYANO, Mary Toshie; AMBRIZZI, Tércio. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and northeast Brazil during the autumn Rainy Season. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 81, n. 3, p. 177-191, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0081-4>

SOUZA, Everaldo Barreiros de; ROCHA, Edson J. P. Climatologia, Variabilidade e tendências do clima atual na Amazônia e em cenários futuros de mudanças climáticas. *In*: VIEIRA, Ima Célia Guimarães; TOLEDO, Peter Mann de; SANTOS JÚNIOR, Roberto Araújo Oliveira (org.). **Ambiente e Sociedade na Amazônia**. Rio de Janeiro: Garamond. 2014. cap.2. p. 295 – 312.

SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo REGCM4. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, n.12, p. 293–306. 2016. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43711>

SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, n. 13, p. 81-93. 2017. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v21i0.41232>.

TAVARES, Alexandra Lima *et al.* Climate indicators for a watershed in the eastern amazon. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, n.14, p.389-410, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v23i0.61160>.

TRENBERTH, Kevin E. *et al.* Global warming and changes in the Earth's climate system. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 17-22, 2014.

TRENBERTH, Kevin E.; HOAR, Timothy J. The 1990 – 1995 El Niño - Southern Oscillation event: Longest on record. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 1, p. 57-60, 1996.

TUKEY, John W *et al.* **Exploratory data analysis**. 1977.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Climate Change and the US Food System: A Report from the United States Department of Agriculture**. Washington, 2022.

WINCKLER, Johannes *et al.* Different response of surface temperature and air temperature to deforestation in climate models. **Earth System Dynamics Discussions**, v. 10, n.3, p.473-484, 2019. <https://doi.org/10.5194/esd-10-473-2019>.



### **CAPÍTULO 3 RISCOS SOCIOAMBIENTAIS DA PRODUTIVIDADE DOS CITROS NO NORDESTE DO PARÁ: APLICAÇÃO DE MULTICRITÉRIOS PARA CHUVAS EXTREMAS<sup>2</sup>**

**Resumo:** Este estudo consistiu em duas partes: a) estudos do comportamento da produtividade (PROD) cítrica (laranja e “limão”) e índices climáticos (SPI, IOS, AMM, Nino 3.4 e GRAD) ao longo de um período de 5 anos (1994-1998, 1999-2003, 2004-2008, 2009-2013 e 2014-2018); b) avaliação do risco socioambiental da produtividade dos citros na região nordeste do estado do Pará, com um estudo de caso focado em chuvas extremas. Foi adotada uma abordagem não paramétrica, mais especificamente a correlação de Spearman ( $\rho$ ), para identificar significância ( $p < 0,05$ ). O cálculo SPI foi utilizado para identificar chuvas extremas, e foram empregados índices oceano-atmosfera (IOS, AMM, Nino 3.4 e GRAD) para a detecção dos sinais de ENSO (El Niño e La Niña). O método AHP foi aplicado para mapear os riscos socioambientais associados à PROD de citros. A produtividade de frutas cítricas representa uma atividade socioeconômica de grande importância. Entretanto, observa-se uma diminuição na PROD dos citros (laranja e limão) ao longo dos anos. Os índices climáticos oceânicos-atmosféricos (IOS, AMM, Nino 3.4 e GRAD) destacam as assinaturas de El Niño e La Niña, o que se mostrou consistente com os resultados do SPI. Outra descoberta relevante identificou os fatores de risco socioambiental para a PROD dos citros em casos de chuvas extremas. Portanto, este estudo recomenda maior atenção e planejamento na gestão dos recursos hídricos em áreas de alto risco.

**Palavra-chaves:** análise multicritérios; índice de precipitação padronizada (SPI); produtividade de *citrus*; riscos socioambientais.

---

<sup>2</sup> Artigo em fase para ser submetido ao *Agriculture* MDPI, Impact fator: 3.408

## **SOCIOENVIRONMENTAL RISKS TO CITRUS PRODUCTIVITY IN NORTHEASTERN PARÁ: APPLICATION OF MULTICRITERIA FOR EXTREME RAINFALL**

**Abstracts:** This study consisted of two parts: a) an investigation into the behavior of citrus productivity (PROD) (orange and lime) and climatic indices (SPI, IOS, AMM, Nino 3.4, and GRAD) over a 5-year period (1994-1998, 1999-2003, 2004-2008, 2009-2013, and 2014-2018); b) an assessment of the socioenvironmental risk associated with citrus productivity in the northeastern region of the state of Pará, with a case study focused on identifying extreme rainfall events. A non-parametric approach, specifically Spearman's correlation ( $\rho$ ), was adopted to determine significance ( $p < 0.05$ ). The SPI calculation was used to identify extreme rainfall, and ocean-atmosphere indices (IOS, AMM, Nino 3.4, and GRAD) were employed to detect ENSO (El Niño and La Niña) signals. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method was applied to map the socioenvironmental risks associated with *Citrus* PROD. Citrus fruit production represents a socioeconomically significant activity. However, a decrease in citrus PROD (orange and lime) has been observed over the years. Ocean-atmosphere climate indices (IOS, AMM, Nino 3.4, and GRAD) highlight El Niño and La Niña signatures, which was consistent with SPI results. Another significant finding identified socioenvironmental risk factors for citrus PROD in cases of extreme rainfall. Therefore, this study recommends increased attention and planning in the management of water resources in high-risk areas.

**Keywords:** multicriteria analysis; standardized precipitation index (SPI); *citrus* productivity; socioenvironmental risks.

### 3.1 Introdução

No Brasil, os *Citrus* são de grande importância econômica, proporcionando emprego e rendimentos aos pequenos, médios e grandes produtores (Moreira, 2016). Só a safra da laranja 2022/23 está estimada em 405 milhões de caixas de 40,8 kg caixa (MBx), ou 16,52 milhões de toneladas métricas (MMT). Isso representa uma queda de 2% em relação à safra anterior (2021/22) (USDA, 2022). Segundo o IBGE, a contribuição econômica da laranja excede 146 milhões do produto interno bruto (PIB) (dados de 2020). Mas o processo de produção da laranja tem encontrado dificuldades, incluindo financeiras, territoriais e ambientais.

As mudanças climáticas têm impactos negativos na fruticultura, especialmente em lugares como Capitão Poço, Pará. O aumento das concentrações de CO<sub>2</sub> e eventos climáticos extremos afetam a produção de frutas, causando prejuízos econômicos e vulnerabilidade social (Carneiro, 2018). De fato, estudos anteriores relataram o impacto da agricultura nos riscos de eventos climáticos extremos (Lesk; Rowhani; Ramankutty, 2016).

Conforme observado no sexto relatório do IPCC (2021), reconhece-se que o aumento dos gases do efeito estufa, em grande parte proveniente de diversas fontes, incluindo práticas como o desmatamento e emissões de metano, contribui para o agravamento das mudanças climáticas. Isso tem consequências diretas para a região da Amazônia Oriental, com projeções de diminuição da precipitação anual e aumento da temperatura do ar. Como resultado, a frequência e gravidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, chuvas intensas e secas, estão previstos para se tornarem mais frequentes (Marengo; Souza Junior, 2018).

Em 2015, Capitão Poço enfrentou um exemplo concreto desses eventos climáticos extremos, quando chuvas excessivas prejudicaram a produção de *Citrus*, uma cultura importante na região, resultando em perdas econômicas significativas (FIDE, 2015). Diante disso, torna-se evidente que a agricultura desempenha um papel crucial no agravamento dos eventos climáticos extremos devido às suas emissões de gases de efeito estufa, tornando-os mais frequentes e severos. Portanto, é essencial adotar práticas agrícolas sustentáveis, monitorar e prevenir esses eventos para garantir a segurança alimentar e econômica da região e mitigar os impactos negativos da agricultura nas mudanças climáticas e nos eventos extremos.

A questão da produtividade dos *Citrus* é de extrema importância, especialmente à luz das mudanças climáticas e das incertezas quanto aos seus efeitos. Isso exige uma compreensão aprofundada das condições climáticas, com foco na disponibilidade de água, um fator crucial para a agricultura (Dias *et al.*, 2019). A escassez de água resulta em redução da condutância e da troca de gases, o que, por sua vez, afeta o crescimento e a produtividade das culturas (Souza

*et al.*, 2018). Por esta razão, a investigação tem se concentrado na utilização de Índices de Precipitação Padronizada (SPI) como um índice que caracteriza as condições chuvosas e secas, principalmente para determinar a disponibilidade de água (Bouabdelli *et al.*, 2022).

É também importante estudar os fenômenos oceano-atmosféricos. Por conseguinte, são utilizados o *Southern Oscillation Index* (SOI) e os índices de Temperatura Superficial do Mar do Oceano Pacífico (SST). O SOI é um indicador numérico do desenvolvimento e intensidade do *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) e é calculado utilizando as diferenças de pressão média do nível do mar (MNP) entre o Taiti e Darwin, com base numa análise mensal para definir os valores altos e baixos do SOI relacionados com as fases fria (La Niña, SOI+) e quente (El Niño, SOI-) do fenômeno ENSO proposto por Lin *et al.* (2016). Por outro lado, os valores de anomalias da (TSS) amplamente utilizado são os seguintes: Niño:  $\geq 0,5$  °C; Neutro: - 0,5 °C a 0,5 °C; e La Niña:  $\leq -0,5$  °C (Souza; Rocha, 2014; Souto *et al.*, 2019).

O fenômeno ENSO ocorre na zona equatorial do Oceano Pacífico tropical, onde as águas superficiais são quentes ou frias durante períodos de dois a sete anos (Kiladis; Diaz, 1989; Trenberth; Hoar, 1996). Os episódios de El Niño são caracterizados por anomalias de temperatura positiva da superfície do mar (SST) na região central e leste do Pacífico, acompanhadas por ventos alísios mais fracos do que o normal do Atlântico tropical e um SOI negativo. Isso inibe a convecção tropical na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e resulta em precipitação deficitária sobre a Amazônia e o nordeste do Brasil. Já os episódios de La Niña favorecem a convecção e o aumento da precipitação (Souza *et al.*, 2016, 2017).

Além disso, o Módulo Meridional Atlântico (AMM) e o gradiente (GRAD) são índices que se referem ao sinal do dipolo Atlântico (positivo/negativo) e têm uma relação de diminuição/aumento da precipitação (Santos; Melo; Brito, 2016; Nóbrega; Santiago, 2016; Da Silva, 2020). O padrão dipolo é caracterizado por anomalias SST simultâneas de sinais opostos que ocorrem sobre as bacias norte e sul do Oceano Atlântico tropical. Este gradiente influencia o deslocamento norte-sul do ZCIT e causa precipitação na área deslocada (Hastenrath; Greichscar, 1993; Wagner, 1996; Nobre; Shukla, 1996; Souza; Rocha, 2014; Souza *et al.*, 2017; Ferreira; Souza; Oliveira, 2020)

É fundamental reconhecer que o potencial de eventos climáticos extremos causarem catástrofes depende não apenas da magnitude desses eventos, mas também das vulnerabilidades e exposições dos sistemas humanos e naturais afetados, determinando o risco, conforme (IPCC, 2013). Portanto, uma compreensão adequada da exposição ao perigo e da vulnerabilidade é essencial para um planejamento eficaz de mitigação de desastres (Almeida *et al.*, 2019). A

quantificação do risco desempenha um papel crucial em qualquer plano de recuperação de desastres.

Existem diversos métodos de avaliação de risco, sendo um deles o processo de análise hierárquica (AHP) proposto por (Saaty,1980) e (Saaty; Vargas, 2012). Este método é amplamente utilizado na análise de adequação do uso do solo agrícola (Akinci; Özalp; Turgut, 2013), erosão (Caldas; Silva; Santos, 2019), áreas suscetíveis a inundação (Hammami *et al.*, 2019), expansão de estradas (Han *et al.*, 2020) e vulnerabilidade ambiental (Peixoto *et al.*, 2019). Consiste na aplicação de uma metodologia que aprimora o processo de tomada de decisão na avaliação de múltiplos critérios, gerando um modelo validado que quantifica e hierarquiza a importância de cada critério com base em pesos determinados (Saaty, 1990).

Neste contexto, esta pesquisa analisa o comportamento da produtividade de laranja (*Citrus sinensis*) x limão (*Citrus latifolia*) em relação às condições dos índices climáticos nos municípios produtores do Pará, durante os quinquênios<sup>3</sup> (1994-1998, 1999-2003, 2004-2008, 2009-2013 e 2014-2018). Essa escolha de períodos se baseia na percepção das mudanças climáticas e na identificação de períodos de chuvas extrema, com base no relatório da *The World Meteorological Organization* (WMO). Além disso, o estudo aplica o método de análise hierárquica de multicritérios para identificar áreas suscetíveis ao risco de chuvas extremas afetarem a produtividade de Citrus, fornecendo informações importantes para tomadores de decisão em um curto espaço de tempo.

## 3.2 Material e métodos

### 3.2.1 Área de estudo

O estudo tem como área de análise o estado do Pará, o segundo maior do Brasil, ocupa uma área de 1.245.870,707 km<sup>2</sup> (IBGE, 2021). Faz parte da Bacia Amazônica e está localizado na região Norte do país.

Segundo Köppen, o clima do Pará é do tipo A, com três subtipos climáticos (Af, Am e Aw), designado para climas tropicais com altos índices pluviométricos e temperaturas mínimas médias de 18 °C. A precipitação anual da região nordeste do Pará varia cerca de 2.250 mm/ano a 3.000 mm/ano. A variabilidade espacial e temporal da precipitação deve-se à formação de nuvens principalmente convectivas, cúmulos, especialmente na costa do Pará, com penetrações para o continente. É causado pela dinâmica oceânica-atmosférica associada a

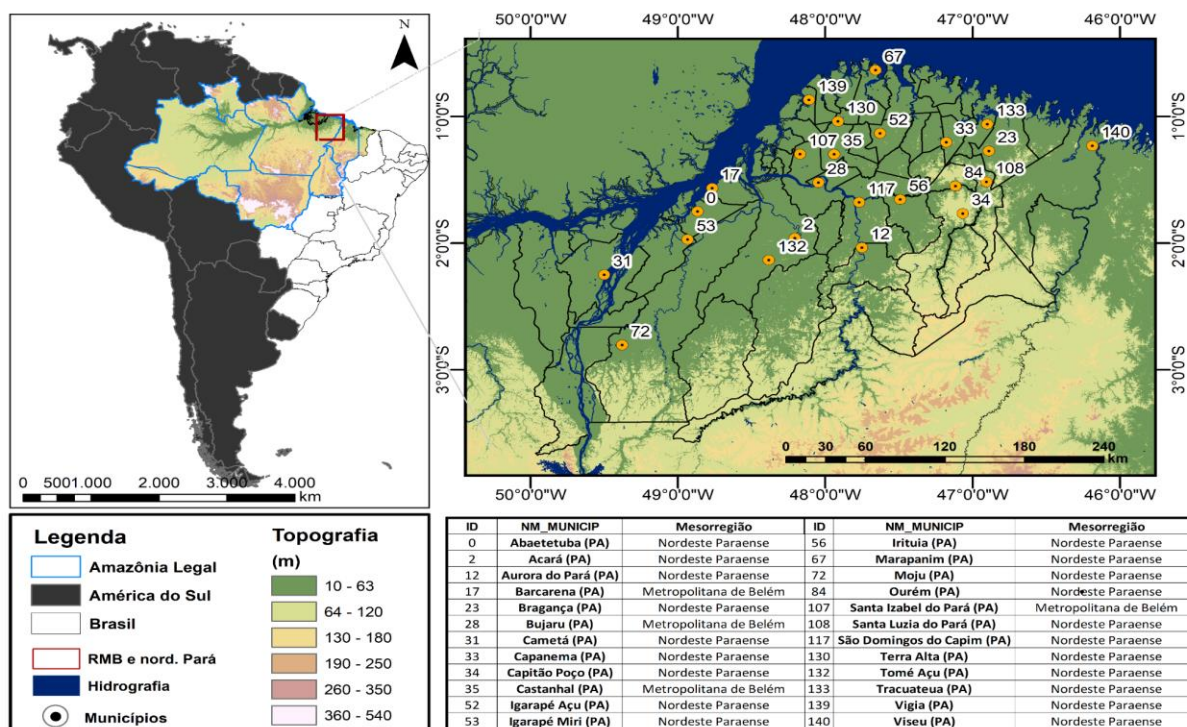
---

<sup>3</sup> Período de cinco anos, lustro.

sistemas climáticos de grande escala (ZCIT e SACZ) e LIs de mesoescala (Souza; Rocha, 2014; Souza *et al.*, 2017; Dias *et al.*, 2019).

O estudo focou nos municípios com a maior produção de citrus do estado. A Figura (21) mostra os 24 municípios que foram incluídos no estudo.

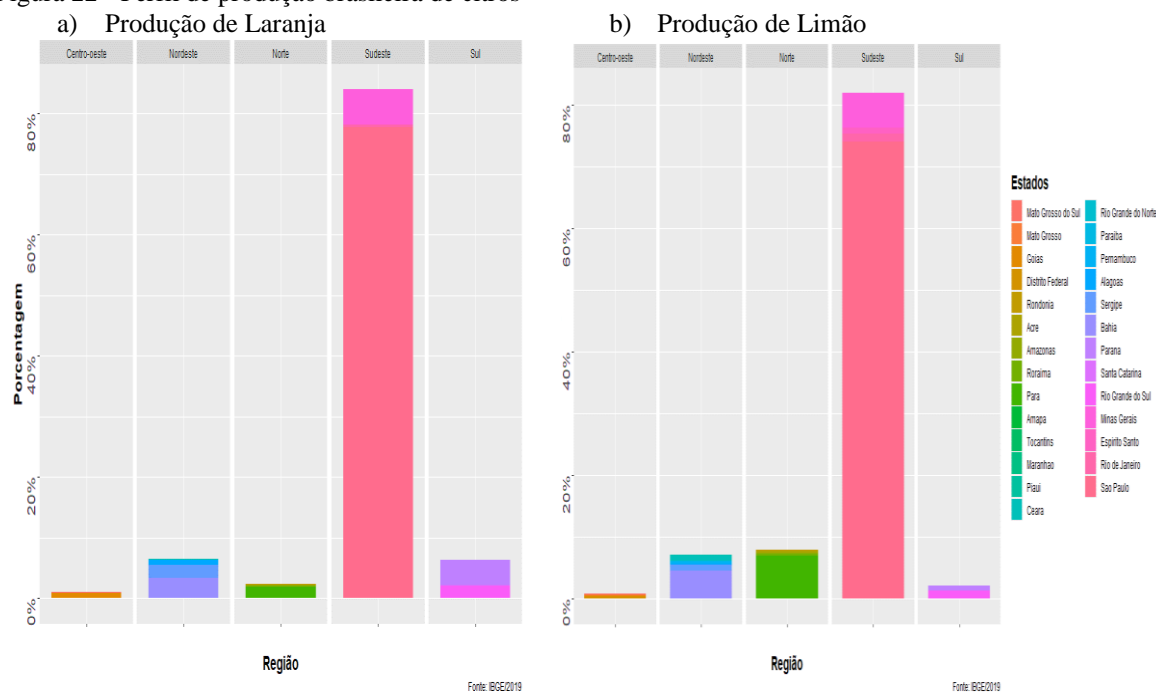
Figura 21 - Área de estudo e dos 24 principais municípios produtores de (*Citrus*) do Pará, numerado por código municipal e circulado em laranja



De acordo com o IBGE, as atividades agrícolas de importância socioeconômica que podem ser destacadas são o cultivo da laranja (*Citrus sinensis*) e a lima acida “Tahiti” (*Citrus latifolia*), conhecida como “limão” no Brasil. A região Norte ocupa a quarta posição de produtor nacional de laranja e a segunda de “limão” (IBGE, 2020), conforme mostra a (Figura 22). Os resultados do estudo mostraram que o clima do Pará é favorável a produção de citrus, com altas temperatura e precipitações abundantes (Siqueira; Salomão, 2017, EMBRAPA, 2020).

No entanto, os preços dos cítricos são sazonais, é o caso da cultura da laranja apresenta preços mais baixos nos meses de novembro a fevereiro, com um preço mínimo por atacado de R\$ 1,00/kg. Por outro lado, os preços mais elevados ocorrem nos meses de março a outubro com um preço máximo é de R\$ 2,00/kg (CONAB, 2021). Já nos meses de maior oferta (janeiro-junho), a lima acida ‘Tahiti’ tem um preço médio pago ao produtor de R\$ 12/SACO de 20 quilos (kg) e, no período de menor oferta (julho-dezembro), preço médio de R\$ 30 / SACO (CEASA, 2021).

Figura 22 - Perfil de produção brasileira de citros



### 3.2.2 Dados

Os dados de precipitação consistem em médias mensais disponíveis numa grade selecionada ao longo da região que inclui os 24 municípios maiores produtores do estado do Pará (Figura 21). A resolução é de 5 km, correspondente à cobertura geográfica de 50°S a 50°N para o período de janeiro de 1994 a dezembro de 2018 (25 anos). Estes dados foram obtidos do *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS)*. De acordo com Funk *et al.* (2015) esta série é formada a partir de várias fontes de informação tais como, *The Climate Hazards Group's Precipitation Climatology (CHPClim)*; Observações de satélites com espectroscopia de infravermelho termal (*Thermal Infrared, TIR*), geoestacionárias quase globais da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*; Centro de Previsão Climática (CPC); *National Climatic Data Center Climáticos (NCDC)*; *Coupled Forecast System* da NOAA, versão 2 (CFSv2) e dados observacionais de estações meteorológicas, disponíveis em (<ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/>).

Os dados mensais de temperatura do ar do conjunto CRU Versão 2.1 (Fick; Hijmans, 2017) foram também utilizados neste estudo para medir a associação com evento de chuvas extremas relacionados com a produtividade dos citros. Assim, os pontos de grade de temperatura máxima do ar na região de produtividade das culturas foram extraídos durante o período de tempo (1994 a 2018). Mais informações sobre os dados originais podem ser encontradas em (<https://www.worldclim.org/data/index.html>).

Os índices climáticos do oceânico-atmosféricos, tais como: Índice de Oscilação Sul (SOI), Índice do Módulo Meridional do Atlântico (AMM), índices da temperatura da superfície do mar (SST) na caixa do Nino 3.4 e bacia norte - NATL /sul do Atlântico SATL, foram obtidos da NOAA, disponível em (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>). O SOI, definido como a diferença de pressão normalizada entre Taiti e Darwin, baseia-se numa análise mensal para definir os valores altos e baixos do SOI associados às fases ENSO: fria (La Niña, anomalia de SST -, SOI +) e quente (El Niño, anomalia de SST +, SOI -). AMM é uma aplicação de análise de variância da TSS e componentes meridionais do vento de nível mais baixo sobre o Atlântico (75 ° W-15 ° E, 20 ° S-30 ° N), obtidas de 1950 –2005. Representa a posição da ZCIT na sua fase positiva, que não contribui para a formação de nuvens de precipitação, e na sua fase negativa, que favorece a formação de nuvens de precipitação, relativamente ao gradiente inter-hemisférico (GRAD) ou (Dipolo Atlântico).

Os dados agrícolas correspondem às culturas cítricas (laranja e “limão”) consistem na área colhida e quantidade produzida (em toneladas/ano) foram obtidos a partir da base de dados da Pesquisa Agropecuária Municipal (PAM) do (IBGE), com ênfase nos municípios mencionados na (Figura 20), dados disponíveis de 1994 a 2018 (vinte e cinco anos).

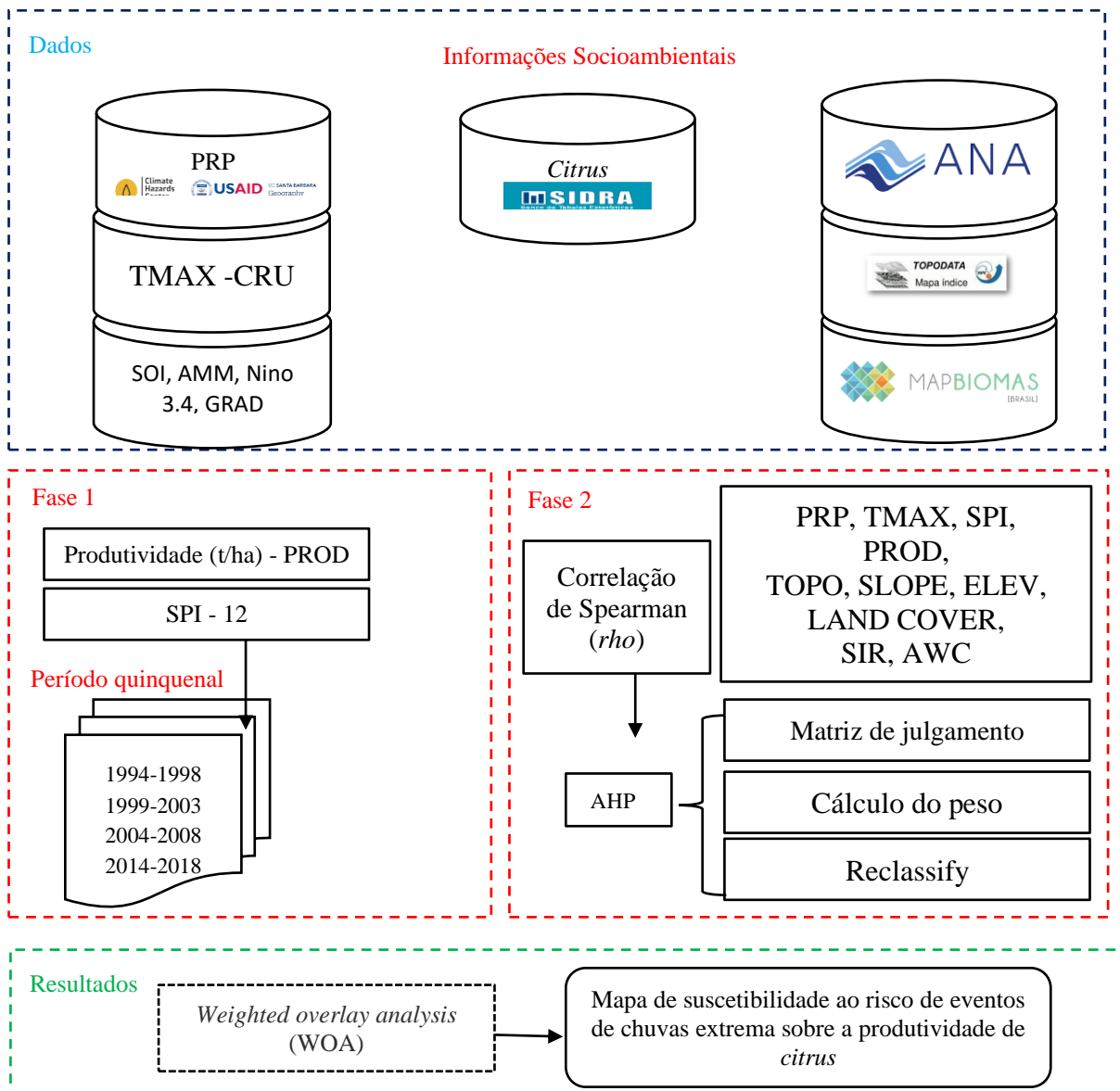
Os dados para análise de multicritérios foram: 1) cobertura e uso da terra da coleção de MAPBIOMAS, disponível em (<https://mapbiomas.org/>); 2) Modelo Digital de Elevação (DEM) e suas derivações de topográficas (TOPO), altitude (ELEV) e inclinação (SLOPE) oferecido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), projeto TOPODATA, disponível em (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>); 3) área irrigada (SIR) e capacidade de água (AWC) elaborado pela Agência Nacional de águas (ANA), disponível em (<https://metadados.snirh.gov.br/>).

### 3.2.3 Métodos

O estudo é composto por duas fases: a primeira fase consiste em analisar os dados do índice climático relacionados com a produtividade dos *Citrus* durante os períodos quinquênios, com o objetivo de identificar o período mais chuvoso, e a segunda fase consiste em aplicar o AHP multicritério, com o objetivo de apontar as áreas susceptíveis de risco para a produtividade de *Citrus* em caso de chuvas extrema, conforme mostra a Figura (23) e abaixo estão alguns métodos utilizados.



Figura 23 - Estrutura metodológica da pesquisa



### 3.2.4 Definição de produtividade e SPI

Os dados de **produtividade** (PROD) são a quantidade produzida (t) por área colhida (ha). O resultado é expresso em toneladas produzidas por hectare (t/ha). Depois, a produtividade média nos períodos de cinco anos foi calculada como se mostra na Equação (1)

$$\overrightarrow{Prod} x_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

Sendo,  $Prod(x_i)$  = Produtividade média no período de intervalo de cinco anos,  $x$  = nome do município,  $n$  = números de elementos contidos na sequência,  $i=1$  representa o primeiro elemento desta amostra.

O **Índice de Precipitação Padronizada** (SPI) (Mckee; Doesken; Kleist, 1993) foi obtido através do pacote SPEI do software (R Core Team, 2017) para investigar as mudanças climáticas nos últimos anos. O SPI é amplamente utilizado para a identificação dos períodos extremamente chuvoso e secos, como mostra a (Tabela 6). No entanto, o cálculo foi efetuado em todos os municípios produtores de *Citrus* (Figura 21) de 1994 a 2018, utilizando um atraso de 12 meses para obter observações a longo prazo.

Após esta operação, as médias quinquenais de (1994-1998, 1999-2003, 2004-2008, 2009-2013 e 2014-2018) foram calculadas para verificar o comportamento entre os índices de produtividade e os índices climáticos. Para a análise do comportamento do SPI, foi calculada a sua frequência relativa.

Os índices climáticos: Índice de Oscilação Sul (SOI), Índice do Módulo Meridional do Atlântico (AMM), índices da temperatura da superfície do mar (SST) na caixa do Nino 3.4 e GRAD (diferença da TSM da bacia norte em relação à SST do sul do Atlântico SATL) foram gerados a partir dos mesmos cálculos de média quinquenal e plotados nos gráficos de barras embutidas

Tabela 6 - Classificações do índice SPI

SPI	Categoria
$\geq 2,0$	Chuva Extrema
1,5 - 1,99	Chuva Severa
1,0 - 1,49	Chuva moderada
-1,0 -1,49	Seca Moderada
-1,5 -1,99	Seca Severa
$\leq -2,0$	Seca Extrema

Fonte: (Meschiatti; Blain, 2016)

### 3.2.5 Correlação Spearman e Processo de Análise Hierárquico (AHP)

As variáveis meteorológicas não seguem um padrão linear. Por conseguinte, o efeito das variáveis meteorológicas na produtividade das culturas foi estudado utilizando a análise de correlação Spearman (Equação 2). De acordo com Souza *et al.* (2017), foi utilizado para estabelecer uma relação de sentido único onde  $n$  é o número de pares  $(x_i, y_i)$  e  $d_i$  = diferença entre (postos de  $x_i$  dentre os valores de  $x$ ) – (postos de  $y_i$  dentre os valores de  $y$ ).

$$rho(xy) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (2)$$

### Processo de Análise Hierárquico (AHP)

Com objetivo de identificar áreas suscetível ao risco de produtividade cítrica em condições de chuvas extremas, foram selecionados dez critérios (PRP, TMAX, PROD, SPI, TOPO, LAND USE, AWC, SIR, ELEV and SLOPE) para mapeamento geoespacial após avaliação da correlação destas variáveis. Abordagem pode ser enquadrada em: (i) seleção de critérios; (ii) Matriz de Comparação AHP; (iii) Cálculo do Peso; (iv) reclassificação dos subcritérios; (v) análise de sobreposição ponderada (WOA); e (vii) Mapa GIS. Os pesos dos critérios foram determinados por julgamentos em pares que definiram a importância de cada um dentro dos critérios. Os valores dos pesos utilizados foram baseados na escala Saaty (1980), que foram calculados e depois padronizados na matriz, como se mostra na tabela seguinte.

Tabela 7 - Matriz de pontuação emparelhada através de critérios

MATRIZ	PRP	SPI	TMAX	PROD	SIR	TOPO	LAND USE	AWC	ELEV	SLOPE
PRP	<b>1,0</b>	1,0	3,0	1,0	2,0	2,0	1,0	2,0	1,0	1,0
SPI	1,0	<b>1,0</b>	3,0	3,0	2,0	3,0	1,0	2,0	1,0	1,0
TMAX	0,3	0,3	<b>1,0</b>	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0
PROD	1,0	0,3	0,3	<b>1,0</b>	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	1,0
SIR	0,5	0,5	1,0	1,0	<b>1,0</b>	2,0	1,0	2,0	1,0	1,0
TOPO	0,5	0,3	0,5	1,0	0,5	<b>1,0</b>	2,0	2,0	1,0	1,0
LAND USE	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	<b>1,0</b>	1,0	1,0	1,0
AWC	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	<b>1,0</b>	1,0	1,0
ELEV	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	<b>1,0</b>	1,0
SLOPE	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	<b>1,0</b>
PESOS	0,13	0,15	0,12	0,10	0,09	0,08	0,08	0,06	0,09	0,09

O resultado dos índices de validação  $\lambda_{max}$  (lambda máximo) foi de 10,87, Índice de Consistência (IC) foi de 0,09 e Razão de Consistência (RC) foi de 0,06 para índice randômico (IR) de 1,49 (n=10), sendo RC <0,10 (10%), mostra que modelo é aceitável para os critérios utilizados, de acordo com (Saaty, 1980).

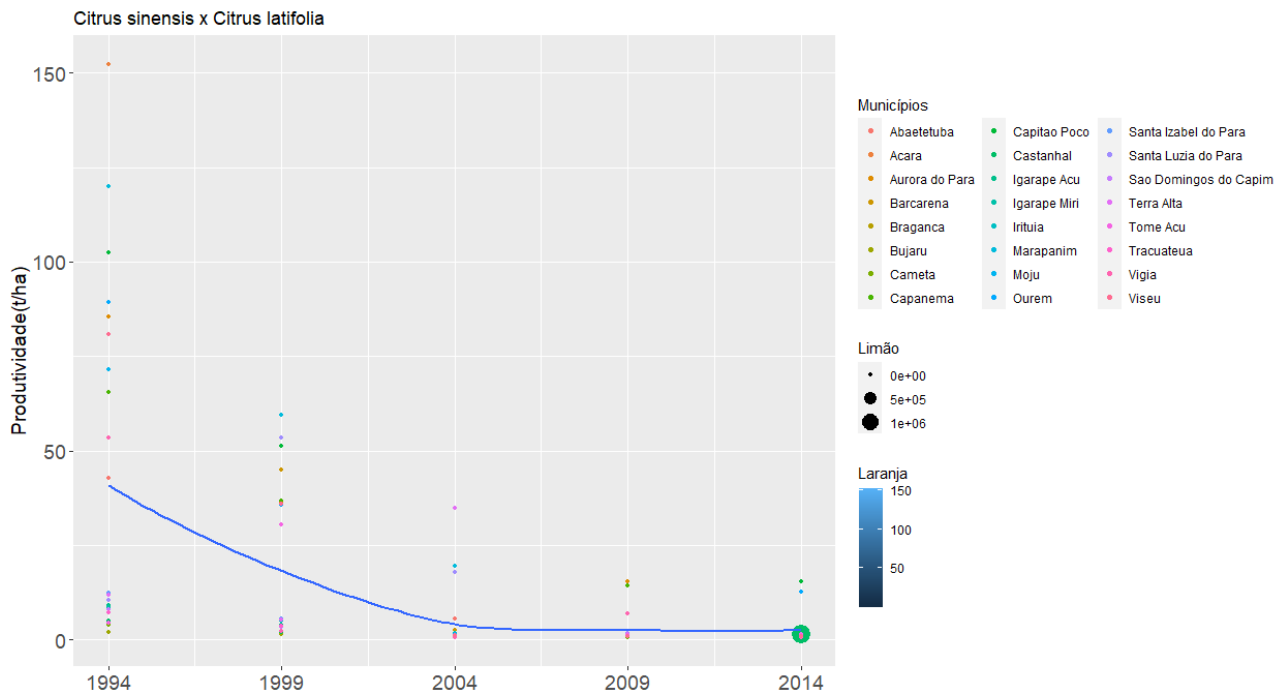
As pontuações dos subcritérios foram atribuídas com base na condição das áreas em risco (1 - muito baixo, 2 - baixo, 3 - moderado, 4 - alto, e 5 - muito alto) utilizando a ferramenta *reclassify* do GIS. Todos os parâmetros *raster* foram reclassificados. Em seguida, os parâmetros selecionados foram sobrepostos utilizando a ferramenta WOA para gerar o mapa de áreas suscetível a risco agrícola para chuvas extremas (Hassan *et al.*, 2020).

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Comportamento da produtividade cítrica nos municípios produtores do Pará

A (Figura 24), observa-se a produtividade de Citrus (*Citrus sinensis x latifolia*) nos 24 municípios maiores produtores do Pará, correspondentes ao período quinquênios. Nota-se que os períodos de 1994 a 2004 apresentaram um declínio na produtividade de Citrus, porém com estabilidade no período quinquênio de 2009 e continuo decréscimo em 2014. Pode-se também observar que a produtividade média de Citrus (em linha azul), o ponto máximo de produtividade média é superior a 50 (t/ha) em 1994 e a produtividade mínima é inferior a 3 (t/ha) em 2014.

Figura 24 - Evolução da produtividade de (*Citrus*) nos 24 municípios produtores do Pará, de acordo com os períodos de 5 anos (1994-1998, 1999-2003, 2004-2008, 2009-2013 e 2014-2018)



#### 3.3.2 Análise dos índices climáticos

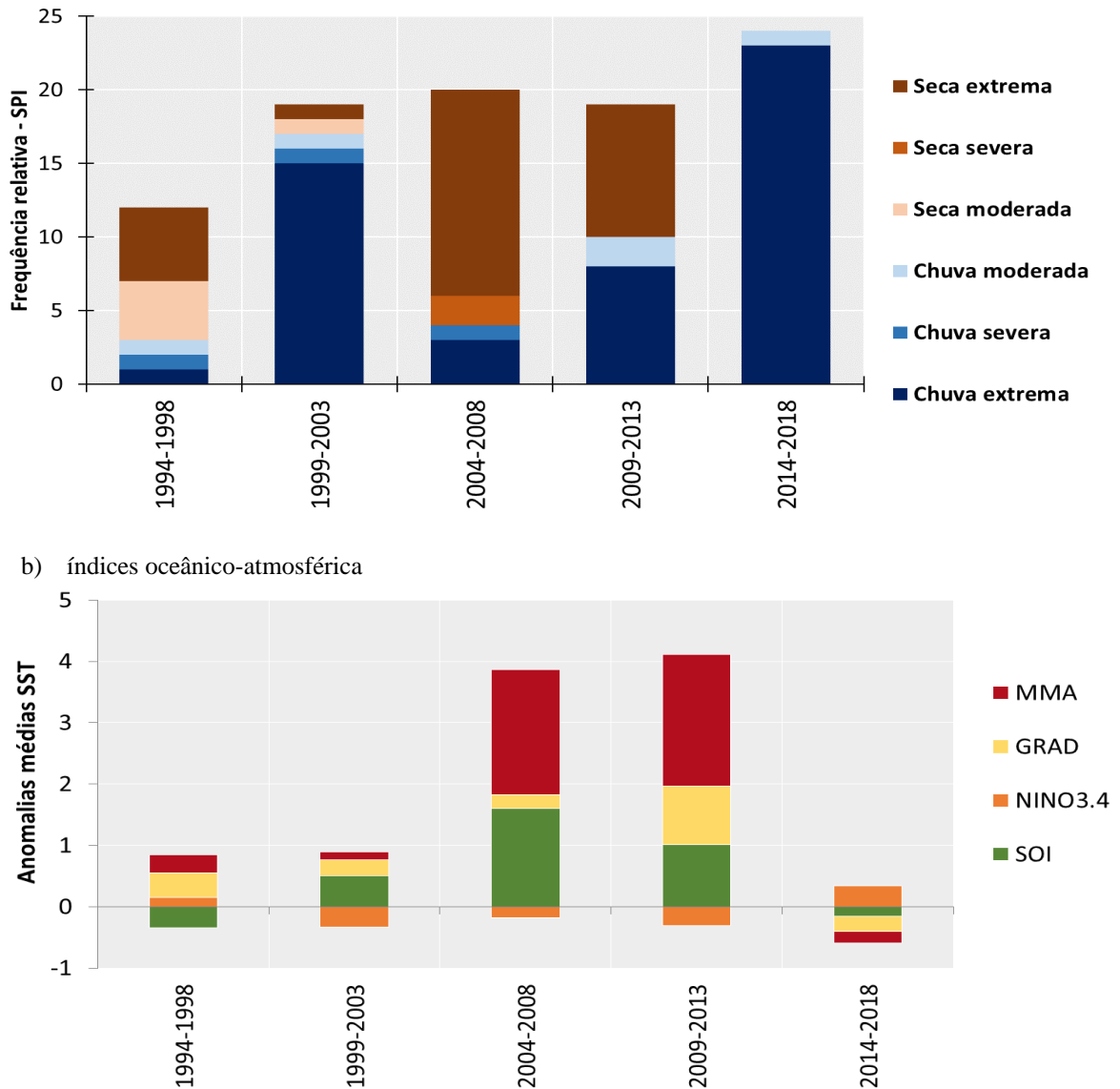
A nível regional, a (Figura 25a) ilustra os resultados do SPI no período quinquênio em termos de distribuição de frequência das condições chuvosas e seca. Em geral, pode-se observar que nos períodos quinquenais (1999-2003 e 2014-2018), ocorreram quantidades de casos de precipitação (moderada, severa e extrema) acima de 15%, enquanto no período quinquenal (2004-2008), os casos de seca (moderada, severa e extrema) ocorreram com maior frequência

(acima de 20%). O padrão oposto de condições de chuvas e secas é observado na maioria dos períodos quinquenais, com exceção do período extremamente chuvoso de 2014-2018.

Neste contexto, o gráfico dos índices oceano-atmosfera (Figura 25b), observa-se que o AMM (coluna vermelha) e o GRAD (coluna amarela) apresentam semelhanças de comportamento, revelando sinais de anomalias positivas (água anormalmente quente no Oceano Atlântico Norte-Tropical), no período (2004-2008 e 2009-2013), levando a uma diminuição da precipitação na região estudada. Por outro lado, os sinais negativos de AMM (coluna vermelha) e GRAD (coluna amarela) indicam uma água anormalmente fria no Atlântico Norte tropical, o que favorece um aumento da precipitação devido à faixa de nuvens da ZCIT sobre a Bacia Amazônica, período de (2014-2018).

As colunas IOS (verde) e NINO 3.4 (laranja) apresentaram comportamentos divergentes. Os resultados do IOS foram negativos e o NINO 3.4 foi positivo. Isto indica a fase negativa do fenômeno El Niño no Pacífico (águas oceânicas anormalmente quentes, cenários desfavoráveis para a pluviosidade na região) no período 1994-1998. Esta poderia ser a razão pela qual o período quinquênio é mais seco ( $SPI < -2$ ). Durante os quinquênios 2004-2008 e 2009-2013, o IOS foi positivo e o NINO 3.4 foi negativo, registrando a fase positiva, que se refere ao fenômeno La Niña no Pacífico (águas oceânicas anormalmente mais frias, cenários favoráveis para o aumento da pluviosidade). Isto pode explicar a pluviosidade extrema ( $SPI > +2$ ).

Figura 25 - Caracterização dos índices climáticos, a) SPI e b) índices oceano-atmosfera (IOS, NINO3.4, GRAD, AMM), correspondentes aos períodos quinquenais 1994-1998, 1999-2003, 2004-2008, 2009-2013 e 2014-2018



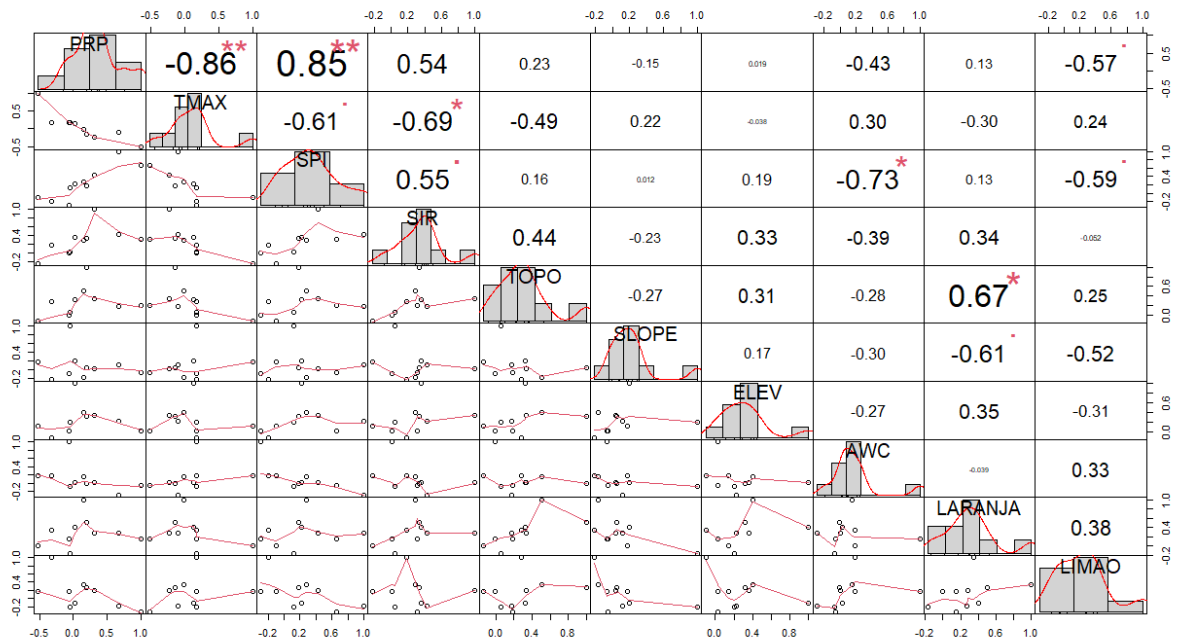
### 3.3.3 Avaliação dos riscos socioambientais associados a evento de chuvas extremas

Durante o período de 2014 a 2018, como mostra a (Figura 25a) acima. Foram observadas condições de precipitação extremas na área de estudo. Para dizer que a diminuição da produtividade tem uma relação com condições de chuvas extremas. A correlação Spearman foi utilizada para responder a esta pergunta.

A (Figura 26) mostra que a relação entre o SPI e a PRP tem uma correlação positiva significativa ( $\rho = +0,85$ ) e uma correlação negativa significativa com a TMAX ( $\rho = -0,86$ ). As SIR apresentou uma correlação positiva significativa com o SPI ( $\rho = +0,55$ ) e uma correlação negativa significativa com o TMAX ( $\rho = -0,69$ ). A AWC exibiu uma correlação negativa significativa com o SPI ( $\rho = -0,73$ ). Por outro lado, a PROD da laranja apresentou

uma correlação positivas significativas para o TOPO ( $\rho=+0,67$ ) e uma correlação negativa significativa com o SLOPE ( $\rho=-0,61$ ). Em contraste, a PROD de “limão” apresentou uma correlação negativa significativa para SPI ( $\rho=-0,59$ ) e correlação negativa significativa com PRP ( $\rho=-0,57$ ). Por conseguinte, pode dizer-se que a diminuição da PROD do “Limão” foi influenciada pelas condições de chuvas extremas. O decréscimo de PROD laranja foi afetado pela SLOPE.

Figura 26 - Matriz de Correlação de Spearman ( $\rho$ ) entre as variáveis ambientais e produtividade de *Citrus*



\*Valores significativos  $p < 0,05$ ;

\*\*Valores significativos  $p < 0,01$

### 3.3.4 Produtividade de *Citrus* sob risco de chuvas extremas

Assim, o nível de risco foi categorizado (muito baixo, moderado, alta e muito alta), como se mostra nos mapas baixos, com base no critério socioambiental. O resultado da análise de risco do PROD laranja mostrou que 0,08%, 24,92% e 70,24% das áreas susceptíveis a eventos de chuvas extremos eram muito elevados, altos e moderados, respectivamente. As manchas vermelhas e amarelas estão localizadas nos municípios produtores. Em contraste (Figura 27; Tabela 8 em tons de verde), apenas 4,76% das áreas PROD laranja estavam nas categorias muito baixas.

No entanto, o resultado da análise de risco do PROD “limão” mostrou que 0,12%, 27,43% e 65,22% das áreas susceptíveis a chuvas extremas foram muito elevados, altas e moderadas, respectivamente, das regiões PROD “limão” (em tons de vermelho e amarelo). Por outro lado (Figura 28, Tabela 8), mais de 7,22% estão na categoria de baixo risco. Portanto, constatou-se que a maioria das regiões do PROD que estão em tons de vermelho são as que

apresentam maiores índices de precipitação (SPI e PRP) e estão localizadas em zona de alta recarga hídrica (TOPO e SLOPE), maior capacidade de retenção de água dos solos (AWC) e alta irrigação (SIR), durante o período de 2014 a 2018, resultando em riscos elevados.

Figura 27 - Distribuição das áreas susceptíveis ao risco de PROD laranja no período de chuvas extremas de 2014 a 2018

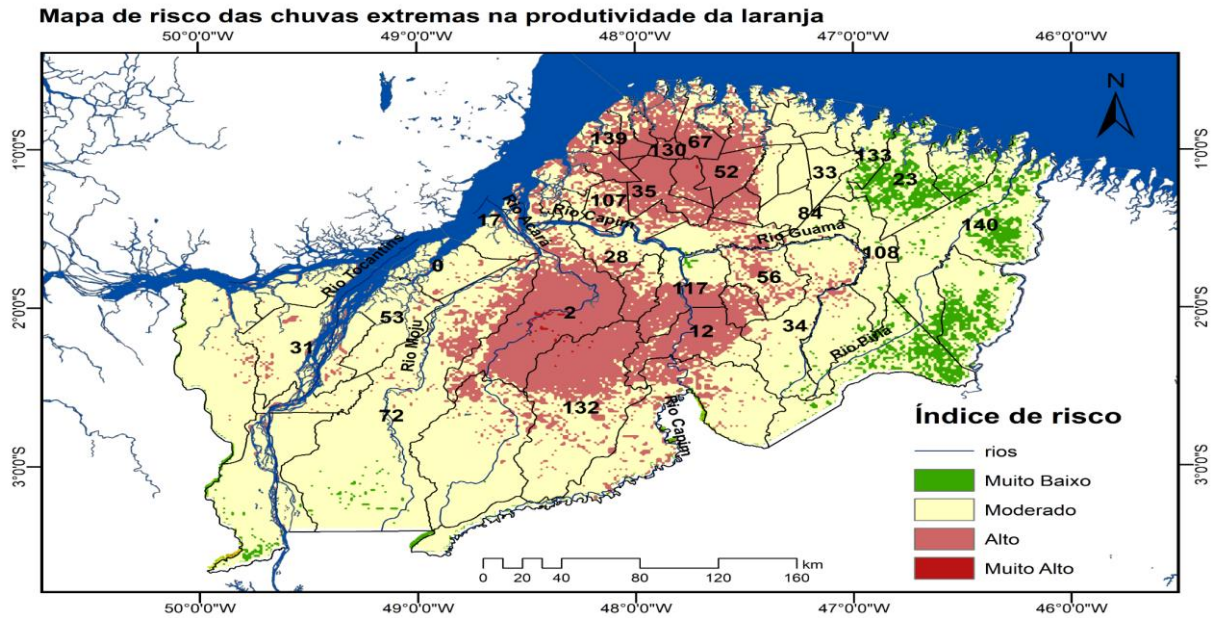


Figura 28 - Distribuição das áreas susceptíveis ao risco de PROD “limão” no período de chuvas extremas de 2014 a 2018

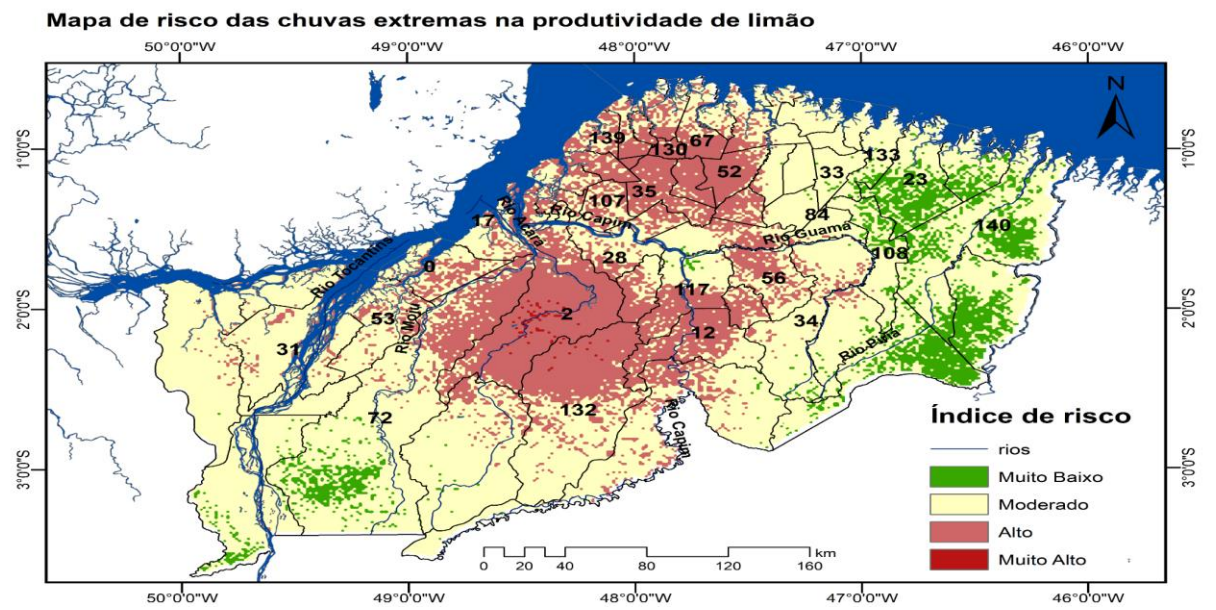


Tabela 8 - Áreas em diferentes categorias de risco e produtividade de *Citrus*

Risco – Laranja				Limão			
Categorias	grids	área(km <sup>2</sup> )	% de área	Categorias	grids	área(km <sup>2</sup> )	% de área
Muito Baixo	2.092	4.135	4,76%	Muito Baixo	3.137	6.266	7,22%
Moderado	28.890	60.988	70,24%	Moderado	26.870	56.628	65,22%
Alto	10.513	21.638	24,92%	Alto	11.464	23.819	27,44%
Muito Alto	46	70	0,08%	Muito Alto	70	105	0,12%



### 3.4 Discussão

O comportamento da produtividade de citros é influenciado por uma combinação de fatores estáveis, como a área do pomar e o método de enxertia, e fatores variáveis, como irrigação, adubação, controle de ervas daninhas, controle de pragas e doenças, e pulverização (Caser; Amaro, 2004). Ao longo dos anos (1994 a 2014), observou-se uma notável queda na produtividade, possivelmente relacionada ao menor cultivo de citros, práticas agrícolas reduzidas e uma baixa densidade de áreas plantadas. É importante mencionar que, em 2004, houve um aumento nas áreas de colheita, embora a queda na produtividade tenha persistido devido à falta de cuidados culturais e ambientais (Alves *et al.*, 2015; Feitoza; Gasparotto, 2020), problemas fitossanitários (Ribeiro; Silva; Ribeiro, 2006) e doenças (Spreen *et al.*, 2020). Além disso, fatores naturais como secas, enchentes (FIDE, 2015) e degradação do solo também contribuíram para a diminuição das colheitas (Oliveira; Oliveira; Moura, 2012; Neves; Trombin, 2011; Carneiro, 2018; Souza *et al.*, 2018).

Em 2014, houve um aumento na produtividade em alguns municípios produtores de citros, possivelmente devido à expansão das plantações de lima ácida 'Tahiti', que se tornou preferida pelos consumidores brasileiros e experimentou um aumento na demanda internacional (Caser; Amaro, 2004). O Estado do Pará também avançou significativamente nesse cenário, sendo reconhecido como uma área livre de cancro cítrico em 2017 (ADEPARÁ, 2017), o que levou à criação de um polo industrial em Capitão Poço em 2018, tornando-se o principal município produtor de cítricos no Pará (Ferreira, 2019). Embora isso tenha gerado benefícios socioeconômicos para o Estado, também trouxe desafios para os pequenos produtores em termos de recursos financeiros, tecnologia, assistência técnica, gestão adequada, disponibilidade de água e nutrição do solo, que podem impactar o desenvolvimento das culturas cítricas (Alves *et al.*, 2015; Carneiro, 2018). Além disso, questões relacionadas ao consumo e ao controle de pragas e doenças também representam desafios (Barros; Barros; Cypriano, 2016).

Ao examinar os índices climáticos, observou-se que os casos de chuvas extremas foram mais frequentes do que as condições de seca extrema no nordeste paraense. Esses extremos de precipitação podem estar relacionados aos fenômenos climáticos ENSO (La Niña e El Niño) (Terassi *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021), com algumas assinaturas identificadas nos anos de La Niña (1999, 2000, 2007, 2008, 2010, 2011, 2017 e 2018) e El Niño (1997, 1998, 2005, 2009, 2010, 2015) (NOAA, 2020). Esses extremos também podem estar

relacionados ao deslocamento norte-sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Ferreira; Souza; Oliveira, 2020).

Durante o período de 2004 a 2009, houve episódios de chuvas extremamente intensas (inundações) e eventos de estiagem (secas) em algumas áreas do estudo, o que pode ser explicado pelo sinal positivo/negativo do AMM, com maior influência do fenômeno no Atlântico (dipolo positivo/negativo). Isso afeta a oscilação norte-sul da Zona de Convergência Intertropical, impactando as chuvas na região (SPI negativo/positivo).

Portanto, os resultados dos índices climáticos estão relacionados aos oceanos Pacífico e Atlântico. A ocorrência frequente de  $SPI < -2$  (seca extrema) está associada ao El Niño no Oceano Pacífico e ao dipolo positivo no Oceano Atlântico, inibindo a ação da ZCIT e levando a extremos negativos de precipitação no nordeste do Pará. Por outro lado, a configuração de La Niña no Pacífico e o dipolo positivo no Atlântico estão ligados a frequências de  $SPI > 2$  (precipitação extrema), favorecendo eventos da ZCIT e resultando em extremos de precipitação na região de estudo (Ferreira; Souza; Oliveira, 2020).

A relação entre a produtividade do “limão” e chuvas extremas ( $SPI > 2$ ) foi estabelecida, enquanto a produtividade da laranja mostrou correlação com o SLOPE. Esses resultados sustentam a hipótese de que eventos de precipitação extrema desempenham um papel significativo na produtividade das culturas cítricas. Estudos também destacaram o aumento do risco agrícola devido a fortes chuvas e inundações (Fahad; Wang, 2018), enfatizando a importância da gestão adequada da irrigação e do solo.

Como resultado, a técnica AHP foi aplicada para avaliar as condições extremas de chuva no setor citrícola. Os resultados indicaram que aproximadamente 25% da área de estudo apresenta alto risco para a produtividade de laranja, enquanto 28% apresenta alto risco para a produtividade de limão. Essas áreas estão localizadas próximas a corpos d'água, recebendo chuvas intensas a moderadas, o que destaca a importância da gestão das águas subterrâneas (Doke *et al.*, 2021) e da sustentabilidade da produtividade das culturas cítricas, especialmente em regiões como Capitão Poço (34) e Acará (2), onde a irrigação é utilizada (Fig. 27 e 28).

### **3.5 Recomendação e limitação**

De acordo com os resultados, existe um risco para a produtividade das culturas de citros. Recomenda-se: a) melhorar a gestão da disponibilidade de água em caso de chuvas e seca severas; b) apoiar os tratamentos culturais; c) monitorar o clima, o solo e a produtividade.

Este estudo apresentou várias limitações. Por exemplo, alguns critérios ambientais que podem afetar o risco de eventos extremos de chuva, como a distância de rios, a textura do solo e a densidade de drenagem, não foram considerados na modelagem. Exposições socioeconômicas, como população, renda, produtividade e consumo de energia, também não foram consideradas. Outra limitação está relacionada à incerteza na aplicação do AHP utilizado. Além disso, o acesso limitado aos dados sobre citricultura na área dos municípios produtores do Pará também foi uma limitação.

Apesar dessas limitações, o presente estudo contribui significativamente para a eficiência e precisão. A metodologia aplicada pode ser utilizada em estudos de impacto de risco agrícola. Os resultados também fornecem informações abrangentes sobre os fatores que afetam a produtividade dos citros e a qualidade da sustentabilidade em um futuro próximo.

### 3.6 Conclusão

A conclusão do presente estudo é que:

- A evolução temporal da produção de cítricos, ambas as produções (laranja e “limão”) apresentaram uma tendência decrescente na série de dados da produção de cítricos (1994 a 2018).
- Há indícios de SPI, com maior ocorrência de precipitação nos períodos 1999-2003 e 2014-2018, e menor ocorrência de seca extrema nos períodos 2004-2008, sendo maior a frequência de precipitação extrema do que a seca extrema.
- Os índices do dipolo atlântico (AMM e GRAD) apresentaram sinais positivos (diminuição da precipitação) nos períodos 2004-2008 e 2009-2013, e sinais negativos (aumento da precipitação) nos períodos 2014 a 2018.
- Sinais de anomalias IOS negativas e SST positivas em NINO3.4, indicativas de assinaturas de El Niño, foram identificadas no período quinquênio de 1994 a 1998. Por outro lado, anomalias IOS positivas e TSM negativas em NINO3.4 com sinal de La Niña no período 2004-2008, 2009-2013 (no entanto, nesses períodos foram encontrados dois padrões: chuvas extremas e seca) e período 2014 a 2018 (El Niño e La Niña).
- A avaliação dos fatores socioambientais do PROD "limão" mostrou correlação negativa significativa para o SPI ( $\rho = -0,59$ ) e correlação negativa significativa com o PRP ( $\rho = -0,57$ ,  $p < 0,05$ ). Por outro lado, o PROD da laranja apresentou correlação positiva significativa para TOPO ( $\rho = +0,67$ ,  $p < 0,05$ ) e correlação negativa significativa com SLOPE ( $\rho = -0,61$ ,  $p < 0,05$ ). Essas correlações sugerem que as condições extremas de chuva e a inclinação do terreno podem influenciar a PROD de “limão” e laranja, respectivamente. No entanto, é

importante considerar que esses fatores podem não ser os únicos a influenciar a produção dessas frutas. Outros fatores, como as condições de solo, o clima e a qualidade da água, também podem desempenhar um papel.

- Evidencia-se áreas de riscos de PROD de citrus na região do estudo em caso de chuvas extremas (inundação e enxurradas). As áreas de alto risco apresentam maiores índices de precipitação (SPI e PRP) e estão localizadas em zona de alta recarga hídrica (TOPO e SLOPE), maior capacidade de retenção de água dos solos (AWC) e alta irrigação (SIR), durante o período de 2014 a 2018.

Portanto, os resultados são bastante importantes no contexto do impacto da produtividade cítrica, verifica-se que algumas localidades foram impactadas positivamente com relação aos critérios ambientais e podem ser utilizadas como base para melhoria da adequação cítrica.

## Referências

- AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO PARÁ. **Decreto nº.1943 do Governo do Estado**. Criação de dois polos citrícolas no Pará. 2017. Disponível em: <http://www.adepara.pa.gov.br/sites/default/files/Decreto%201943%20de%2021%20de%20de%20de%202017%20-%20Cria%C3%A7%C3%A3o%20dos%20polos%20Citricolas.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2020.
- AKINCI, Halil; ÖZALP, Ayşe Yavuz; TURGUT, Bülent. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. **Computers and electronics in agriculture**, v. 97, p. 71-82, 2013.
- ALMEIDA, Rafael *et al.* A conceptual model for enterprise risk management. **Journal of Enterprise Information Management**, v.32, n.5, 843-868. 2019
- ALVES, José *et al.* Evolução da produtividade de laranja e pimenta-do-reino no período de 2000-2012 no município de Capitão Poço, PA. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 1068-1077, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Catálogo de Metadados**. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>. Acesso em: 09 jan. 2023
- BOUABDELLI, Senna *et al.* Impact of temperature on agricultural drought occurrence under the effects of climate change. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 148, n.1-2, p. 191-209, 2022.
- CALDAS, Vanessa Ingrid Saraiva Pereira; SILVA, Antônio Soares da; SANTOS, Jefferson Pereira Caldas dos. Suscetibilidade à erosão dos solos da bacia hidrográfica lagos–São João, no Estado do Rio de Janeiro–Brasil, a partir do método AHP e análise multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 4, p. 1415-1430, 2019.

- CARNEIRO, Renan do Vale. **Experiências de recuperação florestal praticadas por agricultores familiares**. 2018. 129f. Dissertação (Mestrado em Agriculturas Familiares e desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Pará, Belém- PA. 2018.
- CASER, Denise Viani; AMARO, Antonio Ambrosio. Evolução da produtividade na citricultura paulista. **Informações Econômicas**, v. 34, n. 10, p. 6-12, 2004.
- CENTRO DE ABASTECIMENTO DO PARÁ. **Cotação de Preços**. 2021. Disponível em: <http://www.ceasa.pa.gov.br/cotacao>. Acesso em: 12 dez. 2021
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Preços Agropecuários**. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/precos>. Acesso em: 15 fev. 2023
- BARROS, José Roberto Mendonça de; BARROS, Alexandre Lahoz Mendonça de; CYPRIANO, Marcelo Petersen. **O mercado da Citricultura no Brasil e as suas Novas Perspectivas**. Citrus Associação Nacional de Exportadores de sucos cítricos. Brasil. 2016.
- DIAS, Thaianie Soeiro da Silva *et al.* Estimativa Climática Sazonal da Produtividade de Açaí (*Euterpe Oleracea* Mart.) no Estado do Pará - Cenários Futuros. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.2, p.517-533. 2019.
- DOKE, Arjun B. *et al.* Geospatial mapping of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making AHP approach in a hardrock basaltic terrain in India. **Ecological Indicators**, v.127, e107685. 2021
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Citros**. Brasília, DF: Embrapa Serviço de Produção de Informação. Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/citros>. Acesso em: 19 jun 2020.
- FAHAD, Shah; WANG, Jianling. Farmers' risk perception, vulnerability, and adaptation to climate change in rural Pakistan. **Land Use Policy**, v.79, p.301-309, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.018>
- FEITOZA, Fernando Samuel; GASPAROTTO, Angelita Moutin Segoria. Um estudo sobre a produção nacional de suco de laranja concentrado. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 625-634, 2020.
- FERREIRA, Douglas Batista da Silva; SOUZA, Everaldo Barreiros de; OLIVEIRA, Juarez Ventura de. Identificação de extremos de precipitação em municípios do Estado do Pará e sua relação com os modos climáticos atuantes nos Oceanos Pacífico e Atlântico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.27, n.16, p. 197-222, 2020. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.64630>
- FERREIRA, Izabely Vitória Lucas. **Análise do Mercado da Laranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) no Estado do Pará**. 2019. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém -PA, 2019.
- FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. Worldclim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- FORMULÁRIO DE INFORMAÇÕES DO DESASTRE. **Sistema Integrado de Informações sobre Desastre**. Capitão Poço. 2015. Disponível em: <https://cdn.labtrans.ufsc.br/s2id/PA/PA-F-1502301-12200-20150322.pdf>. Acesso: 10 jan. 2019.
- FUNK, Chris *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

- HAMMAMI, Salma *et al.* Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). **Arabian Journal of Geosciences**. v.12, e653. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4754-9>
- HAN, Yuan *et al.* Application of AHP to road selection. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 2, e86, 2020.
- HASSAN, Iqbal *et al.* Weighted overlay-based land suitability analysis of agriculture land in Azad Jammu and Kashmir using GIS and AHP. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 57, n. 6, p.1509-1519, 2020.
- HASTENRATH, Stefan; GREISCHAR, Lawrence. Circulation mechanisms related to northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 98, n. D3, p. 5093-5102, 1993.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades – Panorama - Território e ambiente**. Brasil, 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/igarape-miri/pesquisa/16/12705?tipo=grafico&indicador=12710>. Acesso em: 16 jun. 2020.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de dados geomorfológicos do Brasil**. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 06 jan. 2023
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *In: Stocker, Thomas F. et al. (ed.)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, In Press, 2013.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (ed.)*. Cambridge University Press. In Press, 2021. 3949p.
- KILADIS, George N.; DIAZ, Henry F. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v.2, n. 9, p.1069-1090. 1989.
- LESK, Corey; ROWHANI, Pedram; RAMANKUTTY, Navin. Influence of extreme weather disasters on global crop production. **Nature**, v.529, n.7584, p. 84–87 2016. <https://doi.org/10.1038/nature16467>.
- MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil**. Disponível em: <https://mapbiomas.org/download>. Acesso em: 21 dez. 2022
- MARENGO, José Antonio; SOUZA JUNIOR, Carlos. **Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo: ALANA, 2018.
- MCKEE, Thomas B.; DOESKEN, Nolan J.; KLEIST, John. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY*. 8, 1993, Anaheim – Califórnia. **Proceedings** [...], Anaheim: [s.n], 1993. P.179-183.
- MESCHIATTI, Monica Cristina; BLAIN, Gabriel Constantino. Increasing the regional availability of the Standardized Precipitation Index: an operational approach. **Agrometeorology**, v. 75, n.4, p. 507-521, 2016.

MOREIRA, Rômulo Carantino Lucena. **Tolerância de mudas de lima ácida ‘Tahiti’ em distintos porta-enxertos à salinidade da água**. 2016. 40f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal – PB. 2016.

NEVES, Marcos Fava; TROMBIN, Vinicius Gustavo. Análise de uma década na cadeia da laranja. **Markestrat Value Generation**. São Paulo, 2011.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **El Niño / Southern Oscillation (ENSO)**. Disponível em: <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>. Acesso em: 20 out. 2020.

NOBRE, Paulo; SHUKLA, John. Variations of SST, Wind stress and rainfall over the tropical atlantic and south America. **Journal of Climate**, v.9, n.10, p.2464-2479, 1996. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2).

NÓBREGA, Ranyére Silva; SANTIAGO, Gabriela Ayane Felipe Chagas. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista de Geografia Norte Grande**, n. 63, p. 9-26, 2016.

OLIVEIRA, I. P.; OLIVEIRA, L. C.; MOURA, C. S. F. T. de. Alguns fatores bióticos e abióticos que afetam a qualidade dos produtos da laranja no mercado. **Revista Faculdade Montes Belos**, v.5, n.4, p.112-136, 2012.

PEIXOTO, Rodrigo de Almeida Oliveira *et al.* Análise multicritério com uso da AHP para avaliação temporal na vulnerabilidade ambiental: estudo de caso na bacia hidrográfica do Uberabinha, MG. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 8, n. 3, p. 141-158, 2019.

RIBEIRO, Sydney Itauran; SILVA, Eliana Gomes da; RIBEIRO, N. S. V. Desempenho de laranjeiras em Capitão Poço, PA. **Boletim de pesquisas e desenvolvimento**, Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 57. Versão eletrônica. 1ª impressão: 2006. 16p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/889558/desempenho-de-laranjeiras-em-capitao-poco-pa>. Acesso em: 02 de mar. 2020.

SAATY, Thomas L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I).

SAATY, Thomas L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. ed. New York: McGraw-Hill, 1980, 27 p.

SAATY, Thomas L.; VARGAS, Luis G. **Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process**. 2. ed. New York: Springer, 2012.

SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; MELO, Maria Monalisa M. S.; BRITO, José Ivaldo Barbosa de. Tendências de índices de extremos climáticos para o Estado do Amazonas e suas relações com a TSM dos oceanos tropicais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n.1, p. 1-10, 2016.

SILVA, Djane Fonseca da *et al.* Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no índice padronizado de precipitação para o leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 449-464, 2020.

SILVA, Gabriel Ítalo Novaes da *et al.* Entendendo as características associadas à precipitação para uma região do nordeste do Pará: uma análise do comportamento, tendência, eventos extremos e tempo de retorno para o período de 1973-2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 6, p. 3177-3192, 2021.

SILVA, Rommel Benicio da *et al.* Influência da variabilidade climática na densidade de mosquitos vetores no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 16, v. 26, p.801-816, jan/jul. 2020.

SIQUEIRA, Dalmo Lopes de; SALOMÃO, Luiz Carlos Chamhum. **Citros do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV. 2017.

SOUTO, Jefferson Inayan *et al.* Padrões temporais da precipitação e variabilidade da vegetação sobre a bacia do rio Iriri em anos de ocorrência do El Niño Oscilação Sul (Temporal patterns of precipitation and vegetation variability over Iriri River basin during El Niño/Southern Oscillation). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 789-800, 2019.

SOUZA, Everaldo Barreiros de; ROCHA, Edson J. P. Climatologia, Variabilidade e Tendências do Clima atual na Amazônia e em Cenários Futuros de mudanças climáticas. *In*: VIEIRA, Ima Célia Guimarães; TOLEDO, Peter Mann de; SANTOS JÚNIOR, Roberto Araújo Oliveira (org.). **Ambiente e Sociedade na Amazônia**. Rio de Janeiro: Garamond. 2014. cap.2. p. 295 – 312.

SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo REGCM4. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 293–306. 2016. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43711>

SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 81-93. 2017.

SOUZA, Nayane *et al.* Perfil socioeconômico dos produtores de mudas cítricas de uma comunidade em Capitão Poço, Pa. **Agrarian Academy**, v. 5, n. 10, e140, 2018.

SOUZA, Paulo Fernando de Souza *et al.* Impactos dos anos climáticos extremos no rendimento da lavoura temporária de mandioca na região rural da metrópole de Belém-Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, n.13, p.94-112, 2017.

SPREEN, Thomas H. *et al.* Global economics and marketing of citrus products. *In*: **The genus citrus**, Woodhead Publishing, 2020, p. 471-493.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017.

TERASSI, Paulo Miguel de Bodas *et al.* Variabilidade do índice de precipitação padronizada na região norte do estado do paraná associada aos eventos de El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n.1, p. 11-25, 2018.

TRENBERTH, Kevin E.; HOAR, Timothy J. The 1990 – 1995 El Niño - Southern Oscillation event: Longest on record. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 1, p. 57-60, 1996.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Climate Change and the US Food System**: A Report from the United States Department of Agriculture. Washington, 2022.

WAGNER, Richard G. Mechanisms controlling variability of the interhemispheric sea surface temperature gradient in the tropical Atlantic. **Journal of Climate**, v. 9, n. 9, p. 2010-2019, 1996.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Global temperatures set to reach new records in next five years**. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/media/news/wmo-publishes-global-update-of-climate-datasets>. Acesso em: 03 out. 2023.



## CAPÍTULO 4      MODELAGEM DE ÁREAS ADEQUADAS PARA LARANJA (*Citrus sinensis*) DIANTE DOS CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AMAZONIA LEGAL <sup>4</sup>

**Resumo:** Os citrus são uma das frutas comerciais mais importantes do mundo. Atualmente, o cultivo de laranja (*Citrus sinensis*) enfrenta sérias ameaças das mudanças climáticas, mas há falta de informação documentada e pesquisa sobre a produtividade de *Citrus* em um cenário climático futuro. Portanto, o objetivo deste trabalho é investigar o impacto das mudanças climáticas na espécie de Laranja (*Citrus sinensis*) na Amazônia Legal, utilizando o método de modelagem *ensemble* adicionado à plataforma biomod2 no software R. A adequabilidade da distribuição de espécies de *Citrus* foi modelada com base nos pontos de ocorrência, dados obtidos do *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF), tanto para o clima atual (1995-2014) quanto para o futuro (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100), sob os cenários de SSPs (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 e 5-8.5) das variáveis bioclimáticas do CRU. O modelo *ensemble*, com valores acima de 0,80 para ROC/AUC e TSS, foi considerado como tendo um nível aceitável de precisão. Os resultados simulados mostram que a perda média de áreas adequadas e o ganho médio de áreas inadequadas até o ano de 2050 são de 87% e 32%, respectivamente, em comparação com o presente. Os valores anuais de variabilidade da precipitação, sazonalidade da temperatura do ar e a precipitação no mês mais seco são os principais fatores que podem levar à perda de habitat adequado. Os resultados deste estudo fornecem um apoio crítico aos decisores políticos e planejadores para o desenvolvimento sustentável, adaptação às mudanças climáticas e mitigação na produção de citros.

**Palavras-Chave:** Adequabilidade; Amazonia Legal; Bioclimáticas; *Citrus*; Mudanças climáticas; Modelagem ensemble.

---

<sup>4</sup> Artigo em fase para ser submetido ao *Agriculture* MDPI, Impact fator: 3.408

## **MODELING OF AREAS SUITABLE FOR ORANGE (*Citrus sinensis*) CULTIVATION UNDER FUTURE CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN THE LEGAL AMAZON**

**Abstracts:** Citrus fruits are one of the most important commercial fruits in the world. Currently, the cultivation of orange (*Citrus sinensis*) faces serious threats from climate change, but there is a lack of documented information and research on *Citrus* production in a future climate scenario. Therefore, the objective of this study is to investigate the impact of climate change on the production of orange (*Citrus sinensis*) in the Legal Amazon, using the ensemble modeling method added to the biomod2 platform in the R software. The suitability of *Citrus* species distribution was modeled based on occurrence points, data obtained from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF), both for the current climate (1995-2014) and the future (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, and 2081-2100), under the SSPs (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0, and 5-8.5) scenarios of bioclimatic variables from CRU. The ensemble model, with values above 0.80 for ROC/AUC and TSS, was considered to have an acceptable level of accuracy. Simulated results show that the average loss of suitable areas and the average gain of unsuitable areas by the year 2050 are 87% and 32%, respectively, compared to the present. Annual values of precipitation variability, air temperature seasonality, and precipitation in the driest month are the main factors that can lead to the loss of suitable habitat. The results of this study provide critical support to policymakers and planners for sustainable development, climate change adaptation, and mitigation in *Citrus* production.

**Keywords:** suitability; Legal Amazon; bioclimatic; *Citrus*; climate change; ensemble modeling.

#### 4.1 Introdução

O *Citrus* (Família *Rutaceae*) é uma planta frutífera, acredita ser de origem da região tropical e subtropical do sudeste da Ásia. Isso explica a presença de um grande número de parentes silvestres/variedades primitivas e alta diversidades genéticas de citros (Tanaka, 1928, 1937).

As espécies e variedades domesticadas de *Citrus* economicamente importantes, como às laranjas doce (*Citrus sinensis* Osbeck); tangerinas (*Citrus reticulada* Blanco e *Citrus clementina*); mexericas (*Citrus deliciosa*); limões-verdadeiros (*Citrus limon* Burn. f. e *Citrus aurantiifolia*); limas ácidas (*Citrus latifolia*); limas doces (*Citrus limettioides*); pomelos (*Citrus paradisi*) e cidras (*Citrus medica*) (Bastos *et al.*, 2015; EMBRAPA, 2020), são culturas mais-vulneráveis às mudanças climáticas.

Neste contexto, o aquecimento global estimado de 1,5° a 4,0° C reduzem e reconfigurar espacialmente certas culturas agrícola (Igawa; Toledo; Anjos, 2022; Grüter *et al.*, 2022). Os impactos das variabilidades de precipitação e temperatura do ar na distribuição e produtividade agrícolas, como a laranja (*Citrus sinenses*) e lima ácida “Tahiti” (*Citrus latifoliada*), representa uma ameaça significativa a áreas adequadas para espécies no bioma amazônico, como foram relatados (González-Orozco *et al.*, 2020).

No entanto, o impacto do potencial das mudanças climáticas que podem ter sobre o setor agrícola é pouco estudado. As espécies das culturas permanentes são resilientes aos impactos negativos das mudanças climáticas, por outro lado, as culturas temporárias são mais vulneráveis às mudanças climáticas (Nawaz *et al.*, 2019), para ambas culturas não existe proeminências empíricas por meio de modelagem ou estudos experimentais para confirmar tais suposições. Analisar os impactos das mudanças climáticas nas culturas agrícolas pode ajudar a desenvolver estratégias de longo prazo para sua conservação e manejo.

A modelagem de distribuição de espécies (SDMs) é uma ferramenta amplamente utilizada pelo seu potencial de prever *ensemble* associados ao campo da biodiversidade (Anjos; Toledo, 2018; Gomes *et al.*, 2019), agricultura (Idohou *et al.*, 2017), agroflorestal (Ranjitkar *et al.*, 2016) e manejo florestal em cenários de mudanças climáticas (Barik; Behera; Adhikari, 2022). Todavia, as previsões são incertas, pois os modelos climáticos regionais (RegCM) aninhados aos modelos climáticos globais (GCM) projetam múltiplas trajetórias de mudança e consequentes cenários futuros devido aos diferentes tipos de fator(es) e forçante(s) das emissões de gases de efeito estufa. Apesar disso, existem diversos estudos realizados para identificar áreas climaticamente estáveis usando um consenso de projeções multimodelos, onde ajudam a delinear zonas climáticas estáveis e priorizar áreas de conservação para diferentes espécies.

No presente estudo, modelamos as áreas de distribuição com potenciais com climas atuais e futuros para a espécie de laranjas (*Citrus sinensis*). A identificação das áreas que mantêm a adequação de longo prazo para *Citrus* contra a mudança climática será extremamente útil para a concepção de medidas eficazes de conservação e manejo de espécies específicas no Amazônia Legal.

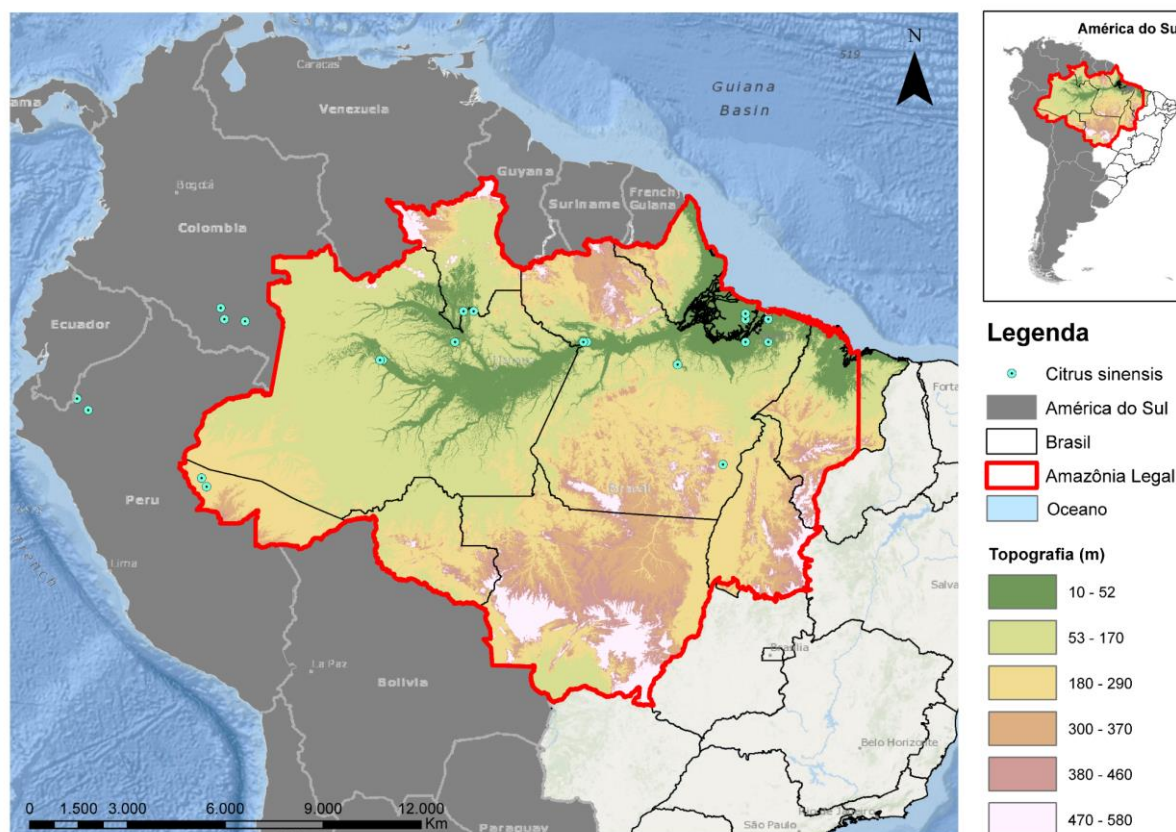
## 4.2 Material e Métodos

### 4.2.1 Área de Estudo

A Figura 29 mostra a localização da região do estudo e mapas de distribuição de espécie de laranja (*Citrus sinensis*). A área de estudo é composta pelo Estados do Acre, Pará, Amazonas, Roraima, Rondônia, Amapá e Mato Grosso e pelas regiões situadas ao norte do Estado de Tocantins, e a oeste do meridiano do Estado do Maranhão, totalizando uma área de 5.114.798,30 km<sup>2</sup> (IBGE, 2021), sendo que, deste total, o que representa o Bioma Amazônia é aproximadamente de 4.196.943 km<sup>2</sup>, onde 82,1% está coberto por vegetação nativa e 62% de florestais remanescentes (MAPBIOMAS, 2021).

O clima é tipicamente chuvoso no período de verão e outono no hemisfério sul, correspondente do primeiro semestre do ano (dezembro a maio), condizentes aos sistemas meteorológicos atuantes como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), bem como os mecanismo de circulação de brisa formam as condições dinâmicas de linhas instabilidades (Souza *et al.*, 2017) e menos chuvoso no período de inverno e primavera no hemisfério sul (junho a novembro), por conseguinte a precipitação na região pode variar aproximadamente de 2.250 mm/ano até cerca de 3.000 mm/ano. A Temperatura do ar possui certa variação sazonal, a mínima chega atingir 25°C no período chuvoso (março) e no período seco de menor ocorrência de chuvas chega alcançar 33°C em outubro (Dias *et al.*, 2019).

Figura 29 - Área de estudo mostrando a topografia da Amazonia Legal (Acre, Pará, Amazonas, Roraima, Rondônia, Amapá e Mato Grosso e o norte do estado de Tocantins, e a oeste do meridiano do estado do Maranhão) e a América do Sul. Bem como, as ocorrências de distribuição de espécie de laranja (*Citrus Sinensis*) em pontos azul claro



#### 4.2.2 Espécies e dados ambientais

Os dados de ocorrência de espécies de laranja (*Citrus sinensis*) foram obtidos da *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) e configurado à região de estudo. Esses dados passaram por um processo de limpeza, no qual valores incorretos e coordenadas duplicadas foram removidos. No entanto, apesar de a baixa ocorrência ter sido de 48 registros, as ocorrências de *Citrus* também são encontradas em regiões fora da Amazônia Legal, como na Colômbia e no Peru (FIGURA 29).

Os dados bioclimáticos foram obtidos do banco de dados (<http://worldclim.org>) com uma resolução de aproximadamente de 20 km (10 min) (Hijmans *et al.*, 2005). Nove variáveis bioclimáticas foram selecionadas *a priori* com base a significância biológica: temperatura média anual (BIO1), sazonalidade da temperatura (BIO4), temperatura máxima do mês mais seco (BIO5), temperatura mínima do mês mais frio (BIO6), faixa anual de temperatura (BIO7), precipitação anual (BIO12), precipitação do mês mais chuvoso (BIO13), precipitação do mês mais seco (BIO14) e precipitação do trimestre mais seco (BIO17), conforme os autores (Marchioro; Krechmer, 2018; Lima *et al.*, 2020; Lima; Marchioro, 2021)

Os 5 modelos climáticos globais (GCM) do CMIP6 foram usados para simular mudanças climáticas no futuro, sendo estes: BCC-CSM2-MR, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, MIROC6 e MIROC-ES2L, correspondentes aos períodos: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 em relação ao período base histórica (1995-2014) no âmbito dos cenários SSPs<sup>5</sup> (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 e 5- 8.5) para as nove variáveis bioclimáticas.

#### 4.2.3 Procedimentos de modelagem *ensemble*

A modelagem de distribuição de espécies (SDMs) como o método *ensemble* tem sido eficaz, pois ele alcança previsões mais robustas e de maior precisão. Esse modelo *ensemble* é uma técnica de aprendizado de máquina que combina o resultado de múltiplos modelos base com o objetivo de produzir um modelo preditivo ótimo. Neste caso, a primeira fase, foi utilizar o pacote *Biomod2* (Thuiller *et al.*, 2016) do programador R (R Core Team, 2017), no qual foi possível criar 500 pontos de pseudo-ausência para prever com precisão as áreas adequadas de espécies de *Citrus*.

Na segunda fase, o modelo *ensemble* de distribuição de espécie foram aplicados para os nove seguintes algoritmos: *Random Forest* (RF), *Classification Tree Analysis* (CTA), *Generalized Boosting Model* or usually called *Boosted Regression Trees* (GBM), *Generalized Linear Model* (GLM), *Maximum Entropy* (MAXENT.PHILLIPS), *Multiple Adaptive Regression Splines* (MARS), *Flexible Discriminant Analysis* (FDA), *Surface Range Envelop* (SRE) e *Artificial Neural Network* (ANN). Os parâmetros do modelo foram definidos usando o (*BIOMOD\_Modeling*) função que permite calibrar e avaliar uma variedade de técnicas de modelagem para uma determinada espécie. Logo, os parâmetros ideais foram definidos em 5 modelos replicados foram construídos e, em cada modelo, todos os registros de ocorrência foram particionados aleatoriamente em um conjunto de calibração (conjunto de treinamento = 80% de todos os registros) e um conjunto de teste (conjunto de validação = 20%). A precisão do modelo foi avaliada nos dados de teste usando a área sob a curva de características operacionais do receptor (ROC) e a habilidade estatística verdadeira (TSS), quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho (Tabela 9).

Por fim, este estudo considerou ROC/TSS acima de 0,8 no modelo *ensemble*. Este modelo foi utilizado para projetar as condições atuais e futuras do *Citrus*. Às áreas adequadas de potenciais de distribuição de *Citrus* foram categorizadas em quatro grupos utilizando a ferramenta *reclassify*, em ArcGis, sendo adequação ótima (valor >0,6), adequação moderada

---

<sup>5</sup> Shared Socio-economic Pathways (SSPs): SSP1 (Low challenges to mitigation and adaptation); SSP2 (Medium challenges to mitigation and adaptation); SSP3 (High challenges to mitigation and adaptation) and SSP5 (High challenges to mitigation, low challenges to adaptation)

(valor 0,4 - 0,6), adequação baixa (0,2-0,4) e inadequada (<0,2). Depois, as mudanças de área foram obtidas pelo *raster to polygon* e adição de área em km<sup>2</sup> pela opção *calculate geometry*, cujo foram calculadas as diferenças de áreas adequadas do período atual e futuro, detalhes do processo na figura abaixo.

Figura 30 - Processo geral do modelo ensemble de distribuição de espécies

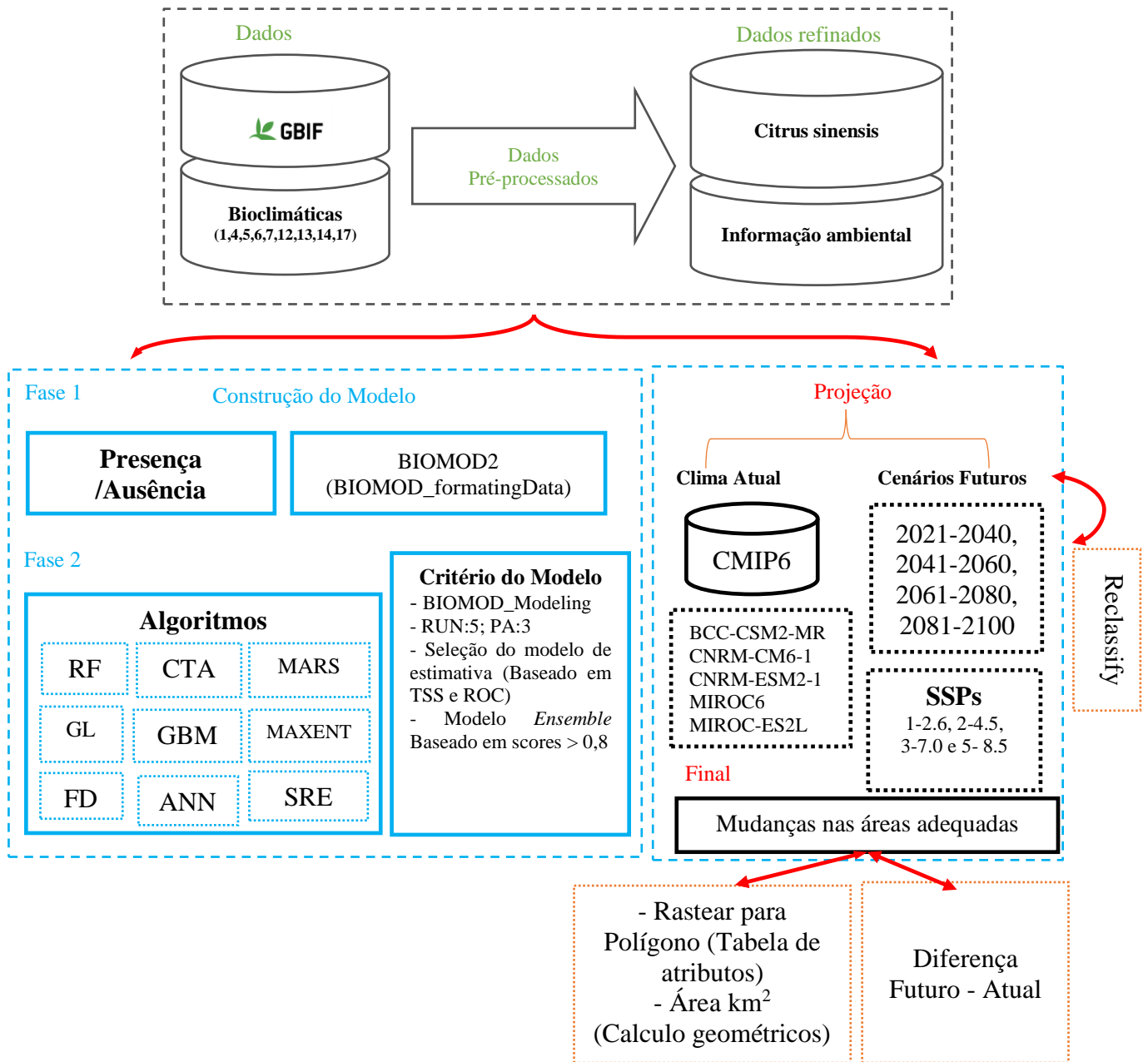


Tabela 9 – Critério de desempenho dos métodos de avaliação, as características de funcionamento do receptor (ROC/AUC) e a habilidade estatística verdadeira (TSS)

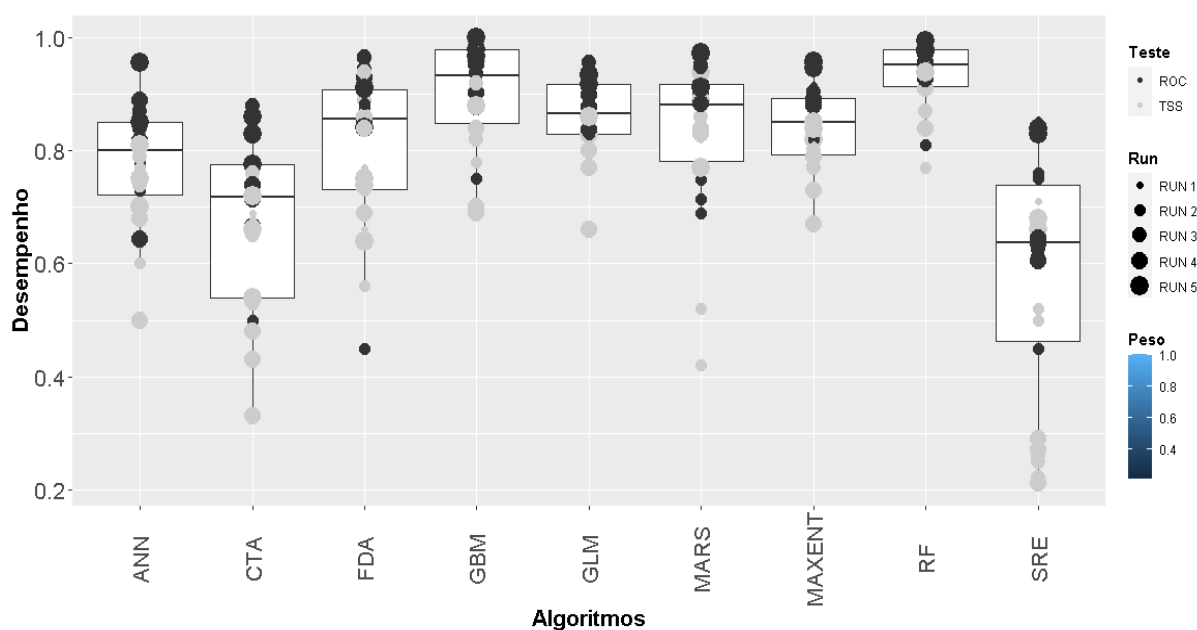
Métodos de Avaliação	Intervalos de valores	Desempenho				Referências
		Excelente	Bom/ Razoável/ Útil/	sem capacidade de previsão	Nada	
ROC/AUC	0 a +1	> 0,9	0,7–0,9	0,5–0,7	< 0,5	Swets (1988) Gama <i>et al.</i> , (2017)
TSS	-1 a +1	> 0,8	0,5–0,8	0,2–0,5	< 0,2	

### 4.3 Resultados

#### 4.3.1 Performance de modelos de estimativas de *Citrus*

Na (Figura 31) mostra os resultados da performance dos modelos de adequação de espécie de *Citrus* usando as nove métricas discutido na seção anterior. A avaliação média do TSS mostrou que o RF teve maior desempenho (0,91), seguido do GBM (0,87) e GLM (0,82). Enquanto, o SRE teve o pior desempenho (0,47), seguido do CTA (0,58). O resultado preditivo avaliado por TSS para cada modelo, por desempenho foi RF, GBM, GLM, MARS, MAXENT.PHILLIPS, FDA, ANN, CTA E SRE. O desempenho preditivo de modelos individuais de acordo com avaliação de ROC diferiu-se de TSS, praticamente todos apresentaram maior desempenho acima  $ROC > 0,8$ , com exceção de SER (0,73) e CTA (0,79). Porém, a ordem de classificação segue o mesmo do TSS. A precisão dos modelos foi considerada útil nos escores de TSS, exceto SRE e CTA, que tiveram desempenho ruim. Por fim, a avaliação do ROC mostrou que o SRE previu mal, enquanto o desempenho dos demais modelos foi considerado bom.

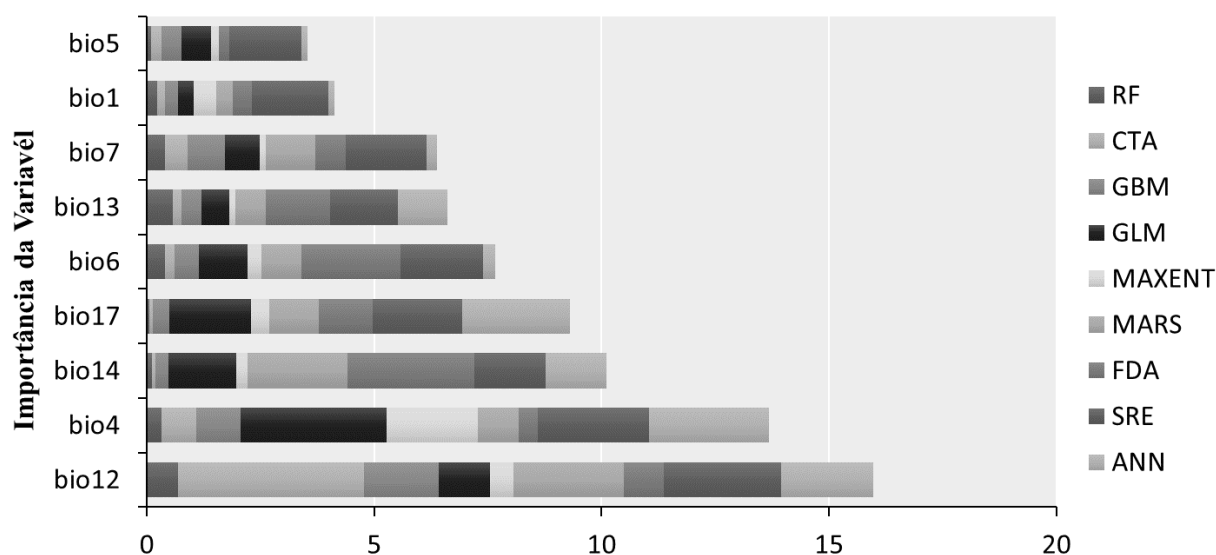


Figura 31 - Desempenho dos modelos de adequação de espécie de *Citrus* avaliados por diferentes métricas

#### 4.3.2 Importância da Variável Preditora

Foi identificado o nível de importância das variáveis preditoras utilizadas no modelo ensemble (Figura 32). As distribuições potenciais de *Citrus* são fortemente influenciadas por fatores bioclimáticos. A precipitação anual (BIO12) teve a maior influência, seguida pela sazonalidade da temperatura (BIO4) e a precipitação do mês mais seco (BIO14). A precipitação do trimestre mais seco (BIO17), temperatura mínima do mês mais frio (BIO6) e a precipitação do mês mais chuvoso (BIO13) e a faixa anual de temperatura (BIO7) também mostraram impactos substanciais nas distribuições de citrus, enquanto a temperatura máxima do mês mais seco (BIO5) tiveram a menor influência.

Figura 32 – Importância das variáveis bioclimáticas



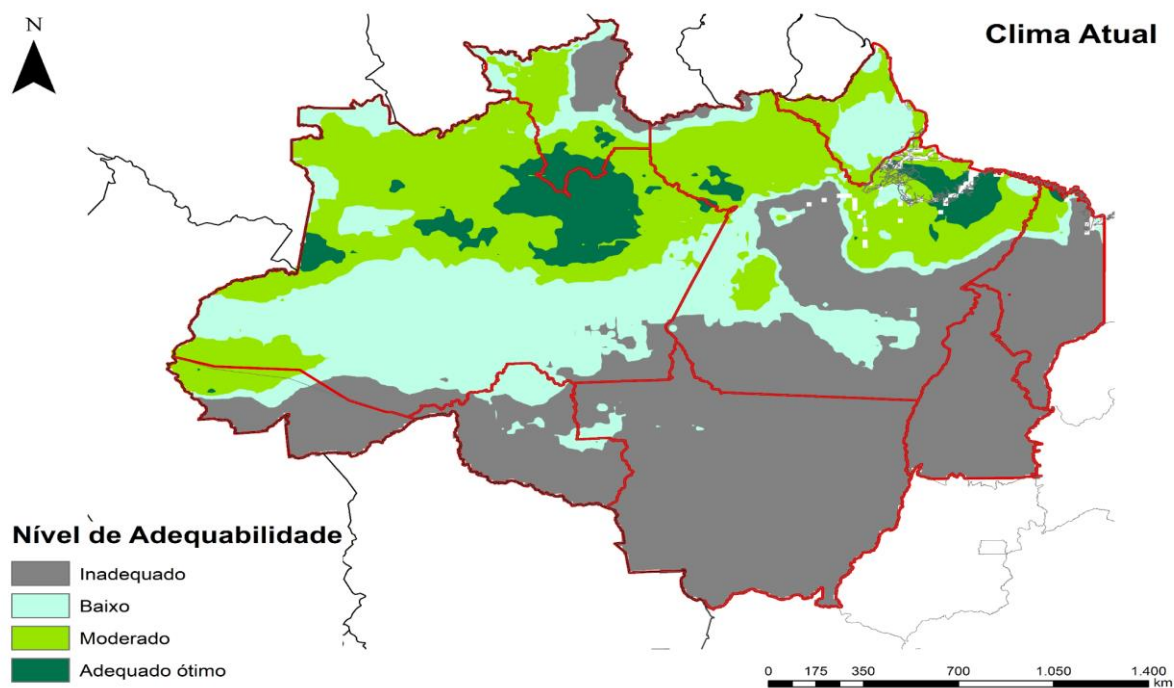
#### 4.3.3 Projeção atual e futura

Mapas de áreas adequadas de (*Citrus sinensis*) sob clima atual e futuro - caso de 2021 a 2040, sob os cenários de SSPs (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 e 5- 8.5) são mostrados na Figura (33).

No clima atual, as áreas altamente adequadas estavam localizadas nas mesorregiões do Estado do Pará (Nordeste, Marajó e Baixo Amazonas), do Estado do Amazonas (Sudoeste e Centro) e Roraima (Sul). Às áreas de baixa e moderadas adequação foram além das mesorregiões, com extensões maiores no Estado do Amazonas e menores no Estado do Pará, Roraima, Amapá, parte do Acre e Rondônia. Outras regiões como Mato-Grosso, parte sudeste do Pará, Tocantins e parte do Maranhão foram áreas inadequadas. Por outro lado, no clima futuro até o ano de 2040, cenários dos SSPs foram observadas áreas altamente adequadas na parte nordeste do Pará e oeste do Marajó, no entanto, no Amazonas apresentavam extensões de áreas com baixa e moderadas adequabilidade de citrus e as demais regiões permanecem áreas inadequadas.

Figura 33 - Área de adequabilidade da laranja (*Citrus sinensis*) sob o clima atual (A) e cenários dos SSPs (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 e 5-8.5) até ao ano 2040 (B), sendo adequação ótima (em cor verde escuro), adequação moderada (em cor verde claro), adequação baixa (em cor azul claro) e inadequada (em cor cinza)

a)



b)

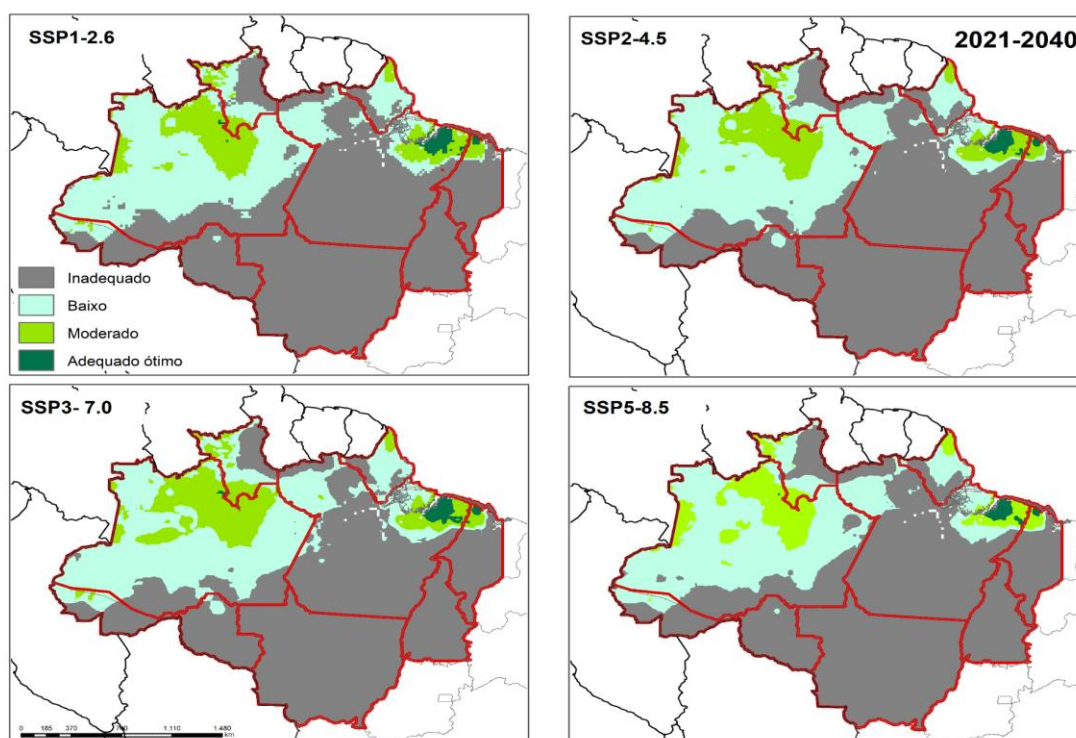


Tabela 10 - Mudanças nas áreas de aptidão dos cítricos nos anos de 2040, 2060, 2080 e 2100 sob os cenários dos SSPs (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 e 5- 8.5) em comparação com o clima atual

Classes	Atual km <sup>2</sup>	2021-2040							
		SSP1- 2.6	%	SSP2- 4.5	%	SSP3- 7.0	%	SSP5- 8.5	%
Inadequado	2.460.113	3.261.424	33%	3.169.783	29%	3.077.673,6	25%	3.313.791	35%
Baixo	1.281.633	1.557.814	22%	1.662.721	30%	1.602.052,2	25%	1.554.478	21%
Moderado	1.292.679	467.087	-64%	460.570	-64%	603.624,7	-53%	428.891	-67%
Ótimo	296.770	45.394	-85%	38.814	-87%	47.329,8	-84%	33.977	-89%
2041-2060									
Inadequado	2.460.113	3.379.711	37%	3.169.783	29%	3.077.674	25%	3.313.791	35%
Baixo	1.281.633	1.399.805	9%	1.662.721	30%	1.602.052	25%	1.554.478	21%
Moderado	1.292.679	526.190	-59%	460.570	-64%	603.625	-53%	428.891	-67%
Ótimo	296.770	25.081	-92%	38.814	-87%	47.330	-84%	33.977	-89%
2061-2080									
Inadequado	2.460.113	3.121.185	27%	3.365.685	37%	3.584.335	46%	3.803.454	55%
Baixo	1.281.633	1.656.696	29%	1.725.979	35%	1.639.672	28%	1.497.226	17%
Moderado	1.292.679	509.711	-61%	226.081	-83%	105.125	-92%	34.433	-97%
Ótimo	296.770	43.253	-85%	13.873	-95%	3.904	-99%	-	-100%
2081-2100									
Inadequado	2.460.113	3.147.345	28%	3.390.296	38%	3.992.991	62%	4.618.454	88%
Baixo	1.281.633	1.539.265	20%	1.749.621	37%	1.326.108	3%	704.928	-45%
Moderado	1.292.679	583.711	-55%	182.612	-86%	16.273	-99%	12.378	-99%
Ótimo	296.770	61.074	-79%	9.063	-97%	-	-100%	-	-100%
Média									
Inadequado	2.460.113,1	3.227.416,6	31%	3.273.886,7	33%	3.433.168,4	40%	3.762.372,5	53%
Baixo	1.281.633,0	1.538.395,0	20%	1.700.260,3	33%	1.542.471,1	20%	1.327.777,5	4%
Moderado	1.292.678,9	521.674,7	-60%	332.458,2	-74%	332.161,9	-74%	226.148,5	-83%
Ótimo	296.770,0	43.700,4	-85%	25.141,1	-92%	24.640,9	-92%	16.988,6	-94%

#### 4.3.4 Mudanças de áreas adequadas de *Citrus sinensis*

A (Tabela 10) mostra as mudanças quantitativas das categorias de adequação sob os cenários climáticos futuros (até 2040, 2060, 2080 e 2100) em comparação ao clima atual (1995-2014), para os resultados emprega-se os termos de inalterado (zero), expandido (+) e reduzido (-).

Em geral, levando em conta o cenário de mudanças climáticas futuras, a adequação ótima de *Citrus sinensis* reduz drasticamente nos anos futuros. A tendência da adequabilidade ótima de citrus irá reduzir em mais de 85% em todos os cenários de SSPs e as regiões de moderadas adequações diminuem em mais de 60% (SSP1-2.6), 74% (SSP2-4.5 e 3-7.0) e 83% (SSP5-8.5). Enquanto, as áreas baixas e inapropriadas para cultivo de *Citrus* a tendência será de aumento a todos os cenários do SSPs.

#### 4.4 Discussão

Neste estudo, utilizou-se o método do modelo ensemble para prever a adequação de laranja (*Citrus sinensis*) na Amazônia Legal. Isso evidenciou que os desempenhos preditivos na utilização de *machine learning*, como RF e GBM, foram maiores do que em outros modelos. Esse resultado está de acordo com estudos anteriores e demonstra o potencial desses modelos em prever distribuições de espécies com precisão aceitável para a agricultura, conforme apontado pelos autores (Dang; Kumar; Reid, 2020; González-Orozco *et al.*, 2020).

Os resultados deste estudo destacam a importância das variáveis bioclimáticas no cultivo de espécies de Citrus na região da Amazônia Legal. Entre as variáveis consideradas, a precipitação anual (BIO12) emergiu como o fator de maior influência, seguido da temperatura sazonal (BIO4) e da precipitação do mês mais seco (BIO14). Essas conclusões são consistentes com outros estudos, como o de Igawa, Toledo e Anjos (2022) e Monteiro *et al.* (2023), que também encontraram uma influência significativa das variáveis BIO14 e BIO15, bem como Grüter *et al.* (2022), que destacaram as três variáveis mais importantes (BIO01, BIO06 e BIO12).

No entanto, é importante reconhecer que não pudemos quantificar o déficit hídrico de forma precisa devido à falta de dados específicos disponíveis para esta região. As informações disponíveis na literatura, como as citadas de acordo com Siqueira e Salomão (2017), a EMBRAPA (2020) e Shafqat *et al.* (2021), indicam a importância dessas variáveis climáticas, mas a falta de dados quantitativos detalhados sobre o déficit hídrico é uma limitação deste estudo.

No cenário de clima atual, as áreas consideradas adequadas para (*Citrus sinensis*) correspondem à presença da espécie na região, principalmente no estado do Pará (mesorregião do Nordeste paraense e Baixo Amazonas), que são detentoras de cadeias produtivas de citros (laranja e lima-ácida “Tahiti”) (Silva Junior *et al.*, 2023; IBGE, 2020; Rosário *et al.*, 2021). Essas áreas adequadas apresentam boas condições edafoclimáticas, confirmando os estudos de (Ríos-Rojas *et al.*, 2018) sobre o desenvolvimento do cultivo de citros, e possuem apoio financeiro, tecnológico e técnico para a manutenção das plantações de citros, de acordo com (ADEPARÁ, 2017).

Este estudo destaca a importância das condições climáticas na adequabilidade para o cultivo de citros na região da Amazônia Legal. Áreas consideradas adequadas para o cultivo de citros, como aquelas encontradas na mesorregião do Nordeste paraense, são caracterizadas por uma alta variabilidade anual de precipitação, que varia de 2.250 a 3.000 mm/ano, e temperaturas máximas do ar que oscilam entre 30 e 33°C (Dias *et al.*, 2019). Essas áreas estão estrategicamente localizadas em terrenos topograficamente planos, próximos às margens de rios e ao Oceano Atlântico (Figura 29). Por outro lado, nas áreas consideradas inadequadas ou impróprias para o cultivo de citros, como é o caso do Sudeste paraense, observa-se uma baixa variabilidade anual de precipitação (Hoffmann *et al.*, 2018; Fernandes; Hacon; Novais, 2020) e maiores variações na temperatura do ar devido a fatores como a altitude e mudanças no uso e cobertura da terra (Romera *et al.*, 2019). Essas condições ambientais desfavoráveis exercem um impacto negativo na aptidão para a produção de citros, uma vez que o estresse hídrico e valores extremos de temperatura do ar podem prejudicar o crescimento e a produção normais das plantas de citros, tornando necessária a implementação de sistemas de irrigação e práticas de manejo específicas para o solo (Nascimento *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2006).

No cenário futuro até 2040, a adequabilidade para o (*Citrus sinensis*) diminuiu nos modelos de mudanças climáticas. As áreas consideradas adequadas para o cultivo de citros diminuiriam gradualmente sob os cenários dos SSPs (Figura 33b e Tabela 10). No cenário intermediário SSP2-4.5, houve uma redução de 87%, e no severo SSP5-8.5, uma diminuição de 89% nas áreas adequadas. Por outro lado, houve um aumento de 29% e 35% nas áreas inadequadas nos cenários dos SSP2-4.5 e 5-8.5, respectivamente. Essa redução nas áreas adequadas demonstra o impacto grave das mudanças climáticas na cultura da laranja.

Neste contexto, a variabilidade anual da precipitação e da temperatura do ar reflete-se na diminuição das áreas de cultivo de laranja. Estudos indicam que até 2040 (nos próximos 21 anos), os modelos globais (GCM) e regionais de mudanças climáticas (RegCM) apontam para

um aumento na intensidade e frequência de chuvas intensas, enquanto o período seco não apresenta mudanças significativas na Amazônia Oriental (Gutierrez; Souza; Gutierrez, 2022).

No entanto, de acordo com os relatórios do IPCC (2021), as projeções de tendências futuras indicam o risco de secas plurianuais de precipitação na Amazônia Legal, associadas às condições dos oceanos Pacífico e Atlântico (Seager *et al.*, 2019), o que pode aumentar os riscos de incêndios florestais, especialmente durante o período seco no sul da Amazônia (Parson *et al.*, 2018; Parson, 2020).

Além disso, vários fatores relacionados ao uso e à mudança na cobertura da terra, como o desmatamento, o fogo e o pastoreio agrícola, são projetados para aumentar a temperatura do ar, o que também pode estar associado a padrões oceânicos e atmosféricos, como El Niño e Oscilação do Sul, Oscilação do Atlântico Norte e Oscilação Decadal do Pacífico (Geng; Yang; Wu, 2019; Grothe *et al.*, 2020; Hamouda *et al.*, 2021). Esses fatores podem afetar a produtividade dos citros e aumentar as ameaças biológicas, como indicado nos estudos de (Deutsch *et al.*, 2018; Donkersley *et al.*, 2018).

Portanto, embora as projeções das futuras mudanças climáticas sejam incertas, o cenário mais grave, SSP5-8.5, com grandes emissões de GEE, pode alterar a frequência e intensidade da precipitação e da temperatura do ar, causando fenômenos como ondas de calor, chuvas fortes, secas e inundações, que podem afetar negativamente a produtividade das culturas. Como resultado, haverá uma redução nas áreas adequadas e um aumento nas áreas impróprias para o cultivo da laranja (*Citrus sinensis*), como mostrado na Tabela 10. Este estudo confirma os efeitos adversos das mudanças climáticas nas culturas de citros, como evidenciado em estudos realizados em outros países (Balfagón; Zandalinas; Gómez-Cadenas, 2019; González-Orozco *et al.*, 2020; Shafqat *et al.*, 2021; Balfagón; Arbona; Gómez-Cadenas, 2022).

#### **4.5 Implicação, Recomendação e Limitação da adequabilidade da laranja**

Neste estudo, foi evidenciada a redução das áreas adequadas para o cultivo de citros, o que representa uma ameaça ao desenvolvimento da sustentabilidade da região. Os citros desempenham um papel fundamental como meio de subsistência para as comunidades locais e também têm um alto valor econômico devido ao sequestro de carbono (Yasin *et al.*, 2021). No entanto, a região enfrenta cada vez mais desafios devido às mudanças climáticas, incluindo inundações, estiagens e ondas de calor, que estão causando danos às plantações de citros (FIDE, 2015), resultando em doenças (Ezrari *et al.*, 2022) e na redução da qualidade e produtividade (Wang; Xie; Yan, 2022). A redução das áreas adequadas para o cultivo de citros devido às

mudanças climáticas terá sérias implicações na segurança alimentar, na economia da região e do país, bem como nos serviços ecossistêmicos, entre outros aspectos.

Com base nos modelos utilizados neste estudo, prevê-se que as condições de variabilidade anual de precipitação, juntamente com o aumento das temperaturas no futuro, resultarão em eventos extremos de inundações e secas, afetando assim a produtividade das culturas cítricas. Recomenda-se: a) Planejar e monitorar as áreas de cultivo de citros levando em consideração as condições climáticas; b) Implementar medidas de controle durante inundações e melhorar os sistemas de irrigação em caso de secas; c) Promover a manutenção, apoio e expansão de sistemas de culturas alternativas com potencial agrícola em áreas ótimas da região; d) Desenvolver boletins de informação para alertar os produtores agrícolas sobre o calendário agrícola, condições climáticas, qualidade do solo e salinidade.

No entanto, é importante observar que este estudo apresenta diversas limitações. Por exemplo, não foram considerados na modelagem alguns elementos ambientais que podem afetar as culturas de laranja, como a salinidade do solo, inundações, sistemas de irrigação e mudanças futuras no uso do solo na região. Além disso, há incertezas relacionadas aos Modelos de Circulação Global (GCMs) utilizados na modelagem, uma vez que não existe consenso sobre qual é o mais preciso ou apropriado para configurações regionais. Outra limitação diz respeito à disponibilidade limitada de dados específicos sobre a cultura de citros na área dos municípios produtores da Amazônia Legal.

Apesar dessas limitações, este estudo contribui de maneira significativa para o aprimoramento das abordagens de Modelagem de Distribuição de Espécies (SDM) para prever a distribuição das espécies e também para a investigação dos impactos das mudanças climáticas nas práticas agrícolas. Os resultados também fornecem informações abrangentes sobre o impacto das mudanças climáticas na produção de laranja, o que é um recurso valioso para promover a produção sustentável de citros e para o planejamento futuro da gestão do uso do solo.

#### **4.6 Conclusão**

Conclui-se que a modelagem das áreas adequadas para o cultivo de *Citrus* em cenários climáticos atuais e futuros foi bem-sucedida e aceitável. Foi evidenciado que a distribuição e extensão das terras adequadas para o cultivo de laranja serão significativamente impactadas pelas mudanças climáticas. Em média, considerando os anos futuros, no cenário de emissões pessimista (SSP5-8.5), em comparação com as condições climáticas atuais, a área adequada



para o cultivo de citros diminuiu em 94%, enquanto a área imprópria para o cultivo de citros aumentou em 53%.

Portanto, é de extrema importância levar em consideração o impacto das mudanças climáticas na sustentabilidade do cultivo de laranja. Espera-se que esta informação seja tratada com seriedade por parte dos formuladores de políticas, tomadores de decisão e demais partes interessadas. Além disso, esses dados espaciais, quando combinados com os fatores ambientais que afetam a produção de laranja em um cenário climático futuro, podem ser utilizados no desenvolvimento de estratégias apropriadas. Isso inclui a criação de infraestrutura adequada, ajustes no calendário de cultivo e a promoção de culturas adaptadas e medidas de mitigação em resposta aos impactos das mudanças climáticas.

## Referências

- ANJOS, Luciano J. S.; TOLEDO, Peter Mann. Measuring resilience and assessing vulnerability of terrestrial ecosystems to climate change in South America. **Plos One**, v.13, n.3, e0194654, 2018 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194654>
- AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO PARÁ. **Decreto nº.1943 do Governo do Estado**. Criação de dois polos citrícolas no Pará. 2017. Disponível em: <http://www.adepara.pa.gov.br/sites/default/files/Decreto%201943%20de%2021%20de%20de%20de%202017%20-%20Cria%C3%A7%C3%A3o%20dos%20polos%20Citrícolas.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2020.
- BALFAGÓN, Damián; ARBONA, Vicent; GÓMEZ-CADENAS, Aurelio. The future of citrus fruit: The impact of climate change on citriculture. **Metode Science Studies Journal**, n. 12, p. 123-129, 2022.
- BALFAGÓN, Damián; ZANDALINAS, Sara I.; GÓMEZ-CADENAS, Aurelio. High temperatures change the perspective: integrating hormonal responses in citrus plants under co-occurring abiotic stress conditions. **Physiologia Plantarum**, v. 165, n. 2, p. 183-197, 2019.
- BARIK, S. K.; BEHERA, Mukunda Dev; ADHIKARI, D. Realizing certainty in an uncertain future climate: Modeling suitable areas for conserving wild Citrus species under different change scenarios in India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 12, e864, 2022.
- BASTOS, Débora Costa *et al.* **Cultivo de citros no Semiárido brasileiro**. In: Embrapa Semiárido. 2015, Documentos 266. 30 p.
- DANG, An T.; KUMAR, Lalit; REID, Michael. Modelling the potential impacts of climate change on rice cultivation in Mekong Delta, Vietnam. **Sustainability**, v.12, n.22, e9608. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12229608>
- DEUTSCH, Curtis A. *et al.* Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. **Science**, v.361, n. 6405, p.916-919. 2018.
- DIAS, Thaianie Soeiro da Silva *et al.* Estimativa climática sazonal da produtividade de açaí (*Euterpe Oleracea* Mart.) no estado do Pará - cenários futuros. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.2, p.517-533. 2019.

DONKERSLEY, Philip *et al.* Biological, environmental and socioeconomic threats to citrus lime production. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 125, p. 339-356, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Citros**. Brasília, DF: Embrapa Serviço de Produção de Informação. Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/citros>. Acesso em: 19 jun. 2020.

EZRARI, Said *et al.* Dry root rot disease, an emerging threat to citrus industry worldwide under climate change: A review. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 117, e101753, 2022.

FORMULÁRIO DE INFORMAÇÕES DO DESASTRE. **Sistema Integrado de Informações sobre Desastre**. Capitão Poço. 2015. Disponível em: <https://cdn.labtrans.ufsc.br/s2id/PA/PA-F-1502301-12200-20150322.pdf>. Acesso: 10 jan. 2019.

FERNANDES, Thiago; HACON, S. S.; NOVAIS, Jonathan Willian Zangeski. Variabilidade das chuvas e sua relação com os objetivos de desenvolvimento sustentável em populações expostas a mudanças hídricas no sudeste da Amazônia paraense. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 4, p. 1519-1536, 2020.

GAMA, Mafalda *et al.* Ensemble forecasting of *Corbicula fluminea* worldwide distribution: projections of the impact of climate change. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 27, n. 3, p. 675-684, 2017.

GENG, Tao; YANG, Yun; WU, Lixin. On the mechanisms of Pacific decadal oscillation modulation in a warming climate. **Journal of Climate**, v. 32, n. 5, p. 1443-1459, 2019. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0337.1>

GOMES, Vitor H. F. *et al.* Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 7, p. 547-553, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0500-2>

GONZÁLEZ-OROZCO, C. E. *et al.* Extreme climate variability weakens a major tropical agricultural hub. **Ecological Indicators**, v.111, n.1, e106015, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106015>

GROTHER, Pamela R. *et al.* Enhanced El Niño–Southern Oscillation variability in recent decades. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n.7, e2019GL083906, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019GL083906>

GRÜTER, Roman *et al.* Expected global suitability of coffee, cashew and avocado due to climate change. **Plos One**, v. 17, n. 1, e0261976, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261976>

GUTIERREZ, Carlos B. B.; SOUZA, Everaldo B. de; GUTIERREZ, Dione M. G. Global/Regional impacts on present and near-future climate regimes in the Metropolitan Region of Belém, Eastern Amazon. **Atmosphere**, v. 13, n. 7, e1077, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13071077>

HAMOUDA, Mostafa E.; PASQUERO, Claudia; TZIPERMAN, Eli. Decoupling of the Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation in a warmer climate. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 2, p. 137-142, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00966-8>

HIJMANS, Robert J. *et al.* Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 25, n. 15, p. 1965-1978, 2005.

HOFFMANN, Emerson Luis *et al.* Variabilidade das chuvas no Sudeste da Amazônia paraense, Brasil (Rainfall variability in southeastern Amazonia, Paraense, Brazil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 4, p. 1251-1263, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/igarape-miri/pesquisa/16/12705?tipo=grafico&indicador=12710>. Acesso em: 16 jun. 2020.

IDOHOU, Rodrigue *et al.* Identification of potential areas for wild palm cultivation in the Republic of Benin through remote sensing and ecological niche modeling. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 64, p. 1383-1393, 2017.

IGAWA, Tassio Koiti; TOLEDO, Peter Mann de; ANJOS, Luciano JS. Climate change could reduce and spatially reconfigure cocoa cultivation in the Brazilian Amazon by 2050. **Plos One**, v. 17, n. 1, e0262729, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262729>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (ed.)*. Cambridge University Press. In Press, 2021. 3949p.

LIMA, Valdeir Pereira *et al.* Extinction threat to neglected *Plinia edulis* exacerbated by climate change, yet likely mitigated by conservation through sustainable use. **Austral Ecology**, v. 45, n. 3, p. 376-383, 2020.

LIMA, Valdeir Pereira; MARCHIORO, Cesar Augusto. Brazilian stingless bees are threatened by habitat conversion and climate change. **Regional Environmental Change**, v. 21, n.14, p. 1-12, 2021.

MAPBIOMAS. **Mapas e Dados**. 2021. Disponível em: [https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama\\_set\\_language=pt-BR](https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR). Acesso em: 4 nov. 2021.

MARCHIORO, Cesar A.; KRECHMER, Flavia S. Potential global distribution of *Diabrotica* species and the risks for agricultural production. **Pest Management Science**, v. 74, n. 9, p. 2100-2109, 2018.

MONTEIRO, Waléria P. *et al.* Potential Distribution of *Pilocarpus microphyllus* in the Amazônia/Cerrado Biomes under Near-Future Climate Change Scenarios. **Plants**, v. 12, n. 11, p. 2106, 2023.

NASCIMENTO, Romário Júnior do *et al.* Formação de um pomar de laranjeira 'pêra' em combinação com diferentes porta-enxertos em Capitão Poço-PA. ed. [s.l]: **Embrapa**, 2018.

NAWAZ, Ahmad *et al.* Rice–wheat cropping systems in South Asia: issues, options and opportunities. **Crop and Pasture Science**, v. 70, n. 5, p. 395-427, 2019.

PARSONS, Luke A. *et al.* The threat of multiyear drought in Western Amazonia. **Water Resources Research**, v.54, n.9, p.5890–5904. 2018. <https://doi.org/10.1029/2017WR021788>

PARSONS, Luke A. Implications of CMIP6 projected drying trends for 21st century Amazonian drought risk. **Earth's Future**, v. 8, n. 10, e2020EF001608, 2020. <https://doi.org/10.1029/2020EF001608>

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017.

RANJITKAR, Sailesh *et al.* Climate modelling for agroforestry species selection in Yunnan Province, China. **Environmental Modelling & Software**, v. 75, p. 263-272, 2016.

- RÍOS-ROJAS, Liliana; CORREA, Jhon Fabio; ROJAS-MARÍN, Carlos A. Caracterización edafoclimática de la zona productora de lima ácida Tahití (*Citrus latifolia* Tanaka) en el Tolima (Colombia), afectada por una fisiopatía. **Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, v. 19, n. 3, p.545-567, 2018. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol19\\_num3\\_art:862](https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num3_art:862)
- ROSÁRIO, Raimara Reis do *et al.* Avaliação do desempenho produtivo e especialização da laranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) no Pará no período de 2008 a 2018 utilizando métodos de análise de desenvolvimento regional associados a geotecnologias. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, e37610615790-e37610615790, 2021.
- ROMERA, Kelly Sousa *et al.* Variabilidade interanual das propriedades óticas de aerossóis em biomas distintos na Amazônia Legal. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, n.15, p.424-443, 2019.
- SEAGER, Richard *et al.* Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 7, p. 517-522, 2019.
- SHAFQAT, Waqar *et al.* Climate change and citrus. In: KHAN, M. S, KHAN, I. A. (Ed). **Citrus-Research, Development and Biotechnology**. [s.l]: IntechOpen, 2021, cap. 8.
- SILVA, Cláudio Ricardo da *et al.* Déficit hídrico em citros: informações para o manejo da irrigação. **Citrus Research & Technology**, v.27, n.1, 119-130. 2006.
- SILVA JUNIOR, Alberto Cruz da *et al.* Energy balance, water demand, and crop coefficient of acid lime in the Oriental Amazon. **Water**, v. 15, n. 6, e1239, 2023.
- SIQUEIRA, Dalmo Lopes de; SALOMÃO, Luiz Carlos Chamhum. **Citros do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV. 2017.
- SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 81-93. 2017.
- SWETS, John A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. **Science**, v. 240, n. 4857, p. 1285-1293, 1988.
- TANAKA, T. On certain new species of Citrus. **Stud Citrol**, v.2, p.155–164. 1928.
- TANAKA, T. Further revision of Rutaceae- Aurantioideae of India and Ceylon (Revisio aurantiacearum VIII). **The Journal of Indian Botanical Society**, v.16, p.227–240. 1937.
- WANG, Shuangshuang; XIE, Wenqiang; YAN, Xiaodong. Effects of future climate change on citrus quality and yield in China. **Sustainability**, v. 14, n. 15, e9366, 2022.
- YASIN, Ghulam *et al.* Assessing the Contribution of Citrus Orchards in Climate Change Mitigation through Carbon Sequestration in Sargodha District, Pakistan. **Sustainability**, v. 13, n. 22, e12412, 2021.
- THUILLER, W. *et al.* Package ‘biomod2’. **Species distribution modeling within an ensemble forecasting framework**, 2016.

## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO GERAL

### 5.1 Resultados Chaves: Impactos e Implicações

A hipótese geral proposta foi a seguinte: *O clima é um dos principais fatores que influenciam a redução da produtividade dos cítricos. No entanto, a probabilidade de impactos agrícolas pode também ser aumentada por fatores antropogênicos e naturais (desmatamento e cheias)*. Considera-se que a hipótese foi concretizada. Os conceitos e metodologias utilizados permitiram identificar os fatores de risco socioambientais da produtividade cítrica, levando a compreender a exposição e vulnerabilidade dos municípios produtores no estado do Pará.

Deste modo, foram propostas três hipóteses instrumentais que podem agora ser analisadas. A primeira delas foi: *A produtividade dos cítricos é reduzida por uma diminuição da precipitação e um aumento da temperatura máxima, o que sugere a hipótese de que o desmatamento possa estar associado a esse fenômeno*. Os resultados mostraram que esta hipótese é válida para a cultura da laranja. Para a cultura da laranja, a produtividade mostrou um sinal negativo à medida que a taxa de desmatamento aumentava e, conseqüentemente, a temperatura máxima aumentava e a precipitação diminuía. Isso sugere que o desmatamento está causando mudanças climáticas que estão prejudicando a produtividade da cultura da laranja. Para a cultura do limão, a produtividade mostrou uma tendência para diminuir com o aumento da precipitação e evapotranspiração, apesar do aumento da temperatura máxima e da taxa de desmatamento. Isso sugere que outros fatores, como a qualidade do solo ou a incidência de pragas e doenças, estão influenciando a produtividade da cultura do limão.

Assim, o impacto na produtividade dos frutos no nordeste do Pará através do aumento da taxa de desmatamento e temperatura máxima pode implicar uma diminuição na produtividade da laranja (*Citrus sinensis*). Por outro lado, com o aumento da precipitação e evapotranspiração, a produtividade da lima ácida “Tahiti” (*Citrus latifolia*) pode diminuir. Isso é relevante pois os principais produtores estão localizados em áreas com uma elevada taxa de desmatamento. Essas descobertas destacam a complexidade das interações entre o ambiente e a produtividade de cultivos cítricos e ressaltam a necessidade de considerar múltiplos fatores ao abordar questões de agricultura e conservação ambiental.

A segunda hipótese instrumental foi a seguinte: *As chuvas extremas afetam as áreas de cultivo de cítricos e aumentam os riscos socioambientais*. Pode-se concluir que esta hipótese é, até certo ponto, verdadeira. Os resultados mostraram que com taxas de precipitação mais elevadas (SPI e PRP), as áreas de cultivo de cítricos foram afetadas negativamente e, conseqüentemente, os riscos de produtividade dos citros foram aumentados. Verificou-se que a

diminuição da produtividade do “limão” foi influenciada por condições de chuvas extremas, enquanto a produtividade da laranja foi afetada pelo declive do terreno (SLOPE). Tais áreas de risco estão localizadas em áreas de alta recarga de água (TOPO e SLOPE), maior capacidade de retenção de água no solo (AWC) e irrigação (SIR), o que afeta o estabelecimento e crescimento das plantas.

No entanto, não foram analisados dados sobre perdas de frutos, relatórios de doenças e pragas, bem como preços. Assim, a última parte da hipótese, onde se argumenta que isso aumenta os riscos socioambientais, é parcialmente não confirmada e pode ser refutada. Contudo, leva-se a concluir que os fatores climáticos (PRP e SPI), do solo (SLOPE e TOPO) e de manejo (irrigação) condizem a um nível mais elevado de risco socioambiental face a eventos extremos nas propriedades de produção de frutos cítricos no Pará.

A terceira hipótese instrumental seria que *as áreas adequadas para a espécie Citrus serão reduzidas em cenários futuros de mudança climática na Amazônia Legal*. Esta hipótese foi confirmada para a laranja (*Citrus sinensis*). Foi possível demonstrar cenários atuais e futuros de mudança climática sobre a espécie de laranja e sua relação com as áreas de plantio no nordeste do Pará. Por exemplo, em relação ao cenário atual, no cenário mais pessimista (SSP5-8.5), as áreas adequadas de laranja diminuiriam 94% e as áreas inadequadas aumentaram 53%. Por conseguinte, conclui-se que a modelagem das áreas adequadas de espécies de laranja tem características físicas de zonas de aptidão decrescente, tendo conseqüentemente uma probabilidade mais elevada de sofrer uma produtividade reduzida e a necessidade de se estabelecer estratégias para melhorar a plantação da laranja nas poucas áreas adequadas na Amazônia Legal.

Portanto, a investigação conclui que os riscos socioambientais à produtividade dos cítricos respondem com os objetivos da tese e apontam implicações negativas e importantes para os estudos sobre a crise climática e a produção agrícolas de cítricos.

## **5.2 Conclusão integrada**

Em suma, os resultados desta pesquisa forneceram uma visão abrangente sobre os fatores que afetam a produtividade dos cítricos na região nordeste do Pará, contribuindo para a concretização da hipótese geral de que o clima desempenha um papel significativo nesse contexto, com impactos agravados por fatores antropogênicos e naturais. As hipóteses instrumentais formuladas e avaliadas destacam a complexidade das interações entre variáveis climáticas, de solo e de manejo, evidenciando os riscos socioambientais associados à produção de cítricos.

Os achados desta tese demonstraram que o desmatamento e o aumento da temperatura máxima têm implicações diretas na diminuição da produtividade da laranja, enquanto o aumento da precipitação e evapotranspiração afeta negativamente a produtividade do limão ácido "Tahiti". Esses resultados são particularmente relevantes, considerando que as principais áreas de produção de cítricos na região estão associadas a altas taxas de desmatamento, destacando a interconexão entre agricultura e conservação ambiental.

Além disso, a pesquisa mostrou que chuvas extremas e declives do terreno também influenciam a produtividade dos cítricos, contribuindo para um maior entendimento dos riscos associados a eventos climáticos extremos. Embora nem todos os aspectos da terceira hipótese instrumental tenha sido completamente confirmada, a redução das áreas adequadas para o cultivo de laranjas em cenários futuros de mudança climática na Amazônia Legal representa um desafio significativo para a produção agrícola regional.

### **5.3 Limitações da metodologia utilizada e Recomendações**

Neste contexto, os três estudos foram limitados de várias maneiras. No primeiro estudo, os dados de produtividade da base de dados do IBGE são inconstantes e isto pode dificultar o cálculo dos modelos PCA e PCR, e os dados climáticos (PRP e TMAX) podem ter resultados estimados e comprometer os resultados, a análise e a metodologia.

No segundo estudo, alguns critérios ambientais que podem afetar o risco de eventos extremos de precipitação, tais como distância dos rios, textura do solo e densidade de drenagem, não foram incluídos na modelagem. As exposições socioeconômicas (doenças, pragas, renda e consumo de energia) também não foram consideradas e por isso não foram calculadas as vulnerabilidades. Houve pouco acesso a bases de dados sobre os aspectos sociais e econômicos na área de estudo e não foi possível coletar dados primários devido o período da COVID-19. Outra limitação é a incerteza na aplicação da AHP utilizada. Os parâmetros foram subjetivos e conceituais.

Contudo, o terceiro estudo também foi limitado de várias maneiras. Por exemplo, alguns elementos ambientais que podem afetar as culturas de laranja, tais como salinidade, inundações, sistemas de irrigação, e mudanças futuras do uso do solo na região, não foram considerados na modelagem. As incertezas nos GCMs utilizados para a modelação são outra limitação. Não há consenso sobre como selecionar o mais preciso ou apropriado para configuração regional. Outra limitação, ausência de dados de biodiversidade para a espécie da lima ácida "Tahiti" (*Citrus latifolia*) na área dos municípios produtores na Amazônia Oriental.

Apesar destas limitações, a tese contribui significativamente para a eficiência e precisão. Os métodos utilizados podem ser aplicados para estudar os riscos agrícolas e os impactos climáticos. Os resultados também fornecem informação abrangente sobre os fatores que irão afetar a produtividade e a qualidade de sustentabilidade dos cítricos no futuro próximo. Recomenda-se: a) planejar e monitorar áreas cítricas com problemas climáticos; b) determinar a qualidade dos sistemas de irrigação em caso de secas e inundações; c) manter, apoiar e melhorar os sistemas de cultivo de citros em áreas adequadas da região; finalmente, d) desenvolver estudos tecnológicos e científicos para verificar os potenciais econômicos e sociais da produtividade da região devido a perturbações do sistema climático e degradação ambiental.

#### **5.4 Considerações Finais**

Portanto, a tese apresenta resultados importantes sobre os riscos socioambientais da produtividade de *Citrus* em face às mudanças climáticas na Amazônia Oriental. É importante continuar a pesquisa nessa área para desenvolver estratégias eficazes para mitigar esses riscos e promover uma produção agrícola sustentável. Além do mais, reforçar o desenvolvimento de estudos sobre o uso de tecnologias para minimizar os riscos e vulnerabilidades socioambientais na produção de citros. Esses estudos podem avaliar a eficácia dessas tecnologias em mitigar os impactos negativos das mudanças climáticas na produção de citros. Além disso, pode ser útil avaliar como essas tecnologias podem ser integradas às práticas existentes de produção de citros para maximizar seus benefícios. Esses estudos podem fornecer informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias para minimizar os riscos e vulnerabilidades socioambientais na produção de citros.



## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO PARÁ. **Decreto nº.1943 do Governo do Estado**. Criação de dois polos citrícolas no Pará. 2017. Disponível em: <http://www.adepara.pa.gov.br/sites/default/files/Decreto%201943%20de%2021%20de%20de%20de%20de%202017%20-%20Cria%C3%A7%C3%A3o%20dos%20polos%20Citrícolas.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2020.
- AFONSO, Andreia M. *et al.* Identification of asymptomatic plants infected with *Citrus tristeza virus* from a time series of leaf spectral characteristics. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.141, n.1, p.340-350. 2017.
- ALMEIDA, C. T. *et al.* Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. **International Journal of Climatology**, v.37, n.4, p. 2013–2026. 2017.
- ALVES, José *et al.* Evolução da produtividade de laranja e pimenta-do-reino no período de 2000-2012 no município de Capitão Poço, PA. **Enciclopédia Biosfera**, v.11, n.21, 2015.
- ANDERSON, L. O. *et al.* Counting the costs of the 2005 Amazon drought: A preliminary assessment, 2011. *In*: SCHRECKENBERG, Kate; POUDYAL, Mahesh; MACE, Georgina (ed.) SCHRECKENBERG, Kate ; POUDYAL, Mahesh; MACE, Georgina (ed.). **Ecosystem services for poverty alleviation in Amazonia**. [S.l.:s.n.], 2011. p.97- 103. DOI:10.13140/RG.2.2.15265.25442.
- ARAÚJO, Paulo Fernando C. de; NICOLELLA, Alexandre. Contribuição da FAPESP ao desenvolvimento da agricultura do estado de São Paulo / organizadores, São Paulo: **FAPESP**, 2018. 412 p.
- AYOADE, J. O. Introdução à climatologia para os trópicos. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil. 1996. *In*: CARVALHO, AMP (org.): **Termodinâmica, um ensino por investigação**. São Paulo: Faculdade de Educação, 1996.
- BARBINO, Gutieres Camatta *et al.* Sensoriamento remoto aplicado ao índice de área foliar e fração da radiação fotossinteticamente ativa em áreas de floresta e pastagem na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.9, n.2, p.76-90, 2021.
- BARROS, José Roberto Mendonça de; BARROS, Alexandre Lahoz Mendonça de; CYPRIANO, Marcelo Petersen. **O mercado da Citricultura no Brasil e as suas Novas Perspectivas**. Citrus Associação Nacional de Exportadores de sucos cítricos. Brasil. 2016.
- BASTOS, Débora Costa *et al.* **Cultivo de citros no Semiárido brasileiro**. (Embrapa Semiárido. Documentos, 266). 30 p. 2015.
- BETTIOL, W. *et al.* Controle de verrugose, melanose e leprose em laranja pera, com fungicidas e acaricida em mistura com adubo foliar. **Scientia Agricola**, v.51, n.3, p.494-499, 1994.
- BOARETTO, Rodrigo Marcelli *et al.* Zinc fertilizers for Citrus production: assessing nutrient supply via fertigation or foliar application. **Plant and Soil**, p. 1-14, 2023.
- BRITO, Marcos Eric Barbosa *et al.* Growth of ungrafted and grafted citrus rootstocks under saline water irrigation. **African Journal of Agricultural Research**, v.9, n.50, p.3600-3609, 2014a.

- BRUGNARA, E. C.; CASTILHOS, R. V.; SABIÃO, R. R. Consequências da seca no Oeste Catarinense para a cultura dos citros na safra 2020/21. **Agropecuária Catarinense**, v.35, n.2, p.11-13. 2022.
- CALDANA, Nathan Felipe da Silva. **Zoneamento de risco agroclimático para espécies frutíferas na Bacia do Rio Paraná 3**. 2020. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina – PR, 2020.
- CARNEIRO, Renan do Vale. **Experiências de recuperação florestal praticadas por agricultores familiares**. 2018. 129f. Dissertação (Mestrado em Agriculturas Familiares e desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Pará, Belém- PA. 2018.
- CARVALHO, Daniel Victor *et al.* Coeficiente de redução da evapotranspiração em citros no Cerrado. **Global Science and Technology**, v. 13, n. 2, p. 74-83, 2020.
- CARVALHO, Deived Uilian de. *et al.* Performance of ‘Salustiana’ sweet orange on different rootstocks under Brazilian subtropical conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 287, e110226, 2021.
- CENTRO DE ABASTECIMENTO DO PARÁ. **Cotação de Preços**. 2021. Disponível em: <http://www.ceasa.pa.gov.br/cotacao>. Acesso em: 12 dez. 2021
- CHRISTIANO, Rock Seille Carlos. **Componentes monocíclicos do cancro cítrico no sistema Xanthomonas axonopodis pv. citri-limão Tahiti-Phyllocnistis citrella, sob condições controladas**. 2003. 104f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba -SP, 2003
- COELHO, Caio A.S.; CARDOSO, Denis H. F.; FIRPO, Mári A.F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.125, n.3-4, p.769-784, 2016.
- COHEN, J. C. P; DIAS, M. A. F. S.; NOBRE, C. A. Condições ambientais associadas às linhas de instabilidade na Amazônia: um estudo de caso. **Revisão Mensal do Tempo**, v.123, n.11, p.3163-3174, 1995.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Preços Agropecuários**. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/precos>. Acesso em: 15 fev. 2023
- COSTA, Marcos Heil; FOLEY, Jonathan A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO2 concentrations on the climate of Amazonia. **Journal of Climate**, v.13, n.1, p.18-34. 2000.
- DIAS, Nildo da S.; BLANCO, Flávio F. Efeitos dos sais no solo e na planta. 2010. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F (org.) **Manejo da Salinidade na Agricultura**: Estudo Básico e Aplicados. Fortaleza: INCT sal, 2010. cap.3. p.129-140.
- DIAS, Thaiane Soeiro da Silva *et al.* Urban environment and the air temperature trend: The case of the metropolis of Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n.1, p.159-171, 2021.
- DIKICI, Mehmet. Drought analysis for the seyhan basin with vegetation indices and comparison with meteorological different indices. **Sustainability**, v. 14, n. 8, p. 4464, 2022.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Citros**. Brasília, DF: Embrapa Serviço de Produção de Informação. Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/citros>. Acesso em: 19 jun. 2020.

ESPINOZA, Jhan Carlo *et al.* The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970–2012 period: A focus on the 2012 flood. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 3, p.1000-1008, 2013.

ESPINOZA, Jhan Carlo *et al.* The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical subtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters**, v.9, n.12, p.1-9, 2014.

FORMULÁRIO DE INFORMAÇÕES DO DESASTRE. **Sistema Integrado de Informações sobre Desastre**. Capitão Poço. 2015. Disponível em: <https://cdn.labtrans.ufsc.br/s2id/PA/PA-F-1502301-12200-20150322.pdf>. Acesso: 10 jan. 2019.

FONSECA, A. E.; GOES, A. de; PEREIRA, F. D. Aplicação isolada de oxicloreto de cobre no controle da mancha preta dos citros. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 3, p. 616-624, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Produção de limão e limas. Produção de laranjas**. 2019. Disponível em: [www.fao.org/faostat/en/#data/QC](http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC). Acesso em: 30 jun. 2019.

GAGO, Jorge *et al.* UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 153, p. 9-19, 2015.

GLENN, David Michael; TABB, Amy. Evaluation of five methods to measure normalized difference vegetation index (NDVI) in apple and citrus. **International Journal of Fruit Science**, v. 19, n. 2, p. 191-210, 2019.

GONZÁLEZ-OROZCO, C. E. *et al.* Extreme climate variability weakens a major tropical agricultural hub. **Ecological Indicators**, v.111, n.1, e106015, 2020.

GUERREIRO NETO, Gerônimo; FIGUEIRA, Sérgio Rangel Fernandes. Satisfação dos produtores e tendências da produção da laranja no principal cinturão citrícola brasileiro. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 38, n. 3, e26895, 2022.

HASTENRATH, Stefan; GREISCHAR, Lawrence. Circulation mechanisms related to northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 98, n. D3, p. 5093-5102, 1993.

HAYLOCK, Malcolm R. *et al.* Trends in total and extreme South American rainfall 1960–2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v.19, n.8, p.1490–1512. 2006.

IGLESIAS, Domingo J. *et al.* Physiology of citrus fruiting. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, n. 4, p.333–362. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/igarape-miri/pesquisa/16/12705?tipo=grafico&indicador=12710>. Acesso em: 16 jun. 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001: The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report**. Cambridge University Press, Cambridge, 2001. 881p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment report of Intergovernmental Panel on Climate Change**, [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007. 104p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. *In: Stocker, Thomas F. et al. (ed.)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, In Press, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** *In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (ed.). Cambridge University Press. In Press, 2021. 3949p.*

IPPOLITO, Matteo *et al.* Estimating crop coefficients and actual evapotranspiration in citrus orchards with sporadic cover weeds based on ground and remote sensing data. **Irrigation Science**, v.41, n.1, p.5–22, 2023.

KILADIS, George N.; DIAZ, Henry F. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v.2, n. 9, p.1069-1090. 1989.

LIU, Xiaoyan *et al.* NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N ratio controlling nitrogen transformation accompanied with NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N accumulation in the oxic-anoxic transition zone. **Environmental Research**, v.189, e109962, 2020.

LONGHINI, Kleber Lopes *et al.* Avaliação da incidência e severidade de cancro cítrico com uso de composto químico em plantas de laranja-doce. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA-EPCC*, 11., 2019, Maringá-PR. **Resumo Expandido.** Painel Dialogado. Maringá (PR): UNICESUMAR, 2019.

LUCAS, Edmundo Wallace Monteiro *et al.* Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin - Brazilian Amazon. **Weather and Climate Extremes**, v. 31, e100306, 2021.

MALUF, Jaime Ricardo Tavares; MATZENAUER, Ronaldo; CAIAFFO, Márcia Rodrigues. Análise e espacialização da temperatura do solo desnudo a 5 cm de profundidade, visando antecipação da semeadura de culturas de verão no estado do Rio Grande Do Sul. **Pesquisa por Área Temática**, p. 834, 1999.

MARENGO, José Antonio; SOARES, Wagner Rodrigues. Impacto das modificações da mudança climática: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC. Condições climáticas e recursos hídricos no Norte do Brasil. **Clima e Recursos Hídricos no Brasil. Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, FBMC, ANA. Porto Alegre, Brasil, p.209-233. 2003.

MARENGO, José Antonio *et al.* Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Sumário Técnico. Brasília: MMA, **Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade**, Brasília. 2007.

MARENGO, José Antonio *et al.* The drought of Amazonia in 2005. **Journal of climate**, v. 21, n. 3, p. 495-516, 2008.

MARENGO, José Antonio; CAMARGO, Claudia C. Surface air temperature trends in southern Brazil for 1960–2002. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v.28, n.7, p.893-904. 2008.

MARENGO, José Antonio. Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 23, n. 22, p. 3236-3244, 2009.

MARENGO, José Antonio *et al.* Extreme climatic events in the Amazon basin-climatological and hydrological context of recent floods. **Theoretical Applied Climatology**, v.107, n.1-2, p. 73–85. 2012a.

MARENGO, José Antonio *et al.* Recent extremes of drought and flooding in Amazonia: vulnerabilities and human adaptation. **American Journal of Climate Change**, v.2, n.2, p.87-96, 2013a.

- MARENGO, José Antonio *et al.* Two Contrasting severe seasonal extremes in tropical south America in 2012: Flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013b.
- MARENGO, José Antonio; SOUZA JUNIOR, Carlos. Mudanças climáticas: impactos e cenários para a Amazônia. São Paulo: **ALANA**, 2018.
- MASSARI, Cícero Augusto; JÚNIOR, José Belasque. A campanha de erradicação do cancro cítrico no estado de São Paulo—situação atual e contaminação em viveiros. **Citrus Research & Technology**, v. 27, n. 1, p. 41-55, 2006.
- MATTOS JUNIOR, D. de *et al.* Citros: principais informações e recomendações de cultivo. **Boletim técnico**, v. 200, 2005.
- MEDINA FILHO, Herculano P. *et al.* Resistência de clones e híbridos de porta-enxertos de citros à gomose de tronco causada por *Phytophthora parasitica*. **Fitopatologia Brasileira**, v. 28, n.5, p. 534-540, 2003.
- MEYERS, S. D. *et al.* Interdecadal variability in a numerical model of the northeast Pacific Ocean. 1970–1989, **Journal of Physical Oceanography**, v.26, n.12, p.2635–2652, 1996.
- MORAES, Bergson Cavalcanti de *et al.* Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazonica**. v. 35, n.2, p. 207-214, 2005.
- MOREIRA, Pedro Hugo Oliveira; CUNHA, Alan Cavalcanti da; COSTA, Antônio Carlos Lola da. Índice de tendências climáticas de longo prazo em área urbana na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 06, p. 3378-3393, 2021.
- MOREIRA, Rômulo Carantino Lucena. **Tolerância de mudas de lima ácida ‘Tahiti’ em distintos portaenxertos à salinidade da água**. 2016. 38f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal – PB, 2016.
- NASCIMENTO, Jayne Soares Martins do *et al.* Mudanças no uso da terra na Amazônia Ocidental e a resposta do microclima à ocorrência de eventos extremos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n.1, p. 135-145, 2020.
- NEVES, Marcos Fava; TROMBIN, Vinícius Gustavo; KALAKI, Rafael Bordonal. Peeling back the citrus in Brazil: mapping and quantification of the brazilian citrus chain. **Citrus Research & Technology**, v. 35, n. 2, p. 45-60, 2017.
- NINA, Alex Santiago; SZLAFSZTEIN, Cláudio Fabian. As inundações de 2009 na Amazônia e suas relações com o desenvolvimento sustentável: impactos ao produto interno bruto municipal. **Geographia**, v. 20, n. 43, p. 101-123, 2018.
- NOBRE, Carlos A.; SELLERS, Piers J.; SHUKLA, Jagadish. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v. 4, n. 10, p. 957-988, 1991.
- NOBRE, Paulo; SHUKLA, John. Variations of SST, Wind stress and rainfall over the tropical atlantic and south America. **Journal of Climate**, v.9, n.10, p.2464-2479, 1996. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2).
- NÓBREGA, Ranyére Silva; SANTIAGO, Gabriela Ayane Felipe Chagas. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no nordeste do Brasil. **Revista de Geografia Norte Grande**, n. 63, p. 9-26, 2016.
- RESTAURAÇÃO FLORESTAL POR AGRICULTORES FAMILIARES NO LESTE DA AMAZÔNIA. **Projetos**, UFPA. Belém. 2019.

RESENDE, Ronaldo Souza. Aspectos da irrigação em citros. *In*: MELO, M.B.; SILVA, L.M.S. (org.). **Aspectos técnicos dos aspectos técnicos dos aspectos técnicos dos citros em Sergipe**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2006. p.51-60.

RIBEIRO, Sydney Itauran; SILVA, Eliana Gomes da; RIBEIRO, N. S. V. Desempenho de laranjeiras em Capitão Poço, PA. **Boletim de pesquisas e desenvolvimento**, Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 57. Versão eletrônica. 1ª impressão: 2006. 16p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/889558/desempenho-de-laranjeiras-em-capitao-poco-pa>. Acesso em: 02 de mar. de 2020.

RODRIGUES, J.; SZLAFSZTEIN, C. **Caracterização do meio rural no município de Alenquer no contexto de Mudanças Climáticas**. Relatório preparado para o projeto Calha Norte, ITT/Iniciativa Amazônica, UFPA, Belém, 2009.

SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; MELO, Maria Monalisa M. S.; BRITO, José Ivaldo Barbosa de. Tendências de índices de extremos climáticos para o Estado do Amazonas e suas relações com a TSM dos oceanos tropicais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n.1, p. 1-10, 2016.

SANTOS JÚNIOR, Jorge Copquer; FRIZZONE, Jose Antonio; PAZ, Vital Pedro da Silva. Otimização do uso da água no Perímetro Irrigado Formoso aplicando lâminas máximas de água. **Irriga**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 196-206, 2014.

SERRÃO, Edivaldo Afonso de Oliveira; SANTOS, Cleber Assis dos; LIMA, Aline Maria Meiguins de. Avaliação da seca de 2005 na Amazônia: uma análise da calha do rio Solimões. **Estação Científica (UNIFAP)**, Macapá, v. 4, n. 2, p. 99-109, 2014.

SHAFQAT, Waqar *et al.* Heat shock protein and aquaporin expression enhance water conserving behavior of citrus under water deficits and high temperature conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 181, e104270, 2021.

SILVA, Amanda Catarine Ribeiro *et al.* Estudo da produção de laranja: detecção de características regionais com modelos de shift-share e derivada na região norte. **Revista Agroecossistemas**, v. 9, n. 2, p. 164-183, 2018.

SILVA, Djane Fonseca da *et al.* Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 449-464, 2020.

SILVA JUNIOR, Orleno Marques da. **Análise de Risco a Inundação na Cidade de Alenquer - estado do Pará**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geografia do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SINGH, Jagveer *et al.* Horticultural classification of citrus cultivars. *In*: KHAN, Muhammad Sarwar; KHAN, Iqrar Ahmad (ed.). **Citrus Research, Development and Biotechnology**. [S.l.: IntechOpen], 2021. cap. 2.

SIQUEIRA, Dalmo Lopes; SALOMÃO, Luiz Carlos Chamhum. Efeitos do paclobutrazol no crescimento e florescimento dos citros. **Laranja**, v. 23, n. 2, p. 355-369, 2002.

SIQUEIRA, Dalmo Lopes de; SALOMÃO, Luiz Carlos Chamhum. **Citros do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV. 2017.

SISTEMA NACIONAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL. Ministério do desenvolvimento regional. **Arquivos Digitais de desastres**. Disponível em: <https://s2id-search.labtrans.ufsc.br/>. Acesso em: 02 mar. 2020.

- SOUTO, Jefferson Inayan *et al.* Padrões temporais da precipitação e variabilidade da vegetação sobre a bacia do rio Iriiri em anos de ocorrência do El Niño Oscilação Sul (Temporal patterns of precipitation and vegetation variability over Iriiri River basin during El Niño/Southern Oscillation). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 789-800, 2019.
- SOUZA, Everaldo Barreiros de; ROCHA, Edson J. P. Climatologia, Variabilidade e tendências do clima atual na Amazônia e em cenários futuros de mudanças climáticas. *In*: VIEIRA, Ima Célia Guimarães; TOLEDO, Peter Mann de; SANTOS JÚNIOR, Roberto Araújo Oliveira (org.). **Ambiente e Sociedade na Amazônia**. Rio de Janeiro: Garamond. 2014. cap.2. p. 295 – 312.
- SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo REGCM4. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 293–306. 2016. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43711>.
- SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 81-93. 2017.
- SOUZA, Everaldo Barreiros de; KAYANO, Mary Toshie; AMBRIZZI, Tércio. The regional precipitation over the eastern amazon/northeast Brazil modulated by tropical pacific and atlantic SST anomalies on weekly timescale. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.3, p.325-336, 2004.
- SOUZA, Everaldo Barreiros de; KAYANO, Mary Toshie; AMBRIZZI, Tércio. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and northeast Brazil during the autumn Rainy Season. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 81, n. 3, p. 177-191, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0081-4>
- SOUZA, Fernanda Luiza de. **Variabilidade genética do fungo *Erythricium salmonicolor*, agente causal da rubelose dos citros**. 2006. 56f. Dissertação (Mestre em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2006.
- SOUZA, Maria José Hatem de. **Análises do manejo de água, graus-dia, radiação interceptada e produtividade na lima ácida ‘Tahiti’**. 2001. 110f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Federal de Viçosa, Viçosa -MG, 2001.
- SU, Jingzhi *et al.* Sea surface temperature in the subtropical Pacific boosted the 2015 El Niño and hindered the 2016 La Niña. **Journal of Climate**, v. 31, n. 2, p. 877-893, 2018.
- TAKAHASHI, Ken *et al.* ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. **Geophysical research letters**, v. 38, n. 10, L10704. 2011.
- TRENBERTH, Kevin E.; HOAR, Timothy J. The 1990–1995 El Niño-southern oscillation event: longest on record. **Geophysical research letters**, v. 23, n. 1, p. 57-60. 1996.
- UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. **Global assessment report on disaster risk reduction: risk and poverty in a changing climate**. Geneva, Switzerland: UNISDR, 2009.
- VANELLA, Daniela *et al.* Suitability of the MODIS-NDVI time-series for a posteriori evaluation of the *Citrus* tristeza virus epidemic. **Remote Sensing**, v.12, n.12, e1965. 2020.
- VICTORIA, R. L. *et al.* Surface air temperature variations in the Amazon region and its borders during this century. **Journal of Climate**, v.11, n.5, p.1105-1110. 1998.
- WU, Guohong Albert *et al.* Genomics of the origin and evolution of *Citrus*. **Nature**, v. 554, n. 7692, p. 311-316, 2018. <https://doi.org/10.1038/nature25447>.

XIN, Ye *et al.* Molecular mechanisms for magnesium-deficiency-induced leaf vein lignification, enlargement and cracking in *Citrus sinensis* revealed by RNA-Seq. **Tree Physiology**, v.41, n.2, p.280–301. 2021.

YILDIRIM, Tugba; ASIK, Serafettin. Index-based assessment of agricultural drought using remote sensing in the semi-arid region of Western Turkey. **Journal of Agricultural Sciences**, v. 24, n. 4, p. 510-516, 2018.

YUHENG, Wang *et al.* Mitigating magnesium deficiency for sustainable citrus production: A case study in southwest China. **Scientia Horticulturae**, n. 295, e110832. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110832>

ZHANG, Chao; LUO, Jing-Jia; LI, Shuanglin. Impacts of tropical Indian and Atlantic Ocean warming on the occurrence of the 2017/2018 La Niña. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 6, p. 3435-3445, 2019.

ZHONG, Guangyan; NICOLOSI, Elisabetta. *Citrus* origin, diffusion, and economic importance. In: GENTILE, Alessandra; LA MALFA, S.; DENG, Z. (ed). **The Citrus Genome**. [S.l.: Springer Nature], 2020. p. 5-21.



## APÊNDICE A- FIGURAS

Mudanças nas áreas de aptidão dos cítricos nos anos de 2040, 2060, 2080 e 2100 sob os cenários dos SSPs (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 e 5-8.5) em comparação com o clima atual.

