

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



TESE DE DOUTORADO

Mariana da Silva de Siqueira

**Índices de extremos climáticos de precipitação pluvial
e temperatura do ar na região do MATOPIBA-Brasil**

Campina grande, dezembro de 2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

TESE

**ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIAL
E TEMPERATURA DO AR NA REGIÃO DO MATOPIBA-BRASIL**

MARIANA DA SILVA DE SIQUEIRA

CAMPINA GRANDE - PB

DEZEMBRO, 2024

MARIANA DA SILVA DE SIQUEIRA

**ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIAL
E TEMPERATURA DO AR NA REGIÃO DO MATOPIBA-BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, seguindo às exigências para obtenção do título de Doutora em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Madson Tavares Silva

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Climatologia

CAMPINA GRANDE - PB

DEZEMBRO, 2024

S618i

Siqueira, Mariana da Silva de.

Índices de extremos climáticos de precipitação pluvial e temperatura do ar na região do MATOPIBA-Brasil / Mariana da Silva de Siqueira. – Campina Grande, 2025.

151 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva".

Referências.

1. Mudanças Climáticas – Região do MATOPIBA-Brasil. 2. Análises de Tendências. 3. Software RClmDex. 4. Índice de Vulnerabilidade. I. Silva, Madson Tavares. II. Título.

CDU 551.583(043)

MARIANA DA SILVA DE SIQUEIRA

ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIAL E
TEMPERATURA DO AR NA REGIÃO DO MATOPIBA-BRASIL

TESE APROVADA EM 05/12/2024

BANCA EXAMINADORA



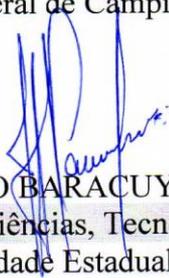
Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



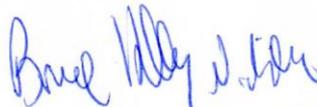
Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Dr. DIMAS DE BARROS SANTIAGO
Programa Nacional de Pós-Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOÃO HUGO BARACUY DA CUNHA CAMPOS
Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde
Universidade Estadual da Paraíba



Dr. BRUCE KELLY DA NOBREGA SILVA
Instituto Nacional do Semiárido
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

A minha mãe Maria Braidá, meu pai Gilvan e meus irmãos Gilliard, Genilson e Gessica, que sempre estiveram ao meu lado, bem como meus amigos. Com muito carinho,

Dedico

A todos os vovôs e vovós, em especial a Josefa Possidônea (minha mãe Zefa) e a Manoel André, Iracema Ussula e Antônio Galdino em memória, meus queridos avós,

Ofereço

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela confiança em todas as minhas decisões e principalmente por contribuírem com amor e compreensão. Aos meus irmãos, pelo amor e amizade que nos une, agradeço a companhia e a forma carinhosa com que compartilhamos nosso tempo.

Ao professor Madson pela disponibilidade de orientação, incentivo, ensinamentos, e principalmente pela paciência e compreensão.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Meteorologia, por todos os ensinamentos, contribuição fundamental em todo conhecimento adquirido durante a vida acadêmica.

Aos funcionários, em especial a secretária Arilene e Dannilo pela paciência, solidariedade, dedicação, orientação e respeito.

Aos amigos por proporcionarem experiências e aprendizados inesquecíveis. Em especial agradeço a Gabriella, Lívia e Welinágila, pelos momentos de emoções e companheirismo.

A Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela estrutura cedida e também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo financeiro ao estudo.

Aos membros da banca examinadora por toda contribuição para correção deste trabalho.

RESUMO

A região denominada MATOPIBA cuja expressão, criada a partir das iniciais dos respectivos estados componentes (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) apresenta áreas favoráveis à produção agrícola e pecuária. Os efeitos da intensificação da expansão da agropecuária sobre o meio ambiente nessa região, possivelmente, implicarão em um futuro fortemente marcado por mudanças climáticas e comprometimento da sustentabilidade de recursos naturais, dessa forma contribuindo para conflitos socioambientais. Este estudo tem como objetivo avaliar impactos potenciais das mudanças climáticas nas características de índices de extremos de precipitação pluvial e temperaturas do ar máximas e mínimas na região do MATOPIBA - Brasil, considerando cenários climáticos passados e futuros, assim como riscos agrícola e hídrico associados a mudanças climáticas. As variáveis climáticas temperatura e precipitação se destacam em estudos de análises detalhadas de causas e efeitos de mudanças climáticas. Índices climáticos extremos que são baseados nessas variáveis permitem compreender as mudanças observadas nos extremos climáticos que afetam muitos sistemas humanos e naturais e suas projeções futuras. Dessa forma, foram obtidos índices de extremos climáticos e tendências usando o software RCLimDex, assim como foi aplicada a análise de agrupamento aos valores máximos do índice simples de intensidade diária de precipitação – SDII, obtidos para o período de 1950 a 2004, como intuito de classificar regiões homogêneas, já que a obtenção de índices de extremos climáticos por regiões homogêneas permitirá a compreensão da distribuição espacial para uma quantidade menor de dados sem perdas significativas de informações. Pode-se constatar que os resultados dos índices por regiões homogêneas, se mostraram representativos em relação aos valores obtidos por microrregiões. Considerando os resultados dos índices para série histórica foi aplicada análise fatorial neste estudo, a qual revelou-se uma técnica estatística poderosa para avaliação de vulnerabilidade, por meio desta foi possível identificar áreas vulneráveis as mudanças climáticas na região, assim como definir um índice de vulnerabilidade climática, considerando os resultados obtidos. A análise de índices de extremos climáticos também foi abordada considerando projeções climáticas de cenários do Quinto Relatório do IPCC, para cada região resultante da análise de agrupamento com a finalidade de identificação de possíveis impactos de mudanças climáticas nas características dos índices de detecção de extremos climáticos.

Palavras-chave: Análise de tendências. Mudanças climáticas. RCLimdex. Agrupamento. Índice de vulnerabilidade.

ABSTRACT

The region called MATOPIBA whose expression, created from the initials of the respective component states (Maranhão, Tocantins, Piauí and Bahia) presents areas favorable to agricultural and livestock production. The effects of the intensification of the expansion of agriculture on the environment in this region will possibly imply a future strongly marked by climate change and compromising the sustainability of natural resources, thus contributing to socio-environmental conflicts. This study aims to evaluate potential impacts of climate change on the characteristics of extreme rainfall indices and maximum and minimum air temperatures in the MATOPIBA region - Brazil, considering past and future climate scenarios, as well as agricultural and water risks associated with climate change. The climatic variables temperature and precipitation stand out in studies of detailed analyses of causes and effects of climate change. Extreme weather indices that are based on these variables allow us to understand the observed changes in weather extremes that affect many human and natural systems and their future projections. Thus, indices of climatic extremes and trends were obtained using the RCLimDex software, as well as cluster analysis was applied to the maximum values of the simple index of daily precipitation intensity - SDII, obtained for the period from 1950 to 2004, in order to classify homogeneous regions, since obtaining indices of climatic extremes by homogeneous regions will allow the understanding of the spatial distribution for a smaller amount of data without significant loss of information. It can be seen that the results of the indices by homogeneous regions were representative in relation to the values obtained by micro-regions. Considering the results of the indices for the historical series, factor analysis was applied in this study, which proved to be a powerful statistical technique for assessing vulnerability, through which it was possible to identify areas vulnerable to climate change in the region, as well as to define a climate vulnerability index, considering the results obtained. The analysis of climate extremes indices was also addressed considering climate projections of scenarios from the Fifth Report of the IPCC, for each region resulting from the cluster analysis with the purpose of identifying possible impacts of climate change on the characteristics of the indices of detection of climatic extremes.

Keywords: Trend analysis. Climate change. RCLimdex. Grouping. Vulnerability index.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Etapas de execução da pesquisa. 30

CAPÍTULO 2

Figura 1. Mapa do Brasil com destaque da área de estudo (região do MATOPIBA). 46

Figura 2. Distribuição espacial dos pontos de grade para área de estudo (região do MATOPIBA). 49

Figura 3. Distribuição da porcentagem de microrregiões com tendências significativas ao nível de 5% ($p < 0,05$), não significativas e ausência de tendências para os índices precipitação pluvial para a região do MATOPIBA. 57

Figura 4. Distribuição da porcentagem de microrregiões com tendências significativas ao nível de 5% ($p < 0,05$), não significativas e ausência de tendências para os índices de temperatura do ar para a região do MATOPIBA. 62

Figura 5. Distribuição espacial das regiões homogêneas obtidas usando análise de agrupamento com base nos valores máximos do SDII para a região do MATOPIBA. 64

CAPÍTULO 3

Figura 1. Mapa do Brasil com destaque da área de estudo e da distribuição espacial dos pontos de grade (região do MATOPIBA). 78

Figura 2. Scree plot - Curva da variância individual de cada fator. 88

Figura 3. Distribuição da combinação linear dos escores fatoriais padronizados de cada fator principal por microrregiões e a proporção da variância explicada por cada fator em relação à variância dos fatores comuns que descrevem os índices de extremos climáticos da área de estudo por microrregiões. 93

Figura 4. Classificação das microrregiões segundo o Índice de Vulnerabilidade Climática (IVC) na região do MATOPIBA. 95

CAPÍTULO 4

Figura 1. Localização da área de estudo (região do MATOPIBA). 107

Figura 2. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices SDII, R10 mm, R20 mm e R25 mm para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099). 113

Figura 3. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices CDD, CWD e PRCPTOT para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099). 116

Figura 4. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices RX1day, RX5day, R95p e R99p para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).	118
Figura 5. Variabilidade temporal dos índices intensidade de precipitação diária simples -SDII, precipitação intensa - R10mm e precipitação muito intensa R20mm e R25 mm para o período de 1950 a 2099.	123
Figura 6. Variabilidade temporal dos índices de dias secos consecutivos anuais - CDD, de dias úmidos consecutivos anuais - CWD e precipitação total anual PRCPTOT para o período de 1950 a 2099.	125
Figura 7. Variabilidade temporal dos índices de maior volume anual de precipitação acumulado em 1 dia (Rx5Day) e em 5 dias (Rx5Day), de precipitação total anual em dias com chuva acima do percentil 95 (R95p) e do percentil 99 (R99p) para o período de 1950 a 2099.	127
Figura 8. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices TXx, TNx, TXn e TNn para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).	130
Figura 9. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices TX10p, TX90p, TN10p e TN90p para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).	132
Figura 10. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices SU, TR, WSDI e DTR para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).	133
Figura 11. Variabilidade temporal dos índices valor máximo da temperatura máxima diária – TXx, e da temperatura mínima (TNx) e dos índices valor mínimo da temperatura máxima diária – TXn, e da temperatura mínima (TNn) para o período de 1950 a 2099.	138
Figura 12. Variabilidade temporal dos índices de dias frios - TX10p, dias quentes - TX90p, noites frias - TN10p e noites quentes - TN90p, para o período de 1950 a 2099.	140
Figura 13. Variabilidade temporal dos índices de extremos climáticos dias de verão - SU, noites tropicais - TR, duração do período de calor - WSDI e faixa de temperatura diurna - DTR, para o período de 1950 a 2099.	142

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Índices de extremos climáticos do Rclimindex referentes à precipitação pluvial e à temperatura do ar utilizados neste estudo.....	51
Tabela 2. Tendências anuais dos índices extremos de precipitação pluvial para as microrregiões do MATOPIBA.	55
Tabela 3. Tendências anuais dos índices extremos de temperatura do ar para as microrregiões do MATOPIBA.	59
Tabela 4. Tendências anuais dos índices extremos de precipitação pluvial por regiões homogêneas para a região do MATOPIBA.....	66
Tabela 5. Tendências anuais dos índices extremos de temperatura do ar por regiões homogêneas para a região do MATOPIBA.....	66

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Índices de extremos climáticos do Rclimindex referentes à precipitação pluvial e à temperatura do ar utilizados neste estudo.....	81
Tabela 2. Estatística do teste Kaiser Meyer Olkin – KMO para adequação da amostra.	87
Tabela 3. Variância total explicada pelos fatores na definição das dimensões, antes e após a rotação VARIMAX.	89
Tabela 4. Cargas fatoriais após a rotação e comunalidades dos indicadores.	90

CAPÍTULO 4

Tabela 1. Variação das projeções para o período de 2005-2099 em comparação ao período de base de 1950-2004 dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial por regiões homogêneas para a área do MATOPIBA.....	112
Tabela 2. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G1 da área do MATOPIBA.	120
Tabela 3. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G2 da área do MATOPIBA.	120
Tabela 4. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G3 da área do MATOPIBA.	121
Tabela 5. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G4 da área do MATOPIBA.	121
Tabela 6. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G5 da área do MATOPIBA.	122

Tabela 7. Variação das projeções para o período de 2005-2099 em comparação ao período de base de 1950-2004 dos índices de extremos climáticos de temperatura do ar por regiões homogêneas para a área do MATOPIBA	129
Tabela 8. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G1 da área do MATOPIBA. .	134
Tabela 9. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G2 da área do MATOPIBA. .	135
Tabela 10. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G3 da área do MATOPIBA. .	135
Tabela 11. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G4 da área do MATOPIBA. .	136
Tabela 12. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G5 da área do MATOPIBA. .	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Análise de agrupamento
ACP	Análise de Componentes Principais
AF	Análise Fatorial
BA	Bahia
CCI/CLIVAR	International Research Programme on Climate Variability and Predictability
CDD	Duração máxima do período de seca: número máximo de dias consecutivos com precipitação diária < 1 mm
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project fase 5
CP	Componentes Principais
CRU	Climatic Research Unit
CWD	Duração máxima do período de chuva: número máximo de dias consecutivos com precipitação diária ≥ 1 mm
DTR	Faixa de temperatura diária: diferença média mensal entre TX e TN
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ES	Earth System
ESS	soma dos quadrados do erro
ETCCDMI	Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices
GCMs	Global Climate Models
GEE	Gases de Efeito Estufa
GITE	Grupo de Inteligência Territorial Estratégica
HadGEM2-ES	The Hadley Global Environmental Model version 2
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IVC	Índice de Vulnerabilidade Climática
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
MA	Maranhão
MCGs	Global Climate Models
PI	Piauí
PRCPTOT	Precipitação total anual em dias úmidos
R10mm	Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 10 mm
R20mm	Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 20 mm

R25mm	Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 25 mm
R95p	Precipitação total anual quando a precipitação diária $> 95^{\circ}$ percentil
R99p	Precipitação total anual quando a precipitação diária $> 99^{\circ}$ percentil
RCPs	Representative Concentration Pathways
RX1day	Precipitação máxima mensal de 1 dia
RX5day	Precipitação máxima mensal consecutiva de 5 dias
SDII	Precipitação média para dias com chuva ≥ 1 mm
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SREX	Relatório Especial Sobre Extremos
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SSPs	Shared Socioeconomic Pathways
SU	Número de dias quando TX (temperatura máxima diária) > 25 °C
TN10p	Porcentagem de dias quando TN $<$ percentil 10 (noites frias)
TN90p	Porcentagem de dias quando TN $>$ percentil 90 (noites quentes)
TNn	Valor mínimo mensal de temperatura mínima diária
TNx	Valor máximo mensal da temperatura mínima diária
TO	Tocantins
TR	Número de dias quando TN (temperatura mínima diária) > 20 °C
TS	Time-series
TX10p	Porcentagem de dias quando TX $<$ percentil 10 (dias frios)
TX90p	Porcentagem de dias quando TX $>$ percentil 90 (dias quentes)
TXn	Valor mínimo mensal de temperatura máxima diária
TXx	Valor máximo mensal da temperatura máxima diária
WCRP	World Climate Research Programme
WGI	Working Group I
WSDI	Índice de duração do período de aquecimento: contagem anual de dias com pelo menos 6 dias consecutivos quando TX $>$ percentil 90

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	14
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. JUSTIFICATIVA	16
3. OBJETIVOS.....	18
3.1 Objetivo geral	18
3.2 Objetivos específicos	18
4. REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1 Variabilidade climática e mudanças climáticas	19
4.2 Projeções climáticas, modelos e cenários climáticos.....	20
4.3 Eventos climáticos extremos	23
4.4 Índices de detecção de mudanças climáticas	25
4.5 Análises de séries temporais em estudos climáticos.....	26
4.6 Análise multivariada	28
5. ESTRUTURA.....	29
6. REFERÊNCIAS	31
CAPÍTULO 2	42
1. INTRODUÇÃO.....	44
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	46
2.1 Área de estudo	46
2.2 Dados	48
2.3 Índices de extremos climáticos	50
2.4 Análise hierárquica de agrupamento.....	52
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1 Índices de extremos de precipitação pluvial	54
3.2 Índices de extremos de temperatura do ar	58
3.3 Distribuição espacial das regiões homogêneas - SDII.....	63
3.4 Índices de tendências de extremos climáticos por regiões homogêneas.....	65
4. CONCLUSÕES	67
5. REFERÊNCIAS	68
CAPÍTULO 3	74
1. INTRODUÇÃO.....	76
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	78
2.1 Área de estudo	78

2.2 Dados	79
2.3 Índices de extremos climáticos	80
2.4 Análise Fatorial	81
2.5 Índice de Vulnerabilidade Climática (IVC)	85
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
3.1 Análise Fatorial	86
3.2 Análise do Índice de Vulnerabilidade Climática	92
4. CONCLUSÕES	96
5. REFERÊNCIAS	97
CAPÍTULO 4	103
1. INTRODUÇÃO	105
2. MATERIAL E MÉTODOS	107
2.1 Área de estudo	107
2.2 Dados	108
2.3 Índices de extremos climáticos	109
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
3.1 Índices de extremos de precipitação pluvial	111
3.1.1 Cenários climáticos futuros	111
3.1.2 Variabilidade temporal	119
3.2 Índices de extremos de temperatura do ar	128
3.2.1 Cenários climáticos futuros	128
3.2.2 Variabilidade temporal	134
4. CONCLUSÕES	144
5. REFERÊNCIAS	145
CAPÍTULO 5	151
CONCLUSÕES GERAIS	151

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A expressão MATOPIBA, criada a partir das iniciais dos respectivos estados componentes (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), serve para designar parte do território desses estados pertencentes ao bioma Cerrado (PEREIRA et al., 2018). O cerrado tornou-se o eixo de expansão agrícola intensiva na década 1980 no Brasil e região estratégica na incorporação de novas áreas por características que permitiram a expansão da produção nos padrões da agricultura moderna (COLUSSI, 2017). Algo extremamente preocupante face às mudanças climáticas globais, à erosão da biodiversidade e à questão hídrica.

Dessa forma o aumento da pressão sobre os recursos hídricos da região a longo prazo, principalmente sob cenários de mudanças climáticas, poderá comprometer a sustentabilidade desses recursos, assim como contribuir para conflitos socioambientais (SILVA, 2018; FAVARETO et al., 2019). Eventos climáticos extremos como inundações e secas são resultados de condições meteorológicas e hidrológicas extremas, podendo ser associados às mudanças climáticas, assim como consequências das atividades humanas (BAIDYA et al., 2008; SINGH e SINGH, 2012). Índices climáticos extremos que são baseados em medidas diárias de temperatura e precipitação vêm sendo utilizados, em diversos estudos que buscam compreender as mudanças observadas nos extremos climáticos e suas projeções futuras (ALEXANDER e ARBLASTER, 2017).

Eventos extremos de precipitação podem causar desastres naturais tais como inundações, sobrecarregar os recursos hídricos, danificar a infraestrutura, seus padrões de variação podem afetar o desenvolvimento da agricultura e pecuária, o abastecimento público e industrial de água, a geração de energia hidrelétrica, deslocar comunidades e destruir vidas humanas (ABIODUN et al., 2017; RAFEE et al., 2020). A precipitação é considerada uma das variáveis mais importantes nos campos da hidrologia, meteorologia e clima. Mudanças na precipitação têm implicações no ciclo hidrológico e nos recursos hídricos (COSTA et al., 2020).

A temperatura extrema é uma ameaça nos países em desenvolvimento para vários setores: ecossistemas, agricultura, transporte, recursos hídricos, energia e saúde humana (ABATAN et al., 2016). Eventos de temperatura relacionados ao clima podem afetar os planos de desenvolvimento nacional de um país e atrasar as estratégias de metas de desenvolvimento sustentável (ABBASNIA e TOROS, 2018).

Segundo Natividade et al. (2017), tais eventos motivam a comunidade acadêmica a buscar explicações mais contundentes acerca de fenômenos que ocorrem hoje e podem ocorrer no futuro em função das mudanças nas características climáticas no Brasil e no mundo. No contexto de mudanças climáticas, os índices extremos climáticos são projetados para representar alguns dos desafios mais críticos para os limites fisiológicos humanos, social de infraestrutura, e do ambiente natural (DUNN et al., 2020).

Portanto, compreender e identificar o comportamento espacial e temporal dessas mudanças, nas variáveis precipitação e temperatura é relevante para oferecer subsídios aos formuladores de políticas, no intuito de melhorar o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos, alertando para os aumentos ou reduções de extremos climáticos, para que ações de prevenção e mitigação sejam tomadas (RAFEE et al., 2020). Índices climáticos podem ser utilizados para avaliação de eventos climáticos extremos que afetaram uma determinada região no passado, buscando compreender possíveis mudanças observadas nos extremos climáticos e suas projeções futuras usando simulações de modelos climáticos (ALEXANDER e ARBLASTER, 2017).

Alves et al. (2013) destacam que estudos observacionais de extremos climáticos são limitados pelas dificuldades de obtenção de séries temporais longas e homogêneas de dados climáticos capazes de registrar a ocorrência frequente de extremos. Embora haja diferenças entre dados observados e dados de reanálises estes estão entre os conjuntos de dados mais usados no estudo do tempo e do clima, fornecendo informações instantâneas e abrangentes das condições climáticas em intervalos regulares durante longos períodos (PARKER, 2016; LIMBERGER e SILVA, 2018).

Eventos extremos de clima têm se tornado cada vez mais comuns em diferentes regiões da América do Sul (NATIVIDADE et al., 2017). Índices de extremos climáticos têm sido utilizados em diversos estudos para América do Sul (HAYLOCK et al., 2006; SKANSI et al., 2013; MARRAFON e REBOITA, 2020) e em diferentes áreas do Brasil (SALVADOR, 2014; SILVA et al, 2017; SALVADOR e BRITO, 2017; BEZERRA et al., 2018; ZHU e TROY, 2018; BRITO et al., 2019; AVILA-DIAZ et al., 2020; COSTA et al., 2020; REIS, 2020).

2. JUSTIFICATIVA

Delimitada a oeste pela Amazônia Legal e a leste pelo semiárido nordestino (SALVADOR e BRITO, 2017), a região do MATOPIBA apresenta áreas favoráveis à produção agrícola e pecuária (GARCIA e VIEIRA FILHO, 2018), onde se desenvolve agricultura de alta produtividade com uso intensivo de insumos modernos (PEREIRA et al., 2018). A expansão agrícola deve-se dentre outros às boas condições edafoclimáticas locais para a produção de grãos, tais como, relevo que favorece a mecanização da produção e clima que apresenta períodos bem definidos, entre secos e chuvosos (PEREIRA et al., 2018) GARCIA e VIEIRA FILHO, 2018).

Estudos anteriores avaliaram índices de eventos extremos climáticos para a região do MATOPIBA e para áreas que contemplam porções inseridas na região (SALVADOR e BRITO, 2017; COSTA et al. 2020; REIS, 2020; SANTOS et al., 2020). O trabalho de Reis (2020) além de destacar-se com a caracterização da região do MATOPIBA de acordo com áreas de precipitação homogênea, obtenção de índices extremos climáticos de temperatura do ar e precipitação pluvial para cada sub-região homogênea, inclui a variabilidade dos elementos climáticos em cenários meteorológicos distintos.

Essa região vem passando por intensas transformações em seus aspectos socioeconômicos e ambientais. Em consequência da expansão da agricultura, o crescimento urbano foi impulsionado pelo forte aumento da população impactando em mudanças no uso do solo (PEREIRA et al., 2018). As alterações climáticas estão se tornando amplamente reconhecidas como um dos principais problemas ambientais do século XXI que o mundo enfrenta (VAGHEFI et al., 2017). Informações de mudanças ambientais e climáticas que ocorreram no passado e descritas em relatos históricos, como as incluem evidências escritas e arqueológicas de cidades que floresceram e depois desapareceram, (HARTMANN, 2015) são úteis para contextualizar as variações recentes quanto ao clima para a região do MATOPIBA.

Éfeso, cidade da Grécia Antiga onde hoje é a Turquia, passou por mudanças climáticas, impulsionadas por forças naturais ou humanas, durante o quarto século a.C. Éfeso era uma grande potência econômica e um centro de aprendizagem, com um porto importante e uma agricultura local próspera, durante seu desenvolvimento suas colinas circundantes cobertas de carvalhos à medida que a cidade crescia, foram desmatadas e destinadas a pastagens e ao cultivo de trigo. Ao mesmo tempo, o clima parece ter-se tornado mais árido. A combinação das mudanças no uso da terra e no clima levou ao desaparecimento da cidade (HARTMANN, 2015).

Os efeitos da intensificação da expansão da agropecuária sobre o meio ambiente na região do MATOPIBA, possivelmente, implicarão em um futuro fortemente marcado pelas mudanças climáticas, por certa escassez de alguns valiosos recursos disponíveis no local, como a água, a terra e a biodiversidade e por conflitos socioambientais (FAVARETO et al., 2019). Salvador e Brito (2017) verificaram em seu estudo para o período de 1970 a 2012, que a região MATOPIBA sofreu um processo de aquecimento significativo nas últimas décadas, indicando principalmente aumento na frequência de dias quentes. Assim atribuíram a esse aquecimento relações diretas com o processo de mudança ambiental e com o crescimento socioeconômico impulsionados pela expansão do agronegócio, já que provocaram mudanças relativamente significativas nas características climáticas do entorno das estações meteorológicas avaliadas.

Strassburg et al. (2017) destacam que a conservação e restauração do Cerrado são medidas importantes para a mitigação das mudanças climáticas, podendo se tornarem indispensáveis caso a adaptação às mudanças climáticas seja considerada, dada a relevância estratégica das bacias hidrográficas do Cerrado para a segurança hídrica e energética do Brasil. As mudanças climáticas podem levar a modificações na frequência, intensidade, extensão espacial, duração e período de ocorrência de fenômenos meteorológicos extremos e climáticos e pode resultar em eventos climáticos extremos sem precedentes (COSTA et al., 2020).

Tanto a compreensão do comportamento dos extremos de precipitação e temperatura quanto a melhoria do desempenho dos modelos globais na previsão de cenários futuros são questões de grande importância nas ciências ambientais modernas (RAFEE et al., 2020). Estudos de extremos climáticos de temperatura e precipitação permitem uma análise detalhada da variabilidade espacial e temporal dos extremos, bem como os tipos de extremos mais importantes para cada região (POWELL e KEIM, 2015). Isso pode fornecer dados para equilibrar os imperativos sociais e econômicos com as preocupações em face da variabilidade e mudanças climáticas (DAD et al., 2021). Tendo em vista que as mudanças climáticas podem acarretar impactos significativos nos setores natural, social e econômico (COSTA et al., 2020).

Portanto, avaliar o comportamento espacial e temporal de variáveis meteorológicas como temperatura do ar e precipitação pluvial e das mudanças climáticas na região do MATOPIBA, permitirá obter informações relevantes para compreensão geral dos eventos extremos climáticos passados e futuros na região, fornecendo subsídios aos gestores de políticas públicas, no sentido de melhorar o planejamento e gestão sustentável dos recursos naturais, adotando estratégias de mitigação adequadas para a área, objetivando identificar regiões que possam sofrer aumentos ou reduções na frequência e intensidade dos eventos.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar possíveis impactos potenciais das mudanças climáticas nas características de índices de extremos de precipitação pluvial e temperaturas do ar máximas e mínimas na região do MATOPIBA - Brasil, considerando cenários climáticos passados e futuros, assim como riscos agrícola e hídrico associados a mudanças climáticas.

3.2 Objetivos específicos

- Obter índices de extremos climáticos de precipitação pluvial e temperaturas máximas e mínimas do ar;
- Verificar possíveis tendências anuais nos extremos de temperaturas do ar máximas e mínimas e precipitação pluvial de 1950 a 2004 para a região do MATOPIBA;
- Determinar regiões homogêneas da intensidade diária de precipitação - SDII utilizado a análise agrupamento, no período de 1950 a 2004;
- A partir de técnicas de análise multivariada pretende-se verificar a existência de padrões entre as correlações dos indicadores de extremos climáticos de precipitação pluvial e temperaturas máximas e mínimas do ar, assim como definir um índice de vulnerabilidade climática, considerando os resultados obtidos por meio da AF;
- Analisar índices de extremos de precipitação pluvial e temperaturas máximas e mínimas do ar para cenários climáticos futuros do *Coupled Model Intercomparison Project fase 5 - CMIP5*;

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Variabilidade climática e mudanças climáticas

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC) usa o termo Mudança Climática para definir mudanças de clima no tempo, seja devido à variabilidade natural e/ou resultado das atividades humanas e o termo variabilidade climática para as variações de clima em função dos condicionantes naturais do planeta e suas interações (IPCC, 2001; IPCC, 2007a). Quaisquer mudanças no clima induzidas pelo homem ocorrerão no contexto de variações climáticas naturais (SINGH e SINGH, 2012).

Há evidências de que, regionalmente, podem ocorrer mudanças climáticas relativamente repentinas (IPCC, 1992). Impactos de extremos, como ondas de calor, secas, inundações, ciclones e incêndios florestais, vêm sendo associados as alterações no clima e revelam vulnerabilidade e exposição significativa as de alguns ecossistemas e muitos sistemas humanos à variabilidade climática (IPCC, 2014). Embora, em geral, seja difícil avaliar a probabilidade de ocorrência de eventos climáticos abruptos, eles são eventos fisicamente plausíveis e significativamente importantes já que podem causar grandes impactos nos ecossistemas e sociedades até mesmo irreversíveis (COLLINS et al., 2019).

O Quinto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (WGII AR5) apresenta a avaliação de impactos, adaptação e vulnerabilidade, analisa como os padrões de riscos e potenciais benefícios estão se tornando inconstantes com a mudança global do clima. O relatório considera como os impactos e riscos relacionados à mudança do clima podem ser reduzidos e gerenciados por meio de atividades de adaptação e mitigação (IPCC, 2014).

Sendo assim, as mudanças climáticas têm sido avaliadas amplamente por diversos grupos de pesquisas e organizações que destacam a necessidade de identificar possíveis alterações na variabilidade natural do clima e a importância de avaliar como essas mudanças irão influenciar e transformar o clima, e seus impactos ambientais e socioeconômicos, e assim traçar estratégias com a finalidade de minimizar estes impactos.

O IPCC tornou-se o principal órgão científico internacional para as avaliações de estudo sobre as alterações climáticas (ASSIS et al., 2019). O Quinto Relatório de Avaliação do IPCC, publicado em 2013, destaca que fortes evidências demonstram mudanças no clima mundial. As mudanças climáticas podem afetar a ocorrência de eventos extremos, modificando a frequência, duração, magnitude e intensidade destes (IPCC, 2013). Acredita-se que os eventos naturais e as atividades humanas sejam os principais contribuintes para alterações provocadas sobre as

condições climáticas (SINGH e SINGH, 2012), modificando o comportamento climático em escalas regional e global, principalmente nos padrões de temperatura e precipitação (IPCC, 2007b).

Alterações climáticas vêm sendo detectadas em todo planeta, como o aumento no nível médio do mar, redução das coberturas de gelo e neve, aumento da temperatura do ar e dos oceanos, sendo muitas das mudanças observadas desde 1950 sem precedentes através das décadas a milênios (IPCC, 2013; IPCC, 2014). As mudanças climáticas associadas ao aquecimento global são tidas como consequências das mudanças nas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa - GEE, das mudanças no uso da terra, nas frações de aerossóis na atmosfera (IPCC, 2007c).

4.2 Projeções climáticas, modelos e cenários climáticos

Modelos de circulação geral - GCMs são ferramentas apropriadas para avaliar e melhorar a compreensão das principais relações entre os fatores que impulsionam emissões de gases (GEE) e as incertezas associadas, como as consequências climáticas e ambientais das futuras emissões, auxiliando na análise de mudanças climáticas, incluindo modelagem climática e avaliação de impactos e para para fornecer subsídios na formulação de estratégias de adaptação e mitigação. Desta forma, se tornam úteis para avaliar o impacto das mudanças climáticas entre sistemas humanos e naturais (IPCC, 1992; IPCC, 2000).

Cenários de mudanças climáticas fornecem entradas para modelos climáticos e auxiliam na avaliação da importância e influência de gases-traço relevantes e precursores de aerossóis na mudança da composição atmosférica e do clima (IPCC, 1992). Um cenário de mudança climática pode ser definido como uma descrição de como o futuro se desenrolará, baseando-se num conjunto de suposições base, acerca de relações chave e mecanismos geradores que devem ser coerentes e consistentes (ADAM e COLLISCHONN, 2013).

A previsão precisa das mudanças climáticas futuras e seu impacto regional é fundamental para o planejamento de longo prazo nos níveis nacional e regional visando à adaptação e mitigação (GU et al., 2012). Os modelos climáticos são usados como ferramentas de muitos estudos e pesquisas sobre o clima incluindo as projeções de futuras mudanças do clima, como consequência de futuros cenários de forçantes climáticas (gases de efeito estufa e aerossóis) (ADAM e COLLISCHONN, 2013).

As projeções de mudanças no sistema climático são obtidas, considerando cenários de mudanças climáticas, usando uma hierarquia de modelos climáticos que vão desde modelos

climáticos simples, modelos de complexidade intermediária, até modelos climáticos abrangentes e Modelos do Sistema Terrestre. Estas exigem informações sobre futuras emissões ou concentrações de gases de efeito estufa, aerossóis e outros fatores climáticos. Sendo que os modelos muitas vezes simulam mudanças com base em um conjunto de cenários de forçantes antropogênicos (IPCC, 2013).

O IPCC vem divulgando cenários de emissões de gases de efeito estufa a serem usados para conduzir modelos de circulação global - GCMs, para desenvolver cenários de mudanças climáticas. Os chamados cenários IS92 divulgados em 1992 foram os primeiros cenários globais a fornecerem estimativas de emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2000). Em 1996 o IPCC decidiu desenvolver um novo conjunto de cenários de emissões, fornecendo informações para o terceiro relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2000). Este relatório descreve os novos cenários e como eles foram desenvolvidos, os cenários SRES (*Special Report on Emissions Scenarios - SRES*), agrupados em quatro famílias de cenários (A1, A2, B1 e B2) que exploram caminhos alternativos de desenvolvimento, abrangendo uma ampla gama de forças motrizes principais desde demográficas, econômicas até tecnológicas e as emissões de GEE resultantes (IPCC, 2000; IPCC, 2007c).

Os SRES são baseados em quatro projeções diferentes de emissões de gases de efeito estufa para o futuro, relacionados com aspectos de desenvolvimento social, econômico e tecnológico, crescimento populacional, preocupação com o meio ambiente e diferenças regionais (ADAM e COLLISCHONN, 2013). As projeções de emissões são amplamente utilizadas nas avaliações das mudanças climáticas futuras, e suas premissas subjacentes com relação às mudanças socioeconômicas, demográficas e tecnológicas, assim como para estudos de vulnerabilidade e impacto das mudanças climáticas (IPCC, 2007c).

Em 2007, o IPCC divulgou e disponibilizou relatórios de mudanças climáticas e cenários para nove variáveis climáticas, projetadas pelos Modelos de Circulação Global (MCGs) dos principais centros de modelagem do clima no mundo, usando como entrada dados dos cenários de emissão de gases (GEE), para os séculos 20 e 21, de acordo com o Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (SRES), publicado em 2000 (IPCC, 2007c)

Relatórios do IPCC fizeram e fazem uso de conjuntos multimodelo gerados através de várias fases do *Coupled Model Intercomparison Project - CMIP* do *World Climate Research Programme* – WCRP (IPCC, 2021) (IPCC-AR6). O CMIP disponibiliza publicamente a saída multimodelo em um formato padronizado para análise pela comunidade climática mais ampla e pelos usuários permitindo entender melhor as mudanças climáticas passadas, presentes e

futuras decorrentes da variabilidade natural não forçada ou em resposta a mudanças nas forçantes radiativas em um contexto multimodelo (EYRING et al., 2016).

No Quinto Relatório de Avaliação do IPCC - AR5, um novo conjunto de cenários, *Representative Concentration Pathways* - RCPs, foi usado para as novas simulações de diversos modelos de circulação global (GCMs), realizadas *Representative Concentration Pathways* - RCPs no âmbito da Fase 5 do CMIP (CMIP5) do WCRP (IPCC, 2013; IPCC, 2014). Os cenários do AR5 são identificados por seu forçamento radiativo total aproximado no ano 2100 em relação a 1750, RCPs incluem um cenário de mitigação levando a um nível de forçamento muito baixo (RCP2.6), dois cenários de estabilização (RCP4.5 e RCP6) e um cenário com emissões de gases de efeito estufa muito altas (RCP8.5). Os RCPs podem, assim, representar uma gama de políticas climáticas do século XXI, em comparação com a política não climática do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (SRES) usada no Terceiro Relatório de Avaliação e no Quarto Relatório de Avaliação (IPCC, 2013; IPCC, 2014).

O CMIP distribuído em sua sexta fase (CMIP6) inclui uma nova e melhor representação de processos físicos, químicos e biológicos, bem como maior resolução, em comparação com modelos climáticos considerados em relatórios anteriores de avaliação do IPCC. O relatório do IPCC *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* utiliza um conjunto básico de cenários disponíveis para projeções futuras do CMIP6, ao invés dos RCPs tem agora os SSPy-x, em que SSP significa Shared Socioeconomic Pathways, que pode ser traduzido como Caminhos Socioeconômicos Compartilhados, o y varia de um a 5 e o x tem o mesmo significado dos números dos RCPs. São cinco cenários: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5, esses cobrem uma gama mais ampla de futuros de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos do que os avaliados nos relatórios anteriores do Working Group I - WGI, além de combinarem cenários socioeconômicos e níveis de forçamento radiativo (EYRING et al., 2016; O'Neill et al., 2016; IPCC, 2021).

4.3 Eventos climáticos extremos

As mudanças climáticas vêm sendo avaliadas por grupos de pesquisas que destacam a importância de conhecer essas mudanças e como irão influenciar e alterar as condições climáticas e os recursos naturais, assim como as informações obtidas permitiram determinar com maior consistência, o papel da natureza e o da ação humana no processo (CONTI, 2005). Do ponto de vista espacial as condições climáticas ocorrem diferentemente e os fenômenos climáticos variam na escala sazonal e interanual, podendo se apresentar de maneira favorável ou desfavorável em diferentes momentos e lugares (SALGUEIRO, 2005).

As mudanças climáticas, sejam elas impulsionadas por forças naturais ou antrópicas, podem levar a mudanças na probabilidade de ocorrência, frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como eventos extremos de precipitação ou períodos de calor. (IPCC, 2013). Os eventos climáticos extremos são aspectos integrantes da variabilidade climática (SILVA, 2018), são fortemente influenciados por padrões climáticos de pequena e grande escala, modos de variabilidade, processos termodinâmicos, terrestres - feedbacks da atmosfera e condições antecedentes (IPCC, 2013).

Alexander et al. (2009), destacam que o estudo dos extremos climáticos diante de perspectivas de mudanças climáticas ganhou destaque nos últimos anos, mas principalmente desde o Segundo Relatório de Avaliação - SAR do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas em 1995. Alguns céticos e cientistas da mudança climática questionam se o aumento observado em eventos climáticos extremos pode ser atribuído diretamente às ações humanas, ou se muito disso é devido à variabilidade natural do clima (SINGH e SINGH, 2012). O interesse neste tópico foi levantado por comunidades científicas relevantes, especialmente para ramos climatológicos que avaliam as mudanças climáticas (GBODE et al., 2014).

O quarto relatório do IPCC advertiu sobre fenômenos climáticos e meteorológicos extremos (IPCC, 2007), destacando que características de condições meteorológicas extremas e eventos climáticos possivelmente mudarão no século 21 devido às mudanças climáticas antropogênicas (IPCC, 2007; IPCC, 2012).

Houve um progresso substancial na avaliação de eventos climáticos e extremos climáticos desde o AR4 (IPCC, 2013), destacando-se a avaliação abrangente dos extremos realizada pelo Relatório Especial do IPCC sobre Gestão o Risco de Eventos Extremos e Desastres para Avançar a Adaptação às Mudanças Climáticas - SREX e a quantidade de informações sobre as evidências observacionais disponíveis e a capacidade dos modelos de simular extremos (IPCC, 2013).

O Relatório Especial sobre Extremos (SREX) aborda a relação entre as mudanças climáticas e eventos extremos de tempo e clima, seus impactos e as estratégias para gerenciar os riscos associados, contribuindo com informações importantes para análise e avaliação global mais abrangente de eventos extremos climáticos (IPCC, 2012). Desde o AR4 e SREX, há novas evidências para a detecção da influência humana na ocorrência temperaturas e precipitações extremas, provavelmente o forçamento antropogênico tenha contribuído para as mudanças observadas na frequência e intensidade dos extremos diários de temperatura e precipitação em escala global desde meados do século XX. É provável que a influência humana tenha aumentado significativamente a probabilidade de ocorrência de ondas de calor, secas e eventos de chuvas intensas (IPCC, 2013).

O Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5), baseia-se na contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (AR4) e incorpora novas descobertas subsequentes de pesquisa. Destaca que também foram consideradas novas evidências de mudanças climáticas com base em muitas análises científicas independentes de observações do sistema climático, arquivos de paleoclima, estudos teóricos de processos climáticos e simulações usando modelos climáticos (IPCC, 2013)

Os relatórios do 4º e 5º Relatórios de Avaliação do IPCC (AR4/AR5) (IPCC, 2007c; IPCC, 2014) evidenciam que os efeitos antropogênicos têm contribuído para a intensificação da precipitação extrema e da temperatura em escala global. Destacando para as décadas (século XX) que os antecedem a tendência crescente significativa ou expressiva na frequência de eventos climáticos extremos é uma realidade (IPCC, 2007; IPCC, 2012).

As mudanças projetadas em eventos extremos terão impactos predominantemente adversos nos ecossistemas e na sociedade humana (SINGH e SINGH, 2012). Tendo em vista que o clima desempenha sobre uma região, determinado controle no seu desenvolvimento, assim como em relação às atividades humanas desempenhadas, (SALGUEIRO, 2005) interferindo e alterando as relações existentes entre os sistemas naturais e humanos, especialmente porque as mudanças podem ultrapassar a capacidade das comunidades de se adaptar e reduzir os impactos adversos (POWELL e KEIM, 2015).

Os impactos da maioria dos extremos são normalmente sentidos em uma escala local ou regional, portanto, estudos regionais de extremos climáticos são da mais alta prioridade para a maioria dos países para avaliar os impactos climáticos potenciais. No entanto dado que os sinais de mudança climática em extremos climáticos são difíceis de detectar em uma escala regional,

para entender completamente como o clima varia e até que ponto os humanos influenciaram o sistema climático requer uma abordagem global (ALEXANDER et al., 2009).

4.4 Índices de detecção de mudanças climáticas

As mudanças climáticas, sejam impulsionadas por forças naturais ou humanas, podem levar a mudanças na probabilidade de ocorrência ou intensidade de climas extremos e eventos climáticos, como eventos de precipitação extrema ou períodos de calor, podendo impactar severamente a relação entre os sistemas naturais e humanos. Avaliar as mudanças nos extremos climáticos apresenta desafios únicos, não apenas por causa da natureza intrinsecamente rara desses eventos, mas porque eles invariavelmente acontecem em conjunto com condições perturbadoras (IPCC, 2013).

Dessa forma, a Equipe de Especialistas em Detecção e Índices de Mudanças Climáticas (*Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices* - ETCCDI) em conjunto com o Programa Internacional de Pesquisa em Previsão da Variabilidade Climática (*International Research Programme on Climate Variability Predictability* - CCI/CLIVAR) coordenados pela Organização Mundial de Meteorologia - OMM desenvolveram, definiram e divulgaram um conjunto de índices internacionalmente aceitos com base em dados diários de temperatura do ar e precipitação pluvial para análises de mudanças climáticas, bem como pacotes de software relacionados para seus cálculos (ZHANG et al., 2005; ALEXANDER et al., 2006; DONAT et al., 2013; POWELL e KEIM, 2015).

A construção de índices de extremos climáticos teve como objetivo principal fazer uso destes em estudos de monitoramento e detecção de mudanças climáticas (ZANG e YANG, 2004). A temperatura e a precipitação, além de serem variáveis climáticas de longo prazo amplamente disponíveis, estão entre os elementos climáticos mais influentes na biosfera e nas atividades humanas, dessa forma, a maioria dos estudos globais tem se concentrado na análise desses dados (ALEXANDER et al., 2009; MUKADI e GONZÁLEZ-GARCÍA, 2021).

Esses índices descrevem eventos extremos de temperatura e precipitação, criados com o propósito específico de medir e monitorar a variabilidade e as mudanças climáticas e que possam ser utilizados na avaliação de diferentes áreas (ABBASNIA e TOROS, 2018). A maior parte dos índices sugeridos busca quantificar eventos extremos moderados, ou seja, aqueles que ocorrem normalmente pelo menos uma vez por ano e permitam detectar variabilidades diárias (ZHANG et al., 2011).

A maioria dos próprios índices tem como objetivo medir alguns dos aspectos mais extremos do clima, caracterizando a intensidade, duração ou frequência de vários eventos climáticos (DONAT et al., 2013). Embora o risco de precipitação extrema ou eventos de temperatura possam se estender por uma grande área geográfica, a vulnerabilidade a eventos de enchentes ou secas é um fenômeno local. Portanto, embora os índices sejam úteis para prever as tendências extremas, eles são de pouca utilidade para avaliar enchentes e secas locais (VAGHEFI et al., 2019).

Ao longo dos anos, diferentes softwares e produtos foram desenvolvidos a partir desses índices. As métricas do ETCCDI foram utilizadas como base para o programa ClimDex, que produz e disponibiliza conjuntos de dados de extremos climáticos como um novo conjunto de produtos extremos em forma de grade e software para cálculo dos índices (DONAT et al., 2013; POWELL e KEIM, 2015; DUNN et al., 2020).

O projeto ClimDex foi desenvolvido por Byron Gleason é uma colaboração entre a University of New South Wales, a University of Melbourne, o *National Climatic Data Centre* e o *Environment Canada*, e financiado pelo projeto de ligação LP100200690 do *Australian Research Council*, fundamentado no Microsoft Excel posteriormente foi incorporado ao software R, já que R é um software gratuito, robusto e poderoso para análises estatísticas e gráficas, os índices principais obtidos usando o RClimDex, incluem todos os 27 índices calculados usando ClimDex (ZHANG e YANG, 2004; POWELL e KEIM, 2015).

Os 27 índices principais são derivados da temperatura máxima e mínima diária e da precipitação diária, 16 índices relacionados a temperatura e 11 índices a precipitação. Os índices de temperatura incluem 9 índices relacionados ao calor e 7 índices relacionados ao frio, e estes podem ser agrupados de acordo com seu método de cálculo como percentis (4), limiares (4), absoluto (1) e índices de duração (3). Os índices de precipitação incluem 10 índices úmidos e 1 índice seco, que são agrupados como percentis (2), limiares (3), absolutos (2), duração (2) e outros índices (2) (POWELL e KEIM, 2015; ALEXANDER e ARBLASTER, 2017).

4.5 Análises de séries temporais em estudos climáticos

Mudanças climáticas, tanto em escala local e regional quanto global, estão ocorrendo e, possivelmente, se intensificarão no futuro (MOREIRA e NAGHETTINI, 2016). Estudar as alterações climáticas ocorridas no passado possibilita compreender melhor as variabilidades inferidas no presente, além de subsidiar elementos para melhor averiguação do comportamento do clima futuro (PENNEREIRO e ORLANDO, 2013). É reconhecido também que a tarefa de

quantificar tais alterações e seus impactos reais sobre a sociedade é bastante complexa, dada a incerteza presente na dinâmica dos processos hidrológicos e meteorológicos (MOREIRA e NAGHETTINI, 2016).

A base de toda análise do clima pode ser representada por séries temporais que consistem em sequências únicas de dados (obtidos ou estimados) representativos para um determinado período, descrevendo tendências, sejam elas de aumento, redução ou manutenção dos valores antecedentes (OLIVEIRA, 2010). Dessa forma mudanças climáticas podem ser identificadas por meio de análise de séries históricas de variáveis meteorológicas, como temperatura do ar e precipitação pluvial (SOUZA e AZEVEDO, 2012). O estudo do comportamento de séries temporais considerando variabilidade e mudanças no clima é de significativa importância na obtenção de estimativas confiáveis de suas grandezas características, e sua posterior associação com suas respectivas frequências e impactos (MOREIRA e NAGHETTINI, 2016).

As séries temporais climáticas são influenciadas por heterogeneidades, ou seja, fatores não climáticos, como mudanças nos instrumentos de observação, práticas de observação, realocações de estações e mudanças no ambiente da estação (MUKADI e GONZÁLEZ-GARCÍA, 2021). A identificação de alterações nos registros meteorológicos é de grande importância para estudos que utilizam as séries temporais, tanto históricas como futuras, pois tanto as simulações como as aplicações de teorias de probabilidade são realizadas com a hipótese de que as séries históricas são homogêneas, isto é, que não apresentam tendências (GUEDES et al., 2019).

Uma série temporal homogênea é definida como aquela em que as variações são causadas apenas nas condições do tempo e do clima (MUKADI e GONZÁLEZ-GARCÍA, 2021). Sendo assim, a caracterização estatística de séries temporais de dados climáticos deve considerar a existência de possíveis alterações no regime esperado das variáveis em estudo na análise do clima de uma região (COSTA et al., 2015).

Técnicas e métodos de análise de séries temporais multivariadas têm se destacado por permitir revelar mecanismos de mudança climática, modelando a evolução do tempo-espacial da mudança climática e prevendo a tendência de futuras mudanças climáticas (ZHANG, 2018). A aplicação de métodos estatísticos em séries temporais climáticas permite obter informações que auxiliam na compreensão da evolução do clima ao longo do tempo (MUDELSEE, 2010).

4.6 Análise multivariada

A análise multivariada compreende um conjunto de técnicas dedicadas à análise de conjuntos de dados com mais de uma variável (ABDI, 2003), incluindo métodos tanto para descrever e explorar dados quanto para fazer inferências formais sobre eles (EVERITT e HOTHORN, 2011). Sendo assim, refere a todas as técnicas estatísticas que simultaneamente analisam múltiplas medidas de uma coleção de variáveis sob investigação, que melhora as análises univariadas separadas de cada variável usando informações sobre as relações entre as variáveis (HAIR Jr. et al., 2009; EVERITT e HOTHORN, 2011; WILKS, 2011). Análise multivariada é uma técnica de análise de dados multitemporais que tem se expandido globalmente, num vasto domínio de possíveis situações de pesquisa (HAIR Jr. et al., 2009). Quando o interesse é verificar como as amostras se relacionam, ou seja, o quanto estas são semelhantes, segundo as variáveis utilizadas no trabalho, destacam-se dois métodos, que podem ser utilizados: a análise de agrupamento hierárquico e a análise fatorial em componentes principais (VICINI, 2005).

Análise de agrupamento - AA, é uma técnica multivariada cujo objetivo é separar os elementos em grupos, baseando-se nas características que estes elementos possuem. Os elementos de um mesmo grupo são homogêneos entre si, e estes grupos já formados são heterogêneos entre eles. O método consiste em colocar em um mesmo grupo objetos que sejam similares de acordo com algum critério pré-determinado. O critério baseia-se normalmente em uma função de dissimilaridade, função esta que recebe dois elementos e retorna a distância entre eles (ALVES et al., 2007; LINDEN, 2009).

A Análise Fatorial - AF é uma técnica de análise multivariada que tem como objetivo reduzir o número de variáveis iniciais com a menor perda possível de informação (VICINI, 2005; WILKS, 2011). HAIR Jr. et al. (2009) destacam que na análise fatorial, variáveis estatísticas são formadas para melhor representarem a estrutura subjacente ou padrões das variáveis conforme representadas por suas intercorrelações. Análise Componentes Principais (ACP), é uma técnica estatística multivariada que consiste em transformar linearmente um conjunto original de dados de diversas variáveis em outro conjunto: os componentes principais (CP) de dimensões equivalentes (PEREIRA et al., 2010; VICINI, 2005).

Tanto a análise de componentes principais, quanto a análise fatorial, são técnicas da análise multivariada, que são aplicadas a um conjunto de variáveis, para descobrir quais dessas são mais relevantes, na composição de cada fator, sendo estes independentes um dos outros (VICINI, 2005). Sendo assim, buscam explicar um conjunto de dados de diferentes variáveis

multivariadas usando outro conjunto com um número reduzido de variáveis em relação ao inicial (EVERITT e HOTHORN, 2011). Dessa forma os fatores, que são gerados, são utilizados de maneira representativa do processo em estudo e utilizados para análises futuras (VICINI, 2005). Os procedimentos usados para atingir esse objetivo são essencialmente bem diferentes nas duas abordagens (EVERITT e HOTHORN, 2011).

5. ESTRUTURA

A estrutura proposta para o presente trabalho consiste em: apresentar no Capítulo 1 - breve introdução, justificativas, objetivo geral e objetivos específicos a serem abordados nos capítulos seguintes, revisão bibliográfica; Capítulo 2 traz caracterização da área de estudo, descrições das informações necessárias, do método utilizado para obtenção dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial e de temperaturas do ar máxima e mínima e da técnica de agrupamento utilizada, a análise das tendências anuais dos índices extremos de precipitação pluvial e temperatura do ar para as diferentes microrregiões da região do MATOPIBA e para as sub-regiões homogêneas obtidas; Capítulo 3 foi obtido um índice de vulnerabilidade climática usando os índices de extremos climáticos para a região, considerando relações existentes entre variabilidade climática e características dos índices de detecção de extremos climáticos; Capítulo 4 aborda a análise de índices de extremos climáticos, considerando projeções climáticas de cenários do Quinto Relatório do IPCC, calculados para cada sub-região, já que a aplicação por regiões homogêneas permitirá avaliar melhor os dados com perdas mínimas de informações das variáveis, possibilitando assim, identificar possíveis impactos de mudanças climáticas nas características dos índices de detecção de extremos; No Capítulo 5 constam às considerações finais. A seguir na Figura 1 a descrição das etapas desenvolvidas neste trabalho de tese.

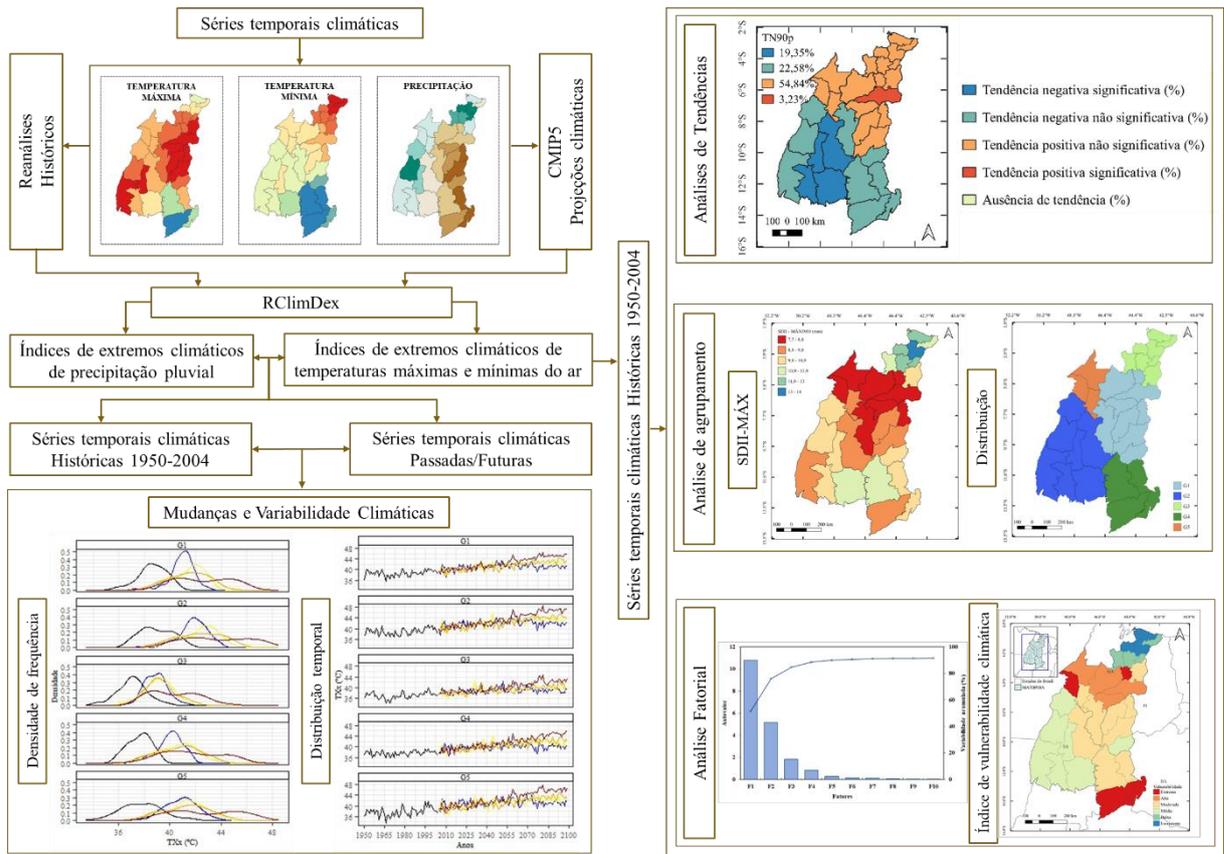


Figura 1. Etapas de execução da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

ABATAN, A. A.; ABIODUN, B. J.; LAWAL, K. A.; GUTOWSKI, W. J. (2016). Trends in extreme temperature over Nigeria from percentile-based threshold indices. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2527-2540. doi:10.1002/joc.4510

ABBASNIA, M.; TOROS, H. (2018). Analysis of long-term changes in extreme climatic indices: a case study of the Mediterranean climate, Marmara Region, Turkey. **Pure and Applied Geophysics**. doi:10.1007/s00024-018-1888-8

ABDI H. (2003). Multivariate Analysis. In: Lewis-Beck M., Bryman, A., Futing T. (Eds.). *Encyclopedia of Social Sciences Research Methods*. Thousand Oaks (CA): Sage.

ABIODUN, B. J.; ADEGOKE, J.; ABATAN, A. A.; IBE, C. A.; EGBEBIYI, T. S.; ENGELBRECHT, F.; PINTO, I. (2017). Potential impacts of climate change on extreme precipitation over four African coastal cities. **Climatic Change**, v. 143, n. 3-4, p. 399-413. doi:10.1007/s10584-017-2001-5

ADAM, K. N.; COLLISCHONN, W. (2013). Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**, v. 18, n.3, p. 69-79

ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A. M. G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D. B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v. 111. doi:10.1029/2005jd006290

ALEXANDER, L. V.; TAPPER, N.; ZHANG, X.; FOWLER, H. J.; TEBALDI, C.; LYNCH, A. (2009). Climate extremes: progress and future directions. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 3, p. 317-319. doi:10.1002/joc.1861

ALEXANDER, L. V.; ARBLASTER, J. M. (2017). Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. **Weather and Climate Extremes**, v. 15, n. 34-56. doi:10.1016/j.wace.2017.02.001

ALVES, L. B.; BELDERRAIN, M. C. N. SCARPEL, R. A. (2007). Tratamento multivariado de dados por análise de correspondência e análise de agrupamentos. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e PósGraduação do ITA - XIII ENCITA / 2007. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos.

ALVES, L. M.; MARENGO, J. A.; CAVALCANTI, I. F. A. (2013). Histórico de secas na Amazônia, In: BORMA, L.S.; NOBRE, C.A. (eds.). Secas na Amazônia: causas e consequências. São Paulo: Oficina de Textos, p. 21-27.

ASSIS, É. A.; ALVES, J. M. B.; SILVA, E. M. VASCONCELOS JÚNIOR, F. C. BARBOSA, A. C. B.; SANTOS, A. C. S.; SOMBRA1, S. S. (2019). Modelos Acoplados do IPCC (CMIP3-CMIP5) e o Gradiente Meridional de Anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano Atlântico Tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 217-226. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334036>

AVILA-DIAZ, A.; ABRAHÃO, G.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. (2020). Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. **Climate Dynamics**. doi:10.1007/s00382-020-05272-9

BAIDYA, S. K.; SHRESTHA, M. L.; SHEIKH, M. M. (2008). Trends in daily climatic extremes of Temperature and precipitation in Nepal. **Journal of Hydrology and Meteorology**, v. 5, n. 1, p. 38-51.

BEZERRA, B. G.; SILVA, L. L.; SANTOS E SILVA; C. M.; CARVALHO, G. G. (2018). Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. **Theoretical and Applied Climatology**. doi:10.1007/s00704-018-2396-6

BRITO, A. L.; VEIGA, J. A. P.; CORREIA, F. W.; CAPISTRANO, V. B. (2019). Avaliação do Desempenho dos Modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de Indicadores de Extremos

Climáticos de Precipitação para a Bacia Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 165-177. doi:10.1590/0102-77863340003

COLLINS M.; SUTHERLAND, M.; BOUWER, L.; CHEONG, S.-M.; FRÖLICHER, T.; JACOT DES COMBES, H.; KOLL ROXY, M.; LOSADA, I.; MCINNES, K.; RATTER, B.; RIVERA-ARRIAGA, E.; SUSANTO, R.D.; SWINGEDOUW, D.; TIBIG, L. (2019). Extremes, Abrupt Changes and Managing Risk. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.C; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E.; MINTENBECK, K.; ALEGRÍA, A.; NICOLAI, M.; OKEM, A.; PETZOLD, J.; RAMA, B.; WEYER, N.M. (eds.)]. In press.

COLUSSI, J. (2017). Matopiba: mudanças no uso da terra na nova fronteira agrícola do Brasil e impactos socioeconômicos. Dissertação (Mestrado em Agronegócios). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 96 f.

CONTI, J. B. (2005). Considerações sobre as Mudanças Climáticas Globais. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, USP, v. 1, n. 16, p. 70-75.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; ROCHA JÚNIOR, R. L.; SALVADOR, M. A.; HERDIES, D. L. (2020). Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 100254. doi:10.1016/j.wace.2020.100254

COSTA, V. J.; FERREIRA, M.; CORDEIRO, M. T. A. (2015). Análise de séries temporais climáticas. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 14, n. 2, p. 169-177.

DAD, J. M.; MUSLIM, M.; RASHID, I.; RASHID, I.; RESHI, Z. A. (2021). Time series analysis of climate variability and trends in Kashmir Himalaya. **Ecological Indicators**, v. 126, 107690. doi:10.1016/j.ecolind.2021.107690

DONAT, M. G.; ALEXANDER, L. V.; YANG, H.; DURRE, I.; VOSE, R.; CAESAR, J. (2013). Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 7, p. 997-1006. doi:10.1175/bams-d-12-00109.1

DUNN, R. J. H.; ALEXANDER, L. V.; DONAT, M. G.; ZHANG, X.; BADOR, M.; BIN HJ YUSSOF, M. N. A.; et al. Development of an Updated Global Land In Situ-Based Data Set of Temperature and Precipitation Extremes: HadEX3. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 16, p. 1-28, 2020.

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937-1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016

EVERITT, B.; HOTHORN, T. (2011). **An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R**. Springer New York Dordrecht Heidelberg London.

FAVARETO, A.; NAKAGAWA, L.; KLEEB, S.; SEIFER, P.; PÓ, M. (2019). Há mais pobreza e desigualdade do que bem estar e riqueza nos municípios do Matopiba. **Revista NERA**, v. 22, n. 47, p. 348-381.

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; TANK, A. M. G. K.; PETERSON, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Climate Research**, v. 19, p. 193-212.

GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. (2018). O papel da dimensão ambiental na ocupação do MATOPIBA », *Confins* [Online], 35: <http://journals.openedition.org/confins/13045>

GBODE, I. E.; AKINSANOLA, A. A.; AJAYI, V. O. (2015). Recent Changes of Some Observed Climate Extreme Events in Kano. **International Journal of Atmospheric Sciences**, p. 1-6. doi:10.1155/2015/298046

GU, H.; WANG, G.; YU, Z.; MEI, R. (2012). Assessing future climate changes and extreme indicators in east and south Asia using the RegCM4 regional climate model. **Climatic Change**, v. 114, n. 2, p. 301-317. doi:10.1007/s10584-012-0411-y

GUEDES, H. A. S.; PRIEBE, P. S.; MANKE, E. B. (2019). Tendências em Séries Temporais de Precipitação no Norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, 283-291.

HAIR Jr., J. F.; BLACK, W. C. BABIN, B. J. ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; (2009). *Análise multivariada de dados*. Tradução Adonai Schup Sant'Anna. 6 ed. Porto Alegre: Bookman.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIÇÃO, Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V. J.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. B.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I.; VINCENT, L. A. (2006). Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**, v. 19, n. 8, p. 1490-1512. doi:10.1175/jcli3695.1

IPCC, 1992: *Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments*. IPCC First Assessment Report Overview and Policymaker Summaries and 1992 IPCC Supplement, 180 pp.

IPCC, 2000: *Special Report on Emissions Scenarios*. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 608 pp.

IPCC, 2001: *Climate Change 2001: Synthesis Report*. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp.

IPCC, 2007a: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.

IPCC, 2007b: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

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

IPCC, 2012: *Summary for policymakers*. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–21.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. (2018). Precipitação observada na Amazônia brasileira: comparação entre os dados das redes convencionais e dados da reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC1. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 14, v. 22.

LINDEN, R. (2009). Técnicas de Agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, n. 4, p. 18-36.

MARRAFON, V. H.; REBOITA, M. S. (2020). Características da precipitação na América do Sul reveladas através de índices climáticos. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 16, v. 26, p. 663-676.

MOREIRA, J. G. V.; NAGHETTINI, M. (2016). Detecção de Tendências Monotônicas Temporais e Relação com Erros dos Tipos I e II: Estudo de Caso em Séries de Precipitações Diárias Máximas Anuais do Estado do Acre **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 394-402.

MUDELSEE M. (2010) Climate Time Series Analysis: Classical Statistical and Bootstrap Methods. Springer, ISBN: 978-90-481-9481-0.

MUKADI, P. M.; GONZÁLEZ-GARCÍA, C. (2021). Time Series Analysis of Climatic Variables in Peninsular Spain. Trends and Forecasting Models for Data between 20th and 21st Centuries. **Climate**, v. 9, n. 119.

NATIVIDADE, U. A.; GARCIA, S. R.; TORRES, R. R. (2017). Tendência dos Índices de Extremos Climáticos Observados e Projetados no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 600-614. doi:10.1590/0102-7786324008

OLIVEIRA, M. J. (2010). Incertezas associadas à temperatura do ar no contexto das mudanças climáticas: determinação das causas e efeitos de heterogeneidades e discussão das implicações práticas. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos,

O'NEILL, B. C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D. P.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J. F.; LOWE, J.; MEEHL, G. A.; MOSS, R.; RIAHI, K.; SANDERSON, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461-482. doi:10.5194/gmd-9-3461-2016

PARKER, W. S. (2016). Reanalyses and Observations: What's the Difference? *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 97, n. 9, p. 1565-1572. doi:10.1175/bams-d-14-00226.1

PENEREIRO, J. C.; ORLANDO, D. V. (2013). Análises de tendências em séries temporais anuais de dados climáticos e hidrológicos na bacia do Rio Parnaíba entre os estados do Maranhão e Piauí/Brasil **Revista Geografia Acadêmica**, v. 7, n. 2, p. 5 – 21.

PEREIRA, C. N.; PORCIONATO, G. L.; CASTRO, N. C. (2018) Aspectos socioeconômicos da região do MATOPIBA. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental*, v. 18, p. 47-59.

POWELL, E. J.; KEIM, B. D. (2015). Trends in Daily Temperature and Precipitation Extremes for the Southeastern United States: 1948-2012. **Journal of Climate**, v. 28, n. 4, p. 1592-1612. doi:10.1175/jcli-d-14-00410.1

PEREIRA, S. A.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; BALBINO, L. C.; OLIVEIRA, J. P. (2010). Análise de componentes principais dos atributos físicos de um Latossolo vermelho distrófico típico sob pastagem e mata. **Global Science and Technology**, v. 03, n. 02, p. 87-97.

RAFEE, S. A. A.; FREITAS, E. D.; MARTINS, J. A.; MARTINS, L. D.; DOMINGUES, L. M.; NASCIMENTO, J. M. P.; MACHADO, C. B.; SANTOS, E. B.; RUDKE, A. P.; FUJITA, T.; SOUZA, R. A. F.; HALLAK, R.; UVO, C. B. (2020). Spatial trends of extreme precipitation events in the Paraná River Basin. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**. doi:10.1175/jamc-d-19-0181.1

REIS, L. C. (2020). Produtividade da soja sob diferentes cenários de variabilidade climática na região do MATOPIBA. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Natal, 161f.

SALGUEIRO, J. H. B. (2005). Avaliação da rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SALVADOR, M. A. (2014). Análise da variabilidade climática na nova fronteira agrícola do Brasil: região do Matopiba Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande-PB, 119 p.

SALVADOR, M. A., BRITO, J. I. B. (2017). Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theor. Appl. Climatol.** V. 133, p. 253-261.

SANTOS, J. R. N.; ARAÚJO, M. L. S.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; SANTOS, J. S.; ALMEIDA, J. L.; LIMA, T. V.; SOUSA, L. V. P.; AGUIAR, P. H. M.; SILVA, F. B. (2020). Tendências de extremos climáticos na região de transição Amazônia-Cerrado no estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 16, Vol. 26.

SILVA, R. O. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SOUZA, W. M. DE. (2017). Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 579-589. doi:10.1590/s1413-41522017142481

SILVA, R. A. (2018). Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região do Matopiba. Campina Grande, 113 f.

SINGH, R. B.; SINGH, O. (2012). Study of Impacts of Global Warming on Climate Change: Rise in Sea Level and Disaster Frequency. *Global Warming - Impacts and Future Perspectives*. doi:10.5772/50464

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. (2012). Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 1, p. 143-159.

SKANSI, M. M.; BRUNET, M.; SIGRÓ, J.; AGUILAR, E.; GROENING, J. A. A.; BENTANCUR, O. J.; GEIER, Y. R. C.; AMAYA, R. L. C.; JÁCOME, H.; RAMOS, A. M.; ROJAS, C. O. PASTEN, A. M.; MITRO, S. S.; JIMÉNEZ, C. V.; MARTÍNEZ, R.; ALEXANDER, L. V.; JONES, P. D. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295-307. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.11.0

STRASSBURG, B. B. N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A. E.; OLIVEIRA FILHO, F. J. B.; SCARAMUZZA, C. A. M.; SCARANO, F. R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. (2017). Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 4, 0099. doi:10.1038/s41559-017-0099

VAGHEFI, S. A.; ABBASPOUR, N.; KAMALI, B.; ABBASPOUR, K. C. (2017). A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. **Environmental Modelling & Software**, v. 96, p. 181-198. doi:10.1016/j.envsoft.2017.06.033

VAGHEFI, S. A.; KEYKHAI, M.; JAHANBAKHSI, F.; SHEIKHOLESAMI, J.; AHMADI, A.; YANG, H.; ABBASPOUR, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1. doi:10.1038/s41598-018-38071-8

VICINI, L. (2005). Análise multivariada da teoria à prática. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 215 p.

WILKS, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3 ed.

ZHANG, X.; YANG, F. (2004). *RClimDex (1.0) UserManual* (p. 22). Ontario:Climate Research Branch, Environment Canada.

ZHANG, X.; HEGERL, G.; ZWIERS, F. W.; KENYON, J. (2005). Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes. **Journal of Climate**, v. 18, n. 11, p. 1641-1651. doi:10.1175/jcli3366.1

ZHANG, Z. (2018). *Multivariate Time Series Analysis in Climate and Environmental Research*. Springer, doi:10.1007/978-3-319-67340-0

ZHANG, X.; ALEXANDER, L.; HEGERL, G. C.; JONES, P.; TANK, A. K.; PETERSON, T. C.; TREWIN, B; ZWIERS, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 2, n. 6, p. 851-870. doi:10.1002/wcc.147

ZHU, X.; TROY, T. J. (2018). Agriculturally relevant climate extremes and their trends in the world's major growing regions. **Earth's Future**, v. 6, p. 656–672. <https://doi.org/10.1002/2017EF000687>.

CAPÍTULO 2

ÍNDICES CLIMÁTICOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIAL E TEMPERATURA DO AR NA REGIÃO DO MATOPIBA-BRASIL

RESUMO

Parâmetros de temperatura e precipitação são importantes para obtenção de informações relacionadas às mudanças climáticas e eventos extremos que afetam nossas vidas. Este estudo tem como objetivos analisar tendências anuais de índices de extremos climáticos de temperatura do ar e precipitação pluvial obtidas usando o software RClindex, para região do MATOPIBA (engloba principalmente áreas de Cerrado dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), assim como agrupar as microrregiões em regiões homogêneas por meio do método agrupamento hierárquico de Ward (1963), empregando valores do índice simples de intensidade diária de precipitação - SDII. Foram utilizados dados de séries históricas diárias (1950-2004) de temperaturas do ar máximas e mínimas e precipitação pluvial adquiridos da Water Weather Energy Ecosystembase (<https://www.2w2e.com/home/CIMP>). As tendências obtidas para as microrregiões e regiões homogêneas foram avaliadas quanto ao nível de significância, sendo considerados índices com significância estatística os que apresentaram valor de $p < 0,05$. Considerando as tendências por microrregiões, maioria dos índices de precipitação demonstram redução das incidências extremas. Apenas para os índices Rx5day, CDD e CWD foram obtidas tendências significativas, sendo estas observadas para uma quantidade de microrregiões que não representam porcentagens de área relativamente significante em termos da área total. Em relação aos índices de temperatura, foram verificadas tendências significativas crescentes para TXx, TNx e DTR e decrescentes para TNn, para quantidades expressivas de microrregiões. Foram obtidas cinco sub-regiões resultantes do agrupamento dos valores máximos do SDII, e os resultados dos índices por regiões homogêneas, mostraram-se representativos em relação aos valores por microrregiões.

Palavras-chave: detecção, variabilidade climática, RClindex, Agrupamento.

EXTREME CLIMATE INDICES OF RAINFALL AND AIR TEMPERATURE IN THE MATOPIBA-BRAZIL REGION

A B S T R A C T

Temperature and precipitation parameters are important for obtaining information related to climate change and extreme events that affect our lives. This study aims to analyze annual trends of indices of climatic extremes of air temperature and rainfall obtained using the RCLimindex software, for the MATOPIBA region (it includes mainly Cerrado areas of the states of Maranhão, Tocantins, Piauí and Bahia), as well as to group the microregions in homogeneous regions by means of the Ward's method in hierarchical clustering (1963), employing values of the Simple precipitation intensity index - SDII. Data from daily historical series (1950-2004) of maximum and minimum air temperatures and rainfall acquired from the Water Weather Energy Ecosystembase (<https://www.2w2e.com/home/CIMP>) were used. The trends obtained for the microregions and homogeneous regions were evaluated for the level of significance, and those with a p-value < 0.05 were considered statistically significant. Considering trends by microregion, most precipitation indices demonstrate reduction in extreme incidences. Only for the indices Rx5day, CDD and CWD were obtained significant trends, these being observed for an amount of microregions that do not represent relatively significant area percentages in terms of the total area. Regarding the temperature indices, trends significant crescents were verified for TXx, TNx and DTR and decreasing for TNn, for expressive amounts of microregions. Were obtained five sub-regions resulting from the clustering of the maximum values of the SDII, and the results of the indices by homogeneous regions, were shown to be representative in relation to the values by microregions.

Keywords: detection, climate variability, RCLimindex, Clustering.

1. INTRODUÇÃO

O avanço da agricultura no Cerrado provoca resultados potencialmente trágicos para o bem-estar humano, conservação da biodiversidade e o desenvolvimento sustentável no Brasil (LAHSEN et al., 2016). A região denominada MATOPIBA (formada principalmente por áreas de Cerrado dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) tem sido marcada pela intensidade da expansão da agricultura e pelos impactos econômicos, socioambientais gerados por esta atividade, com destaque para a degradação ecossistêmica (LOPES e GUILHERME, 2016). O processo de expansão da agricultura deve ser acompanhado por estudos profundos que indiquem a disponibilidade hídrica, considerando as mudanças no uso e cobertura da terra, o aumento da demanda hídrica e os potenciais efeitos das mudanças climáticas em escalas global, local e regional (GARCIA e VIEIRA FILHO, 2018).

As mudanças climáticas podem levar a alterações na frequência, intensidade, extensão espacial, duração e período de ocorrência de fenômenos meteorológicos extremos e climáticos, podendo resultar em eventos climáticos extremos sem precedentes. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC destaca que as mudanças climáticas começaram a afetar eventos climáticos extremos, como secas, inundações e ondas de calor, tornando-os mais recorrentes e intensos em todo o mundo no final do século XX, o que possivelmente persistirá no futuro (IPCC; 2013; IPCC, 2014; SADDIQUE et al., 2015; COSTA et al., 2020; IPCC 2021).

A temperatura e precipitação são os parâmetros mais importantes relacionados às mudanças climáticas e aos eventos extremos que afetam nossas vidas. Essas variáveis climáticas se destacam em estudos de análises de causas e efeitos de mudanças climáticas. Alterações nestas variáveis, são indicativas de mudanças climáticas (RANA et al., 2016; ABBASNIA e TOROS, 2018).

Os índices derivados de dados diários de observações meteorológicas são informações importantes extraídas das variáveis, que respondem a perguntas sobre os extremos que afetam os sistemas humanos e naturais (ZHANG et al., 2011). O monitoramento do clima, a partir de índices extremos climáticos, além de tornar possível mensurar e avaliar a magnitude, extensão e frequência de eventos extremos, em escala temporal quase real, permite avaliar mudanças anômalas em extremos que podem ter impactos em escala local, regional, nacional e global, pondo em riscos os sistemas naturais e humanos (DONAT et al., 2013). A análise de tendências de séries históricas é uma das maneiras de se verificar a ocorrência de mudança climática local. Avaliar as tendências dessas séries de forma abrangente e confiável, baseadas em índices

extremos climáticos, pode-se utilizar uma maior quantidade de dados, com maiores intervalos das séries históricas, mais atualizadas, além de uma melhorar a regionalização das áreas de estudo (SILVA et al., 2017).

Santos et al. (2020) analisaram tendências anuais de índices de extremos climáticos calculados usando o RClmDex para 12 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, distribuídas no estado do Maranhão no período de 1986 a 2016, seus resultados evidenciaram que estão ocorrendo extremos climáticos na região estudada, com dias e noites mais quentes e, em algumas localidades, aumento da umidade, aumento e diminuição no volume de chuvas.

Costa et al. (2020) dividiram a região Nordeste do Brasil em três áreas considerando a distribuição de estações homogêneas de acordo com o período chuvoso, utilizando análise de agrupamento, sendo que duas das áreas obtidas compreendem com exceção do Tocantins, as demais porções da região do MATOBIBA e realizaram avaliação dos índices de extremos climáticos para o período de 1961-2014, utilizando o RClmDex para estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Os autores concluíram que as análises regionais e sub-regionais indicam que o Nordeste do Brasil experimentou uma diminuição significativa no número de dias e noites frios, e aumentos significativos no número de dias e noites quentes a cada ano / década e com relação à precipitação diária, padrões espacialmente organizados de aumento e diminuição são evidentes.

Reis (2020) avaliaram os índices extremos climáticos anuais calculados a partir de dados médios diários de precipitação e temperatura do ar (máxima e mínima) para o período 1980-2013 para quatro sub-regiões de precipitação homogênea, obtidas através da análise de agrupamento dos totais anuais de precipitação na região, destacando que os resultados referentes à análise de tendências concordaram com estudos anteriores realizados no Norte e Nordeste do Brasil, em regiões de alto potencial agrícola.

O presente estudo tem como objetivo analisar as tendências anuais de indicadores de extremos climáticos dependentes das temperaturas máximas e mínimas do ar e da precipitação pluvial obtidas a partir do software RClmDex, para região do MATOPIBA, assim como classificar as microrregiões do MATOPIBA em sub-regiões homogêneas, do ponto de vista do índice de simples intensidade de precipitação - SDII.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A região MATOPIBA é localizada entre a região Amazônica e o Semiárido Brasileiro, é uma região formada por áreas majoritariamente de cerrado nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, abrangendo parte do norte e nordeste do Brasil. Inclui dez mesorregiões, sendo quatro totalmente e seis parcialmente (Sul Maranhense, Leste Maranhense, Oeste Maranhense Centro Maranhense e Norte Maranhense; Oriental do Tocantins e Ocidental do Tocantins; Sudoeste Piauiense; Extremo Oeste Baiano e Vale São-Francisco da Bahia) (SALVADOR, 2014).

A área da região MATOPIBA (Figura 1) possui delimitação territorial obtida e proposta pelo Grupo de Inteligência Territorial Estratégica - GITE, vinculado a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa abrange 31 microrregiões geográficas do IBGE, reúne 337 municípios e uma área total de 73.173.485 ha. Ela engloba um universo com cerca de 324.326 mil estabelecimentos agrícolas (MIRANDA et al., 2014).

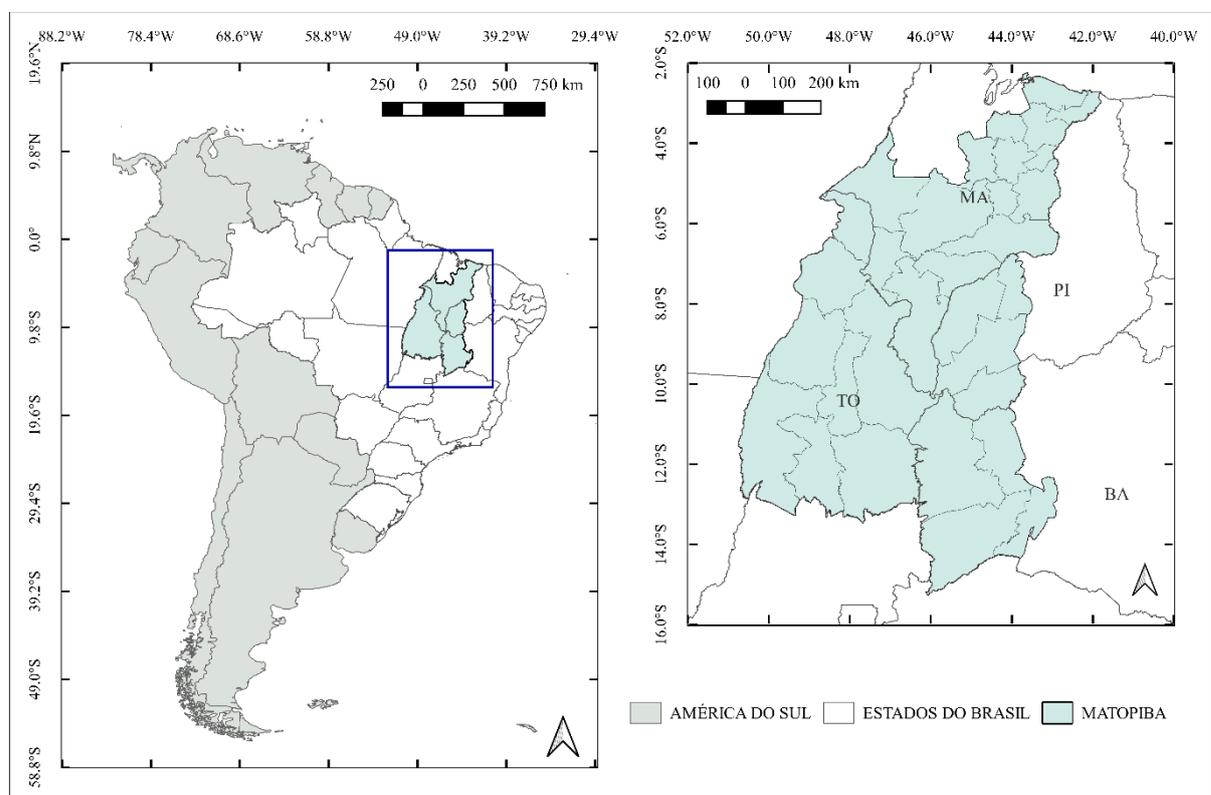


Figura 1. Mapa do Brasil com destaque da área de estudo (região do MATOPIBA).

O recorte territorial proposto pela Embrapa para o MATOPIBA entre os quatro estados inclui cerca de 33% da área do total inserida no Maranhão (porções Sul e Leste, 15 microrregiões, 135 municípios, 23.982.346 ha); 38% da área do total no Tocantins (área total do Tocantins, 8 microrregiões, 139 municípios e 27.772.052 ha); 11% da área do total no Piauí (sudoeste, sul e oeste, 4 microrregiões, 13 municípios e 8.204.588 ha) e 18% da área do total na Bahia (porção oeste, 4 microrregiões, 30 municípios e 13.214.499 ha) (MIRANDA et al., 2014; SOUZA e PEREIRA, 2019).

O principal critério para a delimitação desta região foi a ocorrência de áreas de Cerrados, bioma esse que representa cerca de 91% da área do MATOPIBA, seguido pelo bioma Amazônia (7,3%) e com mínima área de Caatinga (1,7%), sendo a cobertura vegetal natural formada predominantemente por savanas (63,6%), áreas de tensão ecológica (15%) e floresta estacional decidual (10,7%) (BOLFE et al., 2016; SOUZA e PEREIRA, 2019). Suas pastagens plantadas ocupam cerca de 8 milhões de hectares, 3 dos quais com indicativos de degradação (ANDRADE et al., 2016).

A área do MATOPIBA apresenta grande variedade de solos, considerando o 1º nível do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA 2011, Magalhães e Miranda (2014) destacam a ocorrência de 12 classes de solos, com predominância dos Latossolos (37,96%) seguido dos Neossolos (24,57%) e Plintossolos (19,24%). As classes de menor representatividade são os solos Argissolos (9,56%), Gleissolos (2,66%), Cambissolos (2,58%), Nitossolos (1,04%), Luvissolos (0,66%), Chernossolos (0,47%), Planossolos (0,31%), Dunas (0,19%) e Vertissolos (0,09%). Quanto ao relevo, 47,9% são de áreas planas (até 3% de declividade) e 33,7% de áreas suavemente onduladas (de 3% a 8%) (BOLFE et al., 2016).

A região possui três zonas climáticas: tropical brasil central (53%), tropical zona equatorial (44%) e equatorial (3%) (MAGALHÃES e MIRANDA, 2014). Segundo Oliveira Aparecido et al. (2021) as temperaturas médias anuais do ar na região variam de 19,8 a 29,1 °C, junho e julho são os meses que apresentam menores valores de temperatura do ar, com valores entre 20 e 21 °C na porção sul da região, localizada principalmente no extremo oeste baiano, e de 24 a 28 °C, na porção Centro-Oeste e Centro-Norte do MATOPIBA, temperaturas elevadas, acima de 30 °C, são frequentes entre setembro, outubro e novembro no Centro-Norte e Noroeste do MATOPIBA, onde estão localizados os estados do Maranhão, Tocantins e Piauí.

Na região central do território predomina o clima tropical semiúmido (~78% do território), com temperaturas médias acima de 18°C em todos os meses do ano, e períodos de

seca entre 4 e 5 meses. Já o limite leste é caracterizado por um clima semiárido, com baixa umidade e precipitação (6 meses secos) e temperaturas elevadas acima de 18°C em todos os meses do ano) (MAGALHÃES e MIRANDA, 2014). A região possui duas estações climáticas bem definidas: uma seca, de maio a setembro, e outra chuvosa, de outubro a abril, com precipitação média anual de 800 mm a 2.000 mm (ANDRADE et al., 2016).

A região está integrada nos domínios das bacias hidrográficas do rio Tocantins (43%), do Atlântico Norte/Nordeste (40%) e do rio São Francisco (17%), abrange quatro regiões hidrográficas, Tocantins-Araguaia, Parnaíba, Atlântico Nordeste Ocidental e São Francisco, banhadas pelos rios Araguaia, Tocantins, São Francisco, Parnaíba, Itapicuru, Mearim, Gurupi e Pindaré, principais rios do MATOPIBA (MAGALHÃES e MIRANDA, 2014).

2.2 Dados

Os dados utilizados neste trabalho consistem em séries históricas diárias de 54 anos de dados de precipitação pluviométrica, temperaturas do ar máximas e mínimas compreendendo o período de 1 de janeiro de 1950 a 31 de dezembro de 2004. A área de estudo compreende um recorte sobre a região do MATOPIBA, englobando 235 pontos de grade com resolução espacial de 0,5° (Figura 2). Os pontos utilizados neste trabalho estão distribuídos espacialmente em cada microrregião inserida na área do MATOPIBA, para as quais foram obtidas médias dos dados diários da precipitação pluviométrica e das temperaturas do ar máximas e mínimas.

Os dados históricos de temperaturas do ar máximas e mínimas e precipitação foram adquiridos no site <https://www.2w2e.com/home/CIMP> da *Water Weather Energy Ecosystembase*, a base de dados disponibiliza dados diários históricos e futuros de temperatura e precipitação, esses dados diários cobrem o período de 1950 a 2099.

A base de dados históricos de reanálise disponível utiliza os conjuntos de dados de séries temporais (*Time-series-TS*) mensais, produzidos pela *Climatic Research Unit - CRU* da Universidade de East Anglia, esses são campos de grade mensais com base em valores diários. Os dados CRU-TS-3.1 históricos de reanálise são reformatados do NetCDF em arquivos de texto legíveis para base de dados diária, com resolução de 0,5° (HARRIS et al., 2013; ASHRAF VAGHEFI et al., 2017; HARRIS et al., 2020).

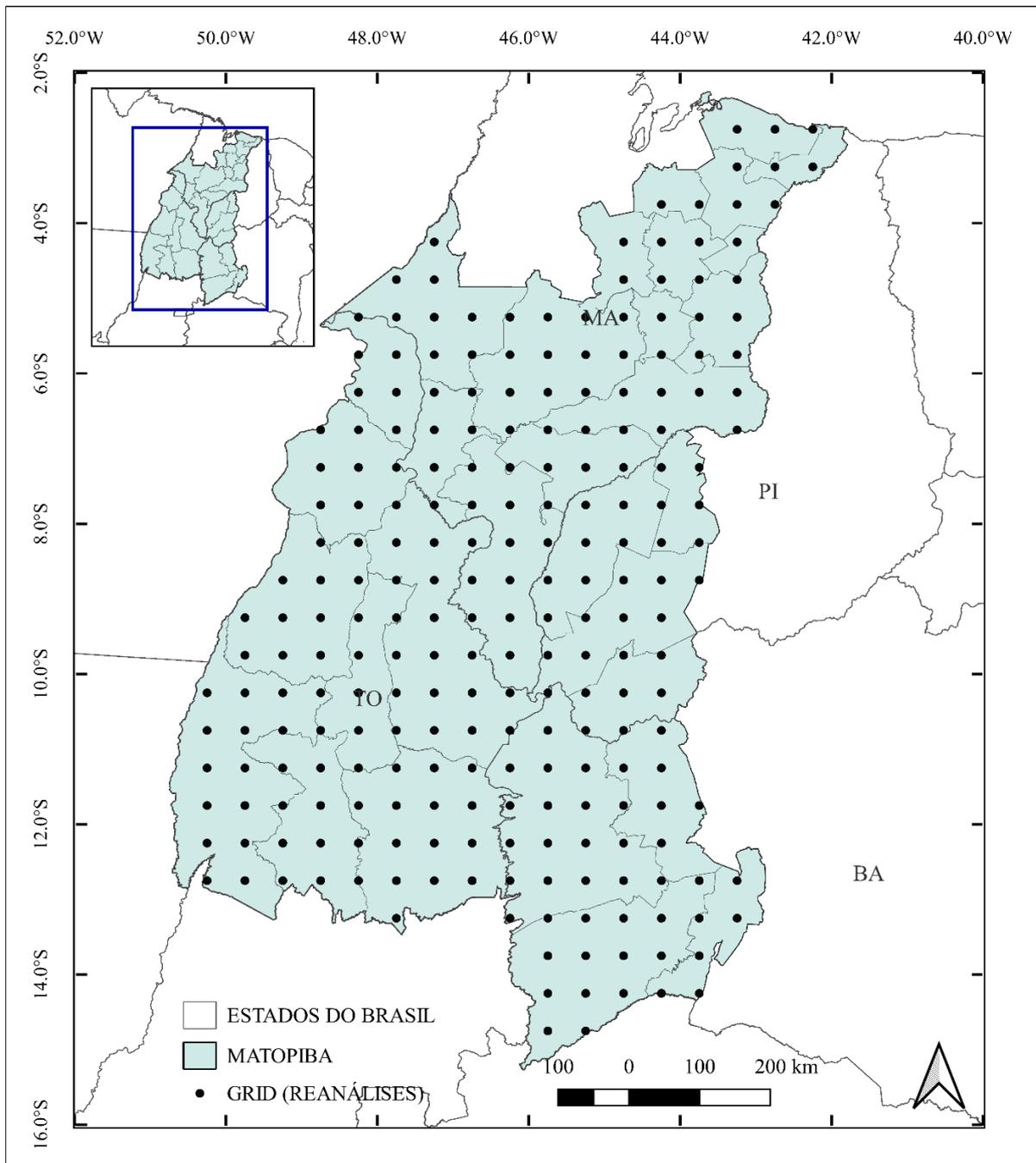


Figura 2. Distribuição espacial dos pontos de grade para área de estudo (região do MATOPIBA).

2.3 Índices de extremos climáticos

Índices de extremos climáticos foram calculados para a região do MATOPIBA (Figura 1) usando o software RclimDex desenvolvido por Zhang e Yang (2004). O Pacote RclimDex (Versão 1.1) utilizado é de distribuição gratuita foi desenvolvido para um código em linguagem R e está disponível para download no website dos índices da Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices – ETCCDMI (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI>).

O RclimDex é projetado para fornecer uma interface amigável para calcular índices de extremos climáticos, incorporando assim, o ClimDex para um ambiente que não dependa de um sistema operacional específico, já que o ClimDex é um programa baseado no Microsoft Excel. O Climdex foi desenvolvido por Byron Gleason do National Climate Data Centre (NCDC) da NOAA é uma ferramenta que proporciona um pacote computacional que é usado no cálculo de índices de extremos climáticos para monitorar e detectar mudanças climáticas, e tem sido usado em oficinas CCI/CLIVAR (International Research Programme on Climate Variability and Predictability) sobre índices climáticos desde 2001 (ZHANG e YANG, 2004).

A partir do RclimDex é possível determinar 27 índices de extremos derivados dos dados diários de temperatura e precipitação recomendados pela Equipe de Especialistas CCI/CLIVAR para Monitoramento e Índices de Detecção de Mudanças Climáticas - ETCCDMI, bem como alguns outros índices de temperatura e precipitação com limites definidos pelo usuário (ZHANG e YANG, 2004).

Na presente pesquisa foram analisados 23 (Tabela 1) dos 27 índices definidos pelo ETCCDMI, sendo 11 relativos aos dados de precipitação pluviométrica e 12 aos dados de temperatura do ar, na Tabela 1 constam os índices selecionados, suas definições e unidades. Os resultados para alguns dos índices podem ser obtidos tanto anualmente quanto mensalmente pelo RclimDex, neste estudo foram considerados apenas os valores anuais. Os índices de extremos climáticos foram obtidos para 31 microrregiões inseridas na região do MATOPIBA utilizando os valores médios diários de precipitação pluvial e temperatura do ar dos pontos de grade inseridos em cada microrregião. Estes também foram obtidos para regiões homogêneas resultantes da análise de agrupamento, sendo feitas as médias de precipitação e temperatura para as regiões homogêneas e em seguida calculados os índices.

A saída do Rclimdex fornece, para cada índice, dados estatísticos, tais como tendência linear calculada pelo método de mínimos quadrados, nível de significância estatística da tendência (valor-p) por meio do Teste de Fisher, coeficiente de determinação (R^2) e erro padrão de estimativa, assim como gráficos das séries anuais (ZHANG e YANG, 2004). Sendo assim,

a tendência dos índices de detecção de mudanças climáticas foi analisada a partir dos resultados estatísticos gerados pelo software RCLimdex.

Tabela 1. Índices de extremos climáticos do Rclimdex referentes à precipitação pluvial e à temperatura do ar utilizados neste estudo.

Índice	Definição	Unidade
Precipitação pluvial		
SDII	Precipitação média para dias com chuva ≥ 1 mm	milímetros
R10mm	Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 10 mm	dias
R20mm	Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 20 mm	dias
R25mm	Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 25 mm	dias
RX1day	Precipitação máxima mensal de 1 dia	milímetros
RX5day	Precipitação máxima mensal consecutiva de 5 dias	milímetros
CDD	Duração máxima do período de seca: número máximo de dias consecutivos com precipitação diária < 1 mm	dias
CWD	Duração máxima do período de chuva: número máximo de dias consecutivos com precipitação diária ≥ 1 mm	dias
R95p	Precipitação total anual quando a precipitação diária $> 95^{\circ}$ percentil	milímetros
R99p	Precipitação total anual quando a precipitação diária $> 99^{\circ}$ percentil	milímetros
PRCPTOT	Precipitação total anual em dias úmidos	milímetros
Temperatura do ar		
SU	Número de dias quando TX (temperatura máxima diária) > 25 °C	dias
TR	Número de dias quando TN (temperatura mínima diária) > 20 °C	dias
TXx	Valor máximo mensal da temperatura máxima diária	°C
TNx	Valor máximo mensal da temperatura mínima diária	°C
TXn	Valor mínimo mensal de temperatura máxima diária	°C
TNn	Valor mínimo mensal de temperatura mínima diária	°C
TX10p	Porcentagem de dias quando TX $<$ percentil 10 (dias frios)	%
TX90p	Porcentagem de dias quando TX $>$ percentil 90 (dias quentes)	%
TN10p	Porcentagem de dias quando TN $<$ percentil 10 (noites frias)	%
TN90p	Porcentagem de dias quando TN $>$ percentil 90 (noites quentes)	%
WSDI	Índice de duração do período de aquecimento: contagem anual de dias com pelo menos 6 dias consecutivos quando TX $>$ percentil 90	dias
DTR	Faixa de temperatura diária: diferença média mensal entre TX e TN	°C

As tendências foram avaliadas quanto a sua intensidade e aos valores que dos índices apresentaram (positivos ou negativos), valores positivos indicando uma tendência crescente e valores negativos indicando uma tendência decrescente. Sendo consideradas como possíveis

tendências climáticas os índices que apresentaram valores de tendência linear (positiva ou negativa) superior ao erro padrão de estimativa e estatisticamente significativa (ao nível de 5%), obtidos pelo Teste de Fisher, gerado pelo software.

2.4 Análise hierárquica de agrupamento

A análise de Agrupamento, tem como objetivo criar grupos, classificando indivíduos em grupos distintos, com características semelhantes no seio de uma população. A classificação dos indivíduos é feita a partir de uma função de agrupamento denominada distância ou similaridade e de um critério matemático de agrupamento. Nos métodos hierárquicos vários critérios de agrupamentos são possíveis, os mais utilizados são: Ligação Simples; Ligação Completa; Ligação Média; Método Centróide e Método de Ward, dentre outros (WILKS, 2006; EVERITT, 1993; RICHMAN e ADRIANTO, 2010; STRAUSS e MALTITZ, 2017).

Neste trabalho foram utilizados valores máximos do índice simples de intensidade diária de precipitação - SDII para obtenção de regiões homogêneas-RH, com intuito de avaliar as tendências dos indicadores de eventos extremos por sub-regiões na área do MATOPIBA. A determinação das RH será obtida pelo método de agrupamento hierárquico de Ward 1963, segundo uma função de agrupamento (distância) e um critério matemático de inercia.

A função de dissimilaridade é usada para medir a distância entre dois indivíduos, para designar o quanto eles são semelhantes. Na medida de similaridade, quanto menor for o valor observado, mais parecido serão os elementos (LINDEN, 2009; VICINI, 2005). A distância euclidiana é a medida de dissimilaridade mais comumente empregada quando todas as variáveis são quantitativas (SEIDEL et al., 2008; EVERITT et al., 2011). Essa medida de distância entre dois indivíduos é obtida pela raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças de valores para cada elemento, sendo definida pela Equação (1):

$$d_{ij} = [X_i - X_j] = \left[\sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

em que: d_{ij} é a distância entre dois elementos X_i e X_j , $i \neq j = 1, \dots, n$ (total de elementos da amostra); X_{ik} é o elemento observado da k -ésima variável do elemento de amostra i ; X_{jk} é o elemento observado da k -ésima variável do elemento de amostra j ; e p variáveis usadas $X_1 \dots X_p$.

O método de variância de Ward (1963), é um procedimento que busca formar grupos hierárquicos que possam minimizar a variância dos elementos dentro destes grupos. Este método consiste em um procedimento de agrupamento hierárquico no qual a medida de similaridade usada para juntar agrupamentos é calculada como a soma de quadrados da distância euclidiana às médias dos grupos feita sobre todas as variáveis. Um grupo será reunido a um outro se a reunião proporcionar o menor valor da variância intragrupo (HAIR Jr. et al., 2005; VICINI, 2005).

A perda de informações que resulta da diferença entre soma dos erros quadrados da distância e às médias dos grupos pode ser indicada por um coeficiente que corresponde a variação atribuída ao erro, a soma dos quadrados do erro (ESS), que pode ser obtido pela relação funcional, conforme Equação (2) (WARD, 1963):

$$ESS = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (2)$$

em que: n é o número total de elementos do agrupamento; x_i é o i -ésimo elemento do agrupamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Índices de extremos de precipitação pluvial

As tendências anuais dos índices extremos de precipitação pluvial para as diferentes microrregiões da região do MATOPIBA, juntamente com seu nível de significância, são observadas na Tabela (2), os índices com significância estatística, ou seja, apresentaram valor de ($p < 0,05$) estão marcados em negrito. Independentemente do índice, apenas algumas localidades mostraram tendências estatisticamente significativas, dentre os 11 índices analisados, foram verificadas tendências negativas estatisticamente significantes apenas para o índice de precipitação máxima mensal consecutiva de 5 dias - Rx5day e tendências positivas estatisticamente significantes para os índices de dias secos consecutivos - CDD e dias úmidos - CWD. Isso é esperado devido à variabilidade espacial e temporal no volume de precipitação ao longo da região MATOPIBA. Reis et al. (2020) destacam que a quantidade e a distribuição das chuvas, na região do MATOPIBA, sofrem variações em virtude de diferentes cenários meteorológicos associados a mecanismos de grande escala, assim como alterações indicadas nas projeções de mudanças climáticas.

Analisando as tendências dos índices Rx1day e Rx5day, é possível verificar que respectivamente 61,29% e 64,52% das localidades (Figura 3) apresentaram tendências negativas. A tendência negativa dos índices Rx1day e Rx5day para maior número de microrregiões e, portanto, maior porção da região do MATOPIBA indica que nesta área a precipitação máxima anual de 1 dia e de 5 dias experimentou uma redução para o período de 1950-2004. Pode-se observar que para o índice de precipitação máxima mensal consecutiva de 5 dias - Rx5day apenas duas localidades apresentaram tendências negativas estatisticamente significativas, ou seja, redução de intensidade, as microrregiões de Baixo Parnaíba Maranhense e Lençóis Maranhenses localizadas na porção norte da região.

A Precipitação média para dias com chuva ≥ 1 mm – SDII, ou seja, o índice de intensidade de precipitação simples, apresentou tendências positivas predominantes (80,65 % das microrregiões) e 19,35 % das microrregiões com tendências negativas, dentre as quais, quatro estão localizadas na porção norte da região do MATOPIBA. Embora não tenham sido obtidos resultados significativos para o índice SDII, pode-se verificar que os valores obtidos indicam tendência de aumento.

Tabela 2. Tendências anuais dos índices extremos de precipitação pluvial para as microrregiões do MATOPIBA.

Micros/Estado	Rx1day	Rx5day	SDII	R95p	R99p	PRCPTOT	CDD	CWD	R10mm	R20mm	R25mm
Lençóis Maranhenses-MA	-0,123	-0,61	-0,012	-2,082	-0,171	-5,157	0,53	-0,224	-0,189	-0,086	-0,07
Itapecuru Mirim-MA	0,045	-0,164	-0,006	-1,246	-0,592	-4,862	0,263	-0,329	-0,135	-0,039	-0,035
Baixo Parnaíba Maranhense-MA	-0,053	-0,472	-0,004	-1,07	-0,205	-3,808	0,378	-0,188	-0,131	-0,036	-0,007
Chapadinha-MA	-0,107	-0,474	-0,006	-1,644	-1,162	-5,324	0,155	-0,261	-0,157	-0,081	-0,034
Codó-MA	0,046	-0,167	0,008	-1,081	0,279	-3,265	0,282	-0,169	-0,107	-0,003	-0,037
Coelho Neto-MA	-0,003	-0,264	0,002	-1,386	-0,63	-3,38	0,231	-0,223	-0,097	-0,003	-0,042
Caxias-MA	-0,075	-0,048	0,01	0,307	-0,177	-1,551	0,302	0,201	0,007	0,02	0,007
Chapadas do Alto Itapecuru-MA	-0,05	-0,161	0,007	-0,59	-0,14	-1,091	0,131	0,137	0,071	0	-0,006
Médio Mearim-MA	0,041	-0,128	0,006	-0,464	0,612	-3,103	0,318	-0,121	-0,132	-0,026	-0,012
Alto Mearim e Grajaú-MA	-0,01	0,036	0,008	0,245	0,208	-1,412	0,298	0,292	0,057	0,008	0,001
Presidente Dutra-MA	-0,046	-0,015	0,007	0,243	0,035	-1,471	0,386	0,174	0,034	0,006	0,002
Imperatriz-MA	-0,039	-0,184	0,003	-0,105	-0,426	-2,69	0,314	-0,144	-0,057	-0,003	-0,007
Porto Franco-MA	0,043	-0,079	0,008	-0,008	0,423	-1,642	0,191	0,357	0,008	0,02	0,006
Chapadas das Mangabeiras-MA	-0,063	-0,139	0,005	0,536	-0,131	-1,094	0,191	0,45	-0,048	0,009	-0,002
Gerais de Balsas-MA	-0,057	-0,054	0,002	-0,296	-0,392	-1,201	0,407	0,105	-0,01	-0,025	-0,008
Bertolínia-PI	0,018	0,127	0,005	0,308	0,263	-0,575	0,39	0,128	0,002	0,013	-0,001
Alto Parnaíba Piauiense-PI	-0,037	0,086	0,006	-0,111	-0,15	-0,684	0,572	0,033	0,002	0,009	-0,004
Alto Médio Gurguéia-PI	-0,058	0,031	0,005	-0,72	0,122	-0,189	0,735	0,21	0,006	-0,025	0,006
Chapadas do Extremo Sul Piauiense-PI	-0,045	-0,052	0,001	-0,208	-0,054	0,335	0,701	0,317	0,038	-0,006	0
Bico do Papagaio-TO	-0,019	-0,134	0,006	-0,705	-0,327	-2,732	0,292	0,019	-0,011	-0,016	-0,006
Araguaína-TO	0,005	-0,156	-0,002	-0,833	-0,262	-3,22	0,281	0,311	-0,102	-0,036	-0,018
Miracema do Tocantins-TO	0,003	-0,18	0,001	-0,329	-0,192	-2,073	0,166	-0,155	-0,008	-0,011	0,006
Rio Formoso-TO	-0,074	-0,027	0,001	-0,527	-0,079	-0,87	0,422	0,047	-0,028	-0,001	0,003
Gurupi-TO	0,053	0,163	0,001	0,679	0,062	-0,911	0,512	-0,03	-0,035	0,02	0,005
Jalapão-TO	-0,009	0,025	0,003	-0,422	-0,104	-1,176	0,508	0,006	-0,049	-0,019	-0,002
Porto Nacional-TO	-0,036	-0,066	0,003	-0,596	0,022	-1,504	0,414	-0,024	-0,054	-0,014	-0,001
Dianópolis-TO	0,052	0,062	0,002	-0,259	0,304	-0,725	0,704	0,115	-0,03	-0,016	0,01
Cotegipe-BA	-0,019	-0,056	0,003	0,097	0,072	0,787	0,58	0,174	0,008	0,001	0,015
Barreiras-BA	0,033	0,07	0,007	0,335	0,267	0,447	0,646	0,18	0,01	0,005	0,003
Santa Maria da Vitória-BA	0,07	0,147	0,001	0,018	0,04	-0,395	0,428	0,098	-0,074	-0,006	0,019
Bom Jesus da Lapa-BA	0,024	-0,034	-0,002	-0,106	-0,096	0,242	0,485	0,079	0,008	-0,004	-0,012

Valores em negrito representam significância ao nível de 5% ($p < 0,05$).

Considerando os índices de dias muito úmidos - R95p e dias extremamente úmidos (R99p), que significam o 95° e 99° percentis de precipitação em dias úmidos no período estudado, respectivamente, não foram observadas tendências estatisticamente significantes, sendo predominantes tendências negativas, sendo assim, houve uma redução no número de eventos de precipitação intensa. Para o índice de precipitação total anual - PRCPTOT foram observadas predominância de tendências negativas e ausências de tendências estatisticamente significantes, mesmo comportamento observado para os índices R95p e R99p, evidenciando

redução predominante dos eventos de extremos de precipitação. Este índice apresentou tendências positivas apenas para as microrregiões Chapadas do Extremo Sul Piauiense, Cotegipe, Barreiras e Bom Jesus da Lapa.

Os índices de dias secos consecutivos - CDD e dias úmidos - CWD apresentaram tendências significativas positivas. Pode-se observar que o índice CDD apresentou apenas tendências positivas, sendo significativas para 6 microrregiões inseridas na porção sudeste da região do MATOPIBA, indicando que o número de dias secos consecutivos aumentou significativamente para estas localidades, enquanto o índice CWD apresentou tendências positivas significativas apenas para a microrregião Chapadas do Extremo Sul Piauiense, um fato interessante merece destaque para esta microrregião o índice CDD também apresentou tendência positiva estatisticamente significativa. Os resultados das tendências obtidos para os índices CDD e CWD concordam com os obtidos por Costa et al. (2020), que verificaram predominância de tendências positivas para a região Nordeste do Brasil, que compreende com exceção do Tocantins as demais porções do MATOPIBA. Costa et al. (2020) destaca que teoricamente, tendências opostas seriam esperadas entre os índices CDD e CWD, porém também obteve nos seus resultados tendências de CWD e CDD igualmente positivas.

Pode-se observar na (Tabela 2) que o índice CWD apresentou tendências negativas para onze microrregiões, sendo possível notar a redução do número de dias úmidos consecutivos para 35,48% (Figura 3) das microrregiões. Considerando os índices PRCPTOT e CDD pode-se verificar que para 27 microrregiões das 31 o PRCPTOT apresenta tendência negativa, ou seja redução da precipitação total anual, enquanto o CDD apresentou tendência positiva, dessa forma destaca-se o aumento dos dias consecutivos secos em um ano, em todas as microrregiões.

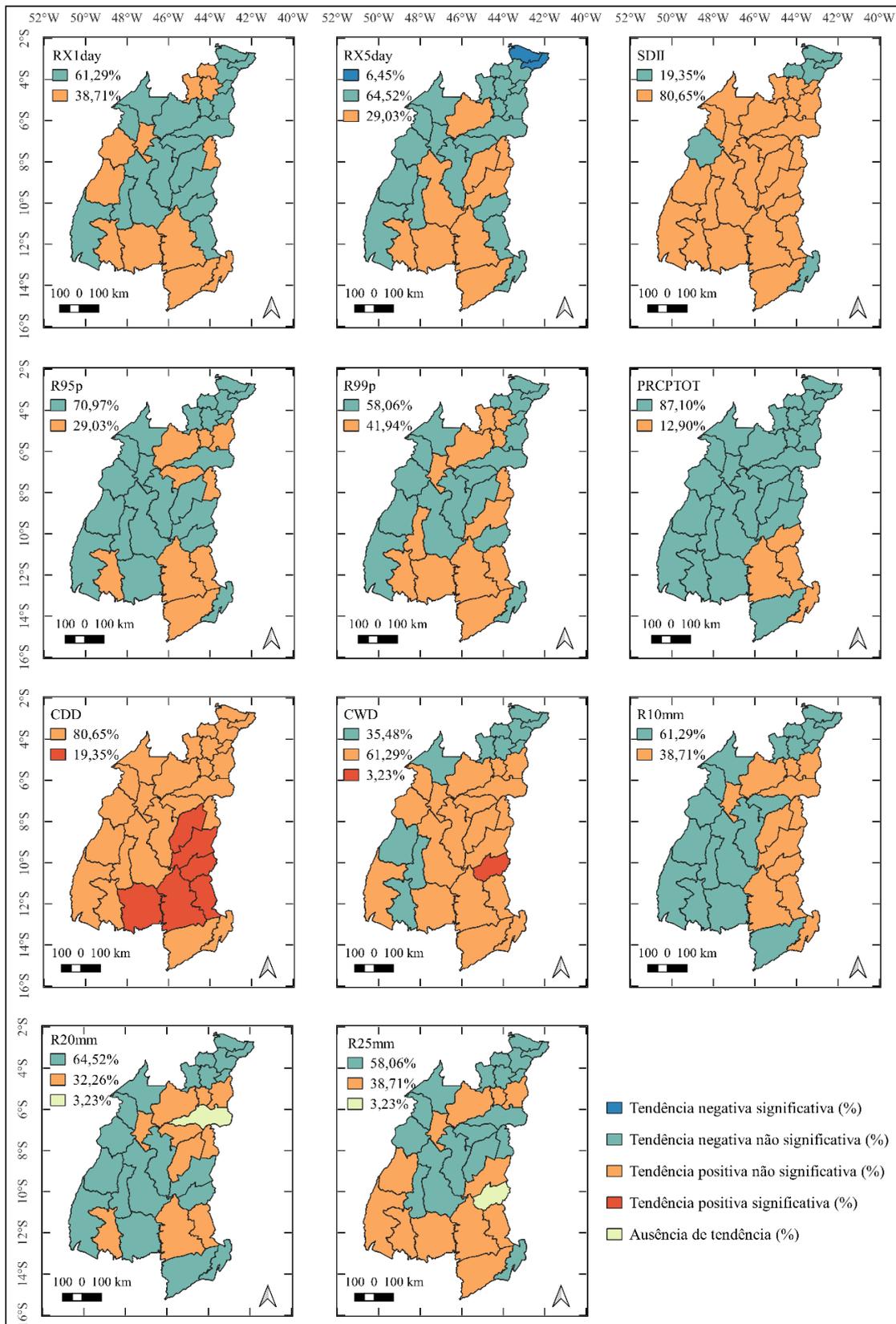


Figura 3. Distribuição da porcentagem de microrregiões com tendências significativas ao nível de 5% ($p < 0,05$), não significativas e ausência de tendências para os índices precipitação pluvial para a região do MATOPIBA.

Reis (2020) obteve para a região do MATOPIBA apenas tendências positivas para o índice CDD, sendo que, apenas uma das sub-regiões de precipitação resultantes de agrupamento, que compreende áreas com precipitação acumulada anual de 1400 mm, apresentou tendência positiva estatisticamente significativa. Nesta sub-região encontram-se inseridas totalmente ou parcialmente as microrregiões Alto Parnaíba Piauiense, Alto Médio Gurguéia, Chapadas do Extremo Sul Piauiense, Cotegipe, Barreiras para as quais, assim como os resultados de Reis (2020), as tendências foram crescentes estatisticamente significativas, indicando que durante o período analisado foi verificado aumento em dias secos consecutivos.

O número de dias de forte precipitação, representado pelos índices R10mm, R20 mm e R25mm, não apresentou tendências estatisticamente significativas, sendo possível verificar que respectivamente 61,29 %, 64,52 % e 58,06 % (Figura 3) das microrregiões apresentaram tendências negativas. Sendo assim, no período 1950-2004, houve uma redução no número de dias com intensidade de precipitação maior ou igual a 10 mm.

Os resultados obtidos para as tendências dos índices Rx1day, R95p, R99p, PRCPTOT, CWD, R10mm e R20mm para as microrregiões inseridas no estado do Maranhão em geral concordam com os obtidos por Santos et al. (2020). Considerando os resultados de Costa et al. (2020) foram verificados padrões de tendência crescente ou decrescente não significativas para os índices extremos PRCPTOT, SDII, R95p e R10mm o que corrobora com os resultados destes índices obtidos para as microrregiões da região do MATOPIBA inseridas região Nordeste do Brasil.

3.2 Índices de extremos de temperatura do ar

As tendências anuais dos índices extremos de temperatura do ar para as diferentes microrregiões do MATOPIBA podem ser observadas na Tabela (3), os índices com significância estatística, ou seja, apresentaram valor de $p < 0,05$ estão marcados em negrito. Os resultados de tendência para o número de dias com temperatura máxima diária > 25 °C (SU indicam ausência de tendências estatisticamente significantes. Todavia o índice SU apresentou tendência positiva para 90,32% das microrregiões, foram obtidas tendências negativas apenas para as microrregiões de Dianópolis e Itapecuru Mirim no Tocantins (localizadas respectivamente no sul e norte da área) e nenhuma tendência para microrregião de Miracema do Tocantins - TO (localizada no oeste da área).

Sendo assim, a contagem anual de dias em que a temperatura máxima diária foi superior a 25 °C permite observar que número de dias de verão aumentou relativamente para maior parte

da região do MATOPIBA. Os resultados obtidos por Reis (2020) para este índice apresentaram tendências positivas e negativas, as tendências decrescentes foram verificadas para uma área na qual as microrregiões de Dianópolis e Itapecuru Mirim encontram-se inseridas, porém é uma área que possui abrangência relativamente maior que a área observada neste trabalho.

Tabela 3. Tendências anuais dos índices extremos de temperatura do ar para as microrregiões do MATOPIBA.

Micros/Estado	SU	TR20	TXx	TXn	TNx	TNn	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p	WSDI	DTR
Lençóis Maranhenses-MA	0,001	0,003	0,008	0,011	0,007	0,005	-0,168	0,188	-0,03	0,109	0,589	0,009
Itapecuru Mirim-MA	-0,001	0,076	0,027	-0,003	0,012	0,005	-0,176	0,228	-0,119	0,121	0,574	0,012
Baixo Parnaíba Maranhense-MA	0,001	0,02	0,01	0,008	0,007	0,009	-0,173	0,166	-0,084	0,113	0,508	0,007
Chapadinha-MA	0,001	0,054	0,018	0,004	0,012	0,007	-0,182	0,214	-0,1	0,101	0,541	0,01
Codó-MA	0,001	0,121	0,031	-0,004	0,006	0,007	-0,153	0,229	-0,145	0,122	0,441	0,011
Coelho Neto-MA	0,001	0,101	0,021	0,001	0,009	0,008	-0,152	0,215	-0,123	0,104	0,413	0,01
Caxias-MA	0,001	0,07	0,023	0,007	0,009	0,008	-0,134	0,17	-0,135	0,096	0,249	0,007
Chapadas do Alto Itapecuru-MA	0,002	0,016	0,02	0,008	0,012	0,005	-0,097	0,109	-0,135	0,122	0,259	0,005
Médio Mearim-MA	0,001	0,121	0,035	-0,005	0,008	0,007	-0,151	0,221	-0,158	0,11	0,391	0,012
Alto Mearim e Grajaú-MA	0,002	0,125	0,032	0,002	0,012	0,002	-0,141	0,155	-0,133	0,082	0,284	0,011
Presidente Dutra-MA	0,001	0,082	0,028	0,005	0,01	0,006	-0,129	0,163	-0,149	0,104	0,296	0,008
Imperatriz-MA	0,001	0,064	0,045	-0,006	0,007	0,001	-0,136	0,232	-0,124	0,086	0,462	0,015
Porto Franco-MA	0,005	-0,077	0,029	0,003	0,013	-0,009	-0,116	0,118	-0,049	0,03	0,307	0,016
Chapadas das Mangabeiras-MA	0,006	-0,041	0,023	0,008	0,012	-0,001	-0,099	0,08	-0,114	0,065	0,215	0,007
Gerais de Balsas-MA	0,012	-0,311	0,022	0,007	0,005	-0,02	-0,096	0,097	0,027	-0,032	0,169	0,016
Bertolínia-PI	0,007	-0,025	0,009	0,003	0,008	0,003	-0,061	0,044	-0,098	0,087	0,127	0
Alto Parnaíba Piauiense-PI	0,007	-0,034	0,012	0,002	0,009	-0,006	-0,061	0,058	-0,064	0,036	0,077	0,005
Alto Médio Gurguéia-PI	0,002	-0,037	0,012	-0,006	0,005	-0,011	-0,034	0,01	-0,033	0,021	-0,091	0,002
Chapadas do Extremo Sul Piauiense-PI	0,009	-0,022	0,015	-0,006	0,007	-0,01	-0,028	-0,005	-0,025	-0,001	-0,118	0,002
Bico do Papagaio-TO	0,002	-0,16	0,041	0	0,013	-0,007	-0,139	0,213	-0,042	0,055	0,532	0,02
Araguaína-TO	0,008	-0,448	0,037	0,001	0,008	-0,022	-0,146	0,186	0,08	-0,016	0,376	0,026
Miracema do Tocantins-TO	0	-0,742	0,029	0	0,002	-0,035	-0,134	0,152	0,155	-0,088	0,258	0,03
Rio Formoso-TO	0,006	-0,567	0,03	0,003	-0,002	-0,025	-0,102	0,091	0,088	-0,071	0,166	0,024
Gurupi-TO	0,003	-0,932	0,027	-0,004	-0,006	-0,037	-0,106	0,087	0,184	-0,153	0,087	0,031
Jalapão-TO	0,013	-0,832	0,026	0,001	-0,003	-0,037	-0,104	0,11	0,144	-0,123	0,15	0,025
Porto Nacional-TO	0,005	-0,944	0,029	0	-0,003	-0,042	-0,116	0,124	0,202	-0,15	0,168	0,031
Dianópolis-TO	-0,001	-1,036	0,023	-0,006	-0,007	-0,039	-0,085	0,058	0,185	-0,157	0,044	0,028
Cotegipe-BA	0,009	-0,009	0,007	-0,003	0,009	-0,011	-0,011	-0,013	0,007	-0,017	-0,185	0,001
Barreiras-BA	0,023	-0,191	0,015	-0,005	0,003	-0,023	-0,044	0,012	0,066	-0,061	-0,07	0,011
Santa Maria da Vitória-BA	0,07	-0,175	0,013	0	0,002	-0,02	-0,051	-0,021	0,058	-0,084	-0,2	0,009
Bom Jesus da Lapa-BA	0,041	-0,236	0	0,002	0,005	-0,017	-0,019	-0,033	0,038	-0,044	-0,18	0,005

Valores em negrito representam significância ao nível de 5% ($p < 0,05$)

O índice de noites tropicais - TR20 apresentou apenas tendências negativas estatisticamente significativas em 7 microrregiões (22,58%) Tabela (3) e Figura (4), respectivamente), inseridas na região da Amazônia Oriental e mesorregiões Ocidental e Oriental do Tocantins. Esses resultados sugerem que existe uma tendência de redução da temperatura do ar noturna principalmente para estas microrregiões do MATOPIBA. Os resultados obtidos por Costa et al. (2020) e Reis (2020) para a região do MATOPIBA evidenciaram que o número anual de dias em que a temperatura mínima do ar foi superior a 20°C - TR está aumentando. Para o estado do Maranhão Santos et al. (2020) definiram limites (entre 23 e 25) para este índice, também observando que os resultados obtidos indicam uma tendência positiva no número de dias em que o TMin excedeu 20 C.

Os valores mensais máximo - TXx e mínimo - TXn das tendências dos índices diários de temperatura máxima e aos valores extremos das temperaturas mínimas diárias, como máxima mensal - TNx e mínima - TNn são apresentados na Tabela (3). O índice TXx exceto para a microrregião de Bom Jesus da Lapa que apresentou ausência de tendência, mostrou apenas tendência positiva, sendo estas estatisticamente significativas para 70.97% das microrregiões. Já o índice TXn apresentou tendências não significativas, decrescentes e crescentes correspondendo a respectivamente 32,26 % e 54,84% e ausência de tendência para 12.90 % das microrregiões (Figura 4). Foram observadas tendências positivas significativas para o índice TNx (38.71% das microrregiões) e tendências negativas significativas para o índice TNn (35.48% das microrregiões). Tendências negativas significativas do índice TNn foram verificadas por Reis (2020) para as sub-regiões de precipitação homogênea nas quais microrregiões inseridas nos estados da Bahia e Piauí encontram-se inseridas nestes estados.

Os resultados do índice valores mensais máximo - TXx são condizentes com os obtidos por Costa et al. (2020) que verificaram que o índice TXx apresentou tendência de aumento, com extrema significância estatística ($p < 0,01$). Já para o TXn Costa et al. (2020) obtiveram resultados que evidenciam leve tendência de queda para áreas ao norte da Região Nordeste do Brasil, concordando como os obtidos neste trabalho para as microrregiões inseridas nessa porção da região, porém divergindo dos resultados para as microrregiões localizadas nas áreas ao sul, já que Costa et al. (2020) verificaram a presença de tendências significativas na porção sul da região Nordeste do Brasil. Em seus resultados Santos et al. (2020) verificaram que os índices TXx e TNx para o estado do Maranhão, apresentaram para todas as estações tendências positivas e estas foram predominantemente estatisticamente significativas o que corrobora com os resultados destes índices obtidos para as microrregiões inseridas no estado do Maranhão.

O índice que representa o número de dias quentes TX90p em cada localidade mostrou predominância de tendências positivas em 83,87% das microrregiões do MATOPIBA, sendo verificado aumento significativo para microrregião de Imperatriz-MA. No caso de noites quentes TN90p, foram observadas tendências positivas e negativas, sendo estas estatisticamente significativas apenas para 3,23% e 19,35% das microrregiões, respectivamente. As tendências negativas estaticamente significativas são verificadas para 6 das 7 microrregiões inseridas no estado do Tocantins o que significa que predominantemente o estado apresentou diminuição no número de noites quentes, já a tendência positiva estaticamente significativas foi observada apenas para Chapadas do Alto Itapecuru no estado do Maranhão. Os resultados para estes índices indicam que a região do MATOPIBA experimentou para o período analisado aumento na frequência de dias quentes por ano e redução noites quentes por ano.

O índice TX10p porcentagem de dias quando TX <percentil 10 (dias frios) apresentou apenas tendências negativas, sendo estas estatisticamente significativas para 16,13 % (Figura 4) das microrregiões. Para o índice TN10p que representa a porcentagem de dias quando TN <percentil 10 (noites frias), foram observadas tendências crescentes e decrescentes estatisticamente significativas. Reis (2020) obteve reduções significativas (ao nível de 1%) para o índice TX10p em todas as sub-regiões homogêneas de precipitação analisadas, já para o índice TN10p os resultados mostraram uma diminuição estatisticamente significativa (ao nível de 1%) em três das sub-regiões homogêneas de precipitação que correspondem principalmente às porções das áreas dos estados do Tocantins e Maranhão, faixa ao leste e oeste do Piauí e Bahia, com maior redução na região homogênea que abrange as microrregiões para as quais os resultados obtidos neste trabalho foram decrescentes significativos. Costa et al. (2020) verificaram que os resultados dos índices TX10p e TN10p mostraram tendências decrescentes significativas estatisticamente para respectivamente áreas dos estados do Maranhão e do Piauí e para a toda a Região Nordeste do Brasil.

O índice WSDI expresso pelo aumento na contagem anual de dias com pelo menos 6 dias consecutivos com temperatura máxima acima do percentil 90°, apresentou tendências crescentes e decrescentes, porém apenas para a microrregião Bico do Papagaio foi verificada tendência crescente estatisticamente significativa. O índice Faixa de temperatura diária que é a diferença média mensal entre TX e TN - DTR exceto para a microrregião Bertolândia, na qual foi observada ausência de tendência, apresentou apenas tendências positivas, sendo estas significativas para 35,48% (Figura 4) das microrregiões, das quais sete compõe o estado do Tocantins e uma encontra-se inserida no sul do estado do Maranhão.

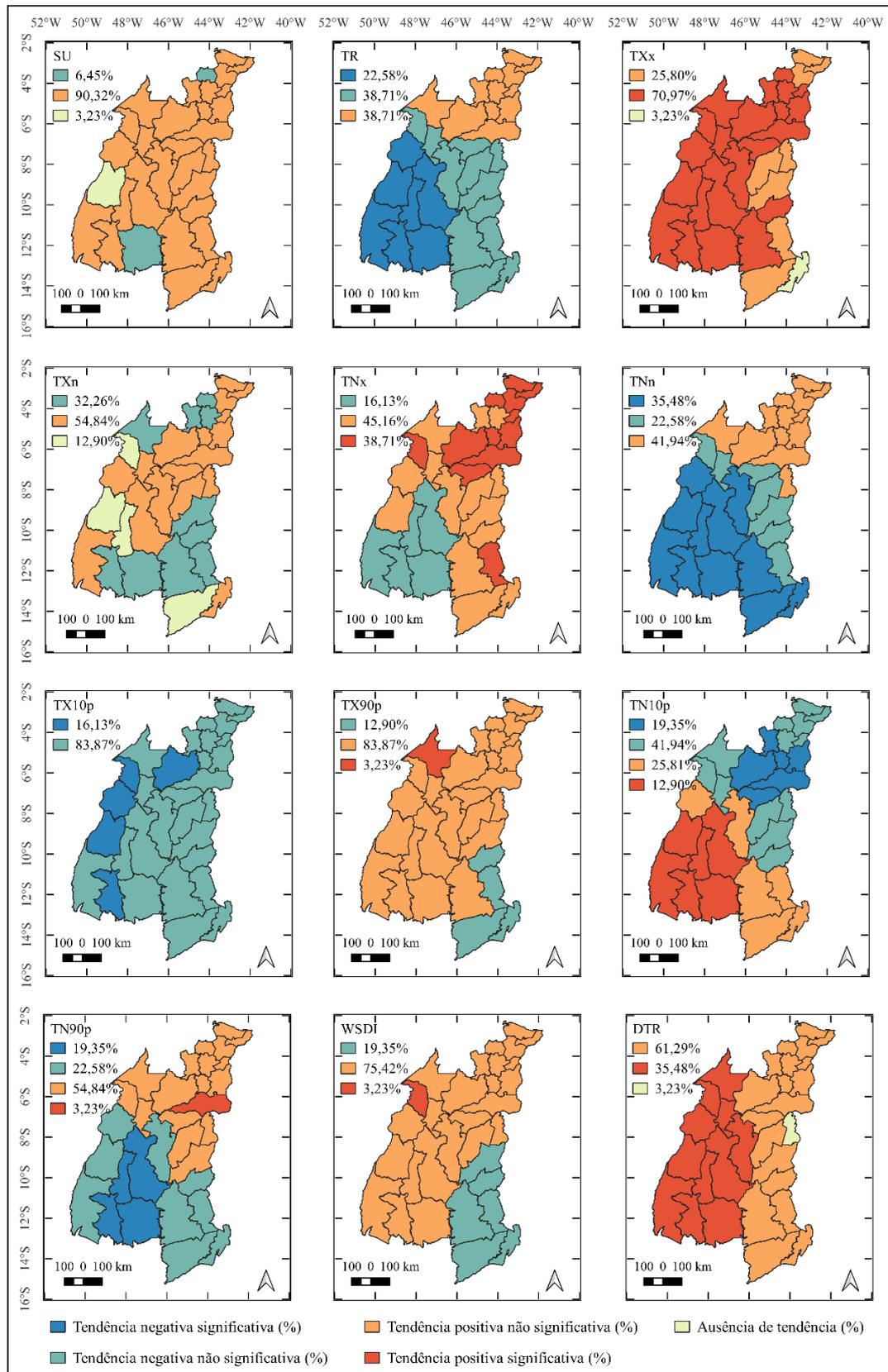


Figura 4. Distribuição da porcentagem de microrregiões com tendências significativas ao nível de 5% ($p < 0,05$), não significativas e ausência de tendências para os índices de temperatura do ar para a região do MATOPIBA.

Considerando a ausência de tendências significativas do índice DTR para as microrregiões inseridas no MATOPIBA, de modo geral os resultados do índice DTR concordam com os encontrados por Costa et al. (2020), em que o DTR não mostrou tendências significativas em nenhuma área da Região Nordeste do Brasil. Reis (2020) obteve tendências positivas (com significância estatística ao nível de 1%) para o índice DTR para duas sub-regiões homogêneas, nas quais algumas microrregiões que apresentaram aumento significativo para este índice neste trabalho encontram-se inseridas.

As tendências do índice TXx para estas microrregiões evidencia que as temperaturas máximas extremas estão aumentando, enquanto o TNn mostrou tendências negativas, evidenciando a redução das temperaturas mínimas, concordando com o índice TR20 que mostra que as temperaturas noturnas diminuíram.

Tendências crescentes para os índices TXx, TNx e DTR e decrescentes para o índice TNn e estatisticamente significativas foram obtidas para quantidades expressivas de microrregiões (Figura 4) da região do MATOBIPA.

3.3 Distribuição espacial das regiões homogêneas - SDII

O índice simples de intensidade diária de precipitação - SDII representa a avaliação dos dias com precipitação pluviométrica igual ou superior a 1 mm ao longo da série histórica, sendo obtido pela razão entre a quantidade de precipitação pluvial igual ou superior a 1 mm total anual e o número de dias chuvosos no ano. Os resultados deste índice representam informações relevantes para caracterização da região, Souza et al. (2012) também destacam que este índice se associa à diferentes fenômenos climáticos que promovem a redução ou intensificação das chuvas em caráter regional.

É possível observar a partir da Figura 5 a distribuição espacial das regiões homogêneas obtidas segundo a análise de agrupamento usando a técnica hierárquica de Ward (1963). A análise de cluster permitiu a divisão da região do MATOPIBA em cinco sub-regiões considerando os valores máximos do índice de intensidade de precipitação simples - SDII. O Grupo 1 - G1 abrange nove microrregiões com valores máximos do SDII entre 7,7 e 10,4 mm inseridas no sudeste do Maranhão e o sudoeste do Piauí e o Grupo 5 - G5 engloba três microrregiões, com valores máximos do SDII entre 8,3 e 10,4 mm, duas no sudoeste do Maranhão e uma no norte do Tocantins. Estes grupos são compostos predominantemente por microrregiões que apresentaram valores baixos para os máximos do índice SDII.

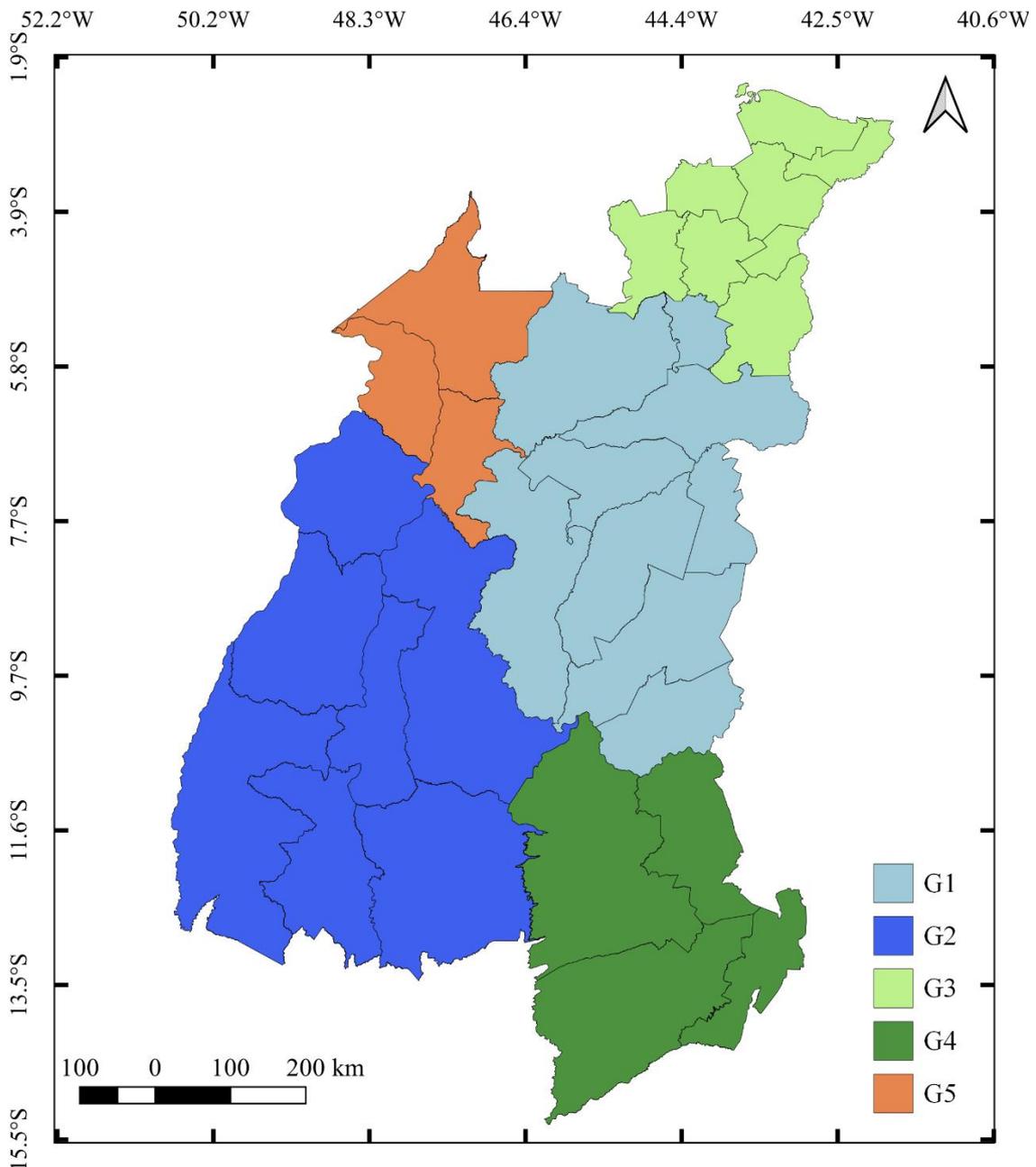


Figura 5. Distribuição espacial das regiões homogêneas obtidas usando análise de agrupamento com base nos valores máximos do SDII para a região do MATOPIBA.

As áreas caracterizadas pelos Grupos G2 e G5, correspondem as porções de duas das quatro sub-regiões de precipitação homogênea obtidas por Reis (2020) usando a análise de agrupamento para os totais anuais de precipitação na região do MATOPIBA, essas sub-regiões são respectivamente ao cluster III (CIII), com precipitação anual total de 1400 mm e cluster IV (CIV), com precipitação acumulada anual de 1682 mm, sendo estas as sub-regiões que apresentam índices altos de precipitação. Demonstrando que áreas com índices de precipitação

relativamente significativos podem não corresponder a áreas de valores mais altos do índice SDII.

O Grupo 2 - G2, abrange com exceção de Bico do Papagaio as demais regiões do estado do Tocantins, para este grupo foram obtidos valores máximos do SDII entre 9,5 e 11,1 mm. As microrregiões da região nordeste do estado do Maranhão compõem o Grupo 3 - G3 com valores máximos do índice SDII variando de 10,7 a 14 mm, a área ocupada pelo Grupo 4 - G4 inclui todas as microrregiões do estado da Bahia, com valores máximos do SDII entre 9,6 e 11,2 mm. Valores altos para os máximos do SDII são encontrados nas microrregiões inseridas nos grupos G2, G3 e G4, sendo que a maioria dos valores altos foram encontrados nas microrregiões que compõem o G3.

Ressalta-se que grupos com valores baixos do índice SDII, podem pertencer a microrregiões com precipitações acumuladas elevadas, porém que foram registradas em maior quantidade de dias. Assim como, grupos com valores altos para o índice SDII podem ser inseridos em outras microrregiões com acumulados de precipitações baixas ou elevadas verificadas em menor quantidade de dias. As regiões homogêneas do índice são de extrema importância, porque é possível fazer uma análise mais precisa dos regimes de chuva utilizando o índice de dias com precipitação pluviométrica igual ou superior a 1 mm ao longo da série histórica nas sub-regiões, sem correr risco de perder informações importantes do conjunto de dados.

O resultado da análise de agrupamento permitiu identificar as regiões homogêneas e as respectivas microrregiões que as compõem, sendo assim, foi possível obter para cada região homogênea séries temporais diárias de precipitação pluvial, temperatura do ar máxima e temperatura do ar mínima. Essas séries foram utilizadas para obtenção dos índices de extremos climáticos para as regiões homogêneas.

3.4 Índices de tendências de extremos climáticos por regiões homogêneas

As tendências anuais dos índices extremos de precipitação pluvial e temperatura do ar para as diferentes regiões homogêneas para a região do MATOPIBA, juntamente com seus respectivos níveis de significância, são observados nas Tabelas (4) e (5). Os índices com significância estatística, que apresentaram valor de $p < 0,05$ estão marcados em negrito. Bezerra et al. (2018) constatou em seus estudos que a significância estatística das tendências de mudanças de precipitação a longo prazo se relaciona com a ocorrência de eventos extremos.

Considerando os resultados das tendências dos índices extremo de precipitação pluvial (Tabela 4) foi possível verificar que apenas o índice de dias secos consecutivos - CDD apresentou tendência significativa, apenas para o Grupo 4, sendo esta crescente. Dentre as tendências obtidas para as microrregiões observam-se que: o índice RX5day apresentou tendências decrescentes nas microrregiões de Baixo Parnaíba Maranhense e Lençóis Maranhenses inseridas no Grupo 3 - G3; para o índice CDW tendência crescente apenas na microrregião Chapadas do Extremo Sul Piauiense englobada pelo no Grupo 1 - G1; e para o índice CDD tendências crescentes nas microrregiões Alto Parnaíba Piauiense, Alto Médio Gurguéia, Chapadas do Extremo Sul Piauiense, Grupo 1 - G1, Dianópolis Grupo 2 - G2, Cotegipe e Barreiras Grupo 4 - G4.

Tabela 4. Tendências anuais dos índices extremos de precipitação pluvial por regiões homogêneas para a região do MATOPIBA.

Grupos	Rx1day	Rx5day	SDII	R10mm	R20mm	R25mm	CDD	CWD	R95p	R99p	PRCPTOT
G1	-0,03	0,004	0,006	0,03	0,002	-0,002	0,21	0,18	-0,205	-0,008	-0,811
G2	-0,01	0,002	0,003	-0,078	0,022	-0,002	0,452	-0,128	-0,291	-0,098	-1,326
G3	0	-0,256	0,005	-0,103	-0,054	-0,013	0,234	-0,231	-1,539	-0,537	-3,495
G4	0,05	0,041	0,004	-0,008	0,007	0,003	0,669	0,198	0,084	0,184	0,232
G5	-0,027	-0,11	0,007	0,014	0,001	-0,013	0,228	0,029	-0,551	-0,005	-2,437

Valores em negrito representam significância ao nível de 5% ($p < 0,05$)

Para os resultados das tendências dos índices extremos de temperatura do ar (Tabela 5) foram observadas para os índices TXx nos grupos G1, G2, G3 e G5, TN10p no G2 e DTR nos grupos G2 e G5 tendências significativas crescentes, para os índices TNn no G2 e TN90p no G2 tendências significativas decrescentes. Considerando os resultados por microrregiões para os índices TR20, WSDI, TX10p e TX90p foram verificadas tendências significativas, porém os resultados não foram refletidos para os grupos nas quais encontram-se inseridas.

Tabela 5. Tendências anuais dos índices extremos de temperatura do ar por regiões homogêneas para a região do MATOPIBA.

Grupos	SU25	TR20	TXx	TXn	TNx	TNn	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p	WSDI	DTR
G1	0,005	-0,062	0,021	0	0,009	-0,007	-0,087	0,082	-0,083	0,043	0,118	0,007
G2	0,006	-0,795	0,027	-0,002	0	-0,036	-0,107	0,108	0,151	-0,148	0,207	0,027
G3	0,001	0,065	0,024	0,003	0,007	0,005	-0,166	0,224	-0,138	0,125	0,475	0,009
G4	0,018	-0,246	0,013	-0,002	0,004	-0,02	-0,036	0,007	0,059	-0,062	-0,164	0,008
G5	0,002	-0,055	0,039	0,001	0,01	-0,003	-0,133	0,196	-0,089	0,061	0,453	0,017

Valores em negrito representam significância ao nível de 5% ($p < 0,05$)

Embora tendências significativas por microrregiões tenham sido verificadas para maior quantidade de índices como também para as microrregiões que compõem outros grupos, os resultados por regiões homogêneas corroboram relativamente com os por microrregiões. Destacando que para os resultados obtidos por grupos, as séries temporais por regiões homogêneas foram obtidas a partir das séries dos pontos de grade inseridos nas microrregiões que as compõem.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos da análise das tendências dos índices de extremos climáticos das microrregiões da região MATOPIBA conclui-se que: dos índices extremos de precipitação pluvial apenas os índices Rx5day, CDD e CWD obtiveram tendências estatisticamente significantes, sendo estas observadas para uma quantidade de microrregiões que não representa porcentagem de área relativamente significativa em termos da área total da região do MATOPIBA. A maioria dos índices de precipitação demonstra a redução das incidências extremas, exceto para a precipitação total - PRCPTOT e a variabilidade em dias muito úmidos - R95p;

Com relação aos índices extremos analisados de temperatura do ar, os resultados indicaram evidências de aumento nos valores mensais máximo - TXx dos índices diários de temperatura máxima, dos valores extremos das temperaturas mínimas diárias, como máxima mensal - TNx e do índice Faixa de temperatura diária - DTR, principalmente nas microrregiões inseridas nos estados do Tocantins e Maranhão. Evidências de redução foram verificadas nos valores mínimos mensais de temperatura mínima diária - TNn, nas porcentagens de dias frios TX10p e de noites quentes TN90.

Os resultados para o índice de noites quentes - TR sugerem que existe uma tendência de redução da temperatura do ar noturna principalmente para as microrregiões do MATOPIBA inseridas na região da Amazônia Oriental e mesorregiões Ocidental e Oriental do Tocantins.

Pode-se constatar que os resultados dos índices por regiões homogêneas, provenientes da análise de agrupamento hierárquico de Ward, se mostraram representativos em relação aos valores obtidos por microrregiões.

5. REFERÊNCIAS

- ABBASNIA, M.; TOROS, H. (2018). Analysis of long-term changes in extreme climatic indices: a case study of the Mediterranean climate, Marmara Region, Turkey. **Pure and Applied Geophysics**, 175, p. 3861–3873, doi:10.1007/s00024-018-1888-8
- ANDRADE, R. G.; BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. D.; NOGUEIRA, S. F. (2016). Geotecnologia: recuperação de pastagens no cerrado. **Agroanalysis**, v. 10, p. 30-33.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, L. L.; SILVA, C. M. S.; CARVALHO, G. G. (2018). Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. **Theoretical and Applied Climatology**.
- BOLFE, É. L.; VICTÓRIA, D. DE C.; CONTINI, E.; BAYMA-SILVA, G.; SPINELLI-ARAÚJO, L.; GOMES, D. (2016). Matopiba em crescimento agrícola Aspectos territoriais e Socioeconômicos. **Revista Política Agrícola**, Ano 20, n. 4.
- COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. (2011). Desenvolvimento e avaliação de um Earth-Modelo do sistema - HadGEM2, **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051–1075, doi: doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011.
- COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; ROCHA JÚNIOR, R. L.; SALVADOR, M. A.; HERDIES, D. L. (2020). Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 100254, 21p., doi:10.1016/j.wace.2020.100254
- DONAT, M. G.; ALEXANDER, L. V.; YANG, H.; DURRE, I.; VOSE, R.; CAESAR, J. (2013). Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 7, p. 997–1006. doi:10.1175/bams-d-12-00109.1

EVERITT, B. S.; LANDAU, S.; LEESE, M.; STAHL, D. (2011). Cluster Analysis. King's College London, UK, 5th Edition, Wiley series in probability and statistics, 848p.

GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. (2018). O papel da dimensão ambiental na ocupação do MATOPIBA, Confins [Online], 35: <http://journals.openedition.org/confins/13045>

HAIR Jr., J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. (2005). Análise multivariada de dados. Tradução Adonai Schup Sant'Anna e Anselmo Chaves Neto. 5 ed. Porto Alegre: Bookman.

HARRIS, I.; JONES, P. D.; OSBORN, T. J.; LISTER, D. H. (2013). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 3, p. 623-642. doi:10.1002/joc.3711

HARRIS, I.; OSBORN, T. J.; JONES, P.; LISTER, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v.7, n.109.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. (2016). A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72.

NOBRE, C. P. C. (2017). A influência da Expansão Agrícola nas Mudanças Climáticas na Região de Matopiba. Trabalho de pesquisa (Graduação em Engenharia Florestal), Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

LAHSEN, M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; DALLA-NORA, E. L. (2016). Undervaluing and Overexploiting the Brazilian Cerrado at Our Peril, Environment: **Science and Policy for Sustainable Development**, v. 58, n. 6, p. 4-15, DOI: 10.1080/00139157.2016.1229537

LINDEN R. (2009). Técnicas de Agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, n. 4, p. 18-36.

MAGALHÃES, L. A.; MIRANDA, E. E. (2014). MATOPIBA: Quadro Natural. Nota técnica 5. EMBRAPA. Available at: Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE). https://www.cnpem.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT5_Matopiba_Quadro_Natural.pdf. Acesso: 20 jun. 2021.

MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S. C.; HINTON¹, T. J.; JONES, C. D.; MCDONALD, R. E.; MCLAREN, A. J.; O'CONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M.; WOODWARD, S.; BEST, M. J.; BROOKS, M. E.; BROWN, A. R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S. H.; DHARSSI, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; GRAY, L. J.; HEWITT, H. T.; HOBSON¹, M.; HUDDLESTON¹, M. R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W. J. ; JAMES, P. M.; JOHNS, T. C.; JOHNSON, C. E.; JONES, A.; JONES, C. P.; JOSHI, M. M.; KEEN, A. B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A. P.; MAIDENS, A. V.; MANNERS, J. C.; MILTON, S. F.; RAE, J. G. L.; RIDLEY, J. K.; SELLAR, A.; SENIOR, C. A.; TOTTERDELL, I. J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P. L.; WILTSHIRE, A. (2011). The HadGEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 723-757.

MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. (2014). Proposta de Delimitação Territorial do MATOPIBA. Disponível em: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf

OLIVEIRA APARECIDO, L. E.; DUTRA, A. F.; LORENÇONE, P. A.; ALCÂNTARA NETO, F.; LORENÇON, J. A.; LEITE, M. R. L. (2021). Climate change in MATOPIBA region of Brazil using Thornthwaite (1948) classification. Research Square. Disponível: <https://www.researchsquare.com/article/rs-428799/v1>. Acesso: 22 set. 2021.

RANA, A.; MORADKHANI, H.; QIN, Y. (2016). Understanding the joint behavior of temperature and precipitation for climate change impact studies. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, edição 1-2, p. 321–339. doi:10.1007/s00704-016-1774-1

REIS, L. C. (2020). Produtividade da soja sob diferentes cenários de variabilidade climática na região do MATOPIBA. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Natal, 161f.

REIS, L. C.; SANTOS E SILVA, C. M.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. (2020). Caracterização da variabilidade da precipitação no MATOPIBA, região produtora de soja. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13 n. 04, p. 1425-1441.

RICHMAN, M. B.; ADRIANTO, I.; (2010). Classification and regionalization through kernel principal component analysis. **Physics and Chemistry of the Earth** 35, 316-328.

SADDIQUE, N.; KHALIQ, A.; BERNHOFER, C. (2020). Trends in temperature and precipitation extremes in historical (1961–1990) and projected (2061–2090) periods in a data scarce mountain basin, northern Pakistan. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 34, n. 10, p. 1441–1455. doi:10.1007/s00477-020-01829-6

SALVADOR, M. A. (2014). Análise da variabilidade climática na nova fronteira agrícola do Brasil: região do Matopiba Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande-PB, 119 p.

SANTOS, J. R. N.; ARAÚJO, M. L. S.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; SANTOS, J. S.; ALMEIDA, J. L.; LIMA, T. V.; SOUSA, L. V. P.; AGUIAR, P. H. M.; SILVA, F. B. (2020). Tendências de extremos climáticos na região de transição Amazônia-Cerrado no estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 16, v. 26.

SEIDEL, E. J.; MOREIRA JR., F. J. ANSUJ, A. P. NOAL, M. R. C. (2008). Comparação entre o método Ward e o método K-médias no agrupamento de produtores de leite. **Ciência e Natura**, UFSM, v. 30, n.1, p. 7- 15.

SILVA, R. O. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SOUZA, W. M. (2017). Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n.3, p. 579-589. doi:10.1590/s1413-41522017142481

SOUZA, P. H.; SANCHES, R. G.; SANTOS, B. C. (2012). Índices climáticos e chuvas intensas no município de Alfenas/MG no período de 1984-2016. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 14 – Edição Especial Dossiê Climatologia de Minas Gerais.

SOUZA, G. V. A; PEREIRA, M. F. V. (2019). MATOPIBA: a Inteligência Territorial Estratégica (ITE) e a regionalização como ferramenta. **Rev. NERA**, v. 22, n. 47, p. 22-45, ISSN: 1806-6755

STRAUSS, T.; VON MALTITZ, M. J. (2017). Generalising Ward's Method for Use with Manhattan Distances. **PLOS ONE**, v. 12, n. 1. doi: 10.1371 / journal.pone.0168288

VAGHEFI, S. A.; ABBASPOUR, N.; KAMALI, B.; ABBASPOUR, K. C. (2017). A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. **Environmental Modelling & Software**, v. 96, p. 181-198. doi:10.1016/j.envsoft.2017.06.033

VICINI, L. (2005). Análise multivariada da teoria à prática. Universidade Federal de Santa Maria-UFSM, Santa Maria.

WARD Jr., J. H (1963). Hierarchical Grouping to Optimize na Objective Function Research Branch, Environment Canada. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236-244. doi: 10.1080 / 01621459.1963.10500845

WILKS, D. S.; 2006. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, 2 ed. **Academic Press**, London.

ZHANG, X.; YANG, F. (2004). RClimDex (1.0) UserManual (p. 22). **Ontario:Climate Research Branch**, Environment Canada.

ZHANG, X.; ALEXANDER, L.; HEGERL, G. C.; JONES, P.; TANK, A. K.; PETERSON, T. C.; TREWIN, B.; ZWIERS, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdisciplinary **Reviews: Climate Change**, v. 2, n. 6, p. 851–870. doi:10.1002/wcc.147

CAPÍTULO 3

APLICAÇÃO DA ANÁLISE FATORIAL PARA DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE CLIMÁTICA PARA REGIÃO DO MATOPIBA-BRASIL

RESUMO

Com o intuito de obter um conjunto reduzido de variáveis capaz de resumir as características dos índices de extremos climáticos derivados dos dados diários de temperatura e precipitação selecionados para as 31 microrregiões do MATOPIBA foi aplicada Análise Fatorial - AF, permitindo assim avaliar quais dimensões possibilitam caracterizar/representar a vulnerabilidade climática na região. Os índices de extremos climáticos de temperatura do ar e precipitação pluviométrica foram obtidos usando o software RCLimindex, utilizando dados de séries históricas diárias (1950-2004) de temperaturas do ar máximas e mínimas e precipitação pluviométrica adquiridos da Water Weather Energy Ecosystembase (<https://www.2w2e.com/home/CIMP>). Por meio análise multivariada após análise de critérios desenvolvidos para determinar o número de fatores possíveis a reter, optou-se por prosseguir o estudo mantendo quatro fatores, estes explicam 80,596 % da variabilidade total existente entre os índices dependentes sobre a composição e vulnerabilidade do espaço. Cabe ressaltar que dentre os 23 índices de extremos climáticos analisados com exceção dos índices TX90p e TN10p os demais foram identificados como representativos, dessa forma restaram 21 índices. Considerando que os índices descrevem eventos extremos climáticos das variáveis temperatura e precipitação, optou-se por denominar os índices de modo que, os nomes representem aspectos destas variáveis, logo o Fator D1 foi denominado de Intensidade de Precipitação, o Fator D2 de Térmico, o Fator D3 de Umidade e o Fator D4 de Duração do Período de Aquecimento. Por meio dos resultados da AF, foi possível obter um Índice de Vulnerabilidade Climática que permitiu identificar as microrregiões que demandam maior necessidade de planejamento que visem a implementação de ações para reverter o quadro de vulnerabilidade no qual estão inseridos, já que possivelmente apresentem risco de ocorrência de eventos extremos, como secas e inundações, afetando a dinâmica do bioma do cerrado, alterando a disponibilidade hídrica e energética e as atividades agrícolas e agropecuárias.

Palavras-chave: Variabilidade climática. Precipitação. Temperatura. Vulnerabilidade.

**APPLICATION OF FACTOR ANALYSIS TO DETERMINE CLIMATE
VULNERABILITY FOR THE MATOPIBA-BRAZIL REGION**

ABSTRACT

In order to obtain a reduced set of variables capable of summarizing the characteristics of the indices of climatic extremes derived from the daily data of temperature and precipitation selected for the 31 micro-regions of MATOPIBA, Factor Analysis (FA) was applied, thus allowing the evaluation of which dimensions make it possible to characterize/represent the climatic vulnerability in the region. The indices of climate extremes of air temperature and rainfall were obtained using the RClimindex software, using data from daily historical series (1950-2004) of maximum and minimum air temperatures and rainfall acquired from the Water Weather Energy Ecosystembase (<https://www.2w2e.com/home/CIMP>). By means of multivariate analysis after analysis of criteria developed to determine the number of possible factors to be retained, it was decided to continue the study maintaining four factors, which explain 80.596% of the total variability existing between the indices dependent on the composition and vulnerability of the space. It should be noted that among the 23 indices of climatic extremes analyzed, with the exception of the TX90p and TN10p indices, the others were identified as representative, so 21 indices remained. Considering that the indices describe extreme climatic events of the variables temperature and precipitation, it was decided to name the indices so that the names represent aspects of these variables, so the D1 Factor was called Precipitation Intensity, the D2 Factor Thermal, the D3 Humidity Factor and the D4 Factor of Duration of the Warming Period. Through the results of the AF, it was possible to obtain a Climate Vulnerability Index that allowed the identification of the micro-regions that require the greatest need for planning aimed at implementing actions to reverse the vulnerability framework in which they are inserted, since they possibly present a risk of occurrence of extreme events, such as droughts and floods, affecting the dynamics of the cerrado biome, changing water and energy availability and agricultural and livestock activities.

Keywords: Climate variability. Precipitation. Temperature. Vulnerability.

1. INTRODUÇÃO

A região do MATOPIBA abrange partes dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, destaca-se como a grande fronteira agrícola do Brasil e uma das maiores fronteiras em expansão do mundo (MIRANDA et al. 2014), com potencial da conversão de remanescentes de vegetação nativa do Cerrado em áreas agrícolas (SALOMON, 2020). A forma como o uso do solo se estabelece e se reorganiza difere conforme sua localização, sendo induzida por diversos fatores como transformações socioeconômicas e climáticas, tornando-se particularmente vulnerável às variações climáticas (COLUSSI, 2017).

O estudo detalhado de dados meteorológicos apresenta-se como um importante indicador na investigação de possíveis alterações e tendências climáticas, principalmente das variáveis precipitação e temperatura do ar na nova fronteira agrícola do Brasil (NOBRE, 2017). Embora o risco de precipitação extrema ou eventos de temperatura possam se estender por uma grande área geográfica, a vulnerabilidade a eventos de enchentes ou secas normalmente se destaca em uma escala local ou regional, estudos regionais de extremos climáticos são da mais alta prioridade para a maioria dos países na avaliação de seu potencial para impactos climáticos. (ALEXANDER et al., 2009; VAGHEFI et al., 2019).

Avaliar a vulnerabilidade às mudanças climáticas é importante para caracterizar os riscos impostos pelas mudanças climáticas e fornecer informações para reconhecer medidas a fim de se adaptar aos impactos adversos das mudanças climáticas (UDDIN, et al., 2019). As principais mudanças climáticas ocorrem nos padrões de temperatura do ar e nos regimes de precipitação, que conseqüentemente têm um grande impacto no balanço hídrico e na gestão da água de qualquer área (TADIĆ et al., 2019). A avaliação de índices de extremos climáticos se torna útil para compreender tendências, alterações climáticas e para conhecimento de padrões climáticos semelhantes por regiões.

Entre os diversos esforços realizados para o melhor entendimento das alterações no padrão do clima e tempo, no estudo das variáveis climáticas sobre determinada área envolvendo vários pontos de observação, destaca-se os estudos com relação a detecção de indícios de variabilidades, mudanças e vulnerabilidades climáticas com base em métodos estatísticos. Dentre estas, a mais utilizada, em várias áreas da ciência, é a análise multivariada, cujos principais objetivos são circunscrever a dimensão de uma matriz de dados, averiguar o comportamento espacial e temporal das variáveis consideradas e obter grupos homogêneos dessas variáveis (SENA e LUCENA, 2013; SANTOS et al., 2014)

Powell e Keim (2015) utilizaram a análise de componentes principais (ACP) caracterizar melhor a variabilidade nos índices de detecção de extremos climáticos e desenvolver uma regionalização dos extremos para o Sudeste dos Estados Unidos, por meio da ACP agruparam estações que experimentaram padrões temporais semelhantes em extremos de índices precipitação, assim como em índices extremos de temperatura. Tadić et al. (2019) analisaram indicadores de alterações climáticas aplicando a análise de componentes principais (ACP), para duas estações meteorológicas croatas. Abrar et al. (2022) usaram um índice de vulnerabilidade ao calor obtido por meio de análise de componentes principais (ACP) para investigar a vulnerabilidade a ondas de calor na ilha de calor urbana de Dhaka em Bangladesh.

Andrade et al. 2021 estudaram a estrutura de correlação de variáveis da área de meteorologia influenciadoras das condições climáticas por meio da técnica da análise fatorial para município de Garanhuns/PE, Brasil, identificando as variáveis mais representativas, simplificando a informação contida nas variáveis observadas, relacionadas com variabilidade climática da região em um índice climático multivariado com intuito de obter um índice de detecção de mudanças climáticas.

A partir da Análise Fatorial - AF pretende-se verificar a existência de padrões entre as correlações presentes de índices de extremos climáticos de precipitação e temperatura com padrões espaciais semelhantes para as microrregiões do MATOPIBA, identificando quais são mais relevantes e suas contribuições, assim como definir um índice de vulnerabilidade climática, considerando os resultados obtidos por meio da AF.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A região do MATOPIBA (Figura 1) abrange áreas nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, possui uma extensão territorial de 73 milhões de hectares, sendo 66 milhões no domínio Cerrado (BUAINAIN et al., 2017). A região do MATOPIBA apresenta condições propícias para a agricultura, possuindo áreas planas e extensas, com solos de alto potencial produtivo, disponibilidade de água e clima favorável, com elevada intensidade de sol (PEREIRA et al., 2018). Além do bioma Cerrado que corresponde a uma porção de 90,94% da área territorial total, a região abrange porções de mais dois biomas, Amazônia com porção da área ocupada de 7,27% e Caatinga abrangendo uma porção de 1,64% da área total (MIRANDA et al., 2014).

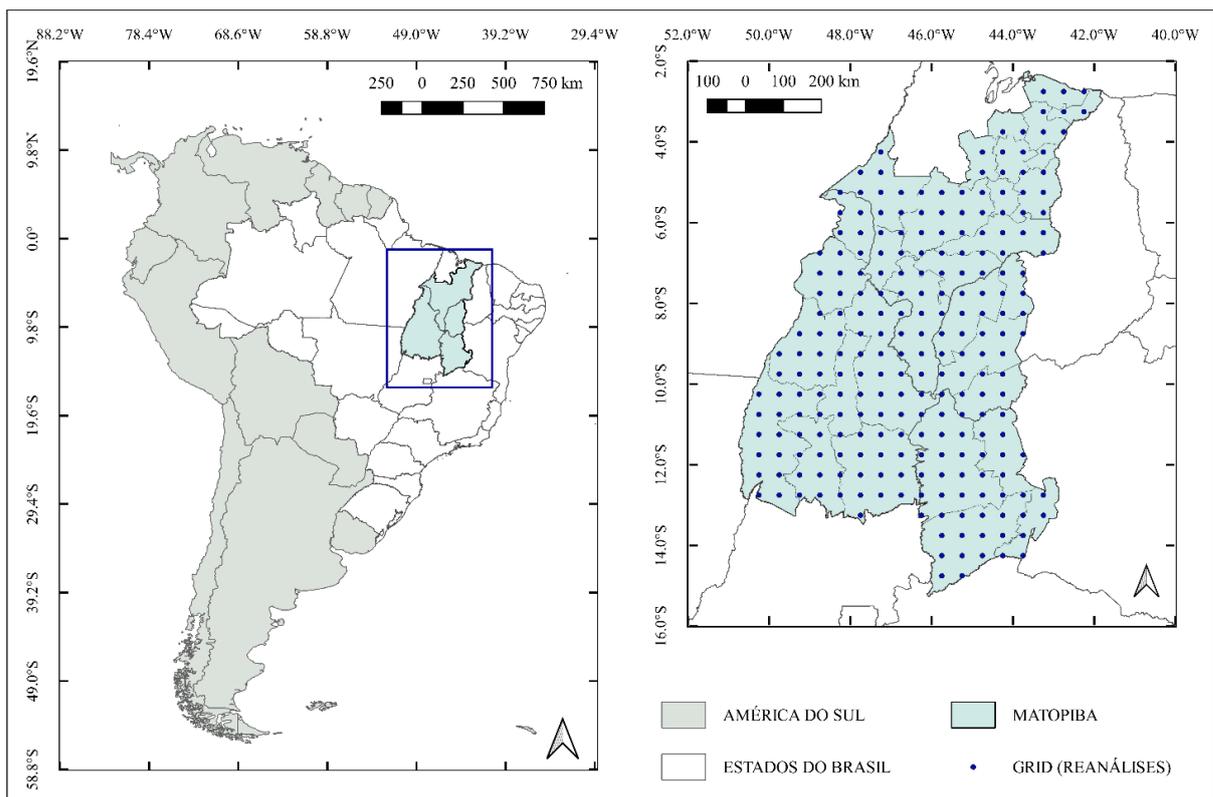


Figura 1. Mapa do Brasil com destaque da área de estudo e da distribuição espacial dos pontos de grade (região do MATOPIBA).

Oliveira Aparecido et al., 2023 ao realizarem a caracterização para região do MATOPIBA utilizando o índice de classificação de Thornthwaite (1948), verificaram que a região apresentou classificação climática variável com quatro classes distintas distribuídas ao longo de sua delimitação, com regiões úmidas (classes B1 e B2) classificadas em 35,04% do

MATOPIBA, sendo que a classe úmida B1 predominou no sul, centro e norte do Tocantins, e ocorreu em pequenas partes dos territórios da Bahia e do Maranhão, enquanto a classe úmida B2 foi representada apenas em pequenas porções do oeste do Tocantins. Subúmido úmido (C2) foi a segunda classe com maior extensão no MATOPIBA, abrangendo as subclasses C2sA'a', C2w2A'a' e C2wA'a', sendo esta última classe mais frequente na região. A classe subúmido seco (C1) representou 12,67% do MATOPIBA, e compreendeu as subclassificações C1dA'a', C1s2A'a', C1sA'a' e C2rA'a', estando localizados na porção sudoeste do Piauí e parte do oeste da Bahia.

Esta região abriga parte de três importantes bacias hidrográficas brasileiras (dos rios Tocantins e Araguaia, do São Francisco e do Parnaíba), além de importante aquífero, o Urucuaia (SALOMON, 2020). A paisagem difere bastante da exuberância da floresta amazônica e é popularmente conhecida como floresta invertida, pelas raízes profundas e ramificadas de suas árvores (SALOMON, 2020).

2.2 Dados

Os dados utilizados neste trabalho consistem em séries históricas diárias de 54 anos de dados de precipitação pluviométrica, temperaturas do ar máximas e mínimas compreendendo o período de 1 de janeiro de 1950 a 31 de dezembro de 2004. A área de estudo compreende um recorte sobre a região do MATOPIBA, englobando 235 pontos de grade com resolução espacial de 0,5°. Os pontos utilizados neste trabalho estão distribuídos espacialmente em cada microrregião inserida na área do MATOPIBA, para as quais foram obtidas médias dos dados diários da precipitação pluviométrica e das temperaturas do ar máximas e mínimas.

Os dados históricos de temperaturas do ar máximas e mínimas e precipitação foram adquiridos no site <https://www.2w2e.com/home/CIMP> da *Water Weather Energy Ecosystembase*, a base de dados disponibiliza dados diários históricos e futuros de temperatura e precipitação, esses dados diários cobrem o período de 1950 a 2099. A base de dados históricos de reanálise disponível utiliza os conjuntos de dados de séries temporais (*Time-series-TS*) mensais, produzidos pela *Climatic Research Unit* - CRU da Universidade de East Anglia, esses são campos de grade mensais com base em valores diários. Os dados CRU-TS-3.1 históricos de reanálise são reformatados do NetCDF em arquivos de texto legíveis para base de dados diária, com resolução de 0,5° (HARRIS et al., 2013; VAGHEFI et al., 2017; HARRIS et al., 2020).

2.3 Índices de extremos climáticos

Índices de extremos climáticos foram calculados para a região do MATOPIBA (Figura 1) usando o software RclimDex desenvolvido por Zhang e Yang (2004). O Pacote RclimDex (Versão 1.1) utilizado é de distribuição gratuita foi desenvolvido para um código em linguagem R e está disponível para download no website dos índices da Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices – ETCCDMI (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI>).

A partir do RclimDex é possível determinar 27 índices de extremos derivados dos dados diários de temperatura e precipitação recomendados pela Equipe de Especialistas CCI/CLIVAR para Monitoramento e Índices de Detecção de Mudanças Climáticas - ETCCDMI, bem como alguns outros índices de temperatura e precipitação com limites definidos pelo usuário (ZHANG e YANG, 2004). Na presente pesquisa foram analisados 23 dos 27 índices definidos pelo ETCCDMI, sendo 11 relativos aos dados de precipitação pluviométrica e 12 aos dados de temperatura do ar, na Tabela 1 constam os índices selecionados, suas definições e unidades.

O RclimDex é projetado para fornecer uma interface amigável para calcular índices de extremos climáticos, incorporando assim, o ClimDex para um ambiente que não dependa de um sistema operacional específico, já que o ClimDex é um programa baseado no Microsoft Excel. O Climdex foi desenvolvido por Byron Gleason do National Climate Data Centre (NCDC) da NOAA é uma ferramenta que proporciona um pacote computacional que é usado no cálculo de índices de extremos climáticos para monitorar e detectar mudanças climáticas, e tem sido usado em oficinas CCI/CLIVAR (International Research Programme on Climate Variability and Predictability) sobre índices climáticos desde 2001 (ZHANG e YANG, 2004).

Os resultados para alguns dos índices podem ser obtidos tanto anualmente quanto mensalmente pelo RclimDex, neste estudo foram considerados apenas os valores anuais. Os índices de extremos climáticos para os valores médios diários de precipitação pluvial e temperatura do ar foram obtidos para 31 microrregiões inseridas na região do MATOPIBA.

Tabela 1. Índices de extremos climáticos do Rclimdex referentes à precipitação pluvial e à temperatura do ar utilizados neste estudo.

Índice	Definição	Unidade
Precipitação pluvial		
SDII	Precipitação média para dias com chuva ≥ 1 mm	milímetros
R10mm	Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 10 mm	dias
R20mm	Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 20 mm	dias
R25mm	Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 25 mm	dias
RX1day	Precipitação máxima mensal de 1 dia	milímetros
RX5day	Precipitação máxima mensal consecutiva de 5 dias	milímetros
CDD	Duração máxima do período de seca: número máximo de dias consecutivos com precipitação diária < 1 mm	dias
CWD	Duração máxima do período de chuva: número máximo de dias consecutivos com precipitação diária ≥ 1 mm	dias
R95p	Precipitação total anual quando a precipitação diária $> 95^{\circ}$ percentil	milímetros
R99p	Precipitação total anual quando a precipitação diária $> 99^{\circ}$ percentil	milímetros
PRCPTOT	Precipitação total anual em dias úmidos	milímetros
Temperatura do ar		
SU	Número de dias quando TX (temperatura máxima diária) > 25 °C	dias
TR	Número de dias quando TN (temperatura mínima diária) > 20 °C	dias
TXx	Valor máximo mensal da temperatura máxima diária	°C
TNx	Valor máximo mensal da temperatura mínima diária	°C
TXn	Valor mínimo mensal de temperatura máxima diária	°C
TNn	Valor mínimo mensal de temperatura mínima diária	°C
TX10p	Porcentagem de dias quando TX $<$ percentil 10 (dias frios)	%
TX90p	Porcentagem de dias quando TX $>$ percentil 90 (dias quentes)	%
TN10p	Porcentagem de dias quando TN $<$ percentil 10 (noites frias)	%
TN90p	Porcentagem de dias quando TN $>$ percentil 90 (noites quentes)	%
WSDI	Índice de duração do período de aquecimento: contagem anual de dias com pelo menos 6 dias consecutivos quando TX $>$ percentil 90	dias
DTR	Faixa de temperatura diária: diferença média mensal entre TX e TN	°C

2.4 Análise Fatorial

Com o intuito de obter um conjunto reduzido de variáveis capaz de resumir as características dos índices de extremos climáticos derivados dos dados diários de temperatura e precipitação selecionados para as 31 microrregiões foi aplicada análise fatorial, permitindo assim avaliar quais dimensões poderiam caracterizar/representar a vulnerabilidade climática na região do MATOPIBA.

Os índices de extremos climáticos foram reduzidos através da análise fatorial, dentre os 23 analisados com exceção dos índices TX90p e TN10p os demais foram identificados como representativos, dessa forma restaram 21, os valores de todos os índices foram normalizados através da Equação 1.

$$x = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

em que X : é o valor do índice; μ : é a média do índice para o período de resultados obtidos; e σ é o desvio padrão para o período de resultados obtidos.

A análise fatorial é uma técnica multivariada de interdependência utilizada para investigar os padrões ou relações latentes para um número grande de variáveis e determinar se a informação pode ser resumida a um conjunto menor de fatores, com intuito de representar melhor a natureza básica do fator ou do componente (HAIR et al., 2009; MATOS e RODRIGUES, 2019). Dessa forma, esta técnica, proporciona a simplificação ou redução de uma grande quantidade de variáveis inter-relacionadas em um conjunto, com o objetivo de identificar um grupo de dimensões latentes comuns, os fatores.

A análise fatorial fornece a base para a criação de um novo conjunto de variáveis que incorporam o caráter e a natureza das variáveis originais em um número muito menor de novas variáveis, usando variáveis representativas, escores fatoriais ou escalas múltiplas de cada dimensão latente e substituindo as variáveis originais pelos mesmos (HAIR et al., 2009). Esta técnica permite a identificação de dimensões isoladas da estrutura dos dados, e determinação do grau em que cada variável é explicada por cada dimensão ou fator (MANLY, 2008). A composição do modelo de análise fatorial pode ser obtida utilizando a Eq.(2).

$$X_i = a_i F + \varepsilon_i \quad (2)$$

em que: X : (X_1, X_2, \dots, X_m) é um vetor transposto p dimensional de variáveis aleatórias observáveis; $F = (F_1, F_2, \dots, F_m)$ é um vetor transposto r dimensional com $(r < m)$ de variáveis não observáveis ou fatores (ou variáveis latentes); $\varepsilon_i = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$ é um vetor transposto p dimensional de erros aleatórios ou fatores únicos, e $a_i =$ é a matriz (p, q) de constantes desconhecidas, chamadas de cargas fatoriais.

Matos e Rodrigues, (2019) destacam que é necessário verificar se a aplicação do modelo da análise fatorial é adequada para as variáveis escolhidas, para isso alguns pontos são importantes como: amostra, nível de mensuração das variáveis, padrão de correlações e Teste de Kaiser-Meyer-Olkin.

A AF só faz sentido se as variáveis analisadas forem altamente correlacionadas entre si. Uma vez definido o nível de mensuração das variáveis e o tipo de correlação adequada, antes de se iniciarem as análises, faz-se necessário verificar a matriz de correlações (MATOS e RODRIGUES, 2019). Existem estatísticas formais para testar a conveniência do modelo fatorial, dentre estas, a medida de adequação da amostra de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) é usada para testar a hipótese nula de que as variáveis não são correlacionadas na população, ou seja, testar se a matriz de correlações é uma matriz identidade e avaliar a provável adequação da análise fatorial (MALHOTRA, 2012).

A medida de adequação dos dados, sugerida por Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Adequacy - KMO foi usada para avaliar o valor de entrada das variáveis para o modelo e assim identificar se o modelo de análise fatorial está adequadamente ajustado as variáveis podendo estas serem utilizadas para realizar a AF, este pode ser calculado para variáveis individuais e múltiplas, com base no grau das correlações simples com as correlações parciais e estimado de acordo com a Eq. (2) que representa a razão da correlação ao quadrado para a correlação parcial ao quadrado entre as variáveis (GARAYALDE et al., 1996; FIELD et al., 2012; VICINI, 2005).

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2} \quad (3)$$

em que: r_{ij}^2 = para todo $i \neq j$ é o coeficiente de correlação original entre variáveis; a_{ij}^2 é o quadrado dos elementos fora da diagonal da matriz anti-imagem da correlação e este corresponde ao coeficiente de correlação parcial.

O resultado do teste de KMO varia entre 0 e 1, representa a proporção da variância das variáveis que pode ser explicada pelos fatores ou traços latentes. Um valor de 0 indica que a soma das correlações parciais é grande em relação à soma das correlações, indicando difusão no padrão de correlações (portanto, a análise fatorial é provavelmente inadequada). Quanto mais próximo esse valor estiver de 1, maior a eficácia de extração da variável, assim sendo, os dados estão mais adequados para se ajustar uma AF (MATOS e RODRIGUES 2019), indicando que os padrões de correlações são relativamente compactos e, portanto, a análise fatorial deve produzir fatores distintos e confiáveis (FIELD et al., 2012).

Kaiser (1974) indica 0,5 como valor mínimo aceitável, sugerindo para avaliação dos padrões que existem entre as correlações presentes entre as variáveis usadas, valores acima de 0,9 como excelentes, entre 0,8 a 0,9 classificados como ótimos, variando de 0,70 a 0,8 como Bons, entre 0,6 e 0,7 como Medíocres, de 0,50 a 0,6 como Miseráveis e abaixo de 0,50, inaceitáveis.

Com o objetivo de redistribuir a variância dos primeiros fatores para os demais e atingir um padrão fatorial mais simples e teoricamente mais significativo fez-se uso da técnica de rotação dos fatores a partir do método de rotação ortogonal "Varimax" (HAIR et al., 2005). O Varimax é o método mais comumente utilizado dentre os métodos ortogonais, neste busca-se maximizar a dispersão das cargas dentro dos fatores e minimizar o número de variáveis que apresentam altas cargas em cada fator, simplificando a interpretação dos fatores, além de facilitar a visualização da relação entre as variáveis (SILVA et al., 2014; DIAS et al., 2019;).

A Comunalidade é tida como a porção da variância que uma variável compartilha com todas as outras variáveis consideradas. Corresponde também à porção da variância de cada variável que é explicada pelos fatores comuns (MALHOTRA, 2012; CARVALHO et al., 2013). A soma em linha de cargas fatoriais ao quadrado gera a comunalidade. O tamanho da comunalidade é um índice útil para avaliar o quanto de variância em uma dada variável é explicado pela solução fatorial. Comunalidades grandes indicam que uma grande parcela da variância em uma variável foi extraída pela solução fatorial (SANTANA, 2007). Esta foi utilizada como critério para validação das variáveis no ajuste do modelo fatorial e foi determinada pela estimativa da variância de X_i explicada através dos fatores comuns e foi determinada seguindo a Eq.(4).

$$h_i^2 = a^2_{i1} + a^2_{i2} + \dots + a^2_{im} \quad (4)$$

Santana, (2007) destaca que uma comunalidade pequena, inferior a 0,50, mostra que uma boa parte da variância contida em uma variável não é explicada pelos fatores. Matos e Rodrigues (2019) afirmam que o critério da comunalidade maior do que 0,5 não deve ser utilizado isoladamente e de maneira muito rígida. Malhotra, (2012) recomenda cautela quanto ao tamanho da amostra, sugerindo que quanto menor a comunalidade, maiores deverão ser as amostras, em especial, quando as comunalidades são menores de 0,5, são necessárias amostras maiores.

O emprego da Análise fatorial permite, inicialmente identificar as dimensões isoladas da estrutura dos dados e então determinar de acordo com o número de observações que fazem parte do conjunto de dados analisados torna-se necessário a delimitação ou a seleção das dimensões que possam descrever o grau em que cada variável é explicada por cada dimensão ou fator (CARVALHO et al., 2007; HAIR et al., 2009). Na análise fatorial, é comum usar a análise dos componentes principais ou a análise de fatores principais como uma técnica de extração preliminar, para extração dos fatores seguida por um ou mais dos outros

procedimentos, talvez variando o número de fatores, estimativas de comunalidade e métodos rotacionais a cada corrida (TABACHNICK e FIDELL 2007).

2.5 Índice de Vulnerabilidade Climática (IVC)

Para a definição do Índice de Vulnerabilidade Climática (IVC) foi considerada uma combinação linear dos escores fatoriais e a proporção da variância explicada por cada fator em relação à variância dos fatores comuns que descrevem os índices de extremos climáticos da área de estudo. A matriz de escores fatoriais foi estimada após a rotação ortogonal da estrutura fatorial inicial (SANTANA, 2007). Para melhor detalhamento da metodologia, propõe-se consultar (BRYMAN e CRAMER, 2001; CARVALHO et al., 2007; SANTANA, 2007).

A estimativa do IVC foi obtida de acordo com a Equação (5).

$$IVC = \sum_{j=1}^q \left(\frac{\lambda_j}{\sum_j \lambda_j} \times FP_{ij} \right), 0 \leq IVC \leq 1 \quad (5)$$

em que: λ_i representa a variância explicada por cada fator; $\sum_j \lambda_j$ é a soma total da variância explicada pelo conjunto de fatores comuns e FP_{ij} é o escore padronizado para se obter os valores positivos dos escores originais, e assim permitir hierarquizar as microrregiões. Os valores do IVC estão situados entre zero e um.

O cálculo dos escores padronizados foi realizado utilizando a Equação (6), para a relação positiva, e a Equação (7), para a relação negativa, segundo Carvalho et al. (2007).

$$FP_{ij} = \left(\frac{F_i - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} \right) \quad (6)$$

$$FP_{ij} = \left(\frac{F_{max} - F_i}{F_{max} - F_{min}} \right) \quad (7)$$

em que: F_{min} e F_{max} representam os valores mínimos e máximos observados para os escores fatoriais índices de extremos climáticos associados a vulnerabilidade climática para a região do MATOPIBA.

A escala hierárquica de classificação das microrregiões corresponde aos quantis estatísticos determinados pela frequência das observações agrupadas em seis classes: $0 \leq IVC \leq 10 =$ Vulnerabilidade Extrema; $10 \leq IVC \leq 25 =$ Alta Vulnerabilidade; $25 \leq IVC \leq 50 =$ Vulnerabilidade Moderada; $50 \leq IVC \leq 75 =$ Vulnerabilidade Média; $75 \leq IVC \leq 90 =$ Vulnerabilidade Baixa; $90 \leq IVC \leq 99 =$ Vulnerabilidade Inexistente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Fatorial

Para verificar a aplicação da Análise Fatorial (AF) utilizou-se o teste KMO de medida de adequação da amostra. O resultado expresso neste teste (0,792) demonstra um bom grau de ajuste para aplicação da técnica multivariada Análise Fatorial, indicando um valor superior ao patamar crítico de 0,50, considerando os limiares propostos por Kaiser (1974) e assim como indicado por Hair et al. (2009) pode-se tomar a decisão de recusar a hipótese de a matriz de correlação ser uma matriz identidade.

Foi possível avaliar mediante os resultados obtidos do teste de Kaiser Meyer Olkin (KMO) (Tabela 2), a existência de padrões entre as correlações presentes entre os índices usados, além de verificar a relação dos dados dos índices de extremos climáticos de precipitação e temperatura com padrões espaciais semelhantes para as microrregiões do MATOPIBA. Dessa forma, pode-se constatar que os índices usados estão satisfatoriamente correlacionados entre si, e proceder com a análise fatorial.

Ao verificar a adequabilidade dos índices de extremos climáticos de precipitação e temperaturas máximas e mínimas do ar a aplicação da análise fatorial, foi possível extrair os fatores com capacidade de explicar a variância total do conjunto de dados. O método de extração selecionado foi o de fatores principais, cujo objetivo é maximizar a variabilidade explicada pelos fatores, em que a comunalidade das variáveis é estimada de maneira iterativa, as correlações múltiplas ao quadrado de cada variável com todas as outras variáveis são usadas como valores iniciais na iteração (TABACHNICK e FIDELL, 2007).

O objetivo da análise, é extrair a variância ortogonal máxima do conjunto de dados com cada fator sucessivo. As vantagens da extração de fatores principais são que ela é amplamente utilizada (e compreendida) e que está em conformidade com o modelo analítico fatorial no qual a variância comum é analisada com a variância única e de erro removida (TABACHNICK e FIDELL 2007).

Tabela 2. Estatística do teste Kaiser Meyer Olkin – KMO para adequação da amostra.

Índices	KMO	Índices	KMO	Índices	KMO
SDII	0,893	R95p	0,862	TNn	0,849
R10mm	0,817	R99p	0,814	TX10p	0,763
R20mm	0,794	PRCPTOT	0,795	TN90p	0,804
R25mm	0,761	SU	0,793	WSDI	0,701
RX1day	0,803	TR	0,831	DTR	0,760
RX5day	0,786	TNx	0,796	CWD	0,574
CDD	0,778	TXn	0,843	TXx	0,611

Dentre os procedimentos e critérios de retenção fatorial desenvolvidos para determinar o número de fatores possíveis a reter, inicialmente recorreu-se ao do critério do Scree plot. Na Figura 2 é possível verificar a distribuição do Scree plot que expõe a distribuição do número de fatores em função da curva da variância específica de cada fator, no qual foi necessário identificar o ponto de inflexão da curva, ou seja, o momento em que a curva tende a decair de forma brusca ou tornar-se horizontal (momento de linearidade da curva), assim deve-se parar de extrair os fatores e considerar o número de fatores anterior a este. Ao considerar-se a localização da mudança de declive na Figura 2, este sugere a retenção de quatro fatores.

Além da interpretação para determinar o número de fatores possíveis a reter (a serem extraídos) realizada a partir do critério do Scree plot, recorreu-se ao critério da raiz latente e a soma da variância acumulada. O critério da raiz latente (KAISER, 1960) ou regra do autovalor recomenda assumir que fatores com autovalores superiores a 1 (ao patamar crítico de 0,50), são os que explicam mais informação sobre o construto (o conjunto de dados) (HAIR et al. 2009). Já a determinação com base na porcentagem da variância o número de fatores é extraído de forma que a porcentagem acumulada da variância extraída pelos fatores atinja um nível satisfatório, propondo-se que os fatores extraídos respondam por, no mínimo, 60% da variância (HAIR et al. 2009; MALHOTRA, 2012).

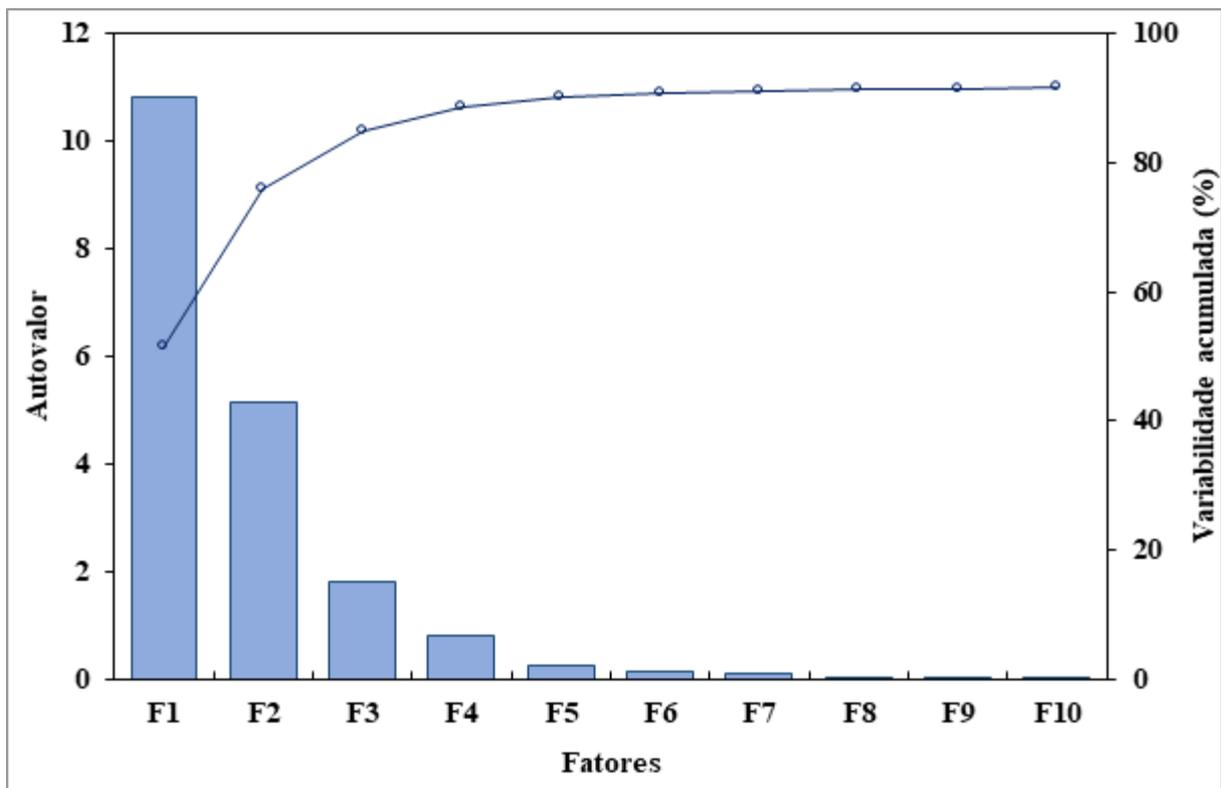


Figura 2. Scree plot - Curva da variância individual de cada fator.

Na Tabela 3, constam os autovalores, e o percentual de explicação pertinente (variabilidade) a cada fator resultantes da solução inicial e rotacionada em relação à variabilidade total e o percentual de variância acumulada. Considerando o percentual de variância acumulada antes e após a rotação VARIMAX, quatro fatores foram mantidos ou extraídos, observa-se que os quatro fatores explicam 80,596 % (da variabilidade total existente entre os índices dependentes sobre a composição e vulnerabilidade do espaço) da variância total do conjunto de dados, o que é satisfatório pelo critério da porcentagem da variância.

Estes fatores definem a combinação linear entre um conjunto dos índices de extremos climáticos de precipitação e temperaturas máximas e mínimas do ar e as microrregiões do MATOPIBA. Dessa forma cada fator é composto por um conjunto de índices de extremos climáticos que caracteriza a vulnerabilidade das microrregiões do MATOPIBA em relação aos índices de extremos climáticos propostos no presente estudo.

Os autovalores obtidos na AF foram submetidos à rotação VARIMAX com o intuito de identificar quais índices representam melhor os fatores e, assim, simplificar a interpretação dos resultados. O varimax é um método matemático de rotação ortogonal que minimiza o número de variáveis que cada agrupamento terá, simplificando a interpretação dos fatores, além de facilitar a visualização da relação entre as variáveis (DIAS et al., 2019). Os dois primeiros

fatores rotacionados explicam 70,729 % da variância total, ou seja, 36,754 % e 33,975%, respectivamente.

Tabela 3. Variância total explicada pelos fatores na definição das dimensões, antes e após a rotação VARIMAX.

Fatores	Condições iniciais			Após a rotação VARIMAX	
	Autovalores	Variabilidade (%)	% Variância acumulada	Variabilidade (%)	% Variância acumulada
F1	10,799	51,426	51,426	36,754	36,754
F2	5,157	24,557	75,983	33,975	70,729
F3	1,826	8,697	84,681	13,078	83,808
F4	0,822	3,915	88,596	4,788	88,596

Além dos critérios estatísticos utilizados nesta pesquisa, torna-se importante destacar em concordância com os autores Zang e Yang (2004) e Abbasnia e Toros (2018), que os índices representam extremos climáticos da temperatura máxima e mínima do ar e precipitação pluvial utilizados na avaliação de diferentes áreas em estudos de monitoramento e detecção de mudanças climáticas e variabilidade climática. Destacando-se que a temperatura e a precipitação são variáveis meteorológicas que condicionam o clima, principalmente as condições hídricas e térmicas.

As cargas fatoriais (Tabela 4) estimadas de cada índice para cada fator após a rotação, com as cargas fatoriais de maiores valores em negrito. A avaliação das cargas fatoriais rotacionadas para cada índice possibilita verificar o desempenho destes e sua contribuição na determinação da estrutura fatorial (HAIR et al., 2009). Dessa forma, a seleção dos índices que compõem cada um dos fatores pode ser obtida avaliando as cargas fatoriais, assim como também é possível verificar o grau de correspondência entre os índices e o fator.

Para seleção dos índices significativos que irão compor cada um dos fatores foram avaliadas as magnitudes das cargas fatoriais dos índices. Dessa forma, procedeu-se com a observação das cargas fatoriais de cada índice, da esquerda para direita e ao longo de cada linha e identificando-se as cargas de maiores valores. Considerando que os índices com cargas mais altas, são mais importantes, pois quanto maior a carga fatorial maior será a correlação com determinado fator, dessa forma, maior a influência na definição de cada fator, bem como sobre o nome ou rótulo selecionado para representar o fator, sendo as cargas numericamente maiores as responsáveis pela denominação que o fator receberá (HAIR et al., 2009; SILVA et al., 2014).

Este procedimento é o mesmo que foi utilizado nos trabalhos de Santana, (2007) e Carvalho et al. (2007).

Com intuito de verificar o quanto da variância de cada índice é explicado pelo conjunto de fatores são avaliadas as comunalidades. Observa-se pela Tabela 4 que exceto para os índices de extremos climáticos TN90p e TXx, os valores das comunalidades obtidas foram acima de 80% para os demais índices, dessa forma, foram significativos, demonstrando que os fatores detêm poder explicativo para as variâncias desses indicadores, podendo, assim, caracterizar a dinâmica da vulnerabilidade climática na região do MATOPIBA. Embora não sendo representativas as estimativas obtidas de comunalidades para os índices TN90p e TXx, os valores das cargas fatoriais indicam que estes índices contribuem para composição dos fatores, dessa forma optou-se pela permanência destes índices na análise.

Tabela 4. Cargas fatoriais após a rotação e comunalidades dos indicadores.

Índices	D1	D2	D3	D4	Comunalidade Final
SDII	0,9587	0,1577	0,1181	0,0255	0,9585
R10mm	0,7718	0,3078	0,5251	-0,0153	0,9665
R20mm	0,9745	0,1096	0,1285	0,0558	0,9812
R25mm	0,9685	0,0733	-0,0669	0,1162	0,9612
RX1day	0,9309	-0,0250	-0,2144	0,0971	0,9225
RX5day	0,9731	0,0212	-0,0718	0,2128	0,9979
CDD	-0,1091	-0,6009	-0,6439	-0,2982	0,8766
R95p	0,8108	0,2845	0,4694	-0,0385	0,9601
R99p	0,8722	0,1946	0,3651	-0,0221	0,9324
PRCPTOT	0,6233	0,3268	0,6854	-0,0942	0,9739
SU	0,1075	0,9336	0,2754	0,0793	0,9653
TR	0,1679	0,9571	0,1597	0,1242	0,9851
TNx	0,0820	0,9245	0,0599	0,0169	0,8654
TXn	0,0597	0,9235	0,2602	0,0827	0,9310
TNn	0,1204	0,9635	0,1027	0,1320	0,9708
TX10p	0,0217	0,9013	0,0013	-0,3321	0,9232
TN90p	-0,2659	-0,4483	-0,0870	0,2043	0,3209
WSDI	0,5701	0,2098	0,0463	0,6574	0,8033
DTR	-0,2007	-0,8639	-0,1630	-0,3510	0,9363
CWD	-0,0583	0,1575	0,9624	-0,0157	0,9548
TXx	-0,4239	-0,3974	0,0279	-0,2825	0,4182

A análise fatorial possibilitou identificar quais índices são importantes para formar os fatores, e esclarecer as inter-relações existentes e a organização de covariância oriunda da correlação de cada índice e seu respectivo fator. Buscando atribuir uma denominação aos

fatores, foram avaliados os índices considerando que estes descrevem eventos extremos climáticos das variáveis temperatura e precipitação, dessa forma, optou-se por denominar os índices de modo que, os nomes representem aspectos destas variáveis.

Logo se observa na Tabela 4 que o Fator D1 é contemplado com a maior quantidade de índices que possuem cargas significantes, ao todo são 9 (SDII, R10mm, R20mm, R25mm, RX1day, RX5day, R95p, R99p e TXx), dentre os quais apenas o índice TXx apresentou cargas negativas, as demais são fortemente correlacionadas positivamente. Optou-se por denominar este fator de intensidade de precipitação, já que é composto com exceção do TXx, que é um índice de intensidade de temperatura predominantemente por índices de intensidade SDII, RX1day, RX5day, R95p e R99p) e frequência (R10mm, R20mm e R25mm) de precipitação.

Conforme se observa na Tabela 4 o Fator D2 abrange o segundo maior número de índices com cargas significantes, são 8 índices de temperatura, dentre estes 4 são de intensidade (TNx, TXn, TNn e DTR) e 4 de frequência (SU, TR, TX10p e TN90p), dos quais apenas TN90p e DTR apresentaram cargas negativos, já que o índice TN90p representa as noites quentes. Este fator foi denominado de térmico.

Considerando os índices que representam o Fator D3, e que estes são índices de extremos de precipitação para intensidade (PRCPTOT) e duração (CWD e CDD), ressalta-se que se os índices PRCPTOT e CDW aumentam e o CDD diminui pode-se corresponder a condições mais úmidas, o oposto irá inferir condições com baixa umidade, dessa forma este fator será denominado de umidade (tratado como Indicador de Umidade), comportamento este que pode ter refletido em termos de valores de cargas fatoriais, já que cargas significantes positivas foram estimadas para os índices PRCPTOT e CDW e negativa para o CDD. (Cargas opostas)

O Índice de temperatura de duração do período de aquecimento WSDI é o único a compor o fator D4, o fato deste ser um índice de extremo climático de duração para temperatura pode justificar a ausência de correlações significativas com os demais índices de temperatura e assim não ter se inserido no fator D2, que foi denominado de térmico. Desta forma, este fator foi designado de duração do período de aquecimento, considerando assim o nome do único índice que o compõe.

Powell e Keim (2015) ao aplicar ACP para índices de detecção de extremos climáticos de precipitação verificou que a maior parte da variação nos extremos não pode ser explicada por apenas alguns componentes, ao contrário dos extremos de temperatura, sendo necessário para os índices de temperatura reter mais componentes para explicar aproximadamente a mesma

quantidade de variação obtida por meio da ACP com apenas dois componentes para os índices de detecção de extremos climáticos de temperatura, sugerindo que os extremos de precipitação apresentam uma variabilidade muito maior do que os extremos de temperatura, sendo assim a ACP pode ser menos útil na descrição da variabilidade extrema da precipitação.

Tadić et al., 2019 aplicaram a análise de componentes principais (PCA), para duas estações meteorológicas croatas Osijek e Dubrovnik usando parâmetros meteorológicos e indicadores de alterações climáticas, estes com características alterações climáticas de mudanças na temperatura do ar e na precipitação e na frequência de valores extremos de temperatura do ar precipitação. Ao avaliarem as contribuições das variáveis para impactos em alterações climáticas verificaram para ambas as estações verificaram que os processos de alterações climáticas estão sob uma influência mais forte relacionadas com alterações de variáveis e indicadores de extremos de precipitação e da temperatura do ar que consequentemente pode resultar em frequências mais elevadas de secas e inundações.

3.2 Análise do Índice de Vulnerabilidade Climática

Devido a rotação a que foram submetidos os fatores, os escores foram obtidos a partir das cargas fatoriais que sofreram rotação e não a partir das originais. O escore fatorial, situa cada observação no espaço dos fatores. Por meio da distribuição dos escores padronizados na Figura 3 é possível observar a combinação linear dos escores fatoriais e a proporção da variância explicada por cada fator em relação à variância dos fatores comuns que descrevem os índices de extremos climáticos da área de estudo por microrregiões. Os fatores Intensidade de Precipitação (D1) e térmico (D2), são os principais contribuintes para a classificação de microrregiões da porção norte com IVC Inexistente.

Pode-se verificar que para o fator intensidade de precipitação (D1), predominância de valores baixos para a região central da área (MATOPIBA), estes valores refletem na composição do IVC em vulnerabilidades que vão de Média e extrema, já para as microrregiões na porção norte da área é possível observar maiores valores para este fator. Para estas porções da área os valores são indicativos para os índices que compõem este fator de eventos de precipitação com intensidade e duração extrema, podendo haver diminuição das chuvas regulares e na precipitação total anual, ocorrências de extremos como inundações, deslizamentos de terra e períodos de estiagem prolongados na área.

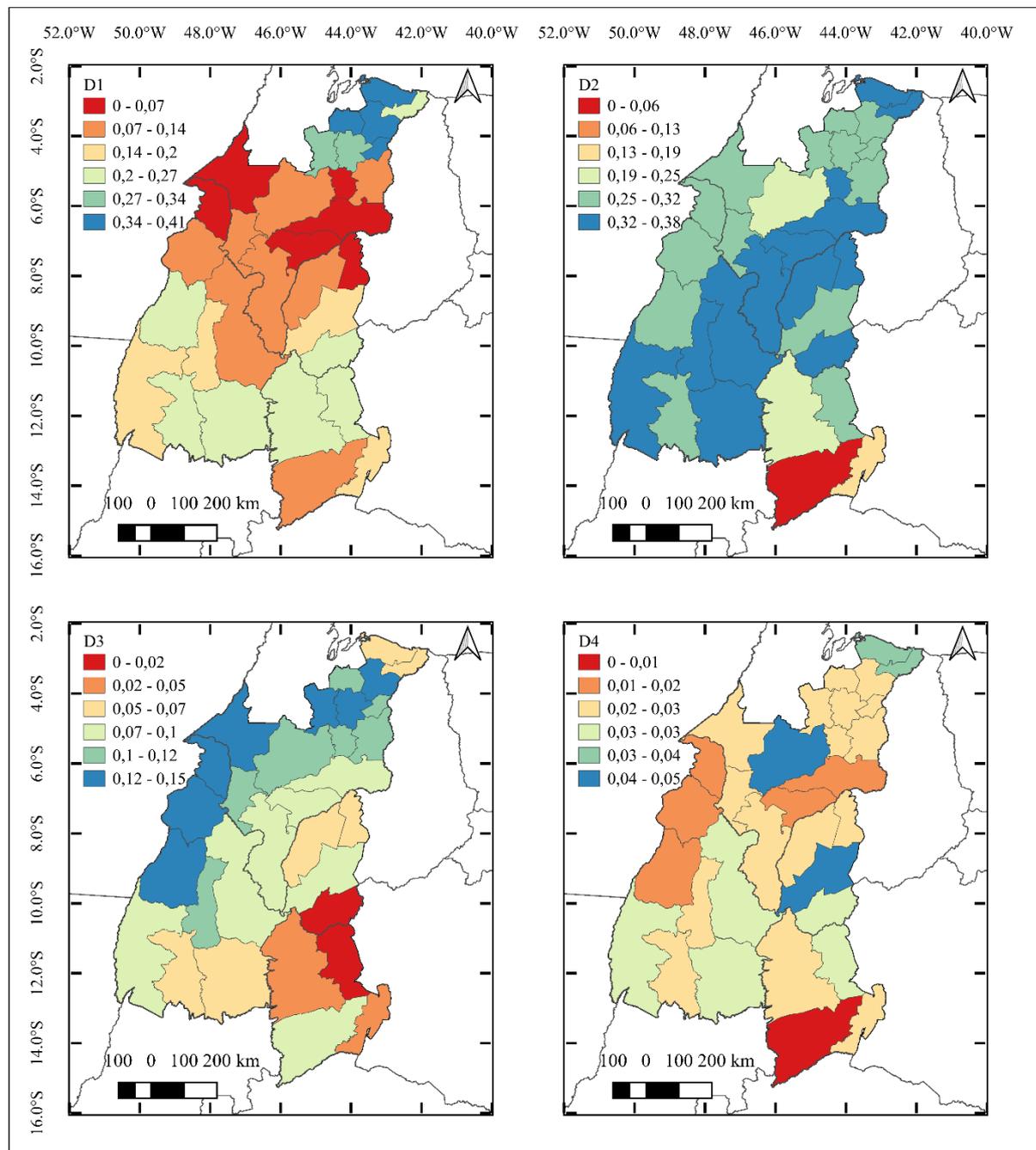


Figura 3. Distribuição da combinação linear dos escores fatoriais padronizados de cada fator principal por microrregiões e a proporção da variância explicada por cada fator em relação à variância dos fatores comuns que descrevem os índices de extremos climáticos da área de estudo por microrregiões.

Quanto ao Fator térmico (D2), constata-se para a área, influência na composição do IVC com valores altos para maior porção da área. Resultados de análises de tendências obtidos por Reis, (2020) e Siqueira et., al. (2024) evidenciam para a região do MATOPIBA tendências de

aumentos para os índices TR, WSDI, SU, TXx, TNx, TXn, TNn, TX90p e TN90p e diminuição para os índices TX10p e TN10p.

Os fatores Umidade (D3) e duração do período de aquecimento (D4) (Figura 3), apresentaram as menores capacidades de explicação das variabilidades dos indicadores utilizados na presente pesquisa. Sendo que o fator D3 exibe valores mais altos e o D4 mais baixos para áreas que coincidem com valores de vulnerabilidade Média, Baixa e Inexistente.

Por meio dos resultados do IVC é possível identificar as microrregiões que demandam maior necessidade de planejamento que visem a implementação de ações para reverter o quadro de vulnerabilidade no qual estão inseridos, já que possivelmente apresentem risco de ocorrência de eventos extremos, como secas e inundações, afetando a dinâmica do bioma do cerrado, alterando a disponibilidade hídrica e energética e as atividades agrícolas e agropecuárias.

Na Figura 4 é possível observar a distribuição espacial por microrregiões dos valores do IVC. Conforme pode-se verificar para sete microrregiões pertencentes as mesorregiões Centro Maranhense, Leste Maranhense e Norte Maranhense foram obtidos valores de IVC que caracterizam como microrregiões com vulnerabilidade inexistente (0,812 a 0,839) Lençóis Maranhenses, Chapadinha e Itapecuru Mirim, e microrregiões com vulnerabilidade baixa (0,720 a 0,776) Baixo Parnaíba Maranhense, Médio Mearim, Codó e Coelho Neto. Para as mesorregiões classificadas com os valores de IVC que as caracterizam com vulnerabilidades inexistentes e baixas foi possível verificar predominância de cargas positivas para os escores dos fatores, e ainda pode-se mencionar que os valores de cargas negativas exercem influência baixa nos valores finais do IVC.

Além da microrregião Chapadas do Extremo Sul Piauiense e com exceção da microrregião do Jalapão as demais microrregiões inseridas nas Mesorregiões Ocidental do Tocantins e Oriental do Tocantins foram classificadas com IVC médio com valores entre 0,580 a 0,675. Nove microrregiões apresentaram vulnerabilidade moderada com valores de IVC entre 0,506 a 0,579.

Quatro microrregiões apresentaram valores de IVC entre 0,475 e 0,497 (Vulnerabilidade Alta), considerando as cargas dos escores fatoriais, foram obtidos valores negativos dos fatores D1 e D4 para Imperatriz, Chapadas das Mangabeiras e Chapadas do Alto Itapecuru, já para Alto Mearim e Grajaú foram verificados valores negativos para os fatores D1 e D2. Desta forma, pode-se constatar que os valores baixos do fator D1 contribuem para que estas microrregiões apresentem alta suscetibilidade a ocorrência de eventos extremos climáticos de baixa intensidade de precipitação. O fator D2 que é fator térmico e o D4 que é duração do período de

aquecimento, baixos valores de índices térmicos e de duração de aquecimento (Verificar descrição de trabalhos que tem que são microrregiões com baixos índices de precipitação, influência de baixas temperaturas e de menor período de aquecimento).

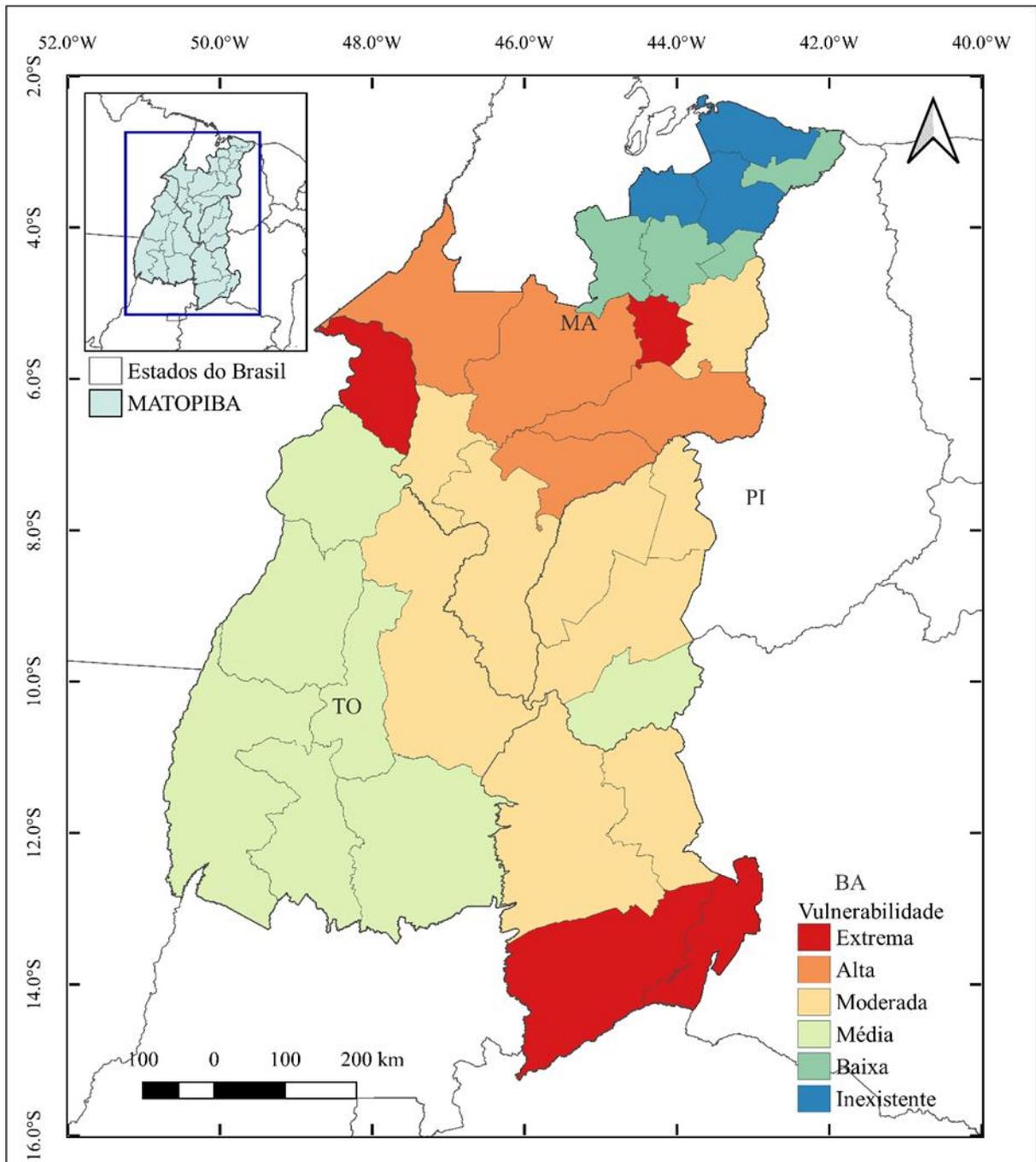


Figura 4. Classificação das microrregiões segundo o Índice de Vulnerabilidade Climática (IVC) na região do MATOPIBA.

Para quatro microrregiões o IVC foi classificado como vulnerabilidade Extrema, sendo que Bom Jesus da Lapa apresentou sinais negativos de escores para os quatro fatores, e Santa Maria Vitória e Bico do Papagaio para três (D1, D2 e D4) e Presidente Dutra para dois (D1 e D4), destacando-se como fatores que exercem maior influência o D1 e D4.

As microrregiões que apresentaram IVC com classificações Moderada, Alta e Extrema encontram-se numa posição desfavorável quanto ao risco de fenômenos naturais, pois apresentam fatores negativos na maioria dos escores das dimensões. Miranda et al. (2014) destacam que decréscimo de áreas de pastagens nativas extensivas e tradicionais no cerrado vem aumentando gradativamente em decorrência da maior parte do bioma estar sob influência do desenvolvimento agrícola crescente predominante na Região Centro Oeste, onde estão substituindo da vegetação nativa por culturas anuais intensificadas com novas tecnologias de produção, as chamadas commodities do agronegócio que recentemente vem integrando áreas em direção ao MATOPIBA.

Reis et al. (2020) obtiveram para o sudoeste do Piauí e a parcela oeste da Bahia os menores valores de volumes de chuva. Oliveira Aparecido et al. (2023) verificaram ao caracterizar as condições climáticas de precipitação da região do MATOPIBA redução espacial dos índices pluviométricos ocorrendo em direção à região nordeste, especialmente no estado do Piauí. Marcuzzo et al. (2012) verificaram uma tendência de redução em índices pluviométricos médios interatuais para a região Centro-Oeste e estado do Tocantins.

4. CONCLUSÕES

Por meio análise multivariada para os índices de detecção de extremos climáticos de temperatura e precipitação para a região do MATOPIBA foi constatado que duas componentes explicam a maior parte da variação nos índices, quando considerando o critério da raiz latente e a soma da variância acumulada sugere, representando 70,729 % da variância total, recorrendo-se ao do critério do Scree plot sugere a retenção de quatro fatores, sendo assim após análise dos critérios optou-se por prosseguir o estudo mantendo quatro fatores, estes explicam 80,596 % da variabilidade total existente entre os índices dependentes sobre a composição e vulnerabilidade do espaço, o que é satisfatório pelo critério da porcentagem da variância. Cabe ressaltar que dentre os 23 índices de extremos climáticos analisados com exceção dos índices TX90p e TN10p os demais foram identificados como representativos, dessa forma restaram 21 índices.

Considerando que os índices descrevem eventos extremos climáticos das variáveis temperatura e precipitação, optou-se por denominar os índices de modo que, os nomes

representem aspectos destas variáveis, logo o Fator D1 foi denominado de Intensidade de Precipitação, já que é composto com exceção do TXx, que é um índice de intensidade de temperatura predominantemente por índices de intensidade SDII, RX1day, RX5day, R95p e R99p) e frequência (R10mm, R20mm e R25mm) de precipitação, já o Fator D2 foi denominado de Térmico, pois é contemplado por 8 índices de temperatura, dentre estes 4 são de intensidade (TNx, TXn, TNn e DTR) e 4 de frequência (SU, TR, TX10p e TN90p). Considerando os índices que representam o Fator D3, e que estes são índices de extremos de precipitação para intensidade (PRCPTOT) e duração (CWD e CDD) este fator foi denominado de Umidade, quanto ao Fator D4, este foi designado de Duração do Período de Aquecimento, considerando assim o nome do único índice que o compõe.

Com o auxílio da Análise Fatorial foi obtido um Índice de Vulnerabilidade Climática - IVC, o qual possibilitou a identificação e classificação de áreas susceptíveis ou não a alterações climáticas, quanto aos aspectos da vulnerabilidade estes são espacialmente distintos, as microrregiões do MATOPIBA são caracterizadas por diferentes graus de vulnerabilidade climática, sendo alguns mais susceptíveis a eventos extremos de baixa ou alta intensidade de precipitação (secas, enchentes, deslizamentos) e outros a condições térmicas e de aquecimento elevadas e duradoras.

5. REFERÊNCIAS

- ABBASNIA, M.; TOROS, H. (2018). Analysis of long-term changes in extreme climatic indices: a case study of the Mediterranean climate, Marmara Region, Turkey. **Pure and Applied Geophysics**, 175, p. 3861–3873, doi:10.1007/s00024-018-1888-8
- ABRAR, R.; SARKAR, S. K.; NISHTHA, K. T.; TALUKDAR, S.; SHAHFAHAD; RAHMAN, A.; ISLAM, A. R. M. T.; MOSAVI, A. (2022). Assessing the Spatial Mapping of Heat Vulnerability under Urban Heat Island (UHI) Effect in the Dhaka Metropolitan Area. **Sustainability**, 14, 4945. <https://doi.org/10.3390/su14094945>
- ALEXANDER, L. V.; TAPPER, N.; ZHANG, X.; FOWLER, H. J.; TEBALDI, C.; LYNCH, A. (2009). Climate extremes: progress and future directions. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 3, p. 317-319. doi:10.1002/joc.1861

ANDRADE, A. R. S.; SILVA, E. G.; VIEIRA, A. P.; SILVA, M. B. G.; SANTOS, W. M.; SILVA, M. G. S. (2021). Análise fatorial na identificação dos fatores para obtenção de índice climatológico. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 06, n. 01, 079-099.

BRYMAN, A.; CRAMER, D. (2001). Quantitative data analysis with SPSS release 10 for windows: A guide for social scientists. New York, NY, US: Routledge.

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R.; FILHO, J. E. R. V. Dinâmica da Economia e da Agropecuária no MATOPIBA. Rio de Janeiro: IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017. 64 p. (Texto para Discussão, 2283)

CARVALHO, D. F.; SANTANA, A. C.; NOGUEIRA, A. K. M.; MENDES, F. A. T. e CARVALHO, A. C. (2007). Análise do desempenho competitivo da indústria de móveis de madeira do Estado do Pará. *Amazônia: Ciência e Desenvolvimento*. Belém, v.2, n.4.

CARVALHO, F. R. D. (2013). Análise Fatorial. Dissertação (Mestrado). Departamento de Matemática da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.

COLUSSI, J. (2017). Matopiba: mudanças no uso da terra na nova fronteira agrícola do Brasil e impactos socioeconômicos. Dissertação (Mestrado em Agronegócios). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 96 f.

DIAS, P. S.; SILVA, H. V. R. S.; MACEDO, R. C. (2019). Estatísticas multivariadas na administração: importância e aplicação da análise fatorial exploratória. **Revista Eletrônica de Administração e Turismo**, v. 13, n.1, p. 1807-1828.

FERNANDES, R. D. M.; MELO, D. M.; ELLI, E. F. Battisti, R. (2022). Climate change impacts on rainfed and irrigated soybean yield in Brazil's new agricultural frontier. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 147: 803-816. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03865-w>

FIELD, A.; MILES, A.; FIELD, Z. (2012). *Discovering statistics using R*. Sage Publications.

GARAYALDE, E. J. G.; SILVA, M. G. A.; TAVARES, SÁ A. (1996). Classificação mesoclimática da região sul do Brasil pela análise de componentes principais. Anais... In: Congresso Interamericano de Meteorologia, 1., Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. (2005). Análise multivariada de dados. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 593p.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. (2009). Análise multivariada de dados. 6. ed. Porto Alegre: Bookman.

HARRIS, I.; JONES, P. D.; OSBORN, T. J.; LISTER, D. H. (2013). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 3, p. 623-642. doi:10.1002/joc.3711

HARRIS, I.; OSBORN, T. J.; JONES, P.; LISTER, D. (2020). Version 4 of the CRU TS Monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v. 7, n. 109 <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

KAISER, H. F. (1974). An index of factorial simplicity. *Psychometrika*, v. 39, p. 31-36.

MALHOTRA, N. K. (2012). Pesquisa de marketing [recurso eletrônico]: uma orientação aplicada. 6. ed. Porto Alegre: Bookman.

MANLY, B. F. J. (2008). Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 229 p.

MARCUZZO, F. F. N.; OLIVEIRA, N. L.; PINTO FILHO, R. F.; FARIA, T. G. (2012). Chuvas na região Centro-Oeste e no Estado do Tocantins: análise histórica e tendência futura. *Boletim de Geografia*, v. 30, n. 1, p. 19-30.

MATOS, D. A.; RODRIGUES, E. (2019). Análise Fatorial. ENAP - Enap Fundação Escola Nacional de Administração Pública.

MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. (2014). Proposta de Delimitação Territorial do MATOPIBA. Disponível em: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf

OLIVEIRA APARECIDO, L. E.; DUTRA, A. F.; LORENÇONE, P. A.; ALCÂNTARA NETO, F.; LORENÇONE, J. A.; LEITE, M. R. L. (2023). Climate change in MATOPIBA region of Brazil: a study on climate extremes in agriculture. **Theoretical and Applied Climatology**, v.153, p. 87-100. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04509-x>

PEREIRA, C. N.; CASTRO, C. N.; PORCIONATO, G. L. (2018). Dinâmica econômica, infraestrutura e logística no MATOPIBA. Brasília: IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

POWELL, E. J.; KEIM, B. D. (2015). Trends in Daily Temperature and Precipitation Extremes for the Southeastern United States: 1948-2012. **Journal of Climate**, v. 28, n. 4, p. 1592-1612. doi:10.1175/jcli-d-14-00410.1

REIS, L. C. (2020). Produtividade da soja sob diferentes cenários de variabilidade climática na região do MATOPIBA. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Natal, 161f.

SALOMON, M. M. R. (2020). Quem disputa o MATOPIBA? Interesses e sustentabilidade na fronteira agrícola. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília.

SANTANA, A. C. (2007). Índice de desempenho competitivo das empresas de polpa de frutas do Estado do Pará. RER, Rio de Janeiro, vol. 45, nº 03, p. 749-775.

SANTOS, D. C. (2014). Análise multivariada de índices climáticos na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 10, v. 15, p. 2237-8642.

SENA, J. P. O.; LUCENA, D. B. (2013). Identificação de tendência da precipitação na Microrregião do Cariri Paraibano. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.6, n.5 (2013) 1400-1416.

SILVA, N. C. N.; FERREIRA, W. L.; CIRILLO, M. A. SCALON, J. D. (2014). O uso da análise fatorial na descrição e identificação dos perfis característicos de municípios de Minas Gerais. **Rev. Bras. Biom.**, São Paulo, v.32, n.2, p.201-215.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. (2007). *Using Multivariate Statistics*. 5. ed. Pearson.

TADIĆ, L.; BONACCI, O.; BRLEKOVIĆ, T. (2019). Um exemplo de aplicação da análise de componentes principais na avaliação de mudanças climáticas. **Theor Appl Climatol**, v. 138, p. 1049-1062.

UDDIN, M. N.; ISLAM, A. K. M. S.; BALA, S. K.; ISLAM, G. M. T.; ADHIKARY, S.; SAHA, D.; HAQUE, S.; FAHAD, M. G. R.; AKTER, R. (2019). Mapping of climate vulnerability of the coastal region of Bangladesh using principal component analysis. **Applied Geography**, v. 102, p. 47-57

VAGHEFI, S. A.; ABBASPOUR, N.; KAMALI, B.; ABBASPOUR, K. C. (2017). A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. **Environmental Modelling & Software**, v. 96, p. 181-198. doi:10.1016/j.envsoft.2017.06.033

VAGHEFI, S. A.; KEYKHAI, M.; JAHANBAKHSHI, F.; SHEIKHOESLAMI, J.; AHMADI, A.; YANG, H.; ABBASPOUR, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1. doi:10.1038/s41598-018-38071-8

VICINI, L. (2005). *Análise multivariada da teoria à prática*. Universidade Federal de Santa Maria-UFSM, Santa Maria.

ZHANG, X.; YANG, F. (2004). *RCLimDex (1.0) UserManual* (p. 22). **Ontario:Climate Research Branch**, Environment Canada.

CAPÍTULO 4

PROJEÇÕES FUTURAS DE ÍNDICES CLIMÁTICOS EXTREMOS NA REGIÃO DO MATOPIBA-BRASIL

RESUMO

Neste estudo, foram avaliadas projeções temporais de índices de detecção de extremos climáticos de precipitação e temperatura para regiões homogêneas na área do MATOPIBA, buscando identificação de possíveis mudanças e variabilidade climáticas. As séries diárias de temperaturas máximas e mínimas de precipitação pluvial foram adquiridas no site <https://www.2w2e.com/home/CIMP> da Water Weather Energy Ecosystembase, sendo os dados históricos (1950-2004) provenientes de reanálises, produzidos pela Climatic Research Unit – CRU, versão CRU-TS-3 (Time-series-TS), enquanto os dados climáticos futuros (2005-2099) de conjuntos de dados diários do Modelo Climático Global (GCM) The Hadley Global Environmental Model versão 2 (HadGEM2-ES), do Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP5), que disponibiliza dados com correção por meio de polarização dos dados do Coupled Model Intercomparison Project - CMIP5. O software RCLimdex 1.1 foi empregado para obtenção de 23 dos 27 índices recomendados pelo CCI/CCLIVAR (Climate Change Detection Monitoring and Indices). Os índices foram analisados para cinco intervalos de tempo futuro em relação ao período de referência (1950 - 2004), sob os seguintes cenários de Via de Concentração Representativa (RCPs), RCP 2.6 (baixa emissão), RCP4.5 (emissão baixa a moderada), RCP6.0 (emissão moderada) e RCP8.5 (alta emissão). A possibilidade, de que mesmo com a diminuição nas chuvas regulares (R10mm), na precipitação total acumulada (PRCPTOT) e nas precipitações totais anuais de dias úmidos (R95p) e de dias extremamente úmidos (R99p)), possam vir a acontecer com maior frequência eventos de precipitação extrema, tais como chuvas moderadas e intensas (R20 mm, R25 mm e RX5day), apesar da redução nos resultados do índice SDII. Quanto aos índices de extremos climáticos de temperatura foram obtidas variações mais altas para os índices TX90p, TN90p, TX10p, TN10p, TR e WSDI predominantes em todos os intervalos de tempo para todos os cenários de projeções, e para os índices TXx, TXn, TNx e TNn, em intervalos de tempo de futuro distante. Os resultados evidenciam indícios de mudanças climáticas para a região do MATOPIBA, com maiores variações no período futuro principalmente nos cenários de altas emissões, com maiores mudanças ocorrendo para os índices de temperatura.

Palavras-chave: detecção, variabilidade climática, RCLimdex, cenários.

FUTURE PROJECTIONS OF EXTREME WEATHER INDICES IN THE MATOPIBA-BRAZIL REGION

A B S T R A C T

In this study, temporal projections of detection indices of climatic extremes of precipitation and temperature for homogeneous regions in the MATOPIBA area were evaluated, seeking to identify possible changes and climate variability. The daily series of maximum and minimum rainfall temperatures were acquired from the <https://www.2w2e.com/home/CIMP> website of the Water Weather Energy Ecosystembase, with historical data (1950-2004) coming from reanalyses, produced by the Climatic Research Unit - CRU, version CRU-TS-3 (Time-series-TS), while future climate data (2005-2099) from daily datasets of the Global Climate Model (GCM) The Hadley Global Environmental Model version 2 (HadGEM2-ES), of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP5), which provides data with polarization correction of data from the Coupled Model Intercomparison Project - CMIP5. The RCLimindex 1.1 software was used to obtain 23 of the 27 indices recommended by the CCI/CCLIVAR (Climate Change Detection Monitoring and Indices). The index were analyzed for five future time intervals in relation to the reference period (1950 - 2004), under the following scenarios of Representative Concentration Pathway (RCPs), RCP 2.6 (low emission), RCP4.5 (low to moderate emission), RCP6.0 (moderate emission) and RCP8.5 (high emission). The possibility that even with the decrease in regular rainfall (R10mm), total accumulated precipitation (PRCPTOT) and total annual rainfall on wet days (R95p) and extremely wet days (R99p)), extreme precipitation events such as moderate and heavy rainfall (R20 mm, R25 mm and RX5day) may occur more frequently, despite the reduction in the results of the SDII index. As for the indices of climatic temperature extremes, higher variations were obtained for the TX90p, TN90p, TX10p, TN10p, TR and WSDI indices predominant in all time intervals for all projection scenarios, and for the TXx, TXn, TNx and TNn indices, in distant future time intervals. The results show evidence of climate change for the MATOPIBA region, with greater variations in the future period, especially in the scenarios of high emissions, with greater changes occurring for the temperature indexes.

Keywords: detection, climate variability, RCLimindex, scenarios.

1. INTRODUÇÃO

A região do MATOPIBA exibe condições físicos-naturais do domínio morfoclimático dos cerrados, como clima, relevo e hidrografia favorecendo a expansão da agricultura moderna nessa região (AZERÊDO, 2022). A expansão agrícola acelerada em uma região quente e com estação seca bem definida como no MATOPIBA, contribui para acelerar as mudanças climáticas, a retirada da vegetação nativa está associada ao aumento da degradação do solo e consequentemente elevação das temperaturas locais (BORDIGNON, 2022).

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2021) pode-se afirmar que as mudanças climáticas provavelmente aumentaram a frequência e a intensidade dos eventos extremos, assim como os tornem mais intensos e mais frequentes com o futuro aquecimento global adicional em todo o planeta. Da perspectiva dos impactos das mudanças climáticas, os mais perceptíveis e fortemente sentidos são os eventos climáticos e meteorológicos extremos devido às suas consequências imediatas e desastrosas no ambiente natural e social (AHSAN et al., 2022).

Eventos extremos são cada vez mais frequentes no mundo e tornam os ambientes mais vulneráveis às suas consequências, eventos de precipitação com intensidade e duração extrema, podem gerar grandes prejuízos como alagamentos, deslizamentos de terra, enxurradas e inundações (OLIVEIRA et al. 2013), já eventos extremos de temperatura como altas temperaturas podem provocar maior evapotranspiração e secagem, o que contribui para a intensidade e duração da seca (KOSTOPOULOU et al., 2023).

A avaliação dos extremos climáticos tem sido o foco de muitos estudos regionais e globais, uma vez que podem estar direta e indiretamente relacionados com a vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos aos impactos climáticos (SANTOS et al., 2020). Quanto mais extremo um evento, é mais provável que cause danos sociais ou ambientais, dessa forma os índices que caracterizam aspectos das extremidades da distribuição tendem a ser mais relevantes para a sociedade e os sistemas naturais do que os índices que caracterizam aspectos da distribuição que ocorrem com mais frequência (ZHANG et al., 2011).

Eventos extremos de precipitação têm sido geralmente investigados usando um conjunto de índices internacionalmente aceitos com base em dados diários de temperatura do ar e precipitação pluvial para análises de mudanças climáticas, bem como pacotes de software relacionados para seus cálculos, desenvolvidos, definidos e divulgados a Equipe de Especialistas em Detecção e Índices de Mudanças Climáticas (*Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices - ETCCDI*) em conjunto com o Programa Internacional de

Pesquisa em Previsão da Variabilidade Climática (*International Research Programme on Climate Variability Predictability - CCI/CLIVAR*) coordenados pela Organização Mundial de Meteorologia - OMM (ZHANG et al., 2005; ALEXANDER et al., 2006; ZHANG et al., 2011; DONAT et al., 2013; POWELL e KEIM, 2015).

As alterações climáticas são agora amplamente reconhecidas como um dos principais problemas ambientais do século XXI que o mundo enfrenta (VAGHEFI et al., 2017). A avaliação dos extremos climáticos é de grande importância em estudos regionais e globais, para a investigação de regiões com alto risco às mudanças climáticas, uma vez que podem estar direta e indiretamente relacionados com a vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos aos impactos climáticos (SILVA, 2022; SANTOS et al., 2023). Dessa forma, os extremos climáticos têm atraído cada vez mais atenção devido ao seu grande impacto social em vários setores, como a agricultura, a economia e a saúde humana (ROJPRATAK e SUPHARATID, 2022).

A região do MATOPIBA composta em sua quase totalidade pelo Bioma Cerrado, é responsável pelo crescimento da agricultura a taxas superiores à média nacional, a partir principalmente da produção de grãos, na qual vem gerando mudanças significativas tanto sociais quanto ambientais (PEREIRA, 2018). É provável que se torne uma área susceptível a futuras alterações climáticas, principalmente relacionadas a temperatura e precipitação.

Estudos recentes destacam aumentos nos extremos de temperatura e precipitação para região do MATOPIBA, dos quais destacam-se os de Salvador e Brito, 2017; Reis, 2020; Santos et al., 2020, Siqueira et al., 2024. Neste estudo propõem-se abordar a análise de índices de extremos climáticos considerando projeções climáticas de cenários do Quinto Relatório do IPCC, para a identificação de possíveis mudanças e variabilidade climáticas nas características dos índices de detecção de extremos climáticos para a região do MATOPIBA.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A região do MATOPIBA (Figura 1) inserida no Norte/Nordeste brasileiro, incluiu o sul e nordeste do estado do Maranhão, estado do Tocantins, oeste do estado da Bahia e sudoeste do estado do Piauí é marcada pela expansão da agricultura de alta tecnologia em áreas de Cerrado. A área do MATOPIBA, foi estimada em 73 milhões de hectares, representando 8,6% do território. Um dos critérios par delimitação territorial da região foram as áreas de cerrados existentes nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, que totalizam 91% do território (66.543.540,87 hectares) do MATOPIBA (FERNANDES et al., 2022; GARCIA e VIEIRA FILHO, 2018).

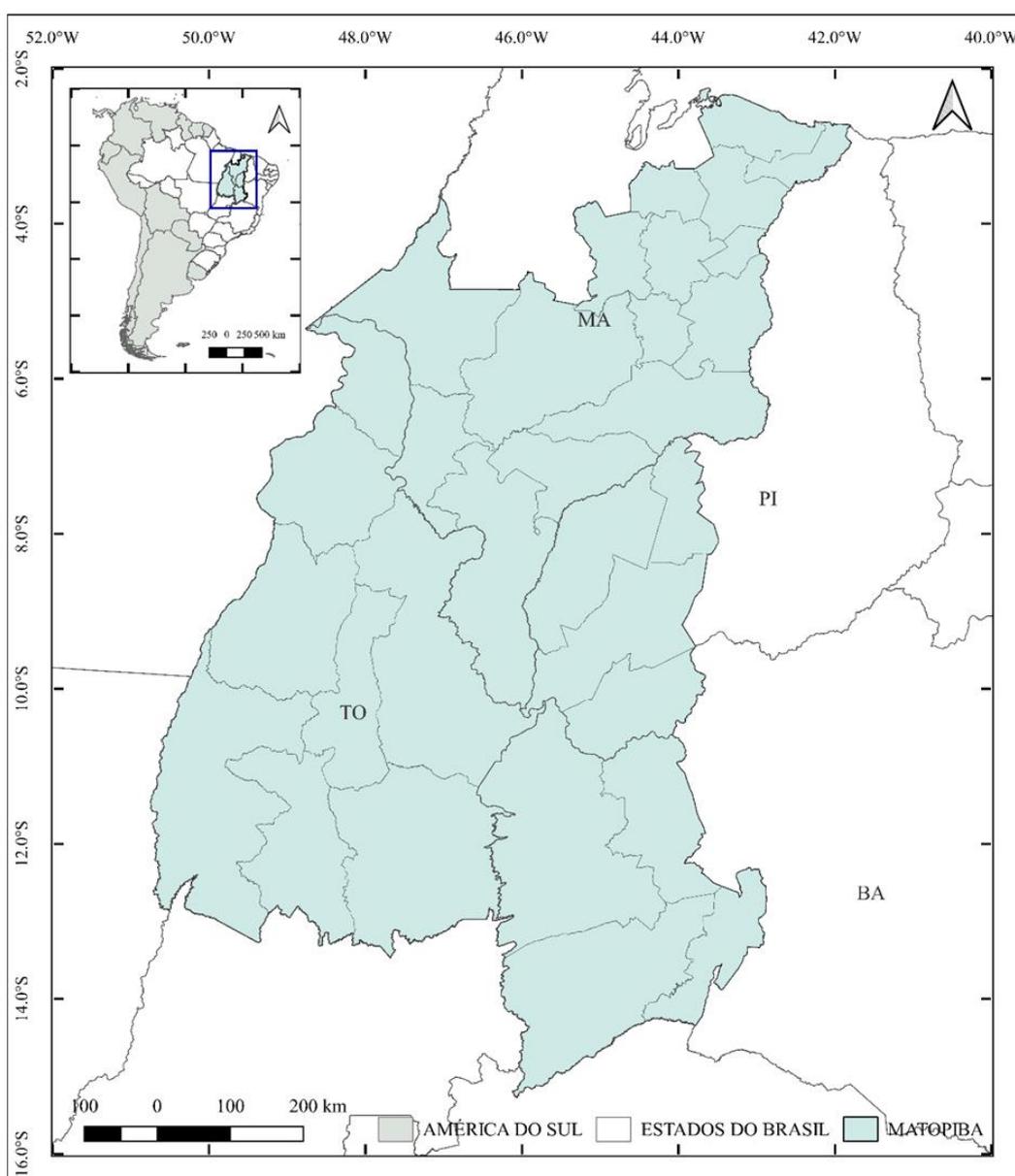


Figura 1. Localização da área de estudo (região do MATOPIBA).

Além do bioma Cerrado foram incluídos na delimitação proposta porções de mais dois biomas, com remanescentes do bioma Amazônia correspondendo a 5.319.628,40 hectares (~7,3%) e Caatinga 1.203.107,22 hectares (~1,7%), encontrados nos limites noroeste e leste da região, respectivamente (MAGALHÃES e MIRANDA, 2014).

A região do MATOPIBA apresenta os climas A (clima tropical) e B (clima árido (seco)), segundo a classificação de Köppen, na região central predomina o tipo climático Aw (clima tropical chuvas de verão), a fronteira leste apresenta transição para As (clima tropical com chuvas de inverno) e para BSh (clima semiárido quente), e a fronteira oeste para Am (clima tropical com monções) (ALVARES et al., 2013). Na região do MATOPIBA, a precipitação média anual é de 1.502,75 mm distribuída majoritariamente (88,75%) entre outubro e abril. Entre maio e setembro (setembro), observam-se os menores índices de chuva, abaixo (OLIVEIRA APARECIDO et al., 2021). E a temperatura média anual é igual ou superior a 22° C, com médias de 28° C (ALVARES et al., 2013).

2.2 Dados

Os dados utilizados compreendem o período de 1 de janeiro de 1950 a 31 de dezembro de 2099, sendo as séries diárias que abrangem o período de 1 de janeiro de 1950 a 31 de dezembro de 2004 (54 anos de dados), consideradas neste estudo como séries históricas diárias, enquanto as séries diárias de dados que compreendem o período de 1 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2099 (94 anos de dados) correspondentes as séries futuras.

As séries diárias de dados utilizadas foram adquiridas no site <https://www.2w2e.com/home/CIMP> da Water Weather Energy Ecosystembase, que disponibiliza base de dados diários históricos e futuros de temperatura e precipitação, que cobrem o período de 1950 a 2099. A área de estudo compreende um recorte sobre a região do MATOPIBA, englobando 235 pontos de grade com resolução espacial de 0,5°, distribuídos espacialmente na área. Os pontos utilizados neste trabalho foram separados para regiões homogêneas obtidas por Siqueira et al. (2024) para a área do MATOPIBA, para as quais foram obtidas médias dos dados diários da precipitação pluviométrica e das temperaturas máximas e mínimas.

A base de dados históricos disponível e utilizada corresponde a dados de reanálises da versão CRU-TS-3 dos conjuntos de dados de séries temporais (Time-series-TS) mensais, produzidos pela Climatic Research Unit - CRU da Universidade de East Anglia, esses são campos de grade mensais com base em valores diários (HARRIS et al., 2013; VAGHEFI et al.,

2017; HARRIS et al., 2020). Os dados CRU-TS-3.1 históricos de reanálise são reformatados do NetCDF em arquivos de texto legíveis para base de dados diária, com resolução de 0,5° (HARRIS et al., 2013; VAGHEFI et al., 2017; HARRIS et al., 2020).

Os dados climáticos futuros de 2005 a 2099 são provenientes de conjuntos de dados diários do Modelo Climático Global (GCM) HadGEM2-ES denominado The Hadley Global Environmental Model versão 2 da família de modelos HadGEM, do ISI-MIP5 (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project), que disponibiliza dados com correção por meio de polarização dos dados do Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado Fase 5 (Coupled Model Intercomparison Project - CMIP5), com os seguintes cenários de Via de Concentração Representativa (RCPs), RCP 2.6 (via de baixa emissão), RCP4.5 (via de emissão baixa a moderada), RCP6.0 (via de emissão moderada) e RCP8.5 (via de alta emissão) (HEMPEL et al., 2013; VAGHEFI et al., 2017).

2.3 Índices de extremos climáticos

Índices de extremos climáticos foram calculados para a região do MATOPIBA (Figura 1) usando o software RclimDex desenvolvido por Zhang e Yang (2004). O Pacote RclimDex (Versão 1.1) utilizado é de distribuição gratuita foi desenvolvido para um código em linguagem R, uma plataforma de computação aberta e acessível, disponível para download no website dos índices da Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices – ETCCDMI (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI>).

A partir do RclimDex é possível determinar 27 índices de extremos derivados dos dados diários de temperatura e precipitação recomendados pela Equipe de Especialistas CCI/CLIVAR para Monitoramento e Índices de Detecção de Mudanças Climáticas - ETCCDMI, bem como alguns outros índices de temperatura e precipitação com limites definidos pelo usuário (ZHANG e YANG, 2004). Sendo estes em sua maioria destinados a medir alguns dos aspectos mais extremos do clima, caracterizando a intensidade, duração ou frequência de vários eventos climáticos (ALEXANDER et al., 2019).

O RclimDex é projetado para fornecer uma interface amigável para calcular índices de extremos climáticos, incorporando assim, o ClimDex para um ambiente que não dependa de um sistema operacional específico, já que o ClimDex é um programa baseado no Microsoft Excel. O Climdex foi desenvolvido por Byron Gleason do National Climate Data Centre (NCDC) da NOAA é uma ferramenta que proporciona um pacote computacional que é usado no cálculo de índices de extremos climáticos para monitorar e detectar mudanças climáticas, e

tem sido usado em oficinas CCI/CLIVAR (International Research Programme on Climate Variability and Predictability) sobre índices climáticos desde 2001 (ZHANG e YANG, 2004).

Na presente pesquisa foram analisados 23 dos 27 índices definidos pelo ETCCDMI, sendo 11 relativos aos dados de precipitação pluviométrica e 12 aos dados de temperatura do ar. Os resultados para alguns dos índices podem ser obtidos tanto anualmente quanto mensalmente pelo RclimDex, neste estudo foram considerados apenas os valores anuais. Os índices de extremos climáticos para os valores médios diários de precipitação pluvial e temperatura do ar foram obtidos para regiões homogêneas obtidas por Siqueira et al. (2024) para a área do MATOPIBA.

Os índices derivados de dados diários de precipitação pluvial obtidos foram: Precipitação média para dias com chuva ≥ 1 mm – SDII, Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 10 mm- R10mm (dias), Contagem anual de dias quando a precipitação ≥ 20 mm - R20mm (dias), Contagem anual de dias quando a precipitação $\geq nn$ mm -Rnnmm (nn corresponde ao valor de precipitação a ser definido, no trabalho o limite definido foi 25 mm) (dias), Precipitação máxima mensal de 1 dia - RX1day (mm), Precipitação máxima mensal consecutiva de 5 dias - RX5day (mm), Duração máxima do período de seca: número máximo de dias consecutivos com precipitação diária < 1 mm – CDD (dias), Duração máxima do período de chuva: número máximo de dias consecutivos com precipitação diária ≥ 1 mm – CWD (dias), Precipitação total anual quando a precipitação diária $> 95^{\circ}$ percentil - R95p (mm), Precipitação total anual quando a precipitação diária $> 99^{\circ}$ percentil - R99p (mm) e Precipitação total anual em dias úmidos - PRCPTOT (mm).

Os índices obtidos de dados de temperaturas máximas e mínimas do ar consistem em: Número de dias quando TX (temperatura máxima diária) > 25 °C- SU (dias), Número de dias quando TN (temperatura mínima diária) > 20 °C - TR (dias), Valor máximo mensal da temperatura máxima diária - TXx (°C), Valor máximo mensal da temperatura mínima diária - TNx (°C), Valor mínimo mensal de temperatura máxima diária - TXn (°C) Valor mínimo mensal de temperatura mínima diária - TNn (°C), Porcentagem de dias quando TX $<$ percentil 10 (dias frios) - TX10p (%), Porcentagem de dias quando TX $>$ percentil 90 (dias quentes) - TX90p(%), Porcentagem de dias quando TN $<$ percentil 10 (noites frias), TN10p (%), Porcentagem de dias quando TN $>$ percentil 90 (noites quentes), TN90p (%), Índice de duração do período de aquecimento: contagem anual de dias com pelo menos 6 dias consecutivos quando TX $>$ percentil 90 -WSDI (dias), Faixa de temperatura diária: diferença média mensal entre TX e TN – DTR (°C).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade de probabilidade da distribuição dos valores anuais para cada um dos índices extremos climáticos de precipitação pluvial e temperaturas máximas e mínimas do ar (distribuição a partir de densidade de Kernel) representada por meio de “gráfico de densidade”, assim como a distribuição dos resultados anuais ao longo do tempo dos índices de extremos climáticos para as cinco regiões homogêneas obtidas por Siqueira et al. (2024) para a área do MATOPIBA são apresentadas e discutidas para todo o período de estudo, 1950-2099. Para cada região homogênea os gráficos são apresentados para a série dos resultados históricos (1950-2004) e das projeções futuras (resultados futuros de 2005 a 2099) dos cenários de Via de Concentração Representativa (RCP), RCP 2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5.

Foram obtidas para os índices de extremos climáticos variações entre as médias dos resultados do período de 2005-2099 (projeções) e médias dos resultados do período de 1950-2004 (período de base). Também se optou por definir quatro intervalos de tempo futuros, 2005-2020, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2099 (períodos de futuro próximo - 2005-2060 e de futuro distante – 2061-2099) tomando como intervalo de base a série de resultados do período de 1950-2004 para avaliação da variabilidade.

3.1 Índices de extremos de precipitação pluvial

3.1.1 Cenários climáticos futuros

Os resultados da variação (Tabela1) do índice SDII, que é definido como sendo a precipitação média para dias com chuva ≥ 1 mm – SDII, são semelhantes aos obtidos para os índices R20mm e R25 mm, o que é esperado, já que variações para estes índices foram suaves, ressalta-se a obtenção de variações baixas predominantemente de aumento, e apenas nos Grupos G2 e G5 as projeções dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 indicam redução. Kostopoulou e Giannakopoulos (2023) verificaram a ausência de alterações específicas no índice SDII ao projetar mudanças nos extremos de precipitação para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 em toda a Grécia, o que significa que a intensidade da precipitação diária não mudou nem se espera que mude no final do século XXI.

Tabela 1. Variação das projeções para o período de 2005-2099 em comparação ao período de base de 1950-2004 dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial por regiões homogêneas para a área do MATOPIBA

Grupos	Cenários	Índices										
		SDII	R10mm	R20mm	R25mm	PRCPTOT	CDD	CWD	RX1day	RX5day	R95p	R99p
G1	RCP 2.6	0.00	-1.57	0.01	-0.05	-98.87	10.17	-15.56	-0.48	3.28	-13.47	-2.82
	RCP 4.5	0.34	2.66	0.45	0.12	-14.85	13.38	-5.53	0.72	7.13	-1.70	1.41
	RCP 6.0	0.34	3.18	0.60	0.14	-21.71	13.75	-9.70	0.46	7.21	-1.10	0.77
	RCP 8.5	0.06	-1.59	0.00	-0.03	-129.63	23.59	-17.52	-0.71	3.70	-17.98	-3.81
G2	RCP 2.6	-0.20	-6.74	0.34	-0.24	-156.78	5.29	-17.27	-0.50	1.78	-14.45	-5.36
	RCP 4.5	0.24	0.03	1.66	0.40	-46.15	5.95	-8.60	1.03	6.38	1.49	-1.25
	RCP 6.0	0.30	-0.41	1.56	0.41	-55.39	13.60	-8.02	1.63	7.02	0.74	-0.26
	RCP 8.5	-0.10	-7.94	0.33	0.30	-196.44	15.01	-17.24	0.04	2.62	-17.13	-4.16
G3	RCP 2.6	0.20	-5.06	-1.04	0.36	-118.75	22.49	-9.26	1.73	0.25	-19.23	-6.03
	RCP 4.5	0.40	-1.20	-0.13	0.88	-33.35	19.06	-5.75	3.40	0.95	-3.01	1.38
	RCP 6.0	0.40	-2.35	0.93	1.75	-40.43	19.02	-5.90	3.47	6.99	3.85	1.24
	RCP 8.5	0.38	-5.54	-0.49	0.69	-139.99	39.82	-14.46	3.33	5.86	-20.51	-4.58
G4	RCP 2.6	0.28	-0.78	1.33	0.06	-65.24	8.70	-0.98	1.79	1.61	-13.01	-6.94
	RCP 4.5	0.59	3.62	2.09	0.93	36.00	10.68	2.80	3.66	9.73	8.61	0.12
	RCP 6.0	0.64	3.24	2.25	0.66	32.92	10.15	4.81	2.32	6.87	5.06	-1.87
	RCP 8.5	0.47	-0.02	1.97	0.51	-40.16	15.35	-0.49	0.48	6.33	-6.13	-5.11
G5	RCP 2.6	-0.03	-5.75	-0.51	0.10	-146.56	9.05	-11.75	0.63	0.04	-24.93	-6.05
	RCP 4.5	0.07	-4.34	0.16	0.24	-116.89	9.67	-10.34	0.95	-0.32	-15.41	-3.90
	RCP 6.0	0.13	-3.35	0.80	0.75	-112.86	9.10	-20.48	2.59	4.64	-9.54	-0.92
	RCP 8.5	-0.12	-8.05	-0.31	0.38	-238.77	30.35	-23.01	1.70	-0.43	-30.33	-6.34

Avaliando para as regiões homogêneas as curvas de densidade (Figura 2) para os períodos das projeções dos diferentes cenários (RCPs) e de referência, para os índices de precipitação moderada - R10mm, precipitação forte R20mm e precipitação intensa R25 mm é possível verificar a concordância as variações obtidas. Os resultados das variações revelam que o número de dias como respectivas precipitações não sofrem aumentos ou reduções drásticas, ressalta-se que as projeções para o índice R10mm são em sua maioria de redução da quantidade de dias com precipitações diárias acumuladas iguais ou superiores a 10 mm, essas variações são perceptíveis como pode-se observar na Figura 2, sendo os cenários RCP2.6 e RCP8.5 os que apresentaram maiores reduções, com destaque para os Grupos G2, G3 e G5.

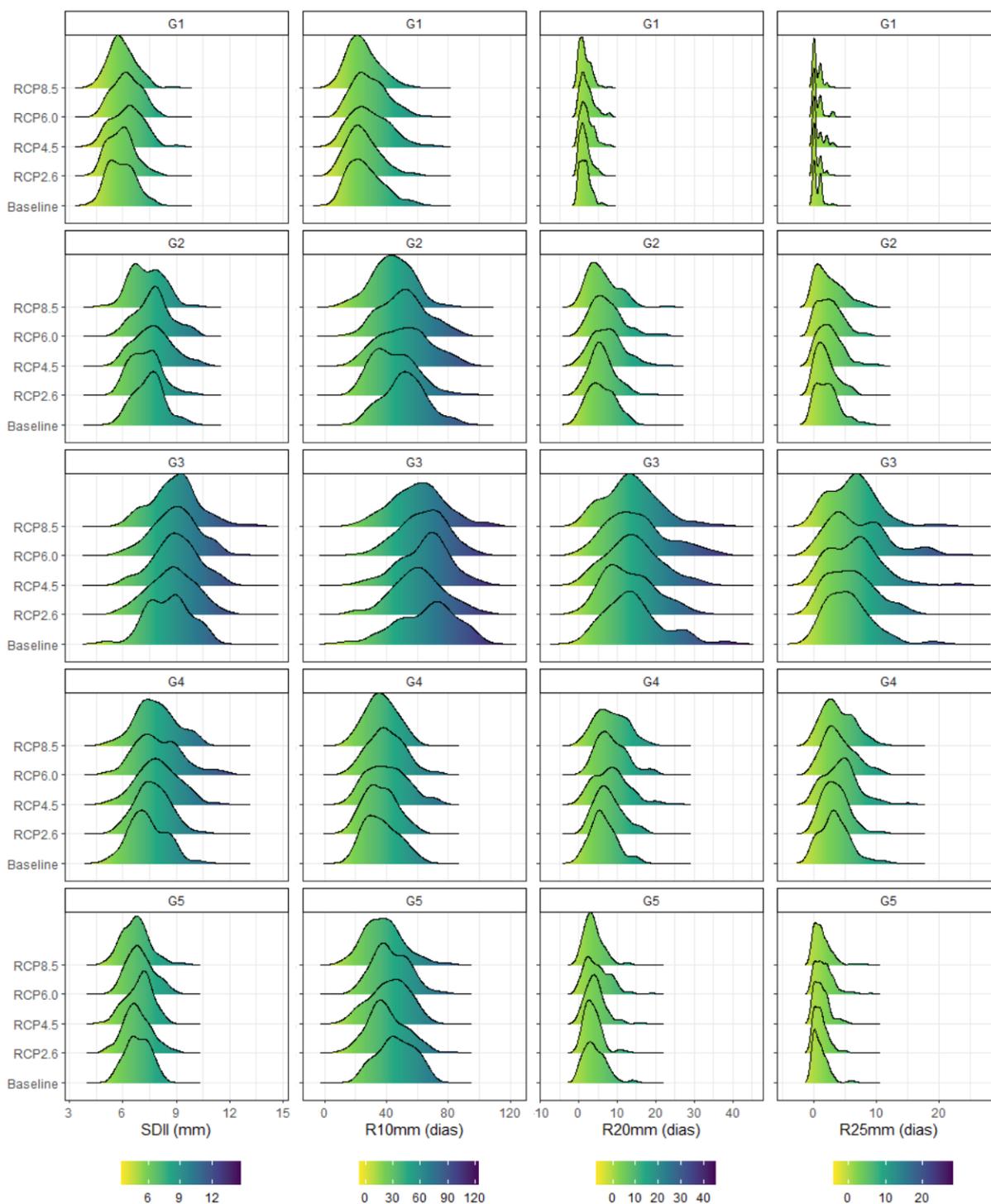


Figura 2. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices SDII, R10 mm, R20 mm e R25 mm para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).

Considerando os índices R20mm e R25 mm as variações caracterizam predominante, leve aumento, destacando que o R25mm exibe as menores variações, indicando que os dias

com precipitação superior a 25 mm são raros (Tabela 1 e Figura 2). Verifica-se por meio das densidades de distribuição que os dias com precipitação superior a 20 mm são menos frequentes, podendo aumentar ligeiramente para as projeções dos RCP4.5 e RCP6.0. Em relação a distribuição de densidade do índice simples de intensidade diária de precipitação - SDII, as curvas apontam (expõem) leve redução na intensidade de chuvas nos cenários RCP2.6 e RCP8.5 para as regiões homogêneas dos grupos G2 e G5, configurando para estas maior quantidade de dias chuvosos, porém com precipitações diárias baixas. Exceto para a região homogênea do grupo G1 que a densidade é maior para eventos na faixa de 5 a 7 mm, para os demais grupos é maior a frequência entre 6 a 8 mm.

A frequência de dias com precipitação moderada - R10mm, forte R20mm e intensa R25 mm é de aumento nos cenários de altas emissões, sendo assim, apesar da redução nos resultados do SDII, é possível a ocorrência de mais dias com eventos de precipitação extrema. Rojpratak e Supharatid (2022) avaliaram mudanças de índices que caracterizam a precipitação extrema na Tailândia, utilizando projeções do CMIP5 para os cenários RCP6.0 e RCP8.5, verificando que as diferenças em magnitude entre esses RCPs são maiores para índices que representam a intensidade extrema (R95p, R99p, Rx1day, Rx5day) do que para índices que representam a frequência extrema (R10mm, R20mm). Esses resultados geralmente indicam que eventos extremos de precipitação serão mais frequentes e mais intensos do que o presente em ambos os cenários RCP, especialmente o cenário RCP8.5, até o final do século XXI.

Pode-se verificar considerando a distribuição dos resultados obtidos por cenários de projeções climáticas em comparação aos resultados históricos para o índice precipitação total anual em dias úmidos (PRCPTOT) e as variações entre os resultados das projeções e históricos (Figura 3 e Tabela 1) variabilidade predominantemente de redução para as regiões homogêneas, nota-se que apenas as projeções dos cenários intermediários RCP4.5 e RCP6.0 e para a região homogênea do Grupo 4 se colocam em posições acima da média dos resultados da série histórica, conforme é evidenciado por meio da variação obtida das projeções em comparação ao período de base. Condizente com os resultados obtidos por Kostopoulou e Giannakopoulos (2023) ao projetar mudanças nos extremos de precipitação para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 em toda a Grécia, foram constatadas reduções para o índice PRCPTOT.

É possível observar a partir da análise dos índices CDD e CWD (Figura 3 e Tabela 1), que o grupo G4 apresentou maior média do número máximo de dias consecutivos com precipitação diária <1 mm (CDD), tanto para os resultados da série histórica quanto para as projeções, o mesmo ocorre para o número máximo de dias consecutivos com precipitação diária

≥ 1 mm (CWD) (as menores médias). As projeções dos cenários RCP4.5 e RCP6.0 para o Grupo 4 que é composto por microrregiões da Bahia exibem o mesmo comportamento dos resultados para o tempo histórico encontrados por Araújo (2009) que constatou ao avaliar índices de extremos climáticos para um período de 45 anos, 1947 a 1991 nos estados de Sergipe e Bahia que, áreas com aumento de CWD estão, praticamente, concentradas no oeste da Bahia e em núcleos isolados no nordeste baiano.

As curvas das densidades para as séries anuais dos índices CDD e CWD podem ser observadas na Figura 3. Considerando a distribuição da densidade do índice CDD, esta retrata uma variabilidade positiva para as regiões homogêneas quando comparadas as médias das séries anuais históricas e as projeções futuras dos cenários, já para o índice CWD pode-se verificar relação oposta, as médias dos cenários obtidas conforme podem ser verificadas na Tabela 1 se apresentam em posições abaixo das médias do período de base, sendo assim, com predominância de menores quantidades de dias úmidos consecutivos para as projeções futuras em comparação com o período histórico, o que é reforçado por meio dos resultados das densidades de frequências baixos.

Em relação a variação entre os resultados da série histórica e as projeções (Tabela 1), todas as regiões homogêneas têm indicativo de aumento para a quantidade de dias secos (CDD), o Grupo 3 destaca-se em todos os cenários de vias de concentração com maior variação e como pode ser observado na Figura 3 as densidades de frequências se revelam mais elevadas para maiores quantidades de dias. Considerando a quantidade de dias úmidos CWD e a precipitação total anual em dias úmidos PRCPTOT, apenas os cenários de via de concentração RCP4.5 e RCP 6.0 e para o Grupo 4 indicam aumento, e o Grupo 5 destaca-se com maiores variações entre os resultados da série histórica e as projeções dos cenários RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5. O aumento na frequência do número máximo de dias consecutivos com precipitação diária < 1 mm (CDD), redução na frequência de número máximo de dias consecutivos com precipitação diária ≥ 1 mm (CWD) e principalmente diminuições no PRCPTOT pode indicar maiores riscos a incidência de secas.

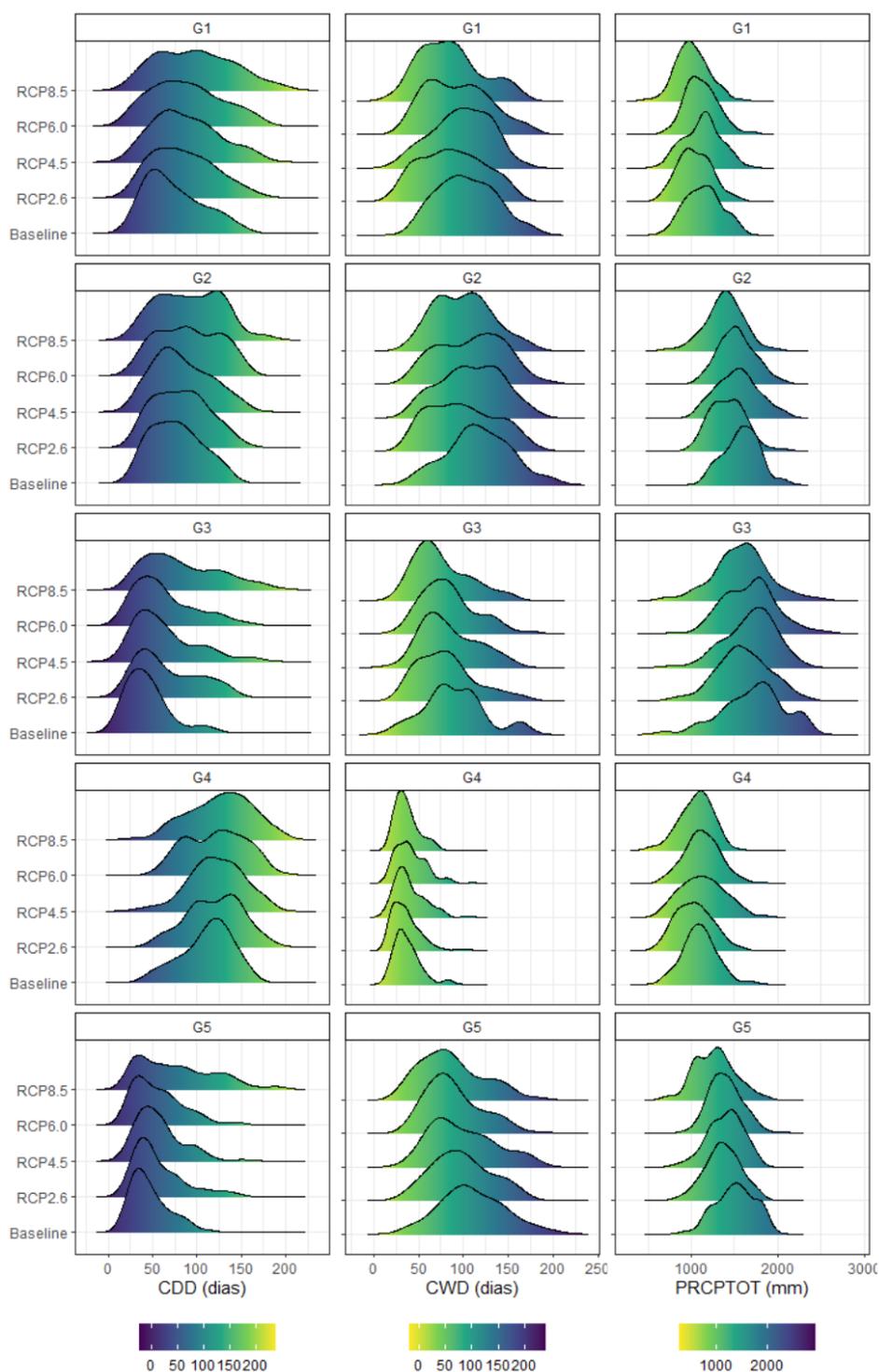


Figura 3. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices CDD, CWD e PRCPTOT para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).

Kostopoulou e Giannakopoulos (2023) ressaltam que os índices PRCPTOT e SDII não estão diretamente relacionados com eventos climáticos extremos, porém evidenciam alterações na distribuição da precipitação. Santos et al.,2023 utilizaram índices de forte intensidade

R25mm usados para verificar a ocorrência eventos climáticos extremos. Ao avaliarem o desempenho de modelos de sistemas terrestres (ESMs) Avila - Diaz et al. (2020) verificaram que algumas bacias hidrológicas do Brasil têm os mesmos padrões, mostrando principalmente diminuições no PRCPTOT e CWD e alguns aumentos no CDD, especialmente no Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil.

Na Figura 4 é possível observar a distribuição de densidade dos índices de precipitação máxima em 1 dia (RX1day) e 5 dias (RX5day) e de precipitação total anual em dias com chuva acima do percentil 95 (R95p) e do percentil de 99 (R99p) para o período de base e as projeções. Nota-se para os índices RX1day RX5day predominância de aumento, em relação ao RX5day as maiores variações foram obtidas para os Grupos G1, G2 e G4, e as projeções dos cenários RCP4.5 e RCP6.0 se destacam com os maiores aumentos. Embora a probabilidade de quantidade precipitação máxima em 5 dias (RX5day), seja menor a da quantidade de precipitação máxima em 1 dia (RX1day), os padrões de distribuição de densidade exibem comportamentos semelhantes. No entanto, considerando os valores obtidos para as variações (Tabela 1) é possível verificar para o índice RX1day variações entre -0,50 e 3.66 predominantemente positivas para todas as regiões, ou seja, variações sutis, já para o índice RX5day dentre -0,43 e 9.73, as maiores variações são para as projeções dos cenários RCP4.5 e RCP6.0 em ambos os índices.

Quanto aos índices R95p (precipitação total anual de dias úmidos) e R99p (precipitação total anual de dias extremamente úmidos), verifica-se padrões de distribuição de densidade com comportamentos distintos, as variações que indicam predominância de reduções em relação ao período de base para todos os cenários de projeções, sendo as maiores reduções obtidas para as projeções dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 em ambos os índices. As distribuições de densidades para os resultados das projeções são mais elevadas para menores quantidades de dias. A predominância de variação de aumento nos valores extremos de precipitação (RX1day, RX5day, R95p e R99p) sob cenários de alta emissão (RCP6.0 e RCP8.5), sugere que eventos de chuva intensa e prolongada podem se tornar mais frequentes e severos no futuro. As distribuições variam entre os diferentes grupos, indicando que o impacto da mudança climática sobre a precipitação extrema não será uniforme. Algumas regiões podem experimentar aumentos mais pronunciados na intensidade e frequência de eventos de precipitação extrema.

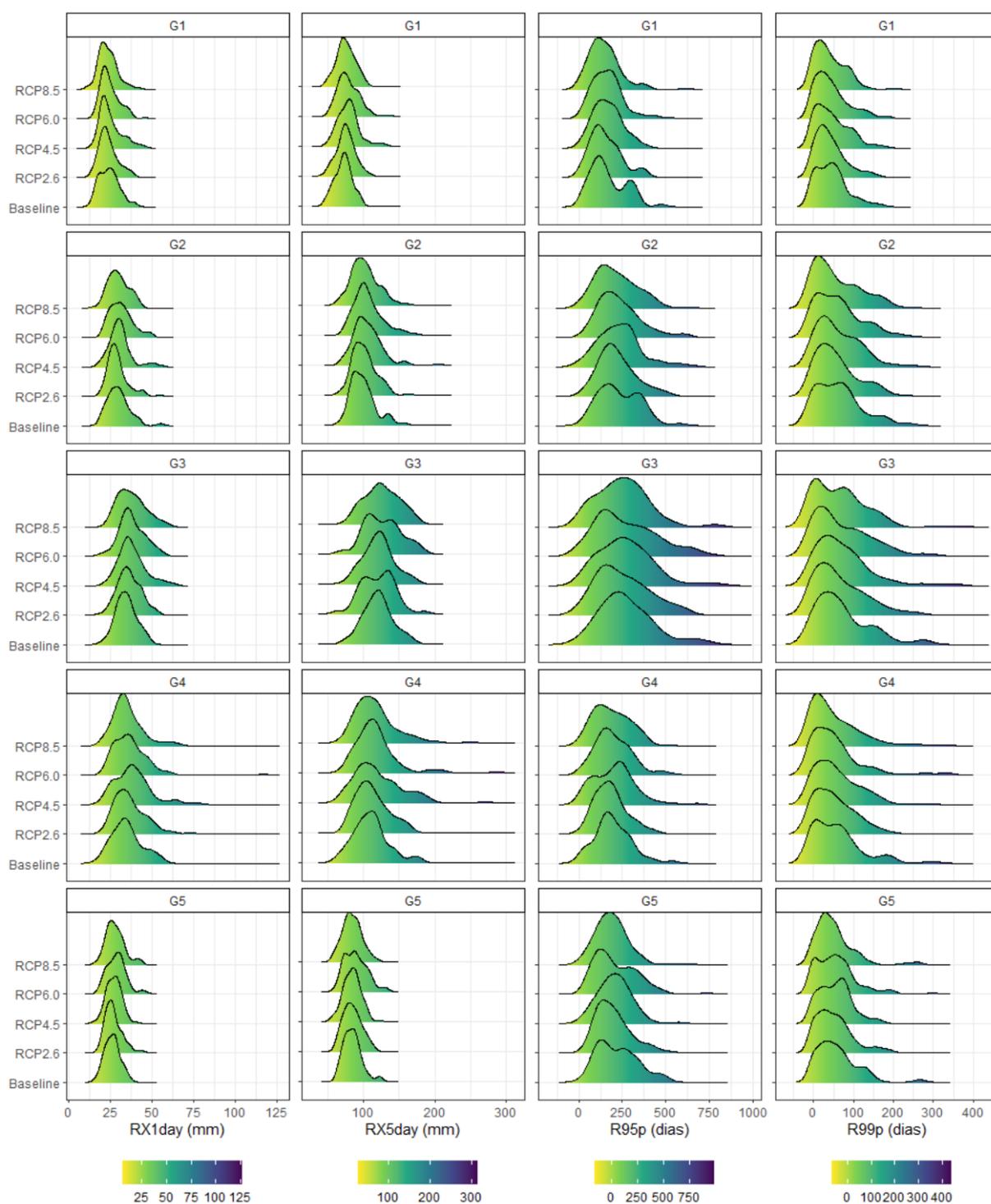


Figura 4. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices RX1day, RX5day, R95p e R99p para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).

O índice R95p é relacionado a chuvas intensas que podem colaborar com a ocorrência de enchentes, inundações e deslizamento de terra, para regiões tropicais normalmente está associado a eventos extremos de chuva (ZHANG et al., 2011; CAMARINHA, 2016). O

RX5day é usado como indicador no risco de enchentes devido a condições de chuva forte numa sequência de dias (FRICH et al., 2002). O aumento tanto do R95p quanto do RX5day em regiões com redução para o PRCPTOT indica possibilidade de diminuição na precipitação acumulada e um aumento da intensidade de chuvas extremas. A possibilidade, de que mesmo com a diminuição de chuvas regulares (reduções na ocorrência de precipitações iguais ou superiores a 10 mm (R10mm), na precipitação total acumulada (PRCPTOT) e nas precipitações totais anuais de dias úmidos (R95p) e de dias extremamente úmidos (R99p)), de que eventos de chuvas moderadas intensas (R20 mm e RX5day) possam ser mais frequentes.

3.1.2 Variabilidade temporal

Constam nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6 em porcentagem a variação dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial por regiões homogêneas para cinco intervalos de tempo para cada cenário em comparação ao período de base de 1950-2004. O comportamento das variações se destaca com valores indicando mudanças acima de 10% do índice SDII para o período de tempo distante 2081-2099 nos cenários RCP4.5 para os Grupos 3 e 4 (Tabelas 4 e 5), RCP6.0 com exceção do Grupo 5 (Tabela 6), e RCP8.5 para o Grupo 4 (Tabela 5), e no período de tempo distante 2061-2080 apenas no Grupo 4 (Tabelas 5) no cenário RCP4.5, para este grupo foram verificadas apenas variações positivas, os demais indicaram predominância de variações também positivas. Sugerindo assim aumento na intensidade do índice até o final deste século para estas regiões homogêneas. Em relação ao R10mm é possível perceber que os cenários RCP2.6 e RCP8.5 exibem variações que sugerem reduções para os períodos de tempos distantes (2061-2080 e 2081-2099), já as mudanças das projeções dos RCP4.5 e RCP6.0 com exceção do Grupo 1 (Tabela 2) para o RCP6.0 e do Grupo 5 para os cenários RCP4.5 e RCP6.0 indicam aumento.

Quanto as precipitações fortes - R20mm verifica-se predominância de variações positivas, nos cenários RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 exceto para os Grupos 3 e 5 (Tabelas 4 e 6) variações mais elevadas para períodos de tempo distante (2061-2080 e 2081-2099), no cenário RCP2.6 exceto para os Grupos 3 e 5 (Tabelas 4 e 6) foram obtidas variações que indicam maiores aumentos para o período 2061-2080, para o R25mm foram obtidas variações elevadas tanto para aumentos quanto reduções, nota-se que para as projeções de períodos de tempos distantes no RCP4.5 (2021-2040, 2041-2061-2080 e 2081-2099), e no RCP6.0 (2061-2080 e 2081-2099) as variações são mais elevadas, predominam para o RCP2.6 reduções enquanto para o RCP8.5 aumento.

Tabela 2. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G1 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices										
		SDII	R10mm	R20mm	R25mm	PRCPTOT	CDD	CWD	RX1day	RX5day	R95p	R99p
RCP 2.6	2005-2020	-1.12	-6.16	2.31	27.31	-6.30	-2.06	-22.05	-0.64	3.61	-16.45	4.70
	2021-2040	4.60	2.25	-5.06	-8.33	-3.03	30.94	-8.06	-2.22	3.41	2.79	-11.43
	2041-2060	0.45	-6.31	1.49	22.22	-10.10	31.15	-8.40	1.38	4.63	-7.44	-5.88
	2061-2080	-2.69	-9.16	14.58	-18.52	-12.31	3.63	-31.21	-1.29	8.27	-2.27	2.41
	2081-2099	-1.58	-10.78	-10.40	-67.84	-11.19	1.33	-6.48	-7.22	2.84	-19.26	-20.18
RCP 4.5	2005-2020	8.51	24.24	59.60	90.97	8.49	-6.63	-0.36	8.29	23.20	15.19	31.29
	2021-2040	3.16	0.35	11.31	12.04	-3.58	5.46	-8.78	-2.49	2.46	-9.28	-9.78
	2041-2060	5.61	13.08	17.86	32.41	-1.91	21.88	-7.43	9.60	10.77	1.13	-2.65
	2061-2080	4.17	4.53	-5.06	-28.70	-4.07	18.77	-6.03	-6.41	4.49	-15.40	-25.76
	2081-2099	7.96	11.23	72.31	28.65	-3.60	47.51	-3.02	7.06	11.86	6.90	29.79
RCP 6.0	2005-2020	-1.86	-5.21	18.68	-10.88	-5.59	-19.05	-26.77	0.42	3.75	-14.92	-19.38
	2021-2040	7.39	20.87	50.60	32.41	2.18	5.46	-0.23	6.30	12.58	10.39	10.69
	2041-2060	5.19	6.24	44.05	73.15	3.55	3.43	0.11	1.63	11.17	-3.64	13.93
	2061-2080	6.04	10.80	14.58	12.04	-6.80	46.63	-18.16	-2.23	5.58	-9.66	-15.94
	2081-2099	10.46	24.83	65.41	28.65	-3.66	50.57	-5.10	3.07	16.60	12.33	15.93
RCP 8.5	2005-2020	-1.76	-8.54	-42.71	-23.61	-7.02	-10.26	-6.40	-6.26	1.08	-20.95	-41.32
	2021-2040	3.33	2.63	-27.98	-28.70	-4.08	2.75	-4.39	-4.62	2.01	-4.81	-31.43
	2041-2060	-1.08	-8.40	-18.15	-38.89	-13.56	21.14	-23.96	-7.84	0.44	-22.27	-28.45
	2061-2080	0.53	-9.73	44.05	1.85	-15.27	64.13	-18.74	0.18	11.34	-7.07	28.25
	2081-2099	3.77	-6.78	37.84	60.82	-16.18	75.48	-29.73	3.52	10.57	-0.35	24.97

Tabela 3. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G2 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices										
		SDII	R10mm	R20mm	R25mm	PRCPTOT	CDD	CWD	RX1day	RX5day	R95p	R99p
RCP 2.6	2005-2020	0.14	-5.51	9.91	-16.30	-5.09	9.33	-14.06	-2.27	0.44	-5.65	-7.19
	2021-2040	-1.32	-13.30	3.45	-16.30	-8.02	30.25	-9.13	-2.66	-0.93	-8.10	-15.98
	2041-2060	-3.66	-13.39	-6.03	-28.26	-11.22	5.36	-11.78	-0.37	1.62	-8.02	-22.05
	2061-2080	-4.27	-13.88	15.52	5.22	-11.99	-11.49	-28.00	0.57	5.46	-1.08	3.40
	2081-2099	-3.60	-17.79	7.08	-1.83	-12.42	1.28	-10.42	-3.92	2.17	-8.17	-0.47
RCP 4.5	2005-2020	5.25	8.14	46.55	34.51	2.88	-4.47	-12.78	4.68	13.12	12.85	5.05
	2021-2040	1.50	-2.95	2.59	14.78	-4.36	3.27	-3.32	4.07	3.03	-17.18	-0.79
	2041-2060	0.63	-5.08	20.69	10.00	-4.85	19.14	-6.48	4.72	2.56	-3.67	-14.52
	2061-2080	1.83	-2.66	21.55	-16.30	-4.80	5.43	-4.26	-3.91	-1.12	-11.33	-36.79
	2081-2099	7.55	4.70	56.99	58.58	-2.27	13.31	-11.14	8.20	16.62	26.25	40.56
RCP 6.0	2005-2020	-1.20	-3.70	-8.41	-52.17	-5.10	-13.37	-21.54	-7.00	-1.60	-22.95	-61.01
	2021-2040	2.57	-3.05	25.86	14.78	-3.10	12.74	-1.32	4.43	8.36	-2.14	-14.20
	2041-2060	0.16	-7.79	4.31	2.83	-2.97	3.21	1.63	2.71	3.55	-17.85	-0.62
	2061-2080	5.32	-1.99	36.21	43.48	-5.70	36.59	-10.58	17.06	7.58	9.38	29.77
	2081-2099	12.70	12.64	71.51	78.72	-0.84	44.81	-5.29	7.82	16.43	32.07	33.56
RCP 8.5	2005-2020	-1.28	-5.51	1.29	1.63	-4.91	4.10	-1.57	-7.62	-6.49	-12.81	-39.03
	2021-2040	-0.04	-7.59	-0.86	-4.35	-6.70	-3.19	-5.63	-4.86	2.46	-6.17	-5.57
	2041-2060	-2.79	-20.16	0.00	14.78	-13.65	14.12	-20.28	4.43	0.64	-10.95	-4.59
	2061-2080	-0.98	-18.22	8.62	7.61	-15.50	41.48	-23.52	2.95	5.52	-6.89	-12.78
	2081-2099	-1.70	-23.69	18.87	51.03	-20.25	39.44	-20.26	4.47	9.65	-0.73	23.62

Tabela 4. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G3 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices										
		SDII	R10mm	R20mm	R25mm	PRCPTOT	CDD	CWD	RX1day	RX5day	R95p	R99p
RCP 2.6	2005-2020	-4.21	-14.46	-14.06	-11.22	-10.84	5.95	-7.82	-0.88	-6.90	-18.65	-38.74
	2021-2040	6.99	1.32	6.98	22.93	0.48	45.56	-1.82	10.40	3.87	6.88	0.66
	2041-2060	2.68	-10.78	-11.61	4.72	-9.37	56.04	-21.30	4.43	0.07	-8.51	11.07
	2061-2080	1.75	-8.06	-9.15	8.36	-7.08	73.08	-12.28	1.39	0.24	-9.13	-9.04
	2081-2099	3.36	-7.67	-10.28	4.48	-8.55	70.07	-7.67	8.78	2.45	-8.33	-12.54
RCP 4.5	2005-2020	2.42	5.67	-7.92	-12.36	3.58	-19.24	11.17	2.04	-0.48	-16.06	-19.38
	2021-2040	1.11	-7.07	-12.31	2.90	-5.40	0.33	-1.54	8.00	-0.28	-13.85	-16.14
	2041-2060	0.35	-7.45	-8.80	4.72	-4.86	30.82	-17.68	0.43	-5.21	-13.96	-22.71
	2061-2080	6.99	0.03	-0.03	24.75	-2.13	52.24	-7.05	16.46	3.46	3.13	5.24
	2081-2099	12.19	1.40	24.43	56.24	0.35	113.71	-13.76	21.40	6.51	33.97	61.38
RCP 6.0	2005-2020	-4.43	-10.87	-11.87	-2.11	-7.21	-11.33	-4.69	-2.55	-5.07	-23.46	-25.35
	2021-2040	1.63	-5.64	8.39	22.93	-1.21	0.09	-2.38	11.31	8.14	-2.48	12.02
	2041-2060	7.69	7.14	23.12	62.09	8.02	15.50	-1.71	7.89	5.31	19.32	-21.09
	2061-2080	5.77	-6.85	-0.03	26.57	-6.54	73.54	-11.90	18.74	9.89	-0.50	19.26
	2081-2099	11.27	-2.98	9.66	43.78	-5.94	125.11	-12.06	12.60	8.85	9.62	19.30
RCP 8.5	2005-2020	-0.64	-9.36	-13.62	-3.25	-8.32	26.68	-4.34	8.07	3.54	-17.71	-21.28
	2021-2040	6.06	4.50	8.74	16.56	0.68	0.35	-2.10	5.08	4.31	-2.27	-12.22
	2041-2060	3.03	-9.04	-14.76	-6.21	-9.53	87.48	-16.74	7.45	2.58	-22.07	-23.70
	2061-2080	4.55	-14.26	-1.79	15.65	-12.75	169.13	-25.42	7.37	1.63	-2.84	-4.11
	2081-2099	8.21	-14.20	2.65	38.03	-10.90	129.23	-30.22	20.60	12.50	5.82	27.91

Tabela 5. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G4 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices										
		SDII	R10mm	R20mm	R25mm	PRCPTOT	CDD	CWD	RX1day	RX5day	R95p	R99p
RCP 2.6	2005-2020	4.21	0.75	9.02	-2.32	-2.70	8.44	0.56	7.69	0.62	-14.70	6.80
	2021-2040	1.64	-5.87	22.57	15.71	-4.48	12.55	8.13	9.97	5.50	-3.80	-1.69
	2041-2060	4.14	1.78	15.50	-0.82	-6.19	5.09	1.89	1.89	0.03	-8.08	-24.32
	2061-2080	5.63	-1.50	39.86	5.19	-7.25	1.99	-13.71	5.17	4.07	6.02	-2.30
	2081-2099	3.28	-5.38	14.96	-9.84	-8.54	11.33	-9.89	1.23	-3.27	-14.73	-35.54
RCP 4.5	2005-2020	8.18	16.46	52.23	27.73	7.77	10.58	2.09	5.59	4.11	16.15	-12.27
	2021-2040	5.43	8.20	21.00	15.71	2.60	4.06	-2.86	8.46	8.70	-4.91	-7.79
	2041-2060	8.20	10.25	16.29	8.20	2.19	10.53	17.08	9.52	4.52	-11.20	-11.91
	2061-2080	4.95	1.09	26.50	30.74	0.57	5.50	15.73	9.70	5.29	0.43	-10.99
	2081-2099	13.25	15.04	53.01	58.18	4.20	17.96	4.68	18.69	21.35	24.93	43.66
RCP 6.0	2005-2020	1.16	-2.49	10.00	-0.44	-4.13	-5.04	-10.97	-5.61	-3.24	-23.29	-51.02
	2021-2040	6.64	9.43	15.50	6.69	3.22	5.05	21.29	12.46	8.91	-9.09	-16.91
	2041-2060	2.85	4.10	19.43	9.70	1.44	7.07	3.65	9.41	6.09	-3.41	18.34
	2061-2080	11.11	6.97	49.29	27.73	2.83	18.40	25.76	9.14	6.65	11.71	3.56
	2081-2099	20.38	24.82	79.47	53.44	10.57	17.77	21.10	5.44	11.22	33.37	21.63
RCP 8.5	2005-2020	2.26	1.26	7.05	3.31	-0.27	-6.84	-14.53	2.10	2.13	-20.31	6.39
	2021-2040	6.85	5.19	30.43	9.70	-2.40	9.68	-3.27	-0.20	5.36	-5.97	-23.90
	2041-2060	1.64	-8.88	16.29	9.70	-7.49	11.11	8.67	-4.44	-1.54	-12.62	-23.21
	2061-2080	7.86	-2.46	43.00	17.21	-5.05	20.69	-15.89	-0.68	10.75	2.73	-11.10
	2081-2099	12.76	5.12	54.66	36.04	-2.33	31.11	16.67	10.67	11.70	18.13	12.01

Tabela 6. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de precipitação pluvial projetados para a região homogênea G5 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices										
		SDII	R10mm	R20mm	R25mm	PRCPTOT	CDD	CWD	RX1day	RX5day	R95p	R99p
RCP 2.6	2005-2020	-2.49	-8.12	-29.41	-2.32	-7.77	-1.54	-16.28	-0.66	-1.60	-13.10	-21.41
	2021-2040	4.01	-5.96	8.04	15.71	-4.97	43.07	-3.95	7.24	1.94	2.20	4.26
	2041-2060	-0.81	-17.85	-18.97	-0.82	-12.33	15.42	-10.82	1.91	-1.29	-16.69	-31.60
	2061-2080	-1.83	-11.90	-4.24	5.19	-11.26	22.17	-12.46	2.69	1.44	-14.04	11.50
	2081-2099	-1.59	-17.73	-22.46	-9.84	-11.87	13.38	-11.11	0.11	-0.60	-15.23	-17.81
RCP 4.5	2005-2020	1.89	2.29	-3.32	27.73	-0.17	-14.26	0.21	8.81	1.74	-6.85	-13.78
	2021-2040	-1.10	-13.74	-15.29	15.71	-8.08	19.92	3.92	-1.08	-2.42	-18.70	-23.72
	2041-2060	0.14	-16.22	14.17	8.20	-9.28	20.78	-11.32	6.36	-1.79	-5.24	2.40
	2061-2080	0.29	-12.55	-1.79	30.74	-11.29	41.79	-22.51	-2.36	-2.46	-12.14	-20.73
	2081-2099	3.95	-4.08	25.35	58.18	-8.36	28.83	-15.75	7.64	3.62	8.95	22.02
RCP 6.0	2005-2020	-3.22	-11.09	-29.41	-0.44	-6.22	-14.13	-11.05	3.27	-1.20	-27.79	-42.70
	2021-2040	1.09	-5.63	37.50	6.69	-4.33	-5.58	-16.96	7.47	5.94	9.05	-2.57
	2041-2060	3.57	-0.66	28.91	9.70	-0.87	12.85	-13.64	18.65	9.95	1.22	19.06
	2061-2080	0.14	-17.41	16.63	27.73	-14.39	38.46	-27.56	9.61	3.19	-14.01	-6.70
	2081-2099	7.18	-1.92	35.69	53.44	-11.47	61.32	-22.65	9.23	8.60	5.81	17.69
RCP 8.5	2005-2020	-2.58	-12.04	-17.13	3.31	-8.61	1.28	-6.44	1.41	-0.20	-18.40	-27.01
	2021-2040	2.04	-0.55	22.77	9.70	-5.39	10.17	-0.04	9.02	6.84	3.02	9.02
	2041-2060	-1.83	-21.09	-23.88	9.70	-15.63	51.86	-29.29	2.38	0.66	-17.14	-17.66
	2061-2080	-1.91	-20.87	-17.75	17.21	-20.97	131.70	-31.11	1.96	-7.13	-16.77	-21.42
	2081-2099	-4.97	-32.18	-4.37	36.04	-27.52	120.21	-35.63	17.30	-2.80	-20.48	-0.68

Avaliando a distribuição dos resultados por regiões homogêneas para o período em estudo das séries históricas e das projeções futuras para os resultados anuais dos índices intensidade de precipitação diária simples -SDII, precipitação intensa - R10mm e precipitação muito intensa R20mm e R25 mm (Figura 5) é possível observar que as projeções para os cenários exibem padrões de distribuição com comportamentos distintos. É possível verificar quanto a distribuição do R25mm ocorrência de picos de aumento, considerando que foram obtidas variações elevadas para os índices de precipitação, principalmente para os cenários intermediários (RCP4.5 e RCP6.0), ressalta-se que poderão ocorrer eventos pluviométricos extremos de alta intensidade até o final do século.

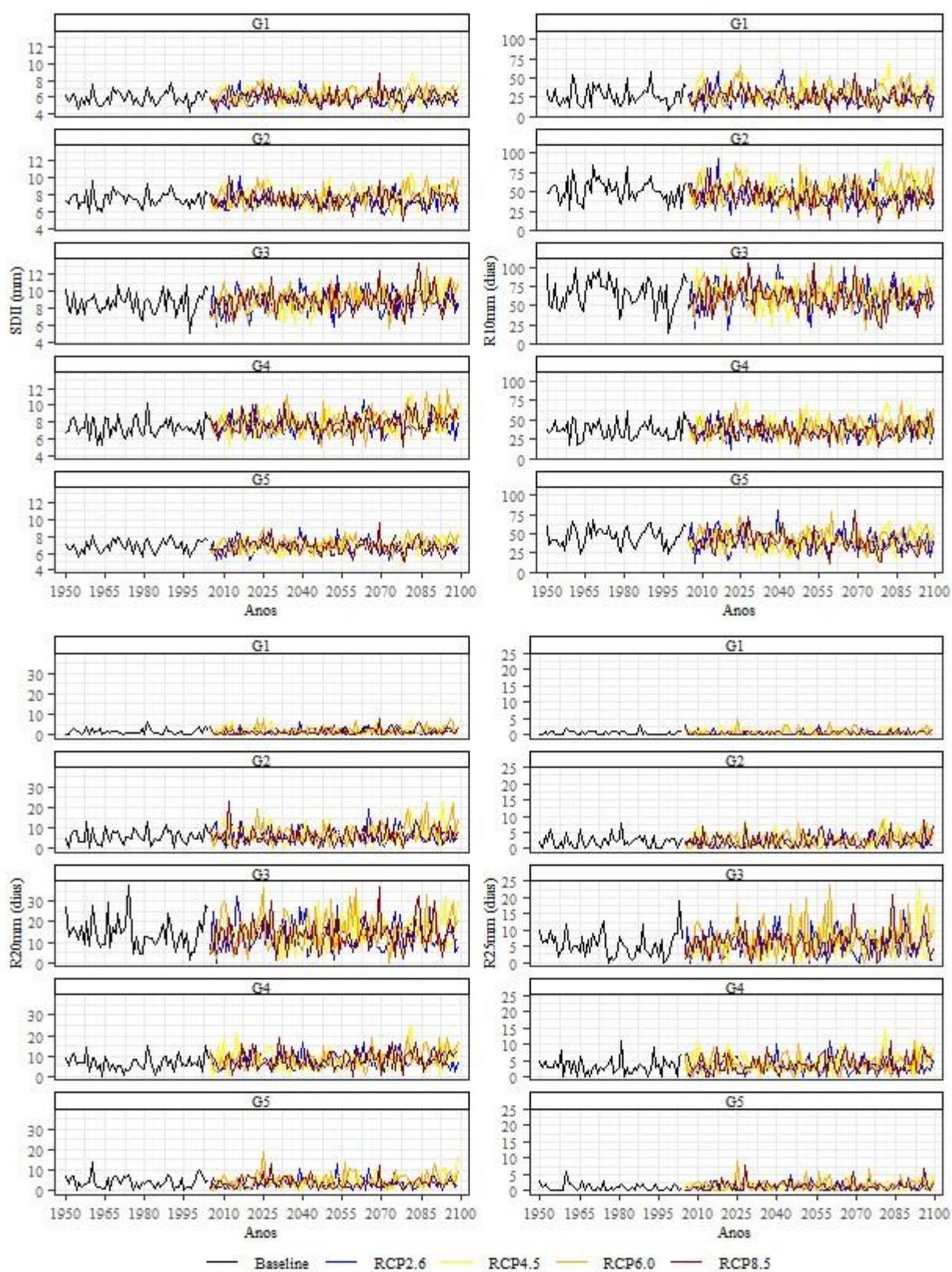


Figura 5. Variabilidade temporal dos índices intensidade de precipitação diária simples - SDII, precipitação intensa - R10mm e precipitação muito intensa R20mm e R25 mm para o período de 1950 a 2099.

Na Figura 6 podem ser observados os gráficos das séries históricas e das projeções futuras para os resultados anuais do índice dias secos consecutivos - CDD, dias úmidos consecutivos - CWD e PRCPTOT por regiões homogêneas para o período em estudo. Avaliando as variações (Tabela 2 e Figura 6) para as projeções, nota-se considerável redução nos resultados do índice de precipitação total PRCPTOT e de dias úmidos consecutivos CWD, já para o índice de dias secos consecutivos CDD aumento. A redução da precipitação agravaria a seca prolongada que prevalece no país e alteraria drasticamente a infraestrutura ambiental.

Observa-se para a distribuição do índice PRCPTOT (Figura 6) configurações distintas para as projeções resultantes dos quatro cenários climáticos, em concordância com a variação em porcentagem deste índice, evidencia-se predominância de diminuição no padrão da precipitação anual para projeções futuras, as maiores variações que sugerem redução foram obtidas principalmente para os cenários 2.6 e 8.5 com destaque em intervalos de tempo futuros distantes (2061-2080 e 2081-2099). Quanto as projeções dos cenários intermediários, RCP4.5 e RCP6.0, foram obtidas variações que sugerem aumento nos resultados do índice PRCPTOT para a região homogênea do Grupo G4, esta região encontra-se inserida no estado da Bahia.

De forma geral, verifica-se que para intervalos de tempo futuros considerando os índices PRCPTOT, CWD e CDD, provavelmente a região do MATOPIBA esteja sujeita a uma grande diminuição na precipitação total anual e na quantidade de dias úmidos até ao final deste século, principalmente sob o RCP8.5, especialmente nas regiões homogêneas dos Grupos 1, 2 e 5. Enquanto as projeções sugerem que, o número de dias úmidos consecutivos (CWD) e a precipitação total (PRCPTOT) diminuem, em contraste os dias secos consecutivos (CDD) aumentam. Em relação a variabilidade do índice CDD, com exceção do período 2005-2020, esta se apresenta predominantemente positiva e considerável nas projeções de todos os cenários (Tabela 2), implicando para um futuro com períodos de estiagens mais prolongados na área. É perceptível a existência de variabilidade temporal para estes índices, indicando um aumento dos eventos extremos de precipitação e uma tendência de redução na precipitação total anual e nos dias úmidos consecutivos, pode-se observar um aumento das condições secas e redução das condições úmidas.

As projeções revelam um aumento dos dias de precipitação muito intensa R20mm e no número de dias muito úmidos (RX5day) até ao final do século nos cenários RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, e embora com uma precipitação total PRCPTOT e número de dias úmidos consecutivos reduzidos (CWD), provavelmente indicam que será maior o risco de inundações e deslizamentos de terra, com consequentes perdas agrícolas e desastres ambientais.

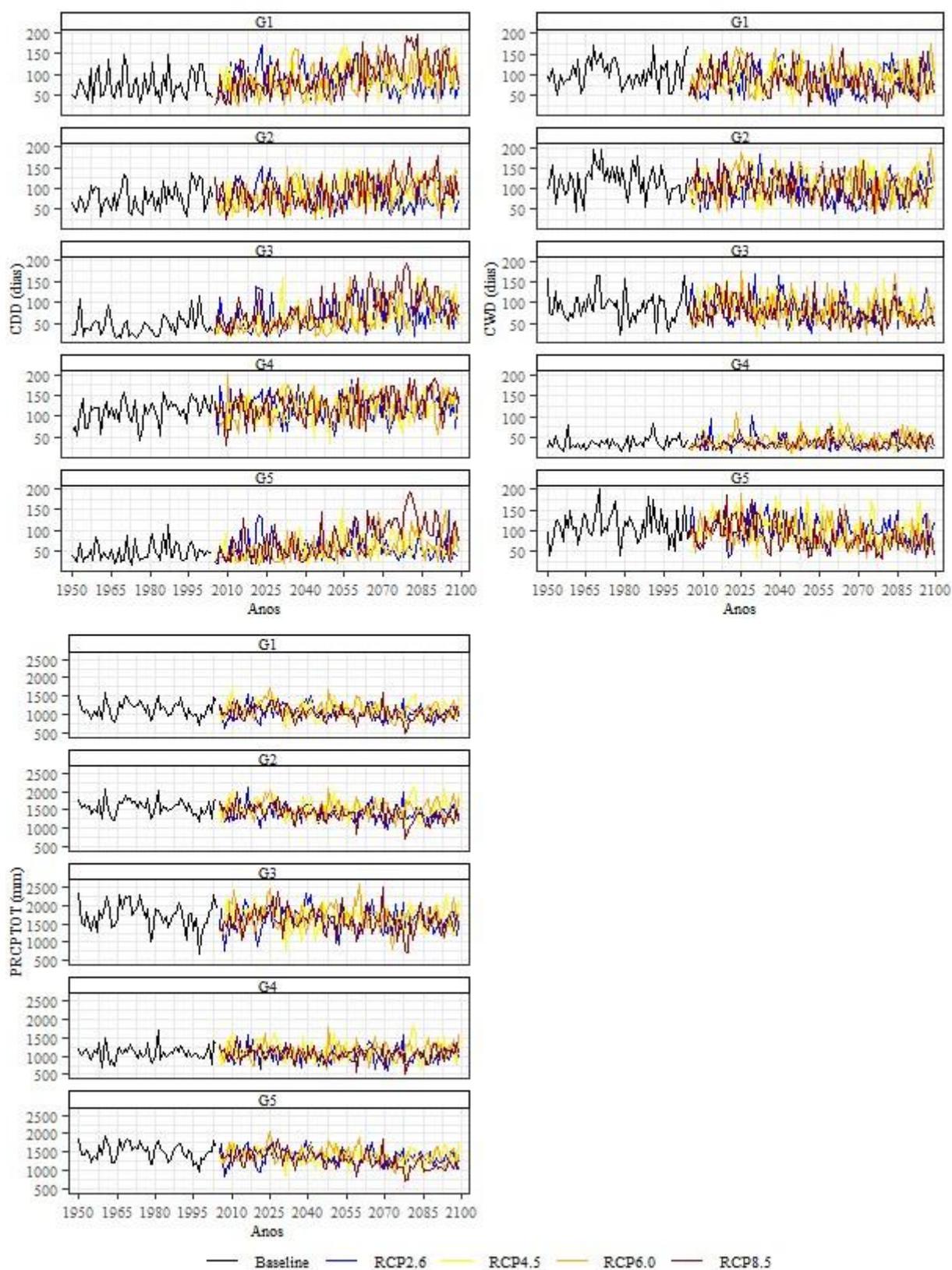


Figura 6. Variabilidade temporal dos índices de dias secos consecutivos anuais - CDD, de dias úmidos consecutivos anuais - CWD e precipitação total anual PRCPTOT para o período de 1950 a 2099.

As distribuições das séries temporais referentes aos índices de maior volume anual de precipitação acumulado em 1 dia (RX5Day), maior volume anual de precipitação acumulado em 5 dias (RX5Day) de precipitação total anual em dias com chuva acima do percentil 95 (R95p) e precipitação total anual em dias com chuva acima do percentil 99 (R99p) podem ser observadas na Figura 7, a distribuição anual dos resultados destes índices revela flutuações interanuais. As configurações das distribuições do maior volume de precipitação anual acumulado em 1 dia e do maior volume de precipitação anual acumulado em 5 dias, RX1day e RX5day (Figura 7), respectivamente exibem padrões opostos aos da precipitação total - PRCPTOT (Figura 6) quanto a ocorrência de anos com maiores e menores volumes. É perceptível que quando a quantidade de precipitação total anual PRCPTOT apresentou redução e que os maiores acumulados anuais em um único dia RX1day e para o intervalo de dias RX5day exibem predominantemente padrões de aumento.

Com exceção da região homogênea do Grupo G5 os resultados das variações do índice RX1Day, R95p e R99p se apresentam predominantemente decrescentes para os intervalos de tempos 2005-2020, 2021-2040, 2041-2060 e 2061-2080, com considerável aumento no período de tempo distante (2081-2099) para as projeções do RCP8.5. Quanto ao índice RX5day, de precipitação máxima em 5 dias, verifica-se para as regiões homogêneas dos Grupos 1, 2 e 4 substanciais variações de aumento para o período 2081-2099, nos cenários RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5. As projeções do RCP2.6 indicam variações predominantemente de reduções para os índices R95p e R99p, os valores mais elevados foram obtidos para o período de tempo distante (2081-2099), já para as projeções dos RCP4.5 e RCP6.0 os períodos de tempo próximos exibem variações de redução e o intervalo de tempo distante (2081-2099) de aumento, este padrão é observado com exceção do Grupo 5 para o RCP8.5.

Saddique et al. (2020) ao avaliarem índices de extremos climáticos na Bacia do Rio Jhelum para dados de observações históricas (1961–1990) e período futuro (2061–2090), estimadas usando dados de modelos de circulação geral sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, verificaram que os resultados indicam que houve mudanças significativas nos padrões de precipitação, indicando aumento, bem como nos extremos climáticos na bacia, tanto para o clima observado quanto para o projetado. Os resultados para os índices de extremos climáticos revelam que o número de dias muito chuvosos (R90p) e dias de precipitação moderada (R10 mm) provavelmente aumentará no futuro, assim como os índices de precipitação máxima de 1 dia (RX1day) e 5 dias (RX5day) dias muito chuvosos (R95p) mostraram aumento sob ambos os cenários de RCPs na maioria das estações da bacia.

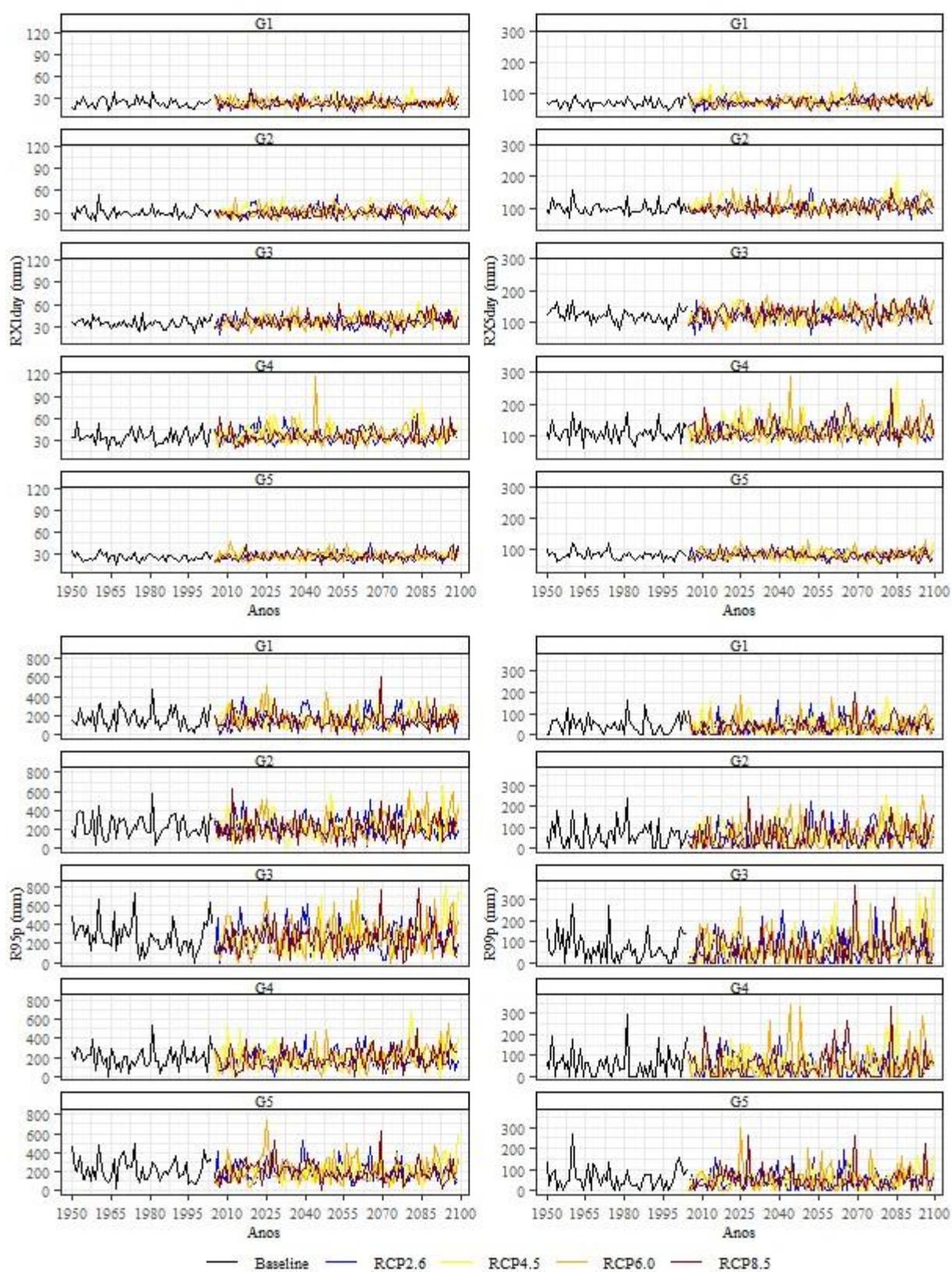


Figura 7. Variabilidade temporal dos índices de maior volume anual de precipitação acumulado em 1 dia (Rx5Day) e em 5 dias (Rx5Day), de precipitação total anual em dias com chuva acima do percentil 95 (R95p) e do percentil 99 (R99p) para o período de 1950 a 2099.

O R20mm é um dos índices importantes para avaliação de eventos extremos, valores altos para ocorrência do número de eventos de precipitação intensa durante o ano revelam maiores indicativos principalmente de precipitações elevadas. Se há redução da distribuição temporal da chuva, aumento no número de dias consecutivos secos e redução de dias consecutivos úmidos, o aumento neste índice indica eventos de precipitação mais concentrados, com potencial para ocorrência de desastres ambientais como inundações, deslizamentos podendo causar impactos agrícolas e agropecuárias (MARRAFON e REBOITA, 2020).

De forma geral, verifica-se que para intervalos de tempo futuros considerando os índices PRCPTOT, CWD e CDD, diminuição pluviométrica em na região do MATOPIBA, sendo provável que a área sofra uma grande diminuição nos dias úmidos até ao final deste século sob o RCP8.5, especialmente nas estações oeste e sul. Por exemplo, o número de CWD diminui. Em contraste, espera-se que os dias secos consecutivos aumentem no futuro na Grécia.

É provável que a área sofra uma grande diminuição nos dias úmidos até ao final deste século sob o RCP8.5, especialmente nas estações oeste e sul. Por exemplo, o número de CWD diminui. Em contraste, espera-se que os dias secos consecutivos aumentem no futuro na Grécia.

3.2 Índices de extremos de temperatura do ar

3.2.1 Cenários climáticos futuros

Os resultados para as variações entre os resultados das projeções e históricos (Tabela 7) índices de extremos climáticos de temperatura do ar revelam que apenas o índice noites tropicais – TR apresentou variações altas predominantemente de aumento para as regiões homogêneas G1, G2, G4 e G5, para as projeções dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 foram obtidas respectivamente as menores e maiores variações. Silva et al. (2019) destacam que mudanças em resultados para o número anual de dias em que a temperatura mínima do ar foi superior a 20°C (TR) podem sugerir que às áreas podem ser susceptíveis a alterações no volume de chuvas que podem levar a ocorrência eventos extremos, como secas e inundações. Quanto aos índices TXx, TXn, TNx, TNn e TN10p as variações foram suaves, apenas de aumento e os demais índices avaliados variações suaves tanto positivas quanto negativas.

Silva et al. (2019) obtiveram índices de extremos climáticos para mesorregiões no Nordeste e Amazônia Brasileira, possibilitando observar se houve indícios de mudanças climáticas durante o período de estudo (1980 a 2013), com os resultados evidenciando que, as maiores mudanças ocorreram para os índices de temperatura, dois quais destacam-se resultados

que indicam aumentos para os índices TXx, TNx, TXn, TNn, TX90p e TN90p e diminuição para os índices TX10p e TN90p.

Tabela 7. Variação das projeções para o período de 2005-2099 em comparação ao período de base de 1950-2004 dos índices de extremos climáticos de temperatura do ar por regiões homogêneas para a área do MATOPIBA

Grupos	Cenários	Índices											
		TXx	TNx	TXn	TNn	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p	SU	TR	WSDI	DTR
G1	RCP 2.6	2.32	1.87	1.35	1.52	-0.17	-0.10	0.18	-0.21	0.06	47.14	-0.84	0.33
	RCP 4.5	2.75	2.82	1.44	2.25	-0.20	-0.03	0.30	0.04	0.07	54.00	0.40	-0.31
	RCP 6.0	2.76	2.92	1.48	2.43	-0.27	-0.01	0.27	0.17	0.03	54.11	3.37	-0.32
	RCP 8.5	3.91	3.88	2.49	3.42	-0.07	0.27	0.46	0.35	0.07	57.15	6.43	0.07
G2	RCP 2.6	2.92	1.45	1.35	0.50	0.00	-0.06	0.13	-0.15	0.32	30.59	-0.25	1.41
	RCP 4.5	3.36	2.83	1.50	1.92	0.04	0.01	0.38	0.10	0.32	63.53	1.05	0.30
	RCP 6.0	3.35	2.79	1.63	1.92	0.03	0.02	0.36	0.25	0.24	60.64	2.48	0.46
	RCP 8.5	4.72	3.84	2.53	2.61	0.03	0.44	0.41	0.50	0.29	66.71	7.09	1.19
G3	RCP 2.6	1.87	1.62	1.03	1.57	-0.37	-0.01	0.13	-0.11	-0.01	6.10	-2.32	0.24
	RCP 4.5	2.08	2.28	1.09	2.30	-0.36	0.03	0.38	0.18	-0.01	6.14	0.42	-0.25
	RCP 6.0	2.17	2.42	1.34	2.54	-0.46	0.09	0.32	0.17	-0.01	6.20	2.19	-0.25
	RCP 8.5	3.26	3.16	2.27	3.56	-0.24	0.31	0.47	0.60	-0.01	6.46	2.91	0.10
G4	RCP 2.6	2.35	1.63	1.38	0.62	0.11	0.07	0.11	-0.22	2.76	73.19	0.13	0.78
	RCP 4.5	2.93	2.63	1.66	1.56	0.04	0.00	0.22	-0.06	2.92	114.55	2.85	0.01
	RCP 6.0	3.05	2.83	1.62	2.20	0.04	0.05	0.25	0.06	2.91	119.44	0.82	-0.01
	RCP 8.5	4.04	3.78	2.48	2.41	0.12	0.34	0.27	0.22	3.18	139.63	4.86	0.36
G5	RCP 2.6	3.12	1.62	1.37	1.35	-0.22	-0.07	0.30	-0.11	0.04	37.30	-2.11	0.62
	RCP 4.5	3.44	2.28	1.44	2.24	-0.21	-0.03	0.41	0.16	0.04	46.01	1.79	0.09
	RCP 6.0	3.46	2.42	1.50	2.52	-0.25	0.08	0.40	0.31	0.03	45.79	3.92	0.02
	RCP 8.5	4.95	3.16	2.53	3.48	-0.07	0.36	0.49	0.44	0.04	47.21	5.22	0.55

Considerando a distribuição da densidade dos índices TXx, TNx, TXn, TNn (Figura 8), estas retratam que para as projeções uma variabilidade positiva suave ao longo da série temporal. As densidades elevadas para valores de temperaturas máximas e mínimas das projeções em relação ao período de referência para estes índices indicam alterações em suas médias e frequência, conforme obtidas variações de aumento, sendo assim as médias dos cenários de projeção são superiores ao do período de referência, o que indica que além de aumento nos valores do índice, maior frequência de ocorrência.

Com relação as distribuições de densidades para os índices TX10p, TX90p, TN10p e TN90p (Figura 9) é perceptível maior frequência de percentuais baixos para quantidade de dias frios (TX10p) e noites frias (TN10p) do cenário RCP2.6 o que se confirma por meio dos resultados da variação das projeções em relação ao período de referência, o índice TN10p para os demais cenários, exibe frequência inferior a obtida para o período de referência, indicando redução na densidade de noites frias.

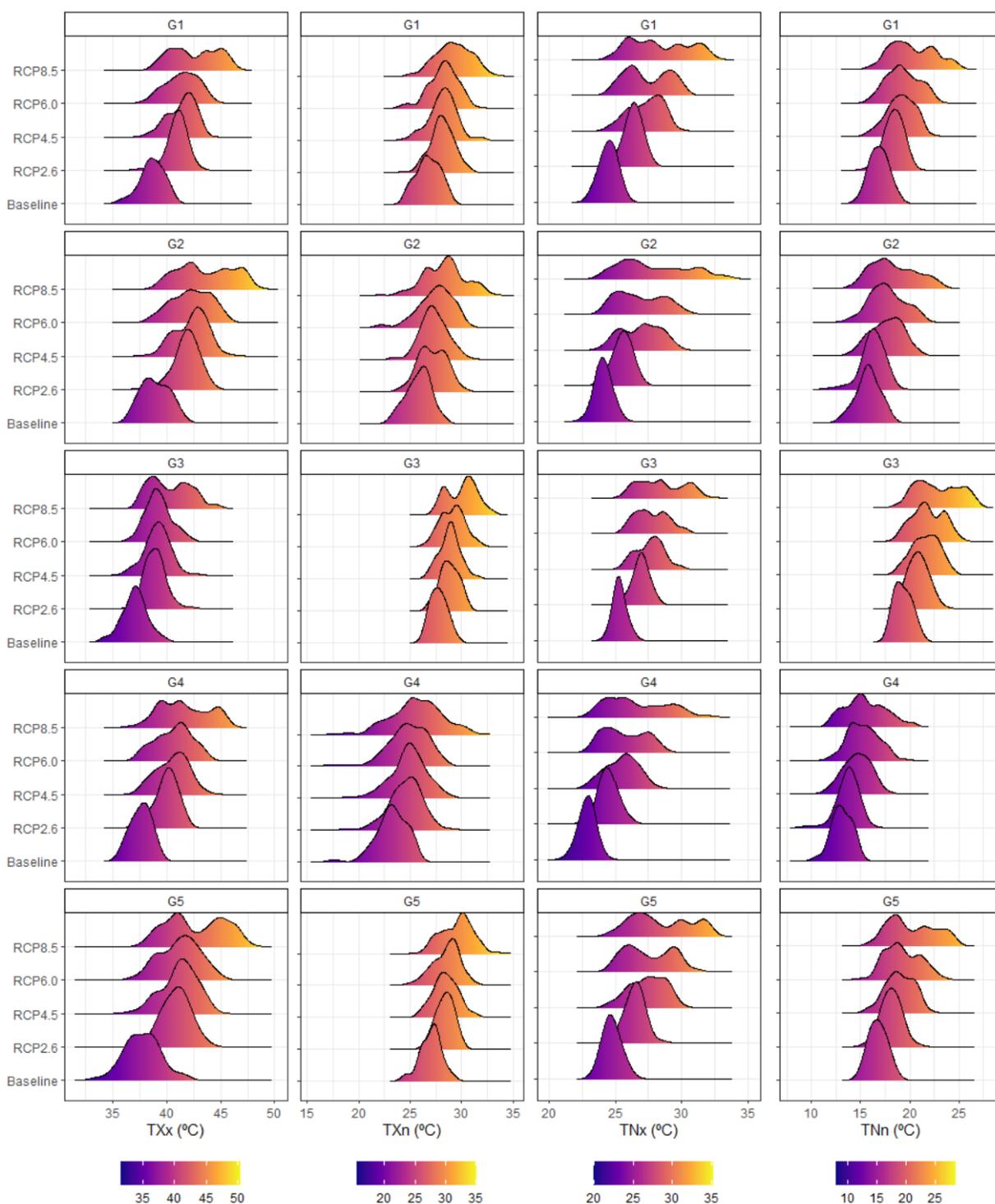


Figura 8. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices TXx, TNx, TXn e TNn para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).

É notória a frequência alta de densidade para baixos percentuais do TX10p, revelando uma variação de redução na densidade de dias frios (TX10p) para as regiões homogêneas dos grupos G1, G3 e G5, e aumento de noites frias (TN10p) para toda a área. As distribuições de

densidade para os dias quentes (TX90p) e quentes (TN90p) indicam para percentis baixos ocorrência de frequências elevadas, as variações são predominantemente de aumento, é evidente que o aumento para noites quentes é maior em comparação com o aumento de dias quentes.

Os índices climáticos de temperaturas extremas também apresentaram aumento na frequência, indicando maior frequência de dias quentes durante o ano e redução de dias frios. As variações são mais elevadas para os índices de temperatura mínima evidenciando que o aumento na temperatura mínima foi maior em comparação com a temperatura máxima, sugerindo que temperaturas extremamente baixas se tornarão menos frequentes. As densidades elevadas para estes índices das projeções em relação ao período de referência indicam alterações em suas médias e frequência.

A densidade alta para maiores quantidades de dias na distribuição do SU (Figura10) indica elevada frequência de dias de verão, sugerindo que estes ocorrem predominantemente ao longo do ano, com pouca variação entre os diferentes cenários de mudanças climáticas. Já para o índice TR, verifica-se baixa densidade de distribuição, a região homogênea do grupo G3 exibe densidade alta para maiores quantidades de dias com temperaturas maiores que 20°C sob a projeção do cenário RCP8.5. A relação entre as projeções dos cenários climáticos e os resultados do período de referência denota variabilidade baixa, indicando que as noites tropicais podem não ser expressivamente afetadas pelos diferentes RCPs.

Em relação a distribuição de densidade do índice de duração do período de calor WSDI DTR é possível verificar variação baixa entre as projeções dos cenários climáticos e os resultados do período de referência e alta frequência de menores quantidades de dias, diminuindo rapidamente com o aumento de dias. A comparação entre os resultados das projeções dos cenários climáticos e do período de referência revela mudanças sutis, o que pode sugerir que a duração das ondas de calor permanece relativamente constante. A distribuição de densidade para o índice faixa de temperatura diurna - DTR, revela variações perceptíveis em relação ao período de referência para as projeções dos diferentes cenários, é nítido para os cenários aumento da frequência para intervalos de temperaturas mais elevadas. Este aumento sugere que, com o avanço das mudanças climáticas, espera-se um maior contraste entre as temperaturas diurnas e noturnas, indicando aumento da amplitude térmica diária como consequência das mudanças climáticas.

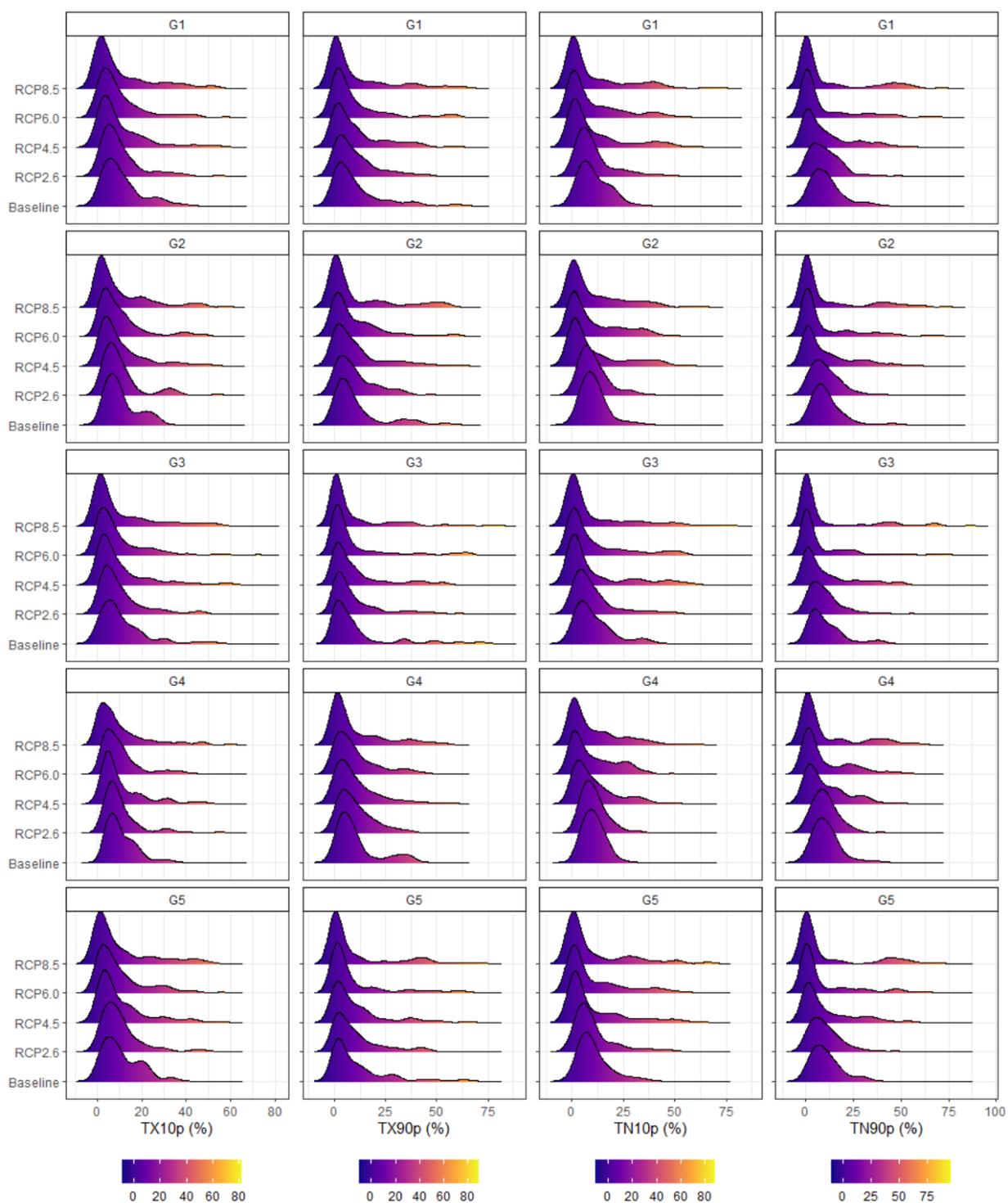


Figura 9. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices TX10p, TX90p, TN10p e TN90p para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).

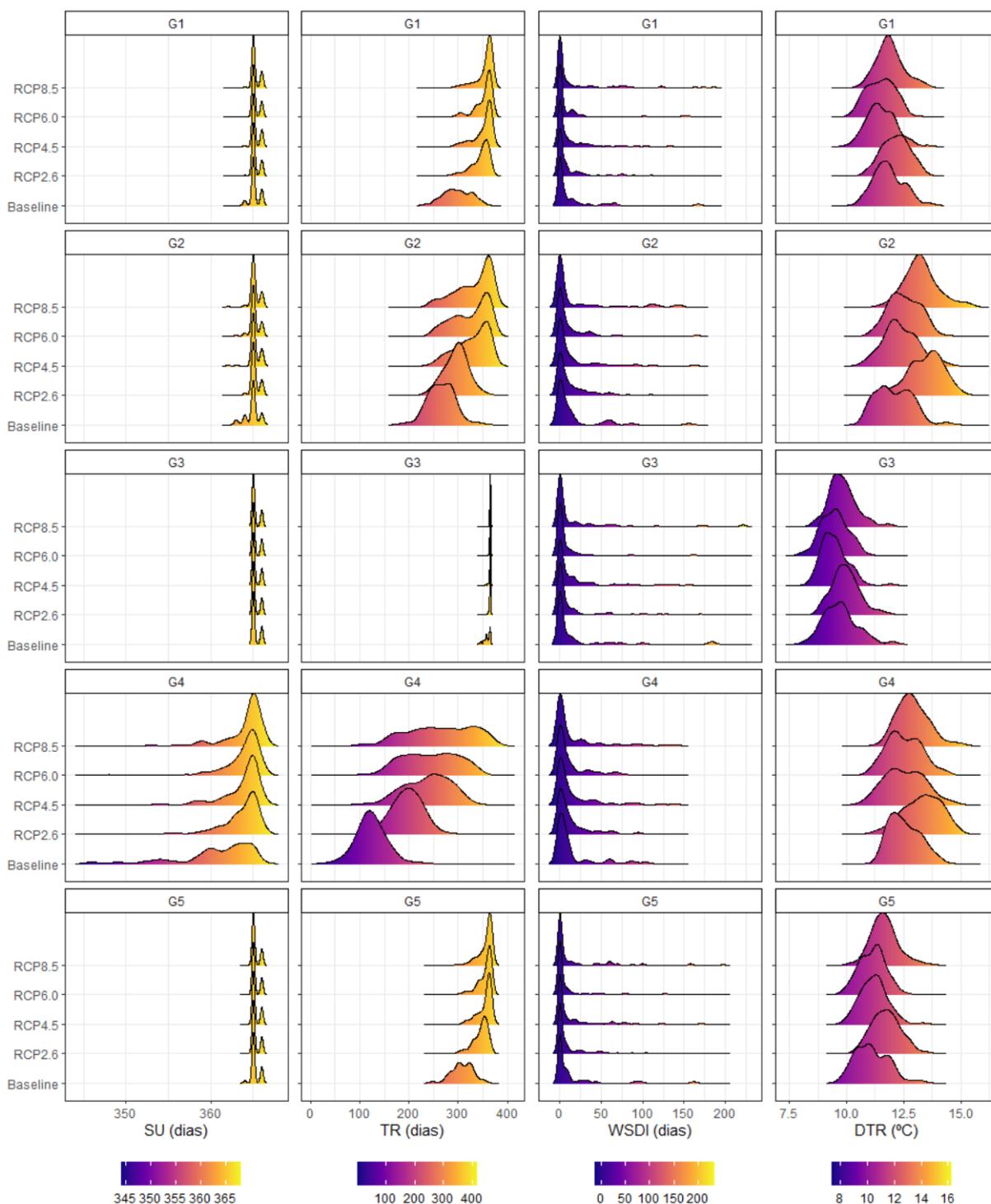


Figura 10. Distribuição de densidade dos valores anuais dos índices SU, TR, WSDI e DTR para a região do MATOPIBA para a série histórica (1950-2004) e para as projeções climáticas (2005-2099).

Impactos de extremos vêm sendo associados as alterações no clima, a avaliação dos índices de extremos climáticos de temperatura obtidos para a região do MATOPIBA neste estudo revela a existência de variabilidade temporal, assim como entre as regiões homogêneas

analisadas, diante dos resultados apresentados é notório aumento na frequência de temperaturas extremas, principalmente aumento de noites e dias quentes e redução de dias e noites frias e sob cenários de altas emissões.

3.2.2 Variabilidade temporal

As variações dos resultados por cenários dos índices climáticos extremos de temperatura por regiões homogêneas para cinco intervalos de tempo em comparação ao período de base de 1950-2004 podem ser observadas nas Tabela 8, 9, 10, 11 e 12. É perceptível que as variações obtidas para os índices de valores máximos da temperatura mínima diária (TNx) e de valores mínimos da temperatura mínima diária (TNn) são maiores que as obtidas para os índices de valores máximos da temperatura máxima diária (TNx) e de valores mínimos da temperatura máxima diária (TNn).

Tabela 8. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G1 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices											
		TXx	TNx	TXn	TNn	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p	SU	TR	WSDI	DTR
RCP 2.6	2005-2020	3.58	4.42	3.67	7.65	81.68	-39.41	155.41	-70.31	0.02	11.31	-16.57	2.47
	2021-2040	5.63	7.89	4.98	5.98	9.81	-48.74	-6.12	-33.42	0.02	14.26	-81.76	1.28
	2041-2060	7.00	8.80	4.61	11.54	-29.29	29.33	-43.84	47.85	0.00	17.29	29.94	2.80
	2061-2080	6.90	8.35	5.84	10.34	-23.98	41.25	-43.27	38.70	0.02	18.11	39.28	3.41
	2081-2099	6.43	8.10	5.80	9.32	-31.33	5.15	-23.79	-7.01	0.01	17.25	-10.07	4.00
RCP 4.5	2005-2020	2.64	4.86	0.36	3.46	155.40	-88.93	256.68	-98.87	0.02	8.19	-96.66	-3.43
	2021-2040	5.55	7.61	4.52	9.50	16.49	-49.23	49.89	-89.11	0.02	16.45	-28.80	-0.75
	2041-2060	7.41	12.01	6.02	13.01	-20.94	-17.55	-60.33	-58.14	0.02	20.08	-43.04	-2.46
	2061-2080	9.39	16.01	8.77	18.32	-70.58	43.56	-90.42	87.81	0.02	21.84	51.29	-3.30
	2081-2099	9.82	16.12	6.19	20.71	-61.26	97.82	-95.57	147.97	0.00	22.23	120.62	-3.17
RCP 6.0	2005-2020	2.67	3.34	2.77	4.82	77.91	-80.66	222.58	-99.53	-0.01	11.04	-92.21	1.35
	2021-2040	4.90	6.84	2.03	7.41	70.18	-78.79	73.39	-98.71	-0.02	14.57	-97.33	-1.43
	2041-2060	5.86	9.75	4.76	12.12	-0.82	-69.31	-50.41	-91.87	0.02	19.54	-91.10	-4.03
	2061-2080	9.75	17.65	8.14	20.43	-64.04	44.42	-94.07	19.80	0.02	21.94	82.00	-3.84
	2081-2099	11.89	20.80	9.62	25.98	-84.15	176.46	-99.48	271.69	0.01	22.44	339.83	-5.00
RCP 8.5	2005-2020	3.02	4.44	4.28	5.71	174.20	-97.88	284.15	-100.00	0.02	10.87	-100.00	1.35
	2021-2040	5.73	8.69	5.00	10.03	72.76	-92.33	57.49	-100.00	0.01	17.14	-87.54	-1.43
	2041-2060	9.61	14.16	8.11	16.87	-39.43	-64.10	-69.39	-95.42	0.02	21.37	-57.28	-4.03
	2061-2080	13.94	21.81	12.12	30.21	-84.62	40.72	-99.50	-0.22	0.02	22.47	109.59	-3.84
	2081-2099	17.19	28.47	16.30	36.52	-95.92	217.42	-99.73	307.23	0.01	22.49	407.28	-5.00

Tabela 9. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G2 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices											
		TXx	TNx	TXn	TNn	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p	SU	TR	WSDI	DTR
RCP 2.6	2005-2020	5.02	2.24	2.77	0.48	86.07	-53.02	88.99	-66.50	0.09	6.65	-35.25	8.37
	2021-2040	6.81	6.15	5.75	1.39	1.22	-37.72	7.47	-27.10	0.10	8.91	-66.48	10.95
	2041-2060	8.46	6.98	6.31	6.72	-32.31	30.52	-32.09	40.01	0.08	13.91	10.46	12.42
	2061-2080	8.79	7.32	4.92	4.30	-14.94	49.24	-27.62	41.64	0.10	16.19	77.11	12.74
	2081-2099	7.89	6.75	5.96	2.39	-23.80	-2.52	-13.39	-8.51	0.06	10.98	-2.17	13.48
RCP 4.5	2005-2020	4.07	4.07	1.33	-0.16	144.01	-85.95	251.86	-99.01	0.10	5.52	-100.00	3.11
	2021-2040	6.36	6.66	4.69	6.64	23.83	-58.66	58.93	-92.90	0.06	17.00	-53.15	4.51
	2041-2060	9.25	11.85	5.33	12.92	-19.97	-1.86	-60.14	-60.67	0.10	26.48	4.74	3.10
	2061-2080	11.00	16.68	9.17	17.82	-64.19	50.93	-92.42	91.28	0.10	32.73	63.78	1.28
	2081-2099	11.67	18.32	7.70	21.59	-55.84	82.96	-95.04	153.73	0.06	34.84	108.08	0.44
RCP 6.0	2005-2020	3.59	3.08	1.43	2.16	94.33	-82.25	204.47	-98.47	0.02	6.82	-88.57	6.31
	2021-2040	5.15	5.36	3.03	3.78	64.27	-75.31	89.57	-97.77	0.03	11.44	-91.24	6.26
	2041-2060	7.58	9.72	4.85	10.22	-4.32	-53.01	-49.38	-86.40	0.08	23.74	-64.96	3.12
	2061-2080	11.96	16.85	9.75	17.85	-59.18	55.42	-93.22	9.43	0.10	33.05	65.69	3.45
	2081-2099	13.98	21.71	11.78	25.49	-78.93	146.93	-98.74	278.80	0.09	36.70	264.45	0.06
RCP 8.5	2005-2020	3.61	2.89	4.18	0.64	184.37	-99.05	243.48	-100.00	0.10	6.14	-100.00	5.75
	2021-2040	7.27	7.43	4.21	5.93	61.85	-93.32	70.94	-99.49	0.01	15.68	-95.43	8.38
	2041-2060	11.47	13.93	8.76	12.61	-36.10	-69.74	-54.33	-92.57	0.09	27.44	-58.48	11.32
	2061-2080	16.40	21.77	13.54	25.32	-81.81	37.49	-97.52	-6.15	0.10	35.69	74.83	11.16
	2081-2099	20.51	31.92	17.54	35.97	-94.64	237.06	-100.00	317.10	0.09	37.58	437.65	11.99

Tabela 10. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G3 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices											
		TXx	TNx	TXn	TNn	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p	SU	TR	WSDI	DTR
RCP 2.6	2005-2020	3.40	3.96	2.82	5.27	91.23	-19.10	189.04	-69.68	0.00	1.40	-6.21	3.90
	2021-2040	4.02	5.86	3.50	6.62	13.14	-63.89	-13.49	-34.80	0.00	1.65	-100.00	-0.04
	2041-2060	6.09	7.45	3.75	10.00	-36.09	42.79	-49.56	61.30	0.00	1.81	30.81	3.15
	2061-2080	6.05	7.52	4.38	8.88	-28.25	29.92	-49.29	33.28	0.00	1.81	8.30	2.32
	2081-2099	5.38	6.76	3.98	9.49	-40.38	6.41	-34.84	-9.58	-0.01	1.78	-6.26	3.29
RCP 4.5	2005-2020	1.68	3.42	1.26	1.99	187.74	-86.64	303.57	-100.00	0.00	1.21	-85.73	-3.68
	2021-2040	4.88	6.88	2.84	8.74	18.06	-33.68	35.36	-85.87	0.00	1.76	10.26	-0.10
	2041-2060	6.14	9.39	3.89	12.25	-40.59	-16.37	-73.65	-63.76	0.00	1.83	-53.02	-2.37
	2061-2080	6.96	11.63	5.43	16.57	-70.09	36.66	-94.80	83.10	0.00	1.83	33.10	-3.73
	2081-2099	7.74	12.73	5.74	18.51	-77.62	88.40	-97.21	162.98	-0.01	1.82	96.07	-3.49
RCP 6.0	2005-2020	3.25	3.47	3.77	5.08	99.53	-79.27	237.54	-100.00	0.00	1.49	-90.62	1.38
	2021-2040	3.77	5.89	1.56	6.84	59.86	-85.85	76.20	-99.60	0.00	1.64	-97.72	-1.64
	2041-2060	4.59	8.57	2.96	11.53	5.33	-81.31	-59.21	-95.64	0.00	1.82	-87.93	-6.15
	2061-2080	7.75	12.78	7.01	18.05	-78.61	17.46	-97.24	2.67	0.00	1.83	5.04	-3.15
	2081-2099	9.59	16.22	8.85	23.16	-91.09	228.60	-99.86	295.47	-0.01	1.82	337.82	-2.59
RCP 8.5	2005-2020	2.97	3.77	3.03	5.83	176.15	-94.13	327.99	-100.00	0.00	1.75	-100.00	2.73
	2021-2040	4.62	7.25	4.35	9.55	76.49	-91.59	35.44	-99.87	0.00	1.78	-86.95	-1.31
	2041-2060	8.30	11.69	7.98	14.28	-50.88	-64.75	-81.13	-96.44	0.00	1.82	-68.68	1.15
	2061-2080	12.41	16.93	11.33	27.08	-85.56	48.26	-100.00	-28.27	0.00	1.83	101.60	2.67
	2081-2099	14.80	21.48	13.38	33.65	-96.47	208.26	-100.00	350.17	-0.01	1.82	236.17	0.42

Tabela 11. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G4 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices											
		TXx	TNx	TXn	TNn	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p	SU	TR	WSDI	DTR
RCP 2.6	2005-2020	3.99	3.95	2.40	5.09	81.55	-38.87	65.85	-57.48	0.38	34.21	-46.63	3.65
	2021-2040	6.35	8.17	5.70	3.11	-11.98	-29.02	-7.40	-16.49	0.80	62.07	-69.05	5.33
	2041-2060	6.70	7.80	7.26	9.12	-19.83	12.36	-35.81	31.93	0.91	74.08	10.47	5.86
	2061-2080	7.28	8.35	5.39	5.27	-5.18	51.61	-9.40	34.98	0.66	68.85	106.84	7.40
	2081-2099	6.55	6.71	8.42	1.13	-24.41	-5.25	5.49	-15.40	1.01	52.40	-6.40	8.45
RCP 4.5	2005-2020	3.52	4.59	2.04	0.64	101.45	-73.32	173.05	-93.98	0.30	40.20	-75.52	-0.26
	2021-2040	5.31	7.48	3.27	7.92	31.73	-45.88	47.51	-80.05	0.53	68.56	-51.82	0.50
	2041-2060	8.93	12.28	8.37	10.86	-16.24	3.16	-28.31	-34.85	0.98	96.68	20.66	0.78
	2061-2080	10.13	15.94	11.83	18.17	-60.51	44.81	-76.07	83.52	1.14	123.18	85.68	-0.10
	2081-2099	10.35	16.06	9.43	20.23	-36.18	54.26	-75.42	109.07	1.00	127.37	117.72	-0.67
RCP 6.0	2005-2020	2.87	3.80	-1.19	7.31	87.96	-52.73	174.04	-93.13	0.36	39.23	-45.16	2.88
	2021-2040	5.29	7.11	3.89	9.05	49.49	-64.19	76.99	-93.73	0.62	60.77	-77.67	1.50
	2041-2060	7.78	10.31	5.81	17.69	-12.48	-27.62	-29.85	-67.36	0.73	96.85	-29.10	0.80
	2061-2080	10.79	17.75	11.65	19.90	-41.30	46.84	-83.83	30.64	1.10	125.58	55.91	-0.71
	2081-2099	13.04	21.63	13.46	29.01	-67.75	89.33	-95.88	218.55	1.14	153.55	123.50	-4.57
RCP 8.5	2005-2020	2.93	4.65	3.17	0.18	169.07	-93.07	210.46	-99.84	0.33	39.64	-100.00	0.67
	2021-2040	6.49	8.85	4.59	9.05	53.62	-81.78	70.39	-96.67	0.69	74.00	-92.17	3.39
	2041-2060	10.07	14.33	8.67	15.29	-28.46	-49.92	-39.46	-85.62	0.96	111.13	-44.37	4.41
	2061-2080	14.03	22.40	15.22	26.52	-68.71	46.76	-92.16	16.77	1.14	152.48	72.76	2.93
	2081-2099	19.01	30.75	20.87	38.42	-90.60	179.10	-99.60	268.94	1.19	177.86	341.63	2.58

Tabela 12. Variação em porcentagem (%) dos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima do ar projetados para a região homogênea G5 da área do MATOPIBA.

Cenários	Períodos	Índices											
		TXx	TNx	TXn	TNn	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p	SU	TR	WSDI	DTR
RCP 2.6	2005-2020	5.12	3.41	4.91	5.47	90.07	-34.71	164.50	-70.50	0.01	8.63	-27.26	4.68
	2021-2040	7.61	6.75	4.11	5.47	9.90	-40.54	-1.12	-26.30	0.01	11.10	-76.29	4.27
	2041-2060	9.61	8.79	5.07	10.55	-37.20	42.53	-43.56	48.03	0.01	13.19	60.34	6.64
	2061-2080	9.58	7.72	5.73	9.80	-28.11	23.96	-48.54	31.24	0.01	13.65	-31.03	5.69
	2081-2099	8.81	7.81	5.57	8.44	-28.08	-1.43	-25.93	-1.80	0.00	13.23	-18.33	6.73
RCP 4.5	2005-2020	4.11	3.91	1.33	2.85	174.82	-89.44	254.99	-98.83	0.01	7.60	-89.22	-1.01
	2021-2040	7.27	7.11	4.02	8.13	16.18	-54.94	59.84	-92.30	0.01	12.87	-43.10	2.84
	2041-2060	9.58	10.98	5.85	14.01	-27.82	-27.59	-64.13	-59.80	0.01	16.85	-48.71	0.99
	2061-2080	11.30	15.44	7.85	18.31	-68.32	57.59	-90.05	98.32	0.01	17.83	104.74	0.32
	2081-2099	12.46	16.23	6.89	21.90	-72.78	100.24	-95.42	147.78	0.00	18.11	138.66	0.46
RCP 6.0	2005-2020	4.10	2.71	3.11	5.07	105.75	-84.93	229.10	-100.00	0.01	8.88	-83.30	2.60
	2021-2040	6.47	5.77	1.81	7.60	61.44	-88.44	80.41	-99.08	0.00	12.01	-100.00	1.71
	2041-2060	7.27	8.67	4.06	12.32	-0.04	-78.09	-54.55	-93.38	0.01	16.09	-93.97	-2.24
	2061-2080	12.34	16.96	8.56	20.89	-72.39	32.88	-96.19	15.40	0.01	17.88	38.36	-0.03
	2081-2099	14.92	20.89	9.98	28.02	-89.34	215.93	-99.58	285.93	0.00	18.33	402.72	-0.60
RCP 8.5	2005-2020	4.67	4.00	4.30	5.91	178.06	-99.20	295.20	-100.00	0.01	8.15	-100.00	3.77
	2021-2040	7.69	7.62	4.66	9.00	80.52	-92.15	53.80	-99.87	0.01	13.24	-90.95	2.80
	2041-2060	12.11	13.36	8.94	15.95	-47.51	-70.08	-72.96	-93.41	0.01	17.11	-65.09	5.72
	2061-2080	18.11	21.13	12.97	30.80	-86.35	31.08	-99.35	-16.54	0.01	18.36	107.33	6.48
	2081-2099	21.69	27.62	15.15	40.22	-97.30	239.26	-100.00	326.44	0.00	18.37	360.53	5.90

Os resultados obtidos por Saddique et al. (2020) ao avaliarem índices de extremos climáticos na Bacia do Rio Jhelum indicam que houve mudanças significativas nos padrões de temperatura, indicando aumento, bem como nos extremos climáticos na bacia, tanto para o clima observado quanto para o projetado. Identificaram que os resultados evidenciam que os índices anuais médios obtidos sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 são maiores no período futuro (2061 - 2090) do que aqueles no período de referência (1961–1990), sendo verificados aumentos para os índices de extremos climáticos TXx, TXn, TNx, TNn e SU, já os índices TX90p e TN90p exibem indicativo da possibilidade de aumento drástico em ambos os cenários de emissão, e os índices TX10p e TN10p evidências de redução para o clima projetado, sendo mais acentuada para projeções do RCP8.5.

Considerando a distribuição dos resultados por regiões homogêneas para o período em estudo das séries históricas e das projeções futuras para os resultados anuais dos índices de valores máximos da temperatura máxima diária (TXx) e da temperatura mínima (TNx) e valores mínimos da temperatura máxima diária (TXn) e da temperatura mínima diária (TNn) (Figura 11) estes exibem padrões de aumento com destaque para as projeções dos cenários RCP6.0 e RCP8.5. Ressalta-se que o padrão de aumento para as projeções se torna mais acentuado a partir de 1940, condizentes com os resultados das variações que são elevadas para períodos de tempo distante.

As variações para os índices TX90p e TN90p (Tabela 8, 9, 10, 11, 12) revelam aumento acentuado para os intervalos de tempo de futuro próximo (2005-2020 e 2021-2040) em ambos os cenários de emissão para todas as regiões homogêneas, e reduções elevadas para os intervalos de tempo de futuro distante (2041-2060, 2061-2080 e 2081-2099), as menores variações foram obtidas sob o as projeções do cenário RCP2.6), já sob as projeções dos cenários RCP6.0 e RCP8.5, principalmente para períodos de intervalos tempo distante em comparação ao de período de referência são verificadas maiores variações. Por meio da observação da distribuição destes índices ao longo do período (Figura 12) nota-se a concordância com a variação em porcentagem. Dessa forma tem-se forte indicativo de que as noites quentes (TX90p) e dias quentes (TN90) aumentem principalmente para períodos de intervalos de tempo distante.

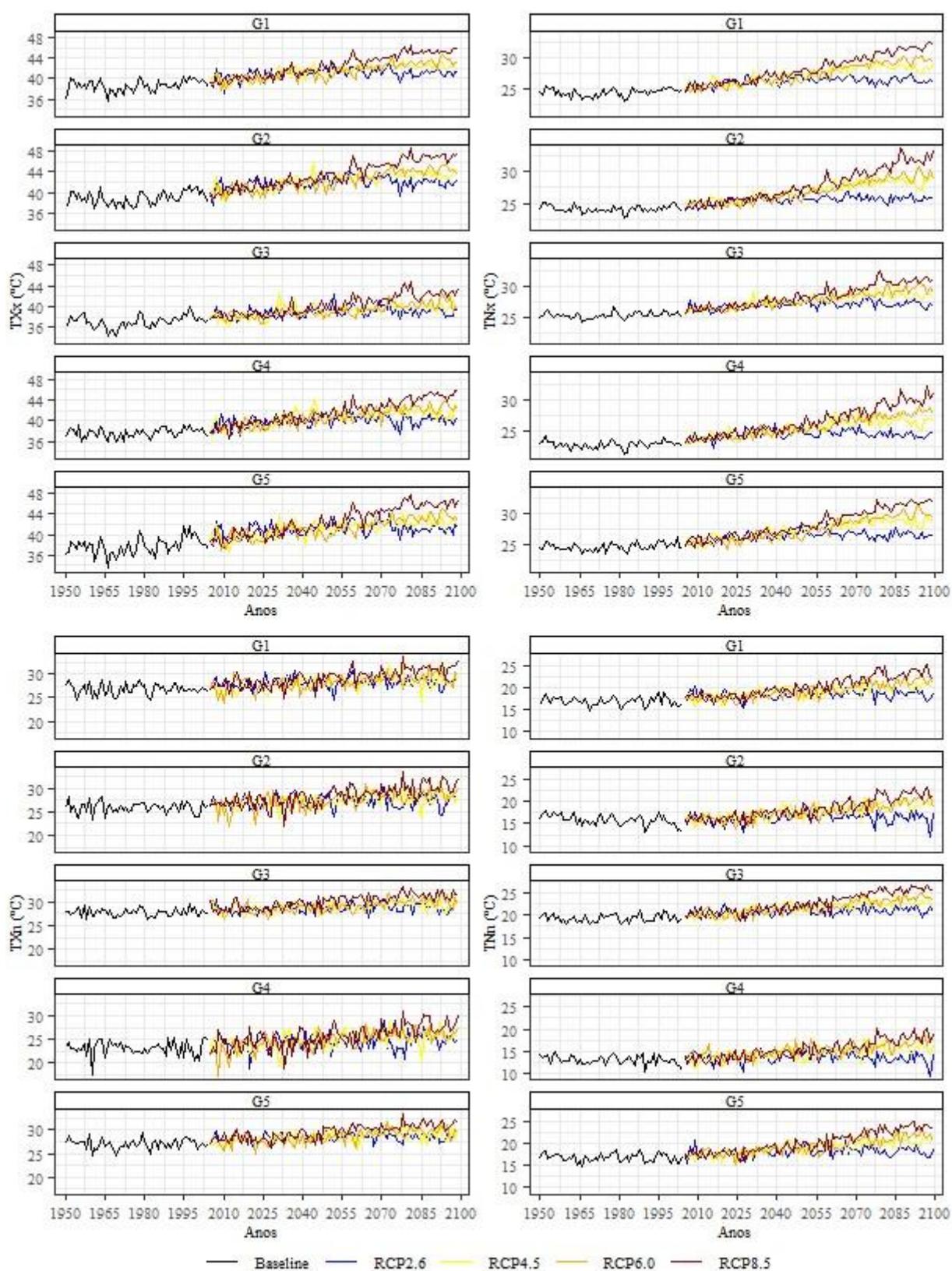


Figura 11. Variabilidade temporal dos índices valor máximo da temperatura máxima diária – TXx, e da temperatura mínima (TNx) e dos índices valor mínimo da temperatura máxima diária – TXn, e da temperatura mínima (TNn) para o período de 1950 a 2099.

Em relação as variações dos índices TX10p e TN10p assim como TX90p e TN90p as menores variações foram obtidas sob as projeções do cenário RCP2.6, porém para intervalos de tempo para períodos de futuro próximo 2005-2020 e 2021-2040 e também para o de futuro distante 2041-2060 exibem reduções, já para os intervalos de tempo de futuro distante 2061-2080 e 2081-2099 foram obtidas variações que indicam aumento. Dessa forma é provável que os dias e noites frios diminuam em todos os cenários de projeções avaliados, com as maiores reduções no RCP8.5(cenário de alta emissão). Por meio da Figura 12 de distribuição das séries temporais dos resultados obtidos para esses índices de fato observa-se de forma geral em ambos os cenários de projeções e para todas as regiões homogêneas que os decréscimos mais perceptíveis iniciam em 2025 e entre os anos de 2040 a 2099 se tornam acentuadas coerentemente com as variações desses índices.

Quanto à análise das variações dos índices de temperatura TN10p (noites frias), TN90p (noites quentes), TX10p (dias frios) e TX90p (dias quentes), configura-se que, de uma maneira geral, os resultados são convergentes no sentido do aumento de temperatura, pois se pode notar, diminuição de noites frias (TN10p) e dias frios (TX10p) para as projeções dos cenários, predominante para os intervalos de período de tempo distante. Cabe ressaltar que os valores de variações encontrados são altas para as regiões homogêneas estudadas (maiores para as regiões homogêneas dos grupos G1 e G5) o que indica maior aquecimento, ou seja, redução de noites e dias frios na região e aumento de dias e noites quentes.

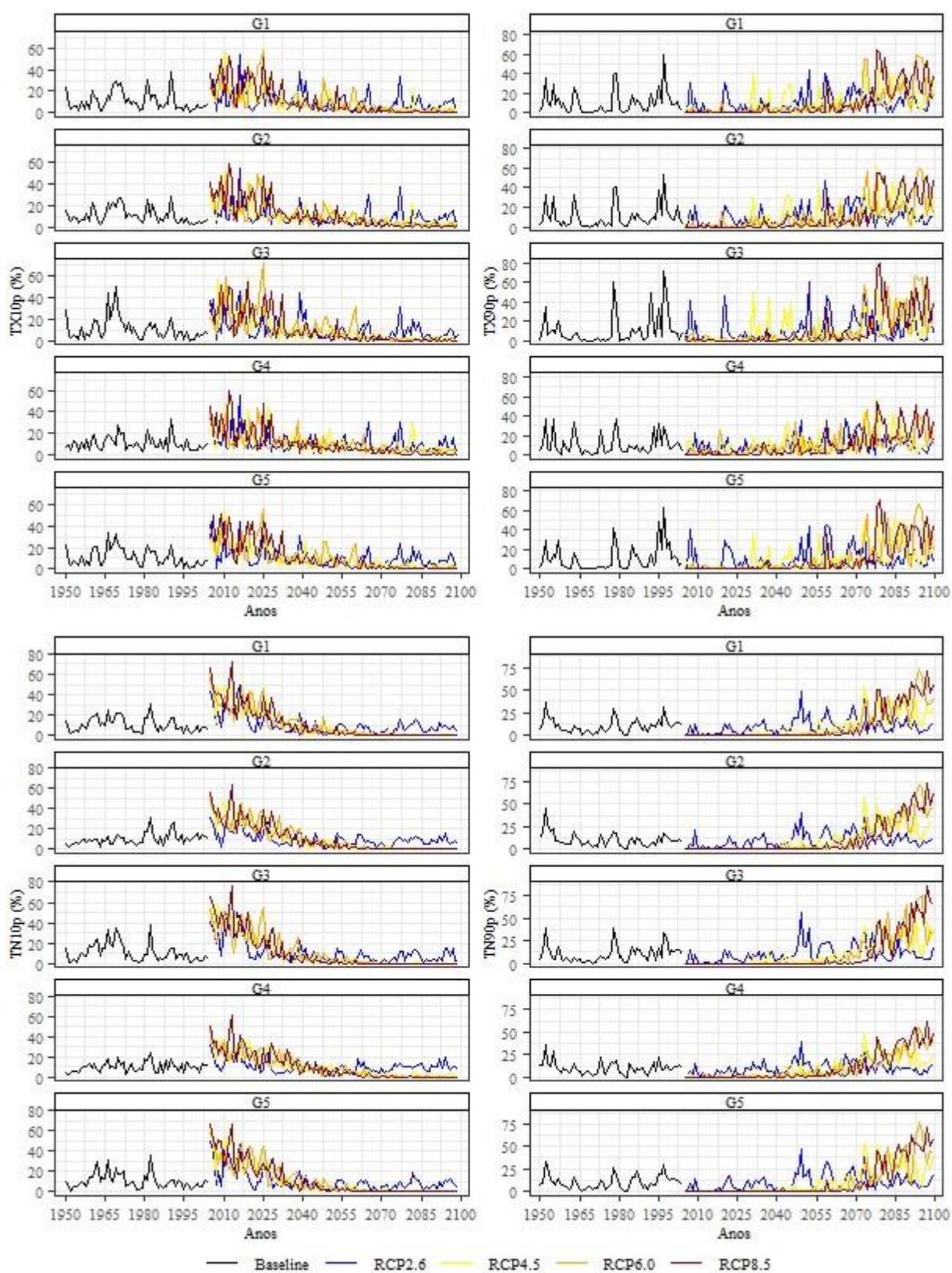


Figura 12. Variabilidade temporal dos índices de dias frios - TX10p, dias quentes - TX90p, noites frias - TN10p e noites quentes - TN90p, para o período de 1950 a 2099.

Embora neste estudo sejam avaliadas variações para as regiões homogêneas e a distribuição das séries temporais dos índices TN10p, TN90p, TX10p e TX90p obtidas, os resultados se mostram condizente com os das projeções obtidas por Natividade et al. (2017) ao analisar estes indicadores de extremos climáticos de temperatura sobre Minas Gerais usando Modelos de Circulação Geral pertencentes ao CMIP5 no período 1948-2005 e nos períodos de 2041-2070 e 2071-210, no qual ressalta que as projeções, principalmente para o período 2041-2070, de aumento dos dias quentes (TX90p) é mais acentuada que a diminuição de dias frios (TX10p) e noites frias (TN10p), mas ainda é menor que o aumento de noites quentes (TN90p), sendo esse último índice o que apresentou os maiores valores de tendência.

Silva (2018) em seu estudo para a região da Amazônia e Nordeste Brasileiro utilizaram índices de extremos climáticos, quanto aos índices valor máximo da temperatura máxima TXx , valor máximo da temperatura mínima (TNx) e dias e noites quentes (TX90p e TN90p) foram verificadas tendências positivas, ou seja, de aumento e para dias frios (TX10p) e noites frias (TN10p) de diminuição, para estes índices obtiveram tendências significativas indicando possíveis mudanças climáticas.

Salvador e Brito (2017) utilizando de índices extremos climáticos de temperatura avaliaram a variabilidade climática durante o período de 1970 a 2012 da temperatura na fronteira agrícola do MATOPIBA por meio da análise anual das temperaturas máximas e mínimas e dos índices extremos obtiveram uma forte tendência positiva em praticamente todas as séries das estações meteorológicas analisadas, dessa forma indicando nos últimos trinta anos da série analisada que a região sofreu um processo de aquecimento.

Reis et al. (2020), por meio da técnica de agrupamento, analisaram índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima sobre a região do MATOPIBA para o período 1980-2013, verificando por meio da análise de tendências identificaram que há evidências de um aumento significativo em quase todos os índices de temperaturas extremas.

Observa-se a distribuição dos resultados das séries temporais dos índices de extremos climáticos dias de verão - SU, noites tropicais - TR, duração do período de calor - WSDI e faixa de temperatura diurna - DTR (Figura 13). As configurações e as variações obtidas correspondem para os índices de dias de verão (SU) e noites tropicais (TR) as características do clima do MATOPIBA que é tropical úmido com inverno seco (Aw), de acordo com a classificação de Köppen, com temperaturas médias mensais que variam de 25 a 27° C em todos os meses do ano (REIS et al., 2020).

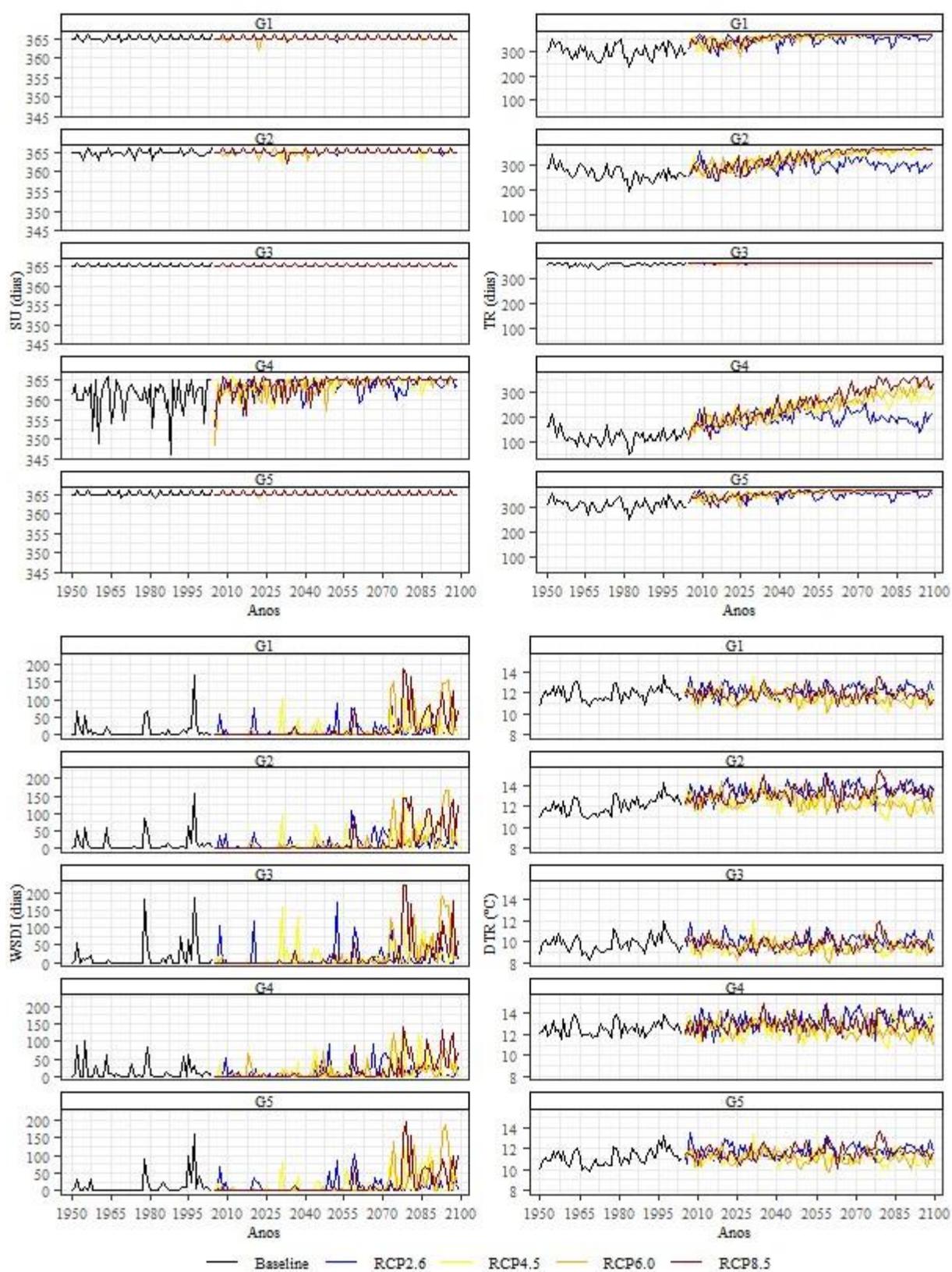


Figura 13. Variabilidade temporal dos índices de extremos climáticos dias de verão - SU, noites tropicais - TR, duração do período de calor - WSDI e faixa de temperatura diurna - DTR, para o período de 1950 a 2099.

Considerando a distribuição do índice SU, esta retrata uma variabilidade positiva relativamente mínima ao longo da série temporal nas projeções de todos os cenários. Os resultados para a quantidade de dias anuais são altos para toda a região e sob as projeções dos cenários, para o Grupo 4 que é composto por microrregiões da Bahia, pois essa localidade tem maior índice de precipitação e redução de temperaturas. Em relação ao índice noites tropicais, quantidade de dias anuais com temperaturas acima 20°C é elevada, principalmente sob as projeções dos cenários RCP2.6 e RCP8.5, com maiores aumentos para os intervalos de tempo de futuro distante (2061-2080 e 2081-2099),

A distribuição dos resultados das séries temporais do índice de duração do período de calor - WSDI permite verificar maior variabilidade em todos os cenários a partir de 2040 (Figura 13) indicando um aumento nos períodos quentes e configurações distintas para as projeções resultantes dos dados dos quatro cenários climáticos, concordância com a variação em porcentagem (Tabela 4) deste índice, evidencia-se predominância de aumento no padrão de distribuição para projeções futuras, as maiores variações de porcentagem que sugerem aumento foram obtidas principalmente para os cenários 6.0 e 8.5 com destaque em intervalos de tempo futuros distantes (2061-2080 e 2081-2099), enquanto para períodos tempo de futuro próximo 2005-2020 e 2021-2040 e também para o de futuro distante 2041-2060 exibem reduções.

A distribuição dos resultados da amplitude térmica diária - DTR, indica variabilidade baixa em comparação com o período de referência o que é confirmado considerando que as variações por períodos de tempo, exceto a região homogênea do Grupo 2 que são verificados aumentos e variações mais altas para períodos intervalos de tempo distante para as projeções dos cenários RCP2.6 (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2099) e RCP8.5 (2041-2060, 2061-2080 e 2081-2099), para as demais regiões homogêneas não foram altas, sendo que Grupo 1 e Grupo 3 projeções RCP4.5 e RCP6.0 exibem predominantemente reduções, indicando um aumento na temperatura mínima superior à temperatura máxima, já os grupos G4 e G5 projeções RCP2.6 e RCP8.5 com aumentos para todos os períodos de tempo.

4. CONCLUSÕES

Diante da análise dos resultados obtidos para variação da série 2005-2099 dos cenários de projeções em relação ao período de referência para os índices de extremos climáticos por regiões homogênea para o MATOPIBA destaca-se para os índices extremos de precipitação, que apenas alguns apresentaram um aumento e/ou diminuição expressiva. Constatou-se para os índices SDII, R20mm, R25mm, CDD, RX1day e RX5day predominância de aumento e diminuições nos índices PRCPTOT, R10mm, CWD, R95p e R99p, sendo as variações mais acentuadas obtidas sob as projeções dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 para os índices.

Todas regiões homogêneas exibiram variações crescentes para os índices de dias secos consecutivos - CDD, quanto aos dias úmidos consecutivos CWD as projeções dos cenários RCP4.5 e RCP6.0 exibem aumentos, porém apenas para região homogênea G4. Sendo assim, pode-se inferir que um aumento nos dias secos consecutivos - CDD e uma redução nos dias úmidos consecutivos - CWD, evidenciando diminuição das chuvas regulares e na precipitação total anual em dias úmidos - PRCPTOT, indicando a ocorrência de períodos de estiagem prolongados na área.

RX1Day e RX5Day exibem padrões opostos aos da precipitação total, com variações expressivas de aumento para os períodos de intervalo de tempo futuro distante de 2081-2099 sob as projeções dos cenários RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5. Para os índices R95p e R99p variações de redução para o período de intervalo de tempo de futuro distante e sob projeções do RCP8.5 foram predominantes.

Em relação aos índices de extremos climáticos de temperaturas máxima e mínima, as variações da série 2005-2099 das projeções para os quatro cenários de emissão do CMIP5 em relação ao período de referência por regiões homogênea para o MATOPIBA, são em sua maioria de aumento nas temperaturas extremas projetadas para o futuro, destacando que essas são mais acentuadas para as projeções dos cenários RCP6.0 e RCP8.5.

De forma geral, os índices relacionados à temperatura revelam indícios de mudanças climáticas durante o período de estudo, para intervalos de tempo de futuro distante os resultados evidenciam aumentos para os índices TR, WSDI, SU, TXx, TNx, TXn, TNn, TX90p e TN90p e diminuição para os índices TX10p e TN10p, com variações altas sob as projeções dos cenários RCP 4.5 e RCP8.5. As variações indicam um aumento predominante nas noites tropicais - TR e nos dias de verão - SU para os cenários RCP2.6 e RCP8.5, com maiores variações no último, sendo verificada elevada frequência de dias de verão, sugerindo que os dias de verão ocorrem predominantemente ao longo do ano.

5. REFERÊNCIAS

ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A. M. G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D. B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v. 111. doi:10.1029/2005jd006290

ALEXANDER, L.V.; FOWLER, H.J.; BADOR, M.; BEHRANGI, A.; DONAT, M.G.; DUNN, R.; FUNK, C.; GOLDIE, J.; LEWIS, E.; ROGÉ, M.; et al. (2019). On the use of indices to study extreme precipitation on sub-daily and daily timescales. **Environ. Res. Lett.**, v.14, 125008. [CrossRef]

AHSAN, S.; BHAT, M. S.; ALAM, A.; FAROOQ, H.; SHIEKH, H. A. (2022). Avaliação do impacto das mudanças climáticas em eventos extremos de temperatura e precipitação sobre o Himalaia da Caxemira. **Climate Dynamics**, v.58, p.1651–1669. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05984-6>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ARAÚJO, W. S. (2009). Detecção de tendências de mudanças climáticas para os estados da Bahia e Sergipe por meio de índices pluviométricos diários. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. (2020). Assessing Current and Future Trends of Climate Extremes across Brazil Based on Reanalyses and Earth System Model Projections. **Climate Dynamics**, v. 55, p. 1403–1426.

AZERÊDO, R. F. (2022). Fazendas corporativas sojícolas e acumulação de capital no início do século 21: os novos senhores da terra na região do Matopiba. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Paraíba – UFPB. 350 p.

BORDIGNON, A. J. Z. (2022). Simulação das necessidades hídricas e produtividade da cultura da soja no MATOPIBA. Dissertação (Mestrado) - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 71 p.

CAMARINHA, P. I. M. (2016). Vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra em cenários de mudanças climáticas na porção paulista da Serra do Mar. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 252 p.

DONAT, M. G.; ALEXANDER, L. V.; YANG, H.; DURRE, I.; VOSE, R.; CAESAR, J. (2013). Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 7, p. 997-1006. doi:10.1175/bams-d-12-00109.1

FERNANDES, R. D. M.; MELO, D. M.; ELLI, E. F. Battisti, R. (2022). Climate change impacts on rainfed and irrigated soybean yield in Brazil’s new agricultural frontier. **Theoretical and Applied Climatology**, v.147, p.803–816. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03865-w>

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; TANK, A. M. G. K.; PETERSON, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Climate Research**, v. 19, p. 193-212.

GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. (2018). O papel da dimensão ambiental na ocupação do MATOPIBA », *Confins* [Online], v.35: <http://journals.openedition.org/confins/13045>

HARRIS, I.; JONES, P. D.; OSBORN, T. J.; LISTER, D. H. (2013). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 3, p. 623-642. doi:10.1002/joc.3711

HARRIS, I.; OSBORN, T. J.; JONES, P.; LISTER, D. (2020). Version 4 of the CRU TS Monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v.7, n.109 <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

HEMPEL, S.; FRIELER, K.; WARSZAWSKI, L.; SCHEWE, J.; PIONTEK, F. (2013). A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. **Earth System Dynamics**, v.4, p.219-236.

IPCC (2021) Weather and climate extreme events in a changing climate. In: Masson-Delmotte V, Zhai PM, Pirani A et al (eds) Climate change 2021: the physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge and New York, p.1513-1766. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>

KOSTOPOULOU, E.; GIANNAKOPOULOS, C. (2023). Projected Changes in Extreme Wet and Dry Conditions in Greece. **Climatev**, v.11, n.49. <https://doi.org/10.3390/cli11030049>

MAGALHÃES, L. A.; MIRANDA, E. E. (2014). MATOPIBA: Quadro Natural. Nota técnica 5. EMBRAPA. Available at: Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE). https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT5_Matopiba_Quadro_Natural.pdf. Acesso: 20 jun. 2021.

NATIVIDADE, U. A.; Garcia, S. R.; Torres, R. R. (2017). Tendência dos Índices de Extremos Climáticos Observados e Projetados no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, 600-614.

PEREIRA, C. N.; CASTRO, C. N.; PORCIONATO, G. L. (2018). Dinâmica econômica, infraestrutura e logística no MATOPIBA. Brasília: IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

OLIVEIRA, P. T.; LIMA, K. C.; SILVA, C. M. S. (2013). Synoptic environment associated with heavy rainfall events on the coastland of Northeast Brazil. **Advances in Geosciences**, v.35, p.73-78.

OLIVEIRA APARECIDO, L. E.; DUTRA, A. F.; LORENÇONE, P. A.; ALCÂNTARA NETO, F.; LORENÇON, J. A.; LEITE, M. R. L. (2021). Climate change in MATOPIBA region of Brazil using Thornthwaite (1948) classification. Research Square. Disponível: <https://www.researchsquare.com/article/rs-428799/v1>. Acesso: 22 set. 2021.

ROJPRATAK S.; SUPHARATID S. (2022). Regional extreme precipitation index: Evaluations and projections from the multi-model ensemble CMIP5 over Thailand. **Weather and Climate Extremes**, v.37, 100475.

REIS, L. C. (2020). Produtividade da soja sob diferentes cenários de variabilidade climática na região do MATOPIBA. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Natal, 161f.

REIS, L. C.; SANTOS E SILVA, C. M.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. (2020). Caracterização da variabilidade da precipitação no MATOPIBA, região produtora de soja. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13 n.04, p. 1425-1441.

SALVADOR, M. A., BRITO, J. I. B. (2017). Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.133, p.253-261.

SANTOS, J. R. N.; ARAÚJO, M. L. S.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; SANTOS, J. S.; ALMEIDA, J. L.; LIMA, T. V.; SOUSA, L. V. P.; AGUIAR, P. H. M.; SILVA, F. B. (2020). Tendências de extremos climáticos na região de transição Amazônia-Cerrado no estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 16, v.26.

SANTOS, L. O. F.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; GELI, H. M. E.; QUERINO, C. A. S.; RUHOFF, A. L.; IVO, I. O.; LOTUFO NETO, N. (2023). Trends in Precipitation and Air

Temperature Extremes and Their Relationship with Sea Surface Temperature in the Brazilian Midwest. **Atmosphere**, v.14, n.426. <https://doi.org/10.3390/atmos14030426>

SILVA, P. E. (2018). Indicador epidemiológico de vulnerabilidade a extremos climáticos para região Amazônica e Nordeste brasileiro. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas. 140p.

SILVA, P. E.; SILVA, C. M. S.; SPYRIDES, M. H. C.; ANDRADE, L. M. B. (2019). Análise de Índices de Extremos Climáticos no Nordeste e Amazônia Brasileira para o Período entre 1980 a 2013. **Anuário do Instituto de Geociências**. v. 42, n.2, p. 137-148.

SILVA, M. L. (2022). Avaliação do impacto das mudanças climáticas na América do Sul Tropical usando downscaling dinâmico: histórico e futuro. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas. 198p.

SIQUEIRA, M. S.; SILVA, M. T.; BRITO, J. I. B.; BRAGA, C. C.; SOUZA, A. C.; SOUSA, W. G. (2024). Índices climáticos extremos de precipitação pluvial e temperatura do ar na região do MATOPIBA-Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.17, n.1, p.446-464.

POWELL, E. J.; KEIM, B. D. (2015). Trends in Daily Temperature and Precipitation Extremes for the Southeastern United States: 1948-2012. **Journal of Climate**, v. 28, n. 4, p. 1592-1612. doi:10.1175/jcli-d-14-00410.1

VAGHEFI, S. A.; ABBASPOUR, N.; KAMALI, B.; ABBASPOUR, K. C. (2017). A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. **Environmental Modelling & Software**, v. 96, p. 181-198. doi:10.1016/j.envsoft.2017.06.033

ZHANG, X.; YANG, F. (2004). RCLimDex (1.0) UserManual (p. 22). **Ontario:Climate Research Branch**, Environment Canada.

ZHANG, X.; HEGERL, G.; ZWIERS, F. W.; KENYON, J. (2005). Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes. **Journal of Climate**, v.18, n. 11, p.1641-1651. doi:10.1175/jcli3366.1

ZHANG, X.; ALEXANDER, L.; HEGERL, G. C.; JONES, P.; TANK, A. K.; PETERSON, T. C.; TREWIN, B; ZWIERS, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdisciplinary **Reviews: Climate Change**, v.2, n.6, p. 851-870. doi:10.1002/wcc.147

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

As conclusões da análise das tendências obtidas para os índices de extremos climáticos de precipitação pluvial e temperaturas máximas e mínimas do ar para o período histórico para a região do MATOPIBA apontam para variabilidade climática, destacando-se tendência de aumento na frequência de dias secos consecutivos e de redução na frequência de dias úmidos consecutivos e do total anual precipitado, acompanhados por aumento nos extremos de temperatura máxima.

De maneira geral para os índices de extremos climáticos de precipitação pluvial os resultados das projeções, indicam que os padrões futuros dos índices extremos de precipitação projetados em ambos os cenários estão a diminuir na região do MATOPIBA num futuro próximo em relação ao período de referência. Implicando em condições de aumento de períodos secos ocorrendo com mais frequência para intervalos de tempo de futuro distante.

Com base nos resultados das projeções dos cenários para os índices de extremos climáticos de temperatura examinados, estes indicam aumento para períodos quentes e redução de períodos frios para intervalos de tempo de futuro distante, com maiores variações sob cenários de alta emissão, as variações são mais elevadas para os índices de temperatura mínima evidenciando que o aumento na temperatura mínima foi maior em comparação com a temperatura máxima.

A análise fatorial aplicada aos índices de extremos climáticos de precipitação e temperatura neste estudo revelou-se uma técnica estatística poderosa para avaliação de vulnerabilidade, por meio desta foi possível identificar áreas vulneráveis as mudanças climáticas na região. O IVC obtido pode fornecer informações para identificar áreas que podem representar risco a mudanças climáticas, já que eventos climáticos extremos podem acarretar desastres naturais afetando a segurança hídrica, energética e a agricultura.

As conclusões deste estudo podem ser úteis no avanço do conhecimento sobre a vulnerabilidade climática na região fornecendo informações valiosas para tomadores de decisão no estudo, desenvolvimento e implementação de estratégias eficazes de mitigação e adaptação no combate aos desafios impostos pelas alterações climáticas.