

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

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Eduardo Bezerra Junior**

**CENÁRIOS FUTUROS DE TEMPERATURA  
MÁXIMA DO AR NA REGIÃO DO MATOPIBA**

**Campina Grande, Fevereiro de 2024**



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

DISSERTAÇÃO

**CENÁRIOS FUTUROS DE TEMPERATURA MÁXIMA DO AR NA  
REGIÃO DO MATOPIBA**

EDUARDO BEZERRA JUNIOR

**CAMPINA GRANDE – PB  
FEVEREIRO DE 2024**

EDUARDO BEZERRA JUNIOR

**CENÁRIOS FUTUROS DE TEMPERATURA MÁXIMA DO AR NA  
REGIÃO DO MATOPIBA**

Dissertação de mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

**Orientador:** Prof. Dr. Madson Tavares Silva

Área de concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia

Subárea: Agrometeorologia

**CAMPINA GRANDE – PB**

**FEVEREIRO DE 2024**

B574c

Bezerra Junior, Eduardo.

Cenários futuros de temperatura máxima do ar na região do MATOPIBA / Eduardo Bezerra Junior. – Campina Grande, 2024.

76 f. : il. color.

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

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

Referências.

1. Agrometeorologia. 2. Micrometeorologia. 3. Agrupamento de Áreas Homogêneas. 4. Tendência Positiva. 5. CMIP6. 6. Temperatura Máxima. I. Silva, Madson Tavares. II. Título.

CDU 551.502.4(043)

**EDUARDO BEZERRA JUNIOR**

**CENÁRIOS FUTUROS DE TEMPERATURA MÁXIMA DO AR NA  
REGIÃO DO MATOPIBA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2024**

**BANCA EXAMINADORA:**



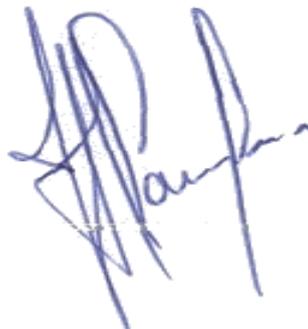
**Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA**

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



**Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA**

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



**Prof. Dr. JOÃO HUGO BARACUY DA CUNHA CAMPOS**

Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde  
Universidade Estadual da Paraíba

Dedico este trabalho ao Cristo, fonte de toda vida e misericórdia sem o qual não posso prosseguir.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente a Deus pela vida e por ter tido compaixão de mim durante todo esse período profissional e pessoal que experimentei sem o qual sem o sentimento da graça divina teria sido muito difícil.

Agradeço a minha mãe Maria Inês de Figueiredo por toda educação a mim concedida, ao meu primo e amigo Caio Franklin V.F por todo o encorajamento e diálogos ao longo desta jornada do curso de mestrado.

Ao professor Dr. Madson Tavares por toda a ajuda a mim consentida na elaboração da pesquisa, por sua dedicação, paciência, educação e amizade ao longo desse período.

À todo corpo docente e membros do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFCG, em especial a pessoa de Arilene de Almeida, que sempre esteve presente e atuante junto as necessidades estudantis, por sua disposição e prontidão.

Ademais, gostaria de fazer uma menção in memoriam de meu tio Raimundo Figueiredo e primo Alex C. Figueiredo.

Por fim agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo investimento realizado nesta importante fase da minha formação.

Meus sinceros muito obrigado a todos vocês, um fraterno abraço!

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma estrutural da dissertação.....	25
Figura 2. Localização da área de estudo .....	35
Figura 3. Distribuição espacial das áreas homogêneas do MATOPIBA para temperatura máxima do ar no período 1961-2018.....	41
Figura 4. Variabilidade temporal da temperatura máxima de ar e pontos de quebra na série pelo método de Pettitt para os grupos homogêneos 1,2,3,4 e 5 no período de 1961-2018 . .....	44
Figura 5. Resumo gráfico das etapas de espacialização climática.....	59
Figura 6. Distribuição espaço temporal mensal da variabilidade climática da Temperatura máxima do ar para as microrregiões do MATOPIBA para o período de janeiro de 1961 a dezembro de 2018.....	61
Figura 7. Distribuição espaço temporal anual da temperatura máxima do ar no MATOPIBA para o período de janeiro de 1961 a dezembro de 2018. ....	63
Figura 8. Distribuição espaço temporal dos cenários futuros de temperatura máxima do ar do MATOPIBA para o s cenários de tempo A) 2021-2040, B) 2041-2060, C) 2061-2080 e D) 2081-2100 do ensemble dos modelos CMIP6 utilizados nesse estudo para concentrações de emissões SSP2-4.5 e SSP5-8.5.....	66
Figura 9. Distribuição temporal mensal dos modelos climáticos para os cenários de tempo e concentrações SSP2-4.5 (A, C, E, e G) e SSP5-8.5 (B, D, F e H) de temperatura máxima de ar para o MATOPIBA no século XXI .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados dos testes de Mann-Kendall e de Pettitt aplicados aos grupos homogêneos.....	43
Tabela 2. Conjunto dos modelos climáticos referentes à pesquisa.....	57
Tabela 3. Aumento médio na Temperatura Máxima do ar para a região do MATOPIBA para cenários futuros de tempo e clima de 7 modelos do CMIP6...65	

## LISTA DE SIMBÓLOS E SIGLAS

AA	Análise de agrupamento
AHC	Agglomerative Hierarchical Clustering
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
COP26	Confederação das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
CRU	Climatic Research Unit
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura
G	Grupo
GEE	Gases de efeito estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ONU	Organização das Nações Unidas
SSP	Shared Socio-economic Pathway
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

## RESUMO

No Brasil, a região do MATOPIBA (formada por porções dos estados Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) possui importância estratégica na economia do país motivada pelo setor agrícola, no entanto, pesquisas alertam que a região vem apresentando modificações de clima. O estudo climático parte da análise de dados e séries temporais a fim de identificar um padrão ou alterações ao longo de um passo temporal. Neste trabalho são analisadas tendências a partir da temperatura máxima de ar na região do MATOPIBA para grupos de áreas homogêneas, bem como, analisados as projeções de modelos climáticos globais derivados do CMIP6. A série temporal utilizada para o período histórico de janeiro de 1961 a dezembro de 2018 trata-se de reanálises do CRU-TS-4.03 com resolução espacial de  $0.5^\circ$  da Universidade de East Anglia, bem como dados de modelos climáticos globais do CMIP6 do WorldClim Global Climate Data, para as faixas de tempo 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 para cenários de concentração SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Para a análise de tendência nos grupos de áreas homogêneas foram aplicados os testes não paramétricos de Mann-Kendall e de Pettitt ao nível de significância de p-valor  $<0,05$ . Os Grupos (G1) e (G3) foram os que apresentaram maior aumento de temperatura máxima do ar (com boa representatividade de microrregiões do Maranhão e do Tocantins) o teste de Pettitt apontou para os 4 grupos ponto de quebra ocorrendo em 1994 e incrementos de  $1^\circ\text{C}$  na mudança das médias da série. Para as projeções do século XXI foram selecionados 7 modelos climáticos globais para compor o ensemble (BCC-CSM-MR, CanESM5, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L e MIROC6). Os resultados observados a partir das projeções indicam que a região do MATOPIBA até o futuro longo poderá aumentar de 3 a  $5,9^\circ\text{C}$  na média para o SSP2-4.5 e SSP5-8.5 respectivamente, ademais, a região poderá passar de média histórica de  $31,7^\circ\text{C}$  (1961-2018) para  $34,6^\circ\text{C}$  até o fim do século (2081-2100) para o cenário intermediário SSP2-4.5 a  $37,5^\circ\text{C}$  para o cenário SSP5-8.5 e que 65% do MATOPIBA possuirá média igual ou maior que a média observada. Por fim, independentemente do cenário de concentração as projeções indicam que a região irá na média apresentar aumentos de temperatura máxima de ar.

**Palavras-chave:** Agrupamento de Áreas Homogêneas. Tendência positiva. CMIP6. Temperatura máxima

## ABSTRACT

In Brazil, the MATOPIBA region (made up of portions of the states of Maranhão, Tocantins, Piauí and Bahia) has strategic importance in the country's economy driven by the agricultural sector, however, research warns that the region has been experiencing changes in climate. The climate study starts from the analysis of data and time series in order to identify a pattern or changes over a time step. In this work, trends are confirmed based on the maximum air temperature in the MATOPIBA region for groups of hydrographic areas, as well as the projections of global climate models resulting from CMIP6 are analyzed. The time series used for the historical period from January 1961 to December 2018 are CRU-TS-4.03 reanalyses with a spatial resolution of  $0.5^\circ$  from the University of East Anglia, as well as CMIP6 global climate model data from WorldClim Global Climate Data (<https://www.worldclim.org/data/cmip6>) for the 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 and 2081-2100 time periods for the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 concentration scenarios. The Mann-Kendall and Pettitt non-parametric tests were applied to analyze trends in the groups of homogeneous areas at a significance level of p-value  $<0.005$ . Groups (G1) and (G3) showed the greatest increase in maximum air temperature (with a good representation of micro-regions in Maranhão and Tocantins). The Pettitt test indicated a breakpoint for all 4 groups and increments of  $1^\circ\text{C}$  in the change in the series averages. For the 21st century projections, 7 global climate models were selected to make up the ensemble (BCC-CSM-MR, CanESM5, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L and MIROC6). The results observed from the projections indicate that the MATOPIBA region could increase by an average of 3 to  $5.9^\circ\text{C}$  in the long term for SSP2-4.5 and SSP5-8.5 respectively. Furthermore, the region could go from a historical average of  $31.7^\circ\text{C}$  (1961-2018) to  $34.6^\circ\text{C}$  by the end of the century (2081-2100) for the SSP2-4.5 intermediate scenario to  $37.5^\circ\text{C}$  for the SSP5-8.5 scenario, and that 65% of MATOPIBA will have an average equal to or greater than the observed average. Finally, regardless of the concentration scenario, the projections indicate that the region will, on average, show increases in maximum air temperature.

Keywords: Grouping of Homogeneous Areas. Positive trend. CMIP6. Maximum temperature

## SUMÁRIO

### Capítulo 1

1.	Introdução.....	12
1.1	Justificativa.....	14
2.	Objetivos .....	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3.	Referencial teórico .....	17
3.1	Mudanças climáticas e eventos extremos.....	17
3.2	Cenários futuros e trajetórias socioeconômicas compartilhadas .....	19
3.3	Análise multivariada .....	20
3.4	Análise de cluster hierárquica .....	21
3.5	Análise de séries temporais .....	22
3.6	Teste de mann-kendall.....	23
3.7	Teste de pettitt .....	24
4.	Estrutura da dissertação.....	24
5.	Referências .....	25

### Capítulo 2

1.	Introdução.....	32
2.	Material e métodos .....	34
2.1	caracterização da área de estudo.....	34
2.2	banco de dados .....	35
2.3	metodologia.....	36
2.3.1	agrupamento de áreas homogêneas .....	36
1.1.1	teste de mann-kendall .....	36
1.1.2	teste de pettitt.....	38
3.	Resultados e discussão .....	39
4.	Conclusões .....	46
5.	Referências .....	47

### Capítulo 3

1.	Introdução.....	52
2.	Material e métodos .....	55
2.1	caracterização da área de estudos.....	55
2.2	banco de dados .....	56
2.3	determinação dos modelos e cenários futuros .....	56
2.4	metodologia.....	58
3.	Resultados e discussão .....	60
4.	Conclusão .....	71
5.	Referências .....	72

### Capítulo 4

1.	Considerações finais. ....	75
----	----------------------------	----

## 1. INTRODUÇÃO

Como aponta Sánchez (2020), o conceito de impacto ambiental pode ser compreendido como uma alteração da qualidade ambiental originada da alteração de processos naturais ou sociais através de ações humanas. As variabilidades podem atingir as propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio. Ainda, em relação as implicações, estas podem ser temporárias ou permanentes, positivas ou degradantes. Frequentemente, os principais danos observados resultam sobre a fauna e flora, recursos hídricos, segurança alimentar e por fim saúde humana (Resolução CONAMA n.001, de 23 de janeiro de 1986, art. 1º).

De acordo com Matos (2006), a crescente degradação do meio ambiente produzida pelo homem está intrinsecamente associada a crescente urbanização originada na Revolução Industrial iniciada em meados do século XVIII, o alto consumo de produtos manufaturados e ou industrializados, e sua larga produção corroborando para o alto consumo de energia e em consequência a emissão de gases de efeito estufa.

No Brasil, o complexo agrícola denominado MATOPIBA possui em sua composição 336 municípios, sua expressão é originada pelo acrônimo das iniciais dos estados que o compõe, sendo eles Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Possui como principal representatividade de bioma o Cerrado e surge como a mais recente fronteira agrícola de alto potencial no Brasil. Ressalta-se que a região vem sofrendo alterações em distintas áreas, tais como a econômica, social e a ambiental em função da expansão agrícola vivenciada na região (PEREIRA et al., 2018).

Conforme Costa (2010), a expansão agrícola experimentada nas áreas do Cerrado brasileiro se deve ao baixo custo das terras e aos incentivos financeiros da região no setor agrícola. Transformando assim a região do MATOPIBA em curto espaço de tempo em uma importante produtora de grãos de soja do Brasil (FRANÇA et al., 2018; BACHI et al., 2023).

Em face aos recursos naturais da área do MATOPIBA, Oliveira e Aquino (2020) revelam que houve redução da ordem de 31,76% da vegetação presente na bacia

hidrográfica do rio Gurguéia no período de 1987 a 2017, em contraponto durante o mesmo período ocorreu um aumento de 31,07% de áreas agricultáveis ao longo da bacia. Tais constatações reforçam os impactos provenientes do uso e manejo do solo na região. O desmatamento corrobora para a erosão do solo, o assoreamento do leito dos rios, a diminuição da vazão hídrica ao longo das bacias e desencadeia alterações na biota presente em tais ecossistemas, pondo em risco a sustentabilidade a longo prazo dos recursos naturais.

França et al. (2018) analisaram a mudança de cobertura vegetal na bacia hidrográfica do rio Uruçuí-Preto, localizada no estado do Piauí - integrante da região de estudo - e verificou que entre os anos 1984 a 2015 houve perda de 45% de vegetação densa. Certamente, tais alterações produzidas pela ação antrópica em prol da agricultura e pecuária extensiva geram impactos nocivos ao meio ambiente como perda de biodiversidade, degradação ambiental e mesmo sensibilidade a incêndios florestais (LUSTIG et al., 2015; FRANÇA et al., 2018, p.1).

De acordo com Nobre (2018), há uma grande correlação entre variáveis climáticas a exemplo da precipitação e temperatura do ar com as alterações e tendências climatológicas de uma superfície. Oliveira et al. (2014) aponta que a região Nordeste do Brasil em virtude de suas condições fisiográficas e de sistemas atmosféricos de diferentes escalas, possui clima de alta variabilidade interanual, tornando-se propensa a extremos de seca e a distintos impactos nesta região.

Nóbrega et al. (2015), relataram os estudos a respeito da variabilidade do clima, ou mesmo, sobre mudanças climáticas são realizados por meio da análise de séries históricas de determinada variável meteorológica. Deste modo, analisar a existência de tendência dessas séries é de importante valia para compreender as possíveis mudanças no clima local (NÓBREGA et al., 2015; SILVA et al., 2019, p.138).

Santos e Oliveira (2017) destacam a relevância dos estudos envolvendo índices climáticos extremos e a sua correlação com mudanças climáticas. Esse tipo de estudo possibilita aferir as principais áreas que sofreram alterações em seus componentes climáticos. De acordo com Sabino et al. (2020), a temperatura média do ar pode sofrer alterações em sua magnitude a depender de uma série de fatores que perturbem os fluxos de energia envolvendo o ecossistema local, tal como a redução da disponibilidade hídrica, e a mudança no uso do solo e cobertura vegetal, além da influência dos fenômenos meteorológicos de micro e mesoescala (SABINO et al., 2020; MOREIRA et al., 2021, p. 3379).

Estudos no Brasil e no mundo fazem uso da análise multivariada para compor os denominados cluster hierárquicos, ou seja, determinar áreas homogêneas a partir de uma dada variável. Análises de tendências significativas de temperatura do ar na região Nordeste brasileira por diferentes autores, revelam tendências positivas para o aumento da magnitude ao longo do ano, década ou clima (SANTOS e OLIVEIRA, 2017; COSTA et al., 2020). Por isso, compreender o comportamento climático em dada região se faz urgente e necessário de modo a auxiliar os tomadores de decisão a implementar políticas públicas eficazes no tocante a minimizar impactos ao meio ambiente e de modo geral a população.

### **1.1 Justificativa**

A partir de 1980 iniciou-se uma forte expansão agrícola nos estados que formam a região do MATOPIBA. Face o desenvolvimento agrícola e a importância no cenário brasileiro o reconhecimento da sua delimitação ocorreu em 2015 por decreto presidencial. A área configura-se como a nova fronteira agrícola brasileira, de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) no ano de 2018 a produtividade de grãos na área compreendeu 10% da produtividade geral de grãos no setor brasileiro, correspondendo a mais de 15 milhões de toneladas de soja, além da produção massiva de milho e algodão. (EMBRAPA, 2018).

Projeções do governo federal por meio do Ministério da Agricultura preveem um largo crescimento de produtividade até 2030. As estimativas sugerem que a safra seja da ordem de 32,7 milhões de toneladas em uma área de 8,9 milhões de hectares (BRASIL, 2021). Por isso, distintos desdobramentos foram e serão evidenciados na região ao longo do passado e futuro, desde o crescimento econômico, a infraestrutura da região e as condições sociais. Além disso, outro fator que se observa são os impactos gerados ao meio ambiente em detrimento dessa transformação pungente.

Os principais danos observados no uso e cobertura do solo denotam reduções extensas da vegetação nativa característica do Cerrado brasileiro nas bacias hidrográficas componentes do MATOPIBA. Tal alterabilidade no ecossistema original contribui para redução da fauna e flora nativa, aumento da temperatura do solo e concomitantemente a do ar de difusão turbulenta, condução e radiação respectivamente, ocasionando impactos em serviços ecossistêmicos como a regulação da temperatura e umidade.

Múltiplos são os estudos que corroboram para a evidenciação das mudanças do clima na área de estudo (SANTOS e OLIVIERA, 2017; SALVADOR e BRITO, 2018;

REIS, 2020). Reis (2020) ao analisar o período entre 1980-2013 obteve índices extremos de temperatura do ar com tendências positivas, isto é, os estudos apontam para um acréscimo nas magnitudes anuais de temperatura na região. A autora ressalta ainda que a quantidade de dias quentes em algumas microrregiões vem aumentando.

Em 2021 o Governo Federal da República Federativa do Brasil por meio da Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (COP26) firma compromisso em reduzir as emissões de carbono a metade até o ano de 2030, combater o desmatamento ilegal e em 2050 alcançar a neutralidade de emissões de carbono, isto é, igualar a emissão e o sequestro. (BRASIL, 2021). Indubitavelmente, reduzir os efeitos dos extremos climáticos gerados pela ação humana, bem como, propiciar bem estar a coletividade global, regional e local são princípios norteadores ao que tange os interesses dos chefes de estado do globo no século XXI.

Por isso, analisar o comportamento da temperatura máxima do ar na região de MATOPIBA por meio de séries temporais históricas, bem como, relacionar esses dados com as projeções futuras por meio dos modelos e cenários socioeconômicos se faz importante na compreensão da análise das mudanças climáticas locais e regionais. Por conseguinte, a realização de pesquisas científicas na região de estudo permitirá aos agentes públicos e formuladores de políticas públicas local, ao setor público e privado a provisão de conhecimento técnico para tomadas de decisão que visem uma melhor eficiência e que corrobore com o desenvolvimento sustentável em MATOPIBA.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar a variabilidade da temperatura máxima de ar em MATOPIBA para o século XXI por meio da média de 7 modelos climatológicos de cenários futuros presentes no CMIP6 e por meio dos dados de clima presente do CRU-TS-4.03 correlacionar os recortes temporais a fim de investigar a existência de mudança climática e seus possíveis efeitos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar o agrupamento de áreas homogêneas de temperatura a partir de séries temporais de temperatura máxima do ar compreendendo o período de 1961-2018.
- Estimar por meio dos testes não-paramétricos de Mann-Kendall e de Pettitt os níveis de significância, a ocorrência de tendência e homogeneidade para as regiões concebidas pelo agrupamento hierárquico.
- Analisar os possíveis efeitos do aumento de temperatura do ar por meio dos cenários futuros do CMIP6 para cenários de concentração SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para o século XXI.

### **3. REFERÊNCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Mudanças climáticas e eventos extremos**

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é uma organização política científica fundada em 1988 que tem por missão avaliar informações científicas, técnicas e socioeconômicas de forma a projetar, compreender e alertar os riscos e impactos ambientais ao globo e aos seres humanos face as mudanças climáticas (MARENGO e SOARES, 2003).

A definição de mudanças climáticas é apresentada por Andrade (2018) como sendo a variação estatisticamente significativa na média do clima e em sua variabilidade, desde que ocorra em um largo horizonte temporal, caracterizado pelo clima. As mudanças podem ocorrer por processos naturais, forçantes externas ou pela ação antropogênica desencadeada pela globalização.

Para a Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC), a mudança de um clima pode ser alçada por uma alteração da composição da atmosfera direta ou indiretamente as ações humanas, que causem variabilidade além do observado quando comparado com períodos de tempo. Deste modo, a variabilidade climática é atribuída apenas aos processos naturais do globo (ANDRADE, 2018).

Por isso, o IPCC em seus relatórios atribui as mudanças climáticas correntes como sendo estas associadas as ações humanas, de modo tal que a interferência no meio promove variações no clima de alto impacto (IPCC, 2021). Em seu Sexto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR6), o IPCC apresenta as principais contribuições científicas acerca do estado atual do clima e alerta sobre as mudanças na atmosfera, oceanos e continentes pela influência de atividades humanas. Em princípio, o AR6 usa as contribuições do relatório antecessor, ou seja, o Quinto Relatório (AR5), bem como, os Relatórios Especiais do ciclo 2018-2019 a exemplo de: Mudanças do Clima e Terra; Aquecimento Global de 1,5°C (IPCC, 2021).

As contribuições presentes no AR6 alertam os formuladores de políticas públicas para as mais diversas alterações no clima, com destaque para o aumento gradativo de temperatura do ar, aumento de precipitação sobre continentes, aumento da altura do nível do mar, diminuição dos glaciares, aquecimento da camada superior dos oceanos, zonas e mudanças climatológicas em diferentes regiões do globo. Ainda, cada mudança citada é indicada como originária de processos antropogênicos (IPCC, 2013; IPCC, 2021).

O aumento da temperatura do ar é intrinsecamente associado a quantidade de emissões de gases de efeito estufa (GEE), com destaque para a emissão de dióxido de

carbono CO<sub>2</sub> principal composto químico degradante da camada de ozônio, de forma que o planeta não consegue manter o seu equilíbrio térmico idealizado, ocorrendo desse modo o chamado aquecimento global, isto é, o aumento de temperatura na superfície terrestre. Além disso, os pesquisadores ressaltam que as mudanças do clima causadas pela ação humana são sentidas em todas as regiões do planeta por meio de extremos de clima e tempo (IPCC, 2021).

Outrossim, no Brasil diversos estudos referem-se a mudanças climáticas sentidas por sua população. A exemplo, a região semiárida do Nordeste brasileiro que sente os efeitos das mudanças do clima em função de uma dualidade de processos naturais potencializados pela ação antrópica. De certo, a Seca evento ou fenômeno caracterizado pela longa estiagem, isto é, a ausência de precipitação em longo período de tempo, e o processo da desertificação cada vez mais presente e sentida pela população adjacente. Estes fenômenos ganham volume na região semiárida em decorrência da má gestão humana dos recursos naturais presentes na área como a retirada da cobertura vegetal nativa, que acarreta perda da biodiversidade, degradação do solo e pelo próprio agravamento do déficit hídrico característico da região (TAVARES et al., 2019).

O Quarto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR4) elege a região semiárida do Brasil como sendo uma das regiões do globo com maior potencial nos próximos anos para sofrer impactos das mudanças do clima, tornando a região ainda mais árida, com alto estresse hídrico e sucedido de frequências e durações do fenômeno seca com maior severidade (MARENGO, 2008; TAVARES et al., 2019). Dessa forma, com a menor recarga dos aquíferos presentes nas bacias hídricas da região por meio da precipitação, a principal atividade produtiva do Nordeste, a agricultura, deverá sofrer impactos negativos em sua produtividade, impactando não somente a economia da região, mas a própria qualidade de vida da população nela inserida, ainda, tornando a terra mais pobre em nutrientes, ocorrendo a perda de carbono armazenada no solo para a atmosfera, contribuindo assim para o aquecimento global (ANGELLOTTI et al., 2011; TAVARES et al., 2019).

Certamente, os estudos sobre mudanças do clima são de fundamental importância dada a urgência da população e do planeta a fim de combater os riscos a fome e aos impactos ambientais pertinentes a temática. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), as mudanças climáticas influenciam na perda de produtividade, alterações na temperatura do solo, e do ar propiciam uma maior proliferação de pragas, revela a organização. Exemplificando, cerca de 40% da

produção agrícola no mundo é perdida por pragas (FAO, 2021). As evidências dos impactos associados a insegurança alimentar revelam que milhões de pessoas sofrerão com a má nutrição até o ano de 2050. Um estudo publicado pela Organização das Nações Unidas (2021), aponta que cerca de 282 milhões de africanos sofrem hoje a severidade da fome. A proporção que os efeitos do clima se intensifiquem no continente, pelo aumento de temperatura, desertificação dos solos e falta de água, é esperado um agravamento do número de pessoas em situação de vulnerabilidade alimentar (ONU, 2021).

### **3.2 Cenários futuros e trajetórias socioeconômicas compartilhadas**

A utilização de modelos climáticos capazes de simular os efeitos provenientes da exposição da atmosfera a forçantes climáticas, como os gases de efeito estufa (GEE) e aerossóis são empregados no estudo de projeções futuras a respeito de mudanças climáticas (MARENGO e SOARES, 2003). Todavia, tamanho o nível de complexidade na simulação da atmosfera e seus constituintes, é de comum saber que ocorre taxas de incertezas nas projeções em disponibilidade, nesse sentido, são observadas diferenças significativas em suas saídas, bem como, quando comparadas a demais metodologias.

De acordo com Chen et al. (2020), o Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) traz em seu escopo como principal diferença na abordagem das simulações de mudanças de clima realizados no CMIP5 a adição de níveis de aquecimento baseados em narrativas socioeconômicas. A nova metodologia abordada na simulação dos modelos climáticos é uma ferramenta concebida de modo a atender as recomendações pautadas no Acordo de Paris, isto é, a modelagem atual simula o aumento de temperatura em níveis de aquecimento. O Acordo, estabeleceu como meta o limiar de 2° a 1,5°C de aquecimento em relação aos níveis pré-industriais.

O CMIP6 pauta-se em cenários alternativos o qual compõe dados socioeconômicos, com características futuras do produto interno bruto (PIB), população, nível de desenvolvimento dentre outras narrativas que compõe os níveis de emissões desenvolvidos. Além disso, os modelos projetados são simulações para diferentes cenários socioeconômicos ora positivos ora negativos do ponto de vista de níveis de aquecimento global, denominados de Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) (GOUVEIA e MARENGO, 2019).

No contexto atual, o Sexto Relatório (AR6) apresentado pelo IPCC considera um conjunto de cinco cenários potenciais de emissões dos gases de efeito estufa (GEE) e as possíveis implicações do efeito estufa em função do aumento de temperatura e mudanças

do clima. As projeções para o século XXI compreendem 3 faixas temporais distribuídas pelo seguinte passo temporal: curto prazo (2021-2040), meio prazo (2041-2060) e longo prazo (2081-2100), tendo como histórico de referência o período de 1850-1900. (IPCC, 2021).

De acordo com o IPCC (2021), os cenários dividem-se em projeções de baixa, média e alta emissão de GEE a partir de combinações envolvendo políticas ambientais, sociais e tecnológicas, além de projetar o desenvolvimento econômico das nações. Por conseguinte, as divisões e ou respostas climáticas seguem assim: SSP1-1.9 e SSP1-2.6 que correspondem respectivamente a emissões baixas ou muito baixas e decaimento contínuo de emissões de CO<sub>2</sub> até o ano de 2050, alcançando emissões de CO<sub>2</sub> em condição líquida zero a partir desse ano; SSP2-4.5 correspondendo a um cenário intermediário em magnitude das emissões de GEE; e SSP3-7.0 e SSP5-8.5 que incluem os maiores níveis de emissões apresentados no relatório, sendo alta e muito alta (IPCC, 2021).

### **3.3 Análise multivariada**

De acordo com Hair et al. (2005), a exploração de dados climatológicos por meio do uso do método da análise multivariada é ideal face a diversidade de informações coletadas ao longo de uma faixa temporal. O método consiste na observância a partir de dados ou informações aleatórias e correlacionadas de modo a obter produtos ou grupos de informações com significância estatística ao qual isoladas possuíam elevada variância (FAVERO et al., 2009).

Segundo Freitas et al. (2013), a análise multivariada é identificada como ferramenta por agrupamento, isto é, fazendo uso do método cluster hierárquico. Desse modo, o uso desse tipo de análise permite obter áreas homogêneas partindo das variáveis examinadas. O objetivo principal consiste na padronização de dados e obtenção de uma correlação estatisticamente significativa, de modo a aferir e apontar grupos de dados com similaridades observadas.

Como aponta Ataíde (2021), a proposta dessa metodologia é reduzir grupos de informações que resultem em simplificações em sua estrutura inicial, propiciando uma classificação, e predição de hipóteses a partir das variáveis lineares.

No Brasil, Araújo et al. (2012), realizaram um estudo na região Nordeste a partir do método da análise de agrupamento, isto é, método oriundo da técnica da análise multivariada. O objetivo da estudo era compreender a dinâmica pluvial incidente na

região ao longo de uma extensa faixa temporal indo de 1960-2006. Além disso, o método foi empregado de acordo com alguns índices provenientes da precipitação. Como resultado, a pesquisa obteve 4 áreas homogêneas ao longo do período para cada índice observado ao longo de todo o Nordeste. Para ilustração, as similaridades nos padrões apresentados variaram em função da influência de fenômenos de mesoescala associadas a Zona de Convergência Intertropical, a orografia da região e a padrões sazonais.

Na região Nordeste do Brasil, Braga et al. (1998), estudou o comportamento da precipitação ao longo do estado da Bahia – maior estado em extensão territorial do Nordeste do Brasil – e a partir da análise multivariada obteve boa similaridade nas formações de grupos homogêneos que se correlacionassem com somatórios de precipitações anuais ao longo do estado. Ao todo, obteve 9 grupos, concluindo que a região possuía características similares em função dos fenômenos climáticos característicos da região, da orografia como os altos relevos da chapada diamantina e baixas planícies, ainda, a região litorânea e semiárida divergindo em função da influência de suas características.

Na região Centro-Oeste do Brasil, no estado do Mato Grosso do Sul, Souza et al. (2012), analisou as variáveis climáticas temperatura e precipitação por meio da técnica de Análise de Agrupamento (AA) pelo método de WARD com o objetivo de corroborar com o planejamento do setor agrícola da região. A análise foi para períodos sazonais e anuais, tendo como série um curto intervalo 2008 a 2010, no entanto, os autores concluíram que os resultados foram satisfatórios haja visto uma boa representatividade dos grupos em função das correlações existentes entre as variáveis observadas e a sazonalidade da região.

### **3.4 Análise de cluster hierárquica**

Conforme Doni (2004), o agrupamento de dados consiste em subdividir um grupo de informações presentes em um conjunto em novas partições de acordo com algum critério ou métrica em comum. De acordo com Jain et al. (1999), a análise de banco de dados por meio da metodologia de cluster ganha espaço em estudos e aplicações em diferentes cenários como processamento de imagens de satélite, pesquisas de mercado, análise de dados computacionais, ciências biológicas e sociais além de outros diferentes meios suscetíveis a padronização (JAIN et al., 1999).

Inicialmente, a análise de cluster é uma ferramenta computacional que agrupa elementos a partir de características similares entre si, formando um conjunto de dados

contendo informações aplicadas à estatística em um modelo matriz e ou diagrama (DONI, 2004). Ainda, ressalta-se que existem diferentes metodologias empregadas nesse tipo de análise de classes, podendo ser aplicados métodos hierárquicos, não-hierárquicos, dentre outros.

De acordo com Metz e Monard (2005), o cluster hierárquico trata-se de uma metodologia auxiliar na análise de padrões comuns presentes em um conjunto de dados. A hierarquização traduz por meio da extração de padrões uniformes diferenças e similaridades de detalhes permitindo a extração de valor por meio de sucessivos agrupamentos (DONI, 2004).

A análise hierárquica apresenta uma estrutura de dendograma, ou diagrama de árvore, ao qual consiste em subdivisões de classes onde dois ou mais elementos por mais que possuam características específicas, isto é, estejam dispostas em grupos de classes diferentes podem coexistir dentro de um mesmo nó por meio de um elemento comum de classificação (METZ e MONARD, 2005).

### **3.5 Análise de séries temporais**

Conforme Ehlers (2007) a análise de séries temporais consiste na realização de observações do comportamento de uma dada variável com escala regular e sucessiva ao longo do tempo. Granger (1997) afirma que o objetivo inicial em realizar a análise de séries temporais é procurar compreender o comportamento da série ao longo do tempo e procurar relacionar o comportamento da variável no tempo passado com o tempo futuro.

De acordo com Anjos et al. (2017) a aplicação desse tipo de ferramenta é vasta em diferentes linhas de pesquisa de mercado e acadêmicas. Como apontado por Latorre e Cardoso (2001), o objetivo inicial é modelar o fenômeno e descrever o seu comportamento e realizar estimativas buscando deduzir possíveis causas e efeitos.

Morretin e Toloí (1981) explicam que as séries temporais possuem 4 elementos: tendência, ciclo, sazonalidade e ruído. Tendência compreende o comportamento da variável ao longo de um horizonte de tempo. Ciclo está relacionado a cinesia ondulatória. Sazonalidade a atividade de curto período, geralmente ao longo de um ano e ruído ao erro, os quais não se pode extinguir.

### 3.6 Teste de Mann-Kendall

Conforme Medeiros (2022), o teste de Mann-Kendall consiste em um ensaio não-paramétrico, ou seja, não necessita de uma distribuição normal das variáveis de estudo. A principal vantagem de fazer uso de ensaios não-paramétricos é a diversidade de sua aplicabilidade podendo inclusive ser utilizado com dados não numéricos. Ainda, Hamed (2009), apresenta a avaliação de séries temporais para obtenção de tendências por meio de Mann-Kendall como a principal metodologia empregada nesse tipo de abordagem.

Desse modo, a metodologia do teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é empregada na determinação de tendência estatisticamente significativa dada uma série de dados a serem abordados. Muito empregada em estudos de variáveis climáticas, estudos ambientais e diversos. Como hipóteses formuladas há a nula e a alternativa, isto é, a primeira quando não ocorre variância significativa na série e a alternativa é a aferição dessa variância podendo ser positiva ou negativa.

Fernandes et al. (2022), fez uso do teste de Mann-Kendall com o objetivo de averiguar possível tendência da variável hidrológica de precipitação para uma bacia hidrográfica de Pernambuco utilizando séries temporais de 1973 a 2018. Obtendo como resultado a estacionariedade e a não tendência positiva ou negativa durante todo o período para o posto pluviométrico de estudo, apesar do resultado divergir para a hipótese nula o teste aferiu boa representatividade no comportamento sazonal ao longo de um ano.

Silva (2004), investigou a variabilidade climática do Nordeste do Brasil com base na aplicação do teste de Mann-Kendall para obtenção de tendências para variados conjuntos de dados climáticos, a exemplo da temperatura máxima e mínima do ar, precipitação e outras, o autor obteve tendências crescentes com base na série temporal analisada para o período anual, estação seca e chuvosa com base em 14 estações meteorológicas distribuídas na região para períodos mínimos de 30 anos.

Lopes e Silva (2013), realizou um estudo semelhante no estado do Ceará fazendo uso do teste na obtenção de tendência de séries temporais envolvendo a variável pluviométrica. Como horizonte temporal o período compreende 55 anos, partindo de 1952 até 2006. De forma que os resultados computados demonstraram em sua maior parte significância para tendências negativas de acordo com a divisão estabelecida para a região.

### **3.7 Teste de Pettitt**

O teste de homogeneidade Pettitt pode ser utilizado de modo complementar ao teste de Mann-Kendall, trata-se de um teste não-paramétrico que investiga o ponto de mudança central em uma série temporal. De acordo com Nourozi (2020), a metodologia assume que as observações ao longo do tempo são regulares e sucedem-se continuamente. A estatística  $U_{t,T}$  realiza a contagem do número de vezes que a primeira amostra apresenta membro maior que a da segunda (PETTITTI, 1979).

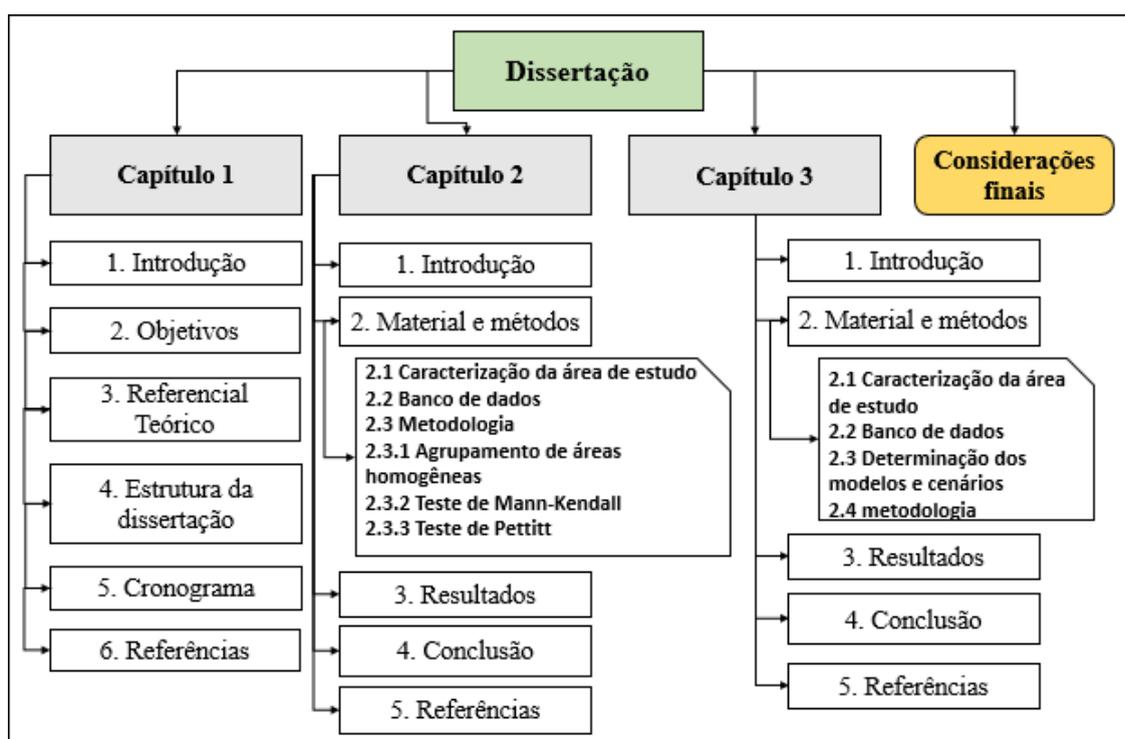
Conforme Santos (2016), o teste é capaz de determinar o ponto que ocorre mudança com nível de significância nas médias da série histórica temporal.

Para ilustração, Back (2001) ao fazer uso do teste de ruptura de Pettitt conjuntamente com o teste de Mann-Kendall concluiu que ambos os testes convergem, podendo inclusive serem empregados de modo complementar e conjunta na análise de tendências de séries temporais.

## **4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A estrutura proposta para a dissertação segue a estrutura por capítulos e compõe a seguinte forma: O Capítulo 1 é apresentado a introdução da temática desenvolvida, ainda, é exposta a justificativa, o objetivo geral e específicos do trabalho, assim como, o referencial teórico. O Capítulo 2 apresenta a região de estudo, o banco de dados, o método de análise multivariada para obtenção de áreas homogêneas e os testes estatísticos de Mann-Kendall e de Pettitt na determinação de tendências para séries temporais. Ainda, por meio do material e métodos é apresentada a metodologia empregada. Para o Capítulo 3 tem-se os cenários futuros do CMIP6 para a região do MATOPIBA a abordagem de

análises de variabilidade climática da região, o perfil de sazonalidade, Além de apresentar e discutir os possíveis efeitos do aumento de temperatura do ar a partir dos cenários futuros do IPCC para o século XXI por meio das projeções climáticas dos principais centros meteorológicos globais, ao qual compõe o IPCC. Ao final, o trabalho aborda as suas considerações finais. A seguir é apresentado o fluxograma estrutural do projeto de dissertação (Figura 1).



**Figura 1.** Fluxograma estrutural da dissertação.

## 5. REFERÊNCIAS

África longe de erradicar a fome até 2030, alertam ONU e União Africana. **Organização das Nações Unidas**, Brasil. 15 de dezembro de 2021. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2021/12/1773702>>. Acesso em: 24 de setembro de 2022.

ANDRADE, M. F de. **Mudanças Climáticas**. Junho de 2018. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo. 33p. Notas de aula.

ANJOS, et al. ANÁLISE TEMPORAL DE PRECIPITAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SERRA GRANDE-PB. II congresso internacional da diversidade do semiárido. Editora: Conidis, 2017

- ANGELOTTI, F.; FERNANDES JÚNIOR, P. I.; SÁ, I. B. de. Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro: Medidas de Mitigação e Adaptação. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 06, p. 1097-1111, 2011.
- ARAÚJO, W. S. et al. Estudo Pluvial no Nordeste do Brasil Utilizando Análise Multivariada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 5(3), p. 448-442, 2012.
- ATAIDE, L. C. P. de. IMPACTOS DA VARIABILIDADE HIDROCLIMÁTICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. 2021. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.
- BACHI, L. et al. Are there bright spots in na agriculture frontier? Characterizing seeds of good Anthropocene in Matopiba, Brazil. **Environmental Development**. v.46, Elsevier, 2023.
- BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726. 2001.
- BRAGA, C. C. et al. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO APLICADA A DISTRIBUIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DA BAHIA. **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. v. 10, p. 1857-1862. 1998.
- BRASIL. **Observatório Social da Fundação Joaquim Nabuco (FUNDAJ)**. Disponível em:<<https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/tecnologias-de-convivencias-com-as-secas/panorama-setorial-forca-do-matopiba>>. Acesso: 30 de agosto de 2022.
- BRASIL. Deputados apontam o dever de casa do Brasil pós-COP-26. **Câmara dos Deputados**. Brasília 2021. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/827151-deputados-apontam-o-dever-de-casa-do-brasil-pos-cop-26/>>. Acesso: 30 de agosto de 2022.
- CONAMA, **Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986**, do Conselho Nacional de Meio Ambiente-CONAMA; “Dispõe sobre as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação de Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente”; publicada no Diário Oficial da União no em 23/01/1986; Brasília, DF.
- CHEM, H.; SUN, J.; LIN, W.; XU, H. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. **Sci Bull (Beijing)**. 2020 Sep 15;65(17):1415-1418. doi: 10.1016/j.scib.2020.05.015. Epub 2020 May 20. PMID: 36747394.

- COSTA, A. R; SANTOS, O. Expansão Agrícola e Vulnerabilidade Natural do Meio Físico no Sul Goiano. **Revista Geografia em Atos**, Presidente Prudente, n. 10, v. 2, p. 23-35, 2010.
- COSTA, R. L. et al. Tendências em índices extremos de precipitação em Cabaceiras (PB) para períodos distintos. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.13, n.01, p. 271-286, 2020.
- DONI, M. V. **Análise de Cluster: Métodos Hierárquicos e de Particionamento**. 2004. (Trabalho de Conclusão de Curso em Bacharel em Ciências de Informação – Faculdade de Computação e Informática), Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2004.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Visão 2030. **O futuro da Agricultura Brasileira**. Brasília, DF. 2018. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829?version=1.1>>. Acesso: 30 de agosto de 2022.
- EHLERS, R. S. Análise de Séries Temporais. Laboratório de Estatística e Geoinformação, Universidade Federal do Paraná. 2007. Disponível em: <http://www.each.usp.br/rvicente/AnaliseDeSeriesTemporais.pdf>.
- FÁVERO, L. P. L. et al. Análise de Dados: Modelagem multivariada para tomada de decisões. Rio de Janeiro: **Elsevier**. 2009. 646p.
- FERNANDES, A. C. G. et al. The use of the Mann-Kendall test for detection of precipitation trends in a semi-arid region of Pernambuco. **Research, Society and Development**, v.11, n.11, e546111133925, 2022.
- FRANÇA, L. C. J de. et al. Análise espaço-temporal da cobertura vegetal em uma bacia hidrográfica na região de MATOPIBA, Brasil. **Revista Nativa**. Universidade Federal do Mato Grosso. v.6, n. especial, p737-744, dez. 2018.
- FREITAS, J.C.; ANDRADE, A.R.S.; BRAGA, C.C.; GODOINETO, A.H.; ALMEIDA, T.F. Análise de agrupamentos na identificação de regiões homogêneas de índices climáticos no Estado da Paraíba, PB - Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 732-748, 2013.
- GOUVEIA, C. D.; MARENGO, J. S. Nova Abordagem de Projeções Climáticas do CMIP6 e os Modelos Globais de Alta Resolução do High-End Climate Impacts and Extremes (HELIX). **CPTEC-INPE**. Cachoeira Paulista, São Paulo. 2019.

- HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAN, R. L.; BLACK, W. C. *Multivariate data analysis* New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- HAMED, K.H. 2009. Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data. **Journal of Hydrology**, 365(1-2): 86-94.
- 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, 2021: *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 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.
- JAIN, A. K.; MURTY, M. N.; FLYNN, P. J. Data clustering: a review. **ACM Computing Surveys**, New York, v. 31, n. 3, p. 265-323, Sept., 1999.
- LATORRE, M.R.D.O.; CARDOSO, M.R.A. Análise de séries temporais em epidemiologia. *Brasileira Epidemiologia*. V. 4, n. 3, p.145-152, 2001
- LOPES, J. R. F.; SILVA, D. F. Aplicação do teste de Mann-Kendall para análise de tendência pluviométrica no estado do Ceará. **Revista de Geografia**, v. 30, n. 3, p. 192-208. 2013.
- LUSTIG, A.; STOUFFER, D. B.; ROIGÉ, M.; WORNER, S. P. Towards more predictable and consistent landscape metrics across spatial scales. **Ecological Indicators**, Coimbra, v. 57, p. 11-21, 2015.
- MANN, H. B. *Econometrica*. **The econometric society**, v.13, n.3, 245-259, 1945.
- MARENGO, J. A.; SOARES, W.R. *Impactos das Mudanças Climáticas no Brasil e Possíveis Futuros Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC 2001*. Cachoeira Paulista, São Paulo. **CPTEC-INPE**. 2003.
- MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília: MMA, 2008.

- MATOS, T. F. L. **Diagnóstico dos Resíduos Poliméricos Presentes nos Resíduos Sólidos Domiciliares Gerados em São Carlos/SP**. 2006. p.21. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental – Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- MEDEIROS, B. C. dos. **ESTUDO CLIMATOLÓGICO E ANÁLISE DA FREQUÊNCIA “DRY SPELL” PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO**. 2022. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.
- METZ, J.; MONARD, M. C. Clustering Hierárquico: uma metodologia para auxiliar na interpretação dos Clusters. **Universidade de São Paulo**. São Carlos, SP. 2005.
- MOREIRA, P. H. O. et al. Índices de tendências climáticas de longo prazo em área urbana na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.14, n.06, p. 3378-3393, 2021.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. Modelos para Previsão de Séries Temporais. Edgard Blucher, p.356, 1981.
- Mudança Climática Influência na Perda da Produção Agrícola para Pragas, Conclui Estudo Apoiado pela FAO. **Organização das Nações Unidas**, Brasil. 09 de junho de 2021. Disponível em: <

- rio Gurguéia-Piauí. **Revista Equador**. Universidade Federal do Piauí. v.9, n.1: p. 317-333, 2020.
- PEREIRA, C. N. et al. Aspectos Socioeconômicos da Região de MATOPIBA. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental** – IPEA. Campinas, SP, jan./jun. 2018.
- PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, v.28, p.126-135, 1979.
- KENDALL, M. G. Rank correlation measures. **Charles Griffin**: London, U.K, p. 220, 1975.
- REIS, L. C dos. **Produtividade da soja sob diferentes cenários de variabilidade climática na região de Matopiba, Brasil**. 2020. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.
- SABINO, M.; SILVA, J.B. da.; COSTA, R. de O. et al. Biophysical parameters and extreme air temperature indexes in the Cerrado-Amazonia transition. **Sociedade & Natureza**. v.32, p. 513-524, 2020.
- SALVADOR, M. A da; BRITO, J. I. B de. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. 133, 253-261, 2018.
- SANTOS, V. de O. **IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE TÊNDENCIAS DAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS E MUDANÇAS NO USO E OCUPAÇÃO DAS TERRAS NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UBERABA, EM MINAS GERAIS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- SANTOS, C. A. C dos.; OLIVEIRA, V. G de. Trends in Extreme Climate Indices for Pará State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 2017, v. 32, n.1: p. 13-24, 2017.
- SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceito e métodos**. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.
- SILVA, P. E de. et al. Análise de Índices de Extremos Climáticos no Nordeste e Amazônia Brasileira para o Período entre 1980 a 2013. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v.42: p.137-148, 2019.
- SILVA, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. **Journal of Arid Environments**. v.58, n.4: p.575-596, 2004.
- SOARES, W. **Material didático da disciplina Mudanças Climáticas**. 2019. Universidade Federal de Espírito Santo. Notas de aula.

- SOUZA, A. de. et al. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO DA PRECIPITAÇÃO E DA TEMPERATURA NO MATO GROSSO DO SUL. *ACTA Geográfica*, Boa vista. V.6, n.12, p. 109-124. 2012.
- TAVARES, V. C. et al. Desertificação, Mudanças Climáticas e Secas no Semiárido Brasileiro: Uma Revisão Bibliográfica. *GEOSUL*. Florianópolis. v.34,n.70, p.385-405, 2019.

## **CAPÍTULO 2**

### **VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA DO AR NA REGIÃO DE MATOPIBA**

#### **RESUMO**

A variável climática temperatura do ar é umas das principais unidades de estudo ligada diretamente na alteração física do clima no meio ambiente e por conseguinte aos eventos extremos de clima. O corrente estudo tem por objetivo realizar o agrupamento de áreas homogêneas das 31 microrregiões que compõe o MATOPIBA pelo método de WARD (1963) através das médias mensais das temperaturas máximas do ar para o período de

análise, bem como a partir dos grupos obtidos realizar a análise de tendência da temperatura máxima do ar para os grupos formados por meio dos testes não paramétricos de Mann-Kendall e de Pettitt. Foram utilizados dados reanálises de séries históricas mensais de temperatura máxima do ar para o período de 1961-2018 derivadas do CRU-TS-4.03. Como resultado da análise de agrupamento foram gerados 5 grupos homogêneos com destaque em extensão do padrão de temperaturas para os grupos G2 e G1 os quais contabilizam 35,8% e 27,9% da região. Em seguida analisou-se tendência para os grupos ao nível de significância de p valor  $<0,05$ . Os resultados de tendência obtidos para os grupos homogêneos tanto para o teste de Mann-Kendall (tendência) quanto para o teste de Pettitt (quebra estrutural) convergem entre si para tendências positivas, isto é, incrementos de temperatura máxima de ar ao longo do período, com extrema significância p valor  $<0,0001$ , o teste de Pettitt apontou que os grupos G2 e G5 apresentaram incrementos na média da série superiores a  $1^{\circ}\text{C}$  com quebras em 1994 e 1995 respectivamente.

**Palavras-chave:** MATOPIBA. Mudanças Climáticas. Agrupamento. Tendência.

## 1. INTRODUÇÃO

O conceito de impacto ambiental está associado a toda ou qualquer alteração em propriedade física, química ou biológica ao meio ambiente, seja oriunda em caráter antrópica ou natural. Bem como, estas modificações podem vim a causar prejuízos a saúde da fauna e flora, dos recursos hídricos e naturais de uma forma geral (Resolução CONAMA n.001, de 23 de janeiro de 1986, art. 1°).

De acordo com o Relatório Especial sobre os impactos do aquecimento global publicado em 2018 pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), estima-se que as atividades humanas tenham alterado em  $1^{\circ}\text{C}$  os níveis de temperatura no globo após o período pré-industrial, além disso, o aquecimento global deve atingir entre 2030 e 2052  $1,5^{\circ}\text{C}$  acarretando em extremos climáticos em curto espaço e tempo (IPCC, 2018). Outrossim, o estudo alerta para danos duradouros ou irreversíveis em diferentes

ecossistemas ao redor do globo. No Brasil, o mais novo complexo agrícola que desponta no mercado nacional recebe o nome de MATOPIBA em alusão as iniciais dos estados o qual o compõe, sendo eles: Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. De acordo com Pereira et al. (2018), a região é representada pelo bioma do Cerrado e a área apresenta intensa transformação no campo econômico, social e ambiental, todas impulsionadas pela intensificação do setor agrícola.

Estudos apontam que houve redução da vegetação densa na região, bem como, aumento das áreas agricultáveis (OLIVEIRA e AQUINO, 2020). Ao passo que, o desmatamento exacerbado culmina em impactos ambientais como erosão do solo, assoreamento dos corpos hídricos e diminuição da vazão além de comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas.

Nobre (2017), informa que há uma correlação entre as variáveis climáticas como precipitação e temperatura do ar com a variabilidade, padrão sazonal e mudanças climáticas em regiões associadas a interferências antropogênicas. Segundo Nóbrega et al. (2015), os estudos referentes a variabilidade climática são realizados por meio de análises de séries históricas, dessa forma pode-se compreender o comportamento das variáveis climáticas em uma dada região.

Ainda do ponto da espacialização de informações geográficas e caracterização dos dados presentes em amostras surge a necessidade de realizar a subdivisão de grupos contendo informações compatíveis entre os pares. O objetivo segundo Doni (2004) é realizar um tratamento linear e otimizado por meio da técnica de cluster hierárquico. Como aponta Metz e Monard (2005), o agrupamento de áreas homogêneas é uma técnica que objetiva auxiliar na análise de padrões convergentes dentro de uma mesma amostra.

Adicionalmente realizar ensaios estatísticos capazes de aferir possíveis tendências presentes nas áreas compartimentadas obtidas pela técnica de agrupamento hierárquico é imprescindível para validação da presente pesquisa. Em suma, o objetivo deste trabalho é realizar os agrupamentos de áreas homogêneas para temperatura máxima de ar para a região de MATOPIBA tendo como dados de referência o período de 1961-2018 e a partir da utilização dos testes não-paramétricos de Mann-Kendall e Pettitt determinar se há variância estatística capaz de mensurar possíveis tendências para as regiões homogêneas formadas.

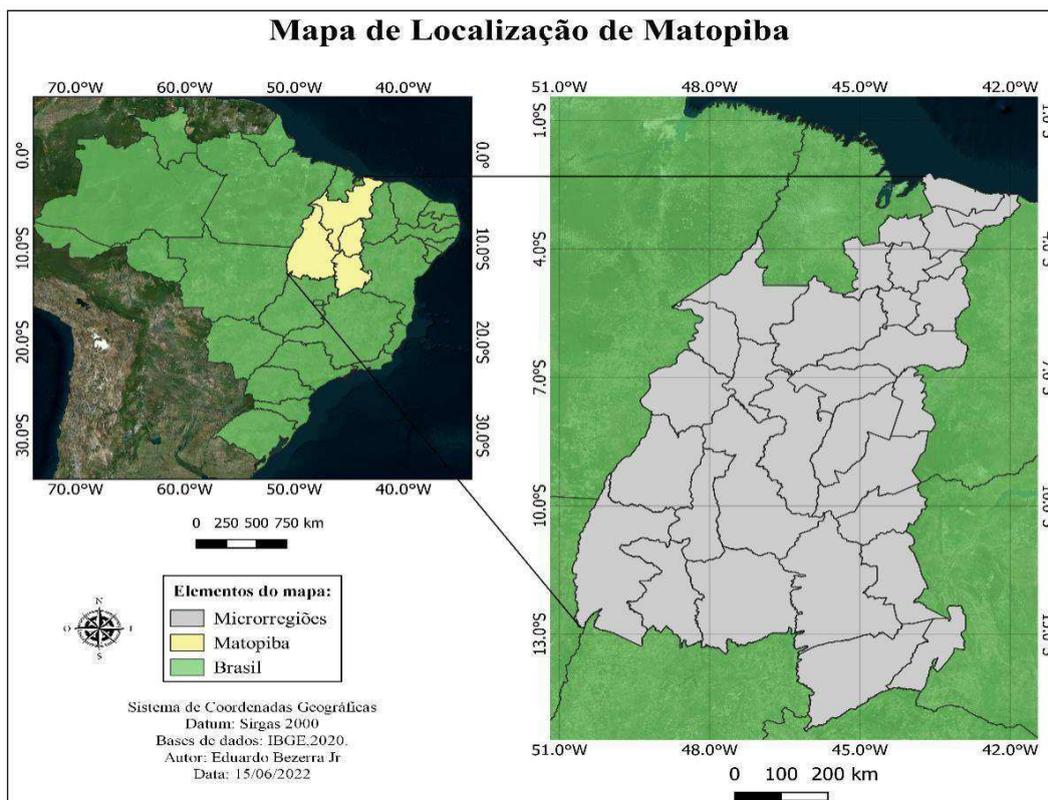
## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da área de estudo**

A região de MATOPIBA (Figura 2) está inserida majoritariamente no Nordeste brasileiro. A área compreende o estado do Tocantins e parte dos estados do Maranhão, Piauí e Bahia. A sua delimitação foi definida por decreto da Presidência da República em 2015. Trata-se de um novo complexo agrícola que desponta no cenário nacional. O território compreende cerca de 73 milhões de hectares, destes, 66,5 milhões estão localizados no bioma de Cerrado, as demais parcelas correspondem a 5,3 milhões e 1,2 milhões para os biomas Amazônia e Caatinga respectivamente. Ainda, do ponto de vista hidrológico três bacias hidrográficas contribuem para a irrigação e abastecimento hídrico – populacional e uso industrial – sendo elas: Bacia do Rio Tocantins, do Atlântico e do Rio São Francisco (EMBRAPA, 2018).

De acordo com Magalhães e Miranda (2014) a região possui 3 zonas climáticas: a tropical brasil central, tropical zona equatorial e equatorial. Outrossim, pela classificação de Köeppen o clima da região é tropical úmido com inverno seco (Aw), possui temperaturas médias mensais entre 22°C a 28°C e precipitação anual entre 800 a 2000mm e duas estações do ano bem definidas a estação seca iniciando em maio e estendendo até setembro e a estação chuvosa marcada pelos meses dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril (ALVARES et al.; 2014).

Outrossim, a topografia plana e o baixo valor do hectare, quando comparado com os demais polos agrícolas do Brasil, contribuíram para a exploração dessa nova fronteira agrícola. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a produtividade agrícola na região é sinalizada pela recolha de grãos de soja, milho e algodão. No ano de 2018, a safra da soja em MATOPIBA foi responsável por 10% de toda produção brasileira (EMBRAPA, 2018). A área de acordo com o IBGE é subdividida em 31 microrregiões, sendo 15 delas no estado do Maranhão, 8 no estado do Tocantins, 4 no estado do Piauí e as outras 4 na Bahia.



**Figura 2.** Localização da área de estudo.

Apresenta uma diversidade de solos com predominância para o Latossolos (37,96%), Neossolos (24,57%), Plintossolos (19,24%), Argissolos (9,56%), Gleissolos (2,66%), Cambissolos (2,58%), Nitossolos (1,04%), Luvisolos (0,66%), Chernossolos (0,47%), Planossolos (0,31%), Dunas (0,19%) e Vertissolos (0,09%) (BOLFÉ et al.; 2016).

## 2.2 Banco de dados

Para os dados de referência utilizou-se dados reformatados de reanálises do Climatic Research Unit- CRU-TS-4.03, dados com pontos de grade e resolução espacial de 0,5° e produzidos por interpolação de ponderação de distância angular (AWD), cedidos pela Unidade de Pesquisa Climática da Universidade de East Anglia (FICK; HIJMANS, 2017). Em suma, tratam-se de séries históricas mensais de temperatura máxima do ar coletados para toda a MATOPIBA e compreendem o horizonte temporal de 58 anos, partindo do ano de 1961 até o fim de 2018.

## **2.3 Metodologia**

### **2.3.1 Agrupamento de áreas homogêneas**

A realização de áreas homogêneas (AA) por meio do cluster hierárquica, ou seja, a criação de grupos com padrões similares é empregada em diversos estudos. Consoante Ahmad e Starkey (2017), o agrupamento pelo método de cluster consiste na disposição de similaridade e de dissimilaridade de objetos em grupos que compreendem todo o domínio ou série de dados.

Conforme discutem Van de Walt et al. (2020) o método de AA é amplo em termos de aplicações podendo agrupar um conjunto de informações sejam qualitativas ou quantitativas a exemplo de manipulação de dados sociais, políticos, demográficos, econômicos e mesmo ambientais. As principais medidas de dissimilaridades utilizadas no método de AA para variáveis quantitativas como séries de dados temporais a exemplo de uma dada série de dados de temperatura ou precipitação são o uso da distância euclidiana, generalizada ou de Minkowski. Definida a distância a etapa seguinte é o armazenamento dos dados em uma matriz. Já para modelos de similaridades o método mais utilizado é o do coeficiente de correlação.

Souza et al. (2012) e Bem et al. (2015) esclarecem que o método de agrupamento de WARD utiliza como medida para determinação dos agrupamentos por dissimilaridade a distância euclidiana para obtenção do dendograma no computo de formação dos grupos com padrões similaridades.

Dessa forma a partir dos dados de temperatura máxima de ar obtidos através de reanálises do Climatic Research Unit-CRU-TS-4.03 os quais compreendem o período de referência indo de 1961 até 2018. De posse desse banco de informação a etapa seguinte consistiu na realização do teste de agrupamento de áreas homogêneas por intermédio de uma rotina em ambiente R utilizando o método de WARD (1963) com a simples seleção dos dados de temperatura das microrregiões gerou-se a classificação. A partir desse resultado, realizou-se a espacialização dos grupos homogêneos através do software QGIS.

#### **1.1.1 Teste de Mann-Kendall**

O teste de Mann-Kendall é um aplicação estatística não-paramétrica empregada comumente na detecção de tendências em séries temporais e em estudos envolvendo variáveis climáticas, tendo como formuladores da análise contextual Mann (1945) e Kendall (1975). Uma vez que se trata de um teste não-paramétrico acaba por desobrigar o padrão de uma distribuição normal ao longo da série da variável a ser examinada (SALVIANO; PELLEGRINO, 2016).

A partir das médias anuais de temperatura máxima do ar por microrregião e do teste de homogeneidade e classificação dos grupos de áreas homogêneas foram organizados os dados por grupo para aplicação do teste de Mann-Kendall através de uma rotina em ambiente livre R.

- Seleção da máxima temperatura máxima do ar anual por microrregião, obtendo 58 dados (1961-2018) para cada microrregião.
- Cálculo da média anual por grupo, ou seja, para cada grupo obtido pelo método hierárquico foram obtidos médias simples das máximas temperaturas máximas do ar
- Aplicação do teste de Mann-Kendall para cada grupo selecionado.

De acordo com Lima (2020), as equações que regem a análise estatística do Teste de Mann-Kendall são dadas por:

$$S = \sum_{t=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (1)$$

em que S é o total de contagens de  $(X_j - X_i)$ ; partindo de  $X_j$  e indo até  $X_i$ ; onde n corresponde ao número de dados totais. Ainda, para cada par de dados, isto é,  $(X_j - X_i)$  são atribuídos um sinal pela equação:

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Ademais, as experiências mostram que dada uma série temporal extensa, com elevado número de observações n, a distribuição de probabilidade S converge para uma distribuição normal, com média igual a zero (FERNANDES et al., 2022). A variância é dada por:

$$\text{Var}[s] = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n ti(ti-1)(2ti+5)}{18} \quad (3)$$

Em que,  $ti$  representa a quantidade de dados iguais dentro de um grupo qualquer, n é o número de grupos contendo valores equivalentes na série de dados i. Conforme Fernandes et al. (2022), o valor da estatística do teste de Mann-Kendall é dado pelo parâmetro  $Z_{MK}$ , calculado pela equação:

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{s - 1}{\sqrt{\text{Var}[s]}} & \text{if } S > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$sgn(X_j - X_i) = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{Var[s]}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{Var[s]}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Dessa forma, para hipóteses alternativas temos que valores de  $Z$  positivo é apontado tendência ascendente na série, enquanto que valores de  $Z$  negativo caracterizam declínio na tendência da série. A hipótese nula,  $H_0$ , rejeita a curva de tendência por não apresentar significância estatística, ou seja, a série apresenta um comportamento constante ou pouco destoa ao longo do tempo. Como aponta Lima (2020), a hipótese é rejeitada sempre que  $|Z| > Z_{\alpha/2}$ , onde,  $\alpha$  é o nível de significância. Para um nível de significância de 5% se valor-p for inferior rejeita-se a hipótese nula. Sendo assim, o valor crítico de  $Z$  para  $Z_{\alpha/2}$  é igual a 1.96.

### 1.1.2 Teste de Pettitt

De modo análogo a organização dos dados de temperatura máxima do ar e as etapas para aplicação do teste de Mann-kendall para cada grupo homogêneo aplicou-se por meio de uma rotina em ambiente R o teste de Pettitt.

Em princípio, o teste de homogeneidade de Pettitt (PETTITT, 1979) faz uso de uma versão do teste não-paramétrico de Mann-Kendall a fim de realizar a contagem a partir de duas amostras  $X_1, \dots, X_t$  e  $X_{t+1}, \dots, X_T$  pertencentes a mesma população, ou seja, possuem correlação. Ao passo que a estatística  $U_{t,T}$  é a contagem de vezes que a primeira amostra é maior que a segunda, obtida pela seguinte equação:

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + \sum_{j=1}^T sgn(X_t - X_j) \quad ; \text{ Para } t = 2, \dots, T \quad (6)$$

Em que  $sgn(x)=1$  para  $X>0$ ;  $sgn(x)=0$  para  $X=0$ ;  $sgn(x)=-1$  para  $X<0$ .

A estatística  $U_{t,T}$  é calculada para  $1 \leq t \leq T$ . E a estatística  $K(t)$  do teste de Pettitt é dada pelo valor máximo absoluto de  $U_{t,T}$ . Ou seja:

$$K(t) = \text{Max}_{1 \leq t \leq T} |U_{t,T}| \quad (7)$$

Conforme Assis (2014), essa estatística localiza o ponto de ocorrência de mudança brusca na média de uma dada série temporal. De modo que sua significância aproximada pode ser aferida pela fórmula a seguir:

$$P \cong 2 \exp \left\{ \frac{-6k(t^2)}{T^3 + T^2} \right\} \quad (8)$$

Assim, para um nível de significância  $\alpha = 0,05$  as hipóteses são:  $H_0$  os dados são homogêneos;  $H_1$  há mudança na série sendo negativa caso o p-valor for menor que o nível de significância, rejeita-se  $H_0$ .

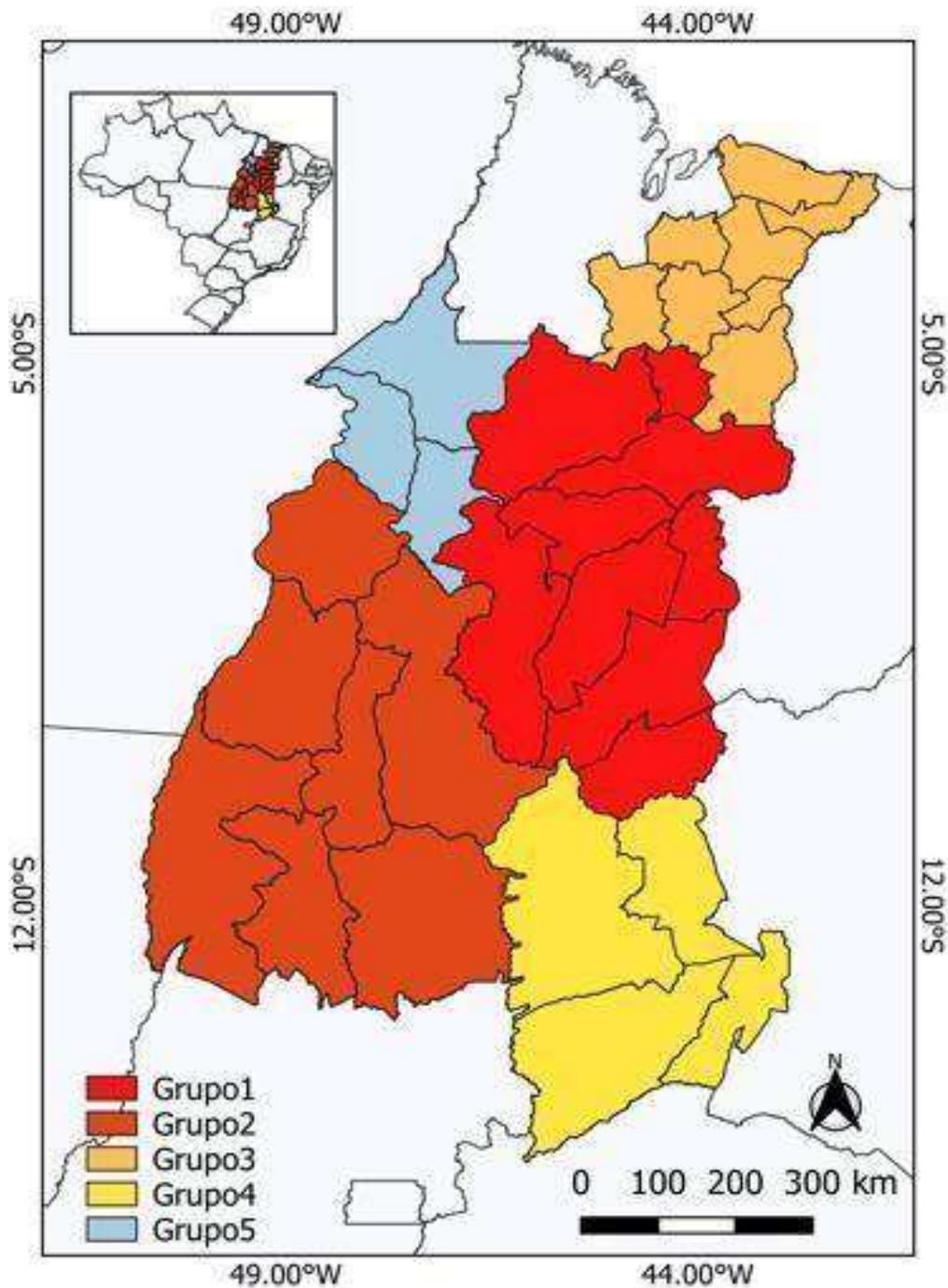
### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A análise de agrupamento pelo método de WARD (1963) é comumente empregada para obtenção de grupos hierárquicos com menor variância dentro do espaço de dados inicial, o teste de dissimilaridade utiliza a distância euclidiana para geração das classes. Como resultado da aplicação da metodologia supracitada no software ambiente livre R Studio por uso da ferramenta Agglomerative hierarchical clustering (AHC) a região de MATOPIBA, com área total de 73.173.544.68 hectares e subdivida pelo IBGE em 31 microrregiões geográficas, foi dividida em cinco grupos homogêneos (Figura 4) a partir da variável climática temperatura máxima de ar para o período de 1961-2018.

Para as disposições espaciais obtidas pelo método, o grupo 1 (G1) é composto por 9 microrregiões, sendo 4 delas localizadas no estado do Maranhão em sua porção Centro-Sul (Alto Mearim e Grajaú, Chapada do Alto Itapecururu, Gerais de Balsas e Presidente Dutra), as outras 5 pertencentes ao estado do Piauí na região sudoeste (Alto Médio Gurguéia, Bertolândia, Chapadas das Mangabeiras, Chapadas do Extremo Sul Piauiense e Alto Parnaíba Piauiense). O grupo 1 abrange 27,9% o equivalente a 20.390.245.0 hectares, ocupando em relação ao MATOPIBA sua porção leste.

O grupo 2 (G2) é formado por 7 microrregiões localizadas no estado do Tocantins (Araguaína, Dianópolis, Gurupi, Jalapão, Miracema do Tocantins, Porto Nacional e Rio Formoso), possuindo a maior área percentual gerada pelos grupos sendo 35,8% o equivalente a 26.195.236.5 hectares ocupando a porção sudoeste da região do MATOPIBA.

O grupo 3 (G3) é composto por 8 microrregiões (Baixo Parnaíba Maranhense, Caxias, Chapadinha, Codó, Coelho Neto, Itapecuru Mirim, Lençóis Maranhenses e Médio Mearim) todas localizadas no estado do Maranhão, responsável por 10,2% o que equivale a 7.449.593.8 hectares. O grupo 4 (G4) é formado por todas as microrregiões que compõe o estado da Bahia, com relação ao estado baiano as microrregiões estão dispostas na porção oeste, sendo apenas 4 (Santa Maria da Vitória, Cotegipe, Bom Jesus da Lapa e Barreiras) compondo 18,1% o equivalente a 13.214.499.0 de hectares e representando a localização sul e sudeste do MATOPIBA. Por fim, o grupo 5 (G5) é composto por 3 microrregiões, 2 localizadas no estado do Maranhão (Porto Franco e Imperatriz) e 1 no Tocantins (Bico do Papagaio) o grupo completa o percentual final com 8,1% o que equivale a 5.923.970.3 hectares e sua espacialização em relação a região é disposta na sua porção Noroeste.



**Figura 3.** Distribuição espacial das áreas homogêneas do MATOPIBA para temperatura máxima do ar no período 1961-2018.

Em relação aos registros máximos mensais verificados por grupo a partir das microrregiões formadas para o período têm-se: Chapada do Extremo Sul Piauiense (G1) em 1998 apresenta média mensal máxima de temperatura máxima de 36,7°C; a microrregião Rio Formoso (G2) em 2015 registrou 36,5°C; Médio Mearim (G3) registrou

no ano de 2016 a temperatura máxima de 36,6°C; Cotegipe (G4) registrou em 2018 36,5°C; e por fim Porto Franco (G5) registrou 35,8°C em 2018.

Em contraponto, para registros mínimos de temperatura máxima do ar no período de estudo temos: Chapada do Alto Itapecuru (G1) registrando em 1971 31,9°C; Porto Nacional (G2) registrou em 1971 30,1°C; Baixo Parnaíba Maranhense (G3) registrou a menor temperatura máxima de ar 32,6°C em 1971; Santa Maria da Vitória (G4) em 1971 registrando 29,9°C; e Imperatriz (G5) 31,5°C.

De posse da classificação dos grupos de áreas homogêneas a etapa seguinte consistiu em reunir os valores máximos mensais de temperatura máxima de ar por microrregião e a partir dos grupos obtidos realizar a média da temperatura máxima para cada ano durante o período de 1961-2018. Realizado esta etapa a série foi submetida a aplicação dos testes não paramétricos de Mann-Kendall e o teste de Pettitt com o fito de observar se ao longo do período a variável de análise – Temperatura máxima de ar – apresenta tendência, ou seja, se há variância significativa que permita afirmar que há acréscimo de temperatura, perca ou estacionariedade no espaço e no tempo.

As hipóteses de ambos os testes estão divididas em  $H_0$ , ou seja, a hipótese é nula, significa que ao longo do tempo a variável de análise não apresenta alguma variação estatística significativa dizemos assim que ela é estacionaria ou homogênea. A outra hipótese é a alternativa ( $H_1$ ), significa que a análise estatística indica a ocorrência de variação significativa ao longo da série podendo ocorrer o acréscimo ou decréscimo diz-se assim para ocorrência de tendência positiva e negativa respectivamente.

O teste de Mann-Kendall bem como, o teste de Pettitt aplicado aos grupos homogêneos no período de 1961-2018, ao nível de significância de 0,05 resultaram em valores de extrema significância com p-valor  $< 0,0001$  para ambos os testes (Tabela 1), com isso, a hipótese nula é rejeitada e a alternativa é aceita. Para valores de tau de Kendall's positivos o teste aponta tendência positiva, implicando ao longo do período, na média, aumento da variável climática temperatura máxima de ar nos grupos que compõe a região do MATOPIBA. Como aponta Bezerra et al. (2023) mudanças em estruturas naturais a partir da prática do desmatamento em um dado ecossistema pode contribuir para mudança de clima local.

O teste de Pettitt aponta o momento (t) em que a série sofre uma quebra em sua estrutura, ou seja, o período de tempo que houve uma mudança brusca na média ao longo da série.

**Tabela 1.** Resultados dos testes de Mann-Kendall e de Pettitt aplicados aos grupos homogêneos.

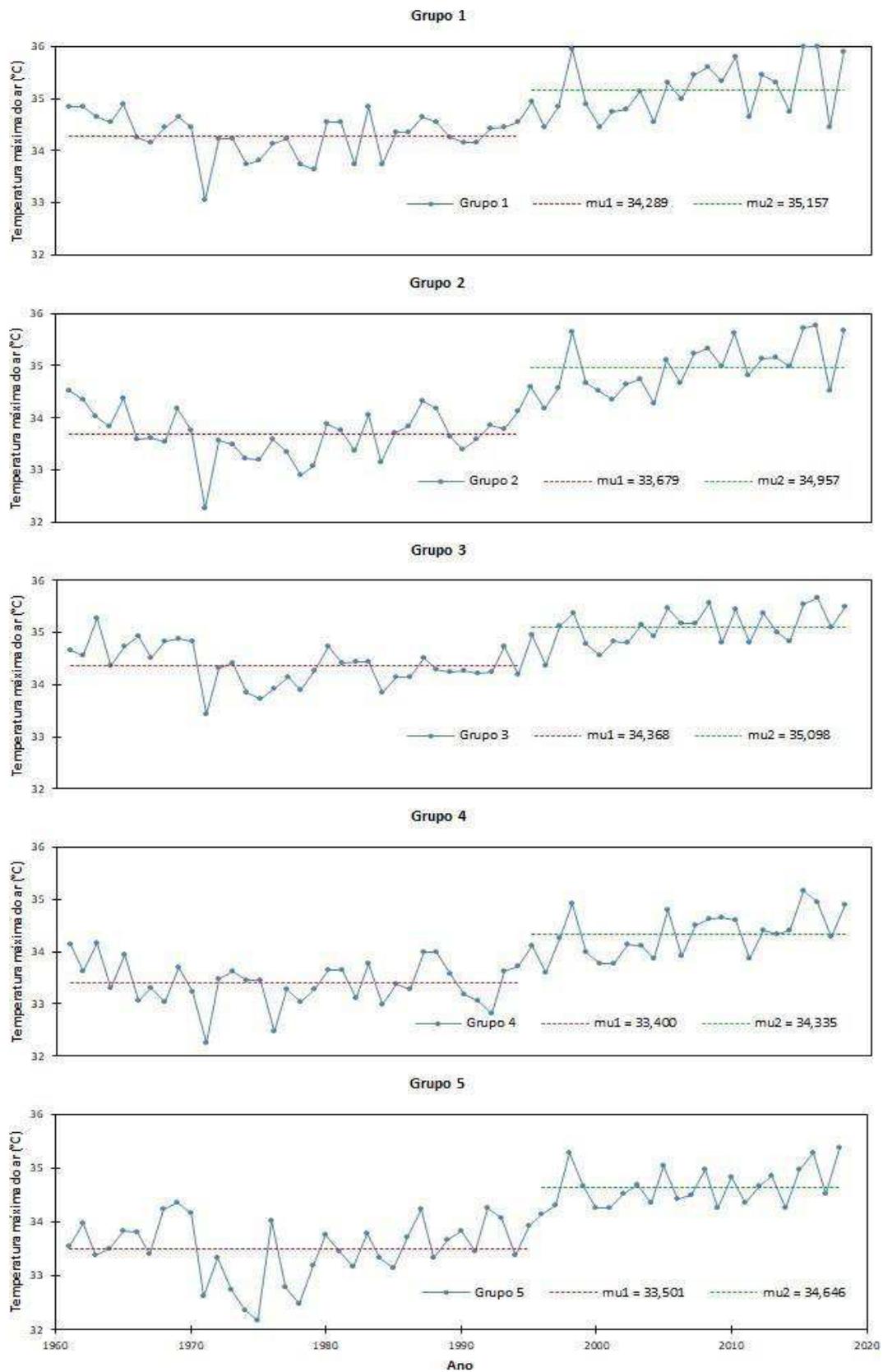
Grupos	Mann-Kendall		Pettitt				
	p-valor	Kendall's tau	p-valor	t	mu1	mu2	diferença
Grupo 1	< 0,0001	0.42	< 0,0001	1994	34.29	35.16	0.87
Grupo 2	< 0,0001	0.53	< 0,0001	1994	33.68	34.96	1.28
Grupo 3	< 0,0001	0.39	< 0,0001	1994	34.37	35.10	0.73
Grupo 4	< 0,0001	0.47	< 0,0001	1994	33.40	34.34	0.94
Grupo 5	< 0,0001	0.54	< 0,0001	1995	33.50	34.65	1.15

Fonte: Autor (2023).

A espacialização da série por grupo aponta o ponto de ruptura (Figura 5) bem como as médias antes da quebra e após,  $\mu_1$  e  $\mu_2$  respectivamente, presentes no período de análise. Coincidentemente, para os grupos G1, G2, G3 e G4 a quebra ocorreu em 1994 já o G5 sofre essa variação significativa no ano seguinte, sendo os grupos G2 e G5 os grupos com maiores gradientes de temperatura na média ( $\mu_2 - \mu_1$ ).

É possível observar que a partir do ponto de quebra as séries passam a experimentar incrementos significativos na magnitude média da temperatura máxima do ar superiores a  $1^\circ\text{C}$  a partir do ano 1994 a exemplo do grupo 2 com  $1,28^\circ\text{C}$  maior a partir de 1994 e o grupo 5 com  $1,15^\circ\text{C}$  a partir de 1995. Sendo os grupos 1 e 3 os que possuem médias a partir do ponto de quebra com maiores magnitudes  $35,16^\circ\text{C}$  e  $35,1^\circ\text{C}$ , os quais ocupam as porções Leste e Nordeste do MATOPIBA formadas por microrregiões dos estados do Maranhão e do Piauí.

No G1 o maior valor de temperatura máxima de ar ocorre em 1998 na microrregião Chapadas do Extremo Sul Piauiense no ano de 1998 com temperatura máxima de  $36,7^\circ\text{C}$ , já ao avaliar o grupo homogêneo o valor máximo ocorre em 2016 com registro médio de  $36^\circ\text{C}$  e mínimo de  $33^\circ\text{C}$  em 1971. Já o G3 apresentou temperatura máxima de  $35,67^\circ\text{C}$  em 2018, o último ano da série evidenciando que no tempo recente a região do Maranhão vivencia os maiores registros observados, ocorrendo o mínimo em 1961 com  $33,4^\circ\text{C}$  o que corrobora com os resultados apontados pelos testes para tendências positivas nesta região.



**Figura 4.** Variabilidade temporal da temperatura máxima de ar e pontos de quebra na série pelo método de Pettitt para os grupos homogêneos 1,2,3,4 e 5 no período de 1961-2018.

Ainda a respeito dos pontos de quebra estrutural na série 1961-2018 da aplicação teste de Pettitt para cada grupo analisado (Figura 4) obtendo tendências positivas para aumento da temperatura máxima do ar na região, outros estudos como o apresentado por Reis (2020) identificou tendências para aumento de temperatura máxima de ar em escala mensal e anual na série de 1980 a 2013, ela aplicou o teste Climdex na detecção de índices extremos e os resultados obtidos apresentaram tendências crescentes significativas para toda a região do MATOPIBA para os índices TXx (Temperatura máxima diária), TNx (Temperatura mínima diária) e TX90p (Temperatura máxima acima do percentil 90° para dias quentes), ressaltando que o índice TX10p (dias frios) vem apresentando reduções em sua duração nos clusters observados na referida pesquisa.

Como apontado por Pires et al. (2016), do ponto de vista agroclimático alterações na magnitude de temperatura de ar ao longo do período podem acarretar em reduções na produtividade das culturas produzidas, em especial na soja, como demonstrou seus ensaios.

Já para as aplicações em escala sazonal chuvosa e seca os resultados observados por Reis (2020), foram integralmente uniformes para tendências positivas de temperatura do ar na região. De acordo com a autora, o aumento dos níveis de temperatura no MATOPIBA expõe as cultivares da região, em especial a produção da soja impactando assim não só o meio ambiente e a qualidade de vida da população, mas sim a própria economia resultante da cadeia produtiva local (SALVADOR e BRITO, 2017; REIS, 2020).

Siqueira et al. (2024) realizaram análises de índices climáticos extremos na região do MATOPIBA por meio do RCLimdex para uma série temporal de 1950-2004 e os resultados obtidos pelos autores indicam aumentos de temperatura máxima diária e de mínima com boa representatividade, com destaque para as microrregiões localizadas no estado do Maranhão e do Tocantins.

Ademais, os resultados de tendência obtidos nos testes de Mann-kendall e de Pettitt convergem com os apresentados por outros autores, seja na região do MATOPIBA ou na região Nordeste do Brasil. Como analisadas por Santos et al. (2020) para obtenção de índices extremos de clima através do software RCLimdex para o estado do Maranhão no período de 1986 a 2016 obtendo aumento de dias e noites quentes estatisticamente significativos corroborando assim para os resultados obtidos no presente estudo.

Por fim, fica evidente que a região apresenta um aumento progressivo na média da temperatura do ar e que essa variabilidade no clima acarretará em diversas implicações seja sócias, ambientais e econômicas.

#### **4. CONCLUSÕES**

A partir do agrupamento de áreas homogêneas foi possível identificar as microrregiões do MATOPIBA com significância estatística para formação de grupos homogêneos bem como apresentar os Grupo 1 (G1) e Grupo 3 (G3) formados pelas microrregiões com maiores elevações nas médias de temperaturas máximas de ar na região do MATOPIBA para o período de 1961 a 2018. A análise de tendência realizada no estudo a partir do testes não paramétricos de Mann-kendall e do teste de Pettitt convergiram apontando que a variável temperatura máxima do ar nas microrregiões do MATOPIBA apresentaram extrema significância  $p\text{-valor} < 0,0001$  para ambos os testes além disso, observa-se através do ponto de quebra da série para os grupos incrementos superiores a  $1^{\circ}\text{C}$  a partir do ano de 1994, sendo os grupos 1 e 3 os com maiores médias após a quebra sendo  $35,1^{\circ}\text{C}$  e  $35,1^{\circ}\text{C}$  com espacialização Leste e Nordeste da região do MATOPIBA formadas pelos estados do Maranhão e do Piauí.

## 5. REFERÊNCIAS

- AHMAD, A. U.; STARKEY. A. Application of feature selection methods for automated clustering analysis: a review on synthetic datasets. **Neural Computing and Applications**, p. 1-12, 2017.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; de MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G.; 2014. Köppens climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6), 711–728.
- ASSIS, W. T. de. Avaliação do impacto do uso de água para irrigação na Bacia Hidrográfica do Alto rio das Mortes. 2014. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), Universidade Federal De Mato Grosso, Cuiabá, 2014.
- BEM, J. S.; GIACOMINI, N. M. R.; WAISMANN, M. Utilização da técnica da análise de Clusters ao Emprego da Indústria Criativa entre 2000 e 2010: Estudo da Região do Consinos, RS. *Interações, Campo Grande*, v. 16, n. 1, p. 27-41, 2015.
- BEZERRA, A. P. et al. Modelagem preditiva da precipitação para análise das inundações e suas consequências no município de Natal-RN. **Revista Geama- Ciências Ambientais e Biotecnologia**, 9(1):p. 29-41, 2023.
- BOLFE, E.L., Victória, D.C., Contini, E., BaymaSilva, G., Spinelli-Araujo, L., Gomes, D., 2016. Matopiba em crescimento agrícola Aspectos territoriais e Socioeconômicos. *Revista Política Agrícola* 25, 4. Disponível: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1202/1025>. Acesso: 10 de janeiro de 2024.
- CONAMA, **Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986**, do Conselho Nacional de Meio Ambiente-CONAMA; “Dispõe sobre as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação de Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente”; publicada no Diário Oficial da União no em 23/01/1986; Brasília, DF.
- DONI, M. V. **Análise de Cluster: Métodos Hierárquicos e de Particionamento**. 2004. (Trabalho de Conclusão de Curso em Bacharel em Ciências de Informação – Faculdade de Computação e Informática), Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2004.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Visão 2030. **O futuro da Agricultura Brasileira**. Brasília, DF. 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+->

+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829?version=1.1>. Acesso: 30 de agosto de 2022.

- FERNANDES, A. C. G. et al. O uso do teste de mann-kendall para detecção de tendência da precipitação em região semiárida pernambucana. *Research, Society and Development*. 2022.
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24, doi:10.1017/9781009157940.001.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 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.
- KENDALL, M. G. Rank correlation measures. **Charles Griffin**: London, U.K, p. 220, 1975.
- LIMA, S. L. de. Análise de secas no estado do Rio Grande do Norte baseado em índice climático. 2020. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.
- MAGALHÃES, L.A., MIRANDA, E.E., 2014. MATOPIBA: Quadro Natural. Nota técnica 5. EMBRAPA. Available at: Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE).Disponível:[https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT5\\_Matopiba\\_Quadro\\_Natural.pdf](https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT5_Matopiba_Quadro_Natural.pdf). Acesso: 20 janeiro. 2024.
- MANN, H. B. *Econometrica*. **The econometric society**, v.13, n.3, 245-259, 1945.
- METZ, J.; MONARD, M. C. Clustering Hierárquico: uma metodologia para auxiliar na interpretação dos Clusters. **Universidade de São Paulo**. São Carlos, SP. 2005.

- NOBRE, C. P. C de. A influência da expansão agrícola nas mudanças climáticas na região de MATOPIBA. 2017. 28f., il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) -**Universidade de Brasília**, Brasília, 2017.
- NÓBREGA, R. S.; FARIAS, R.F.L. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 30(2): p.171-180, 2015.
- OLIVEIRA, L. N de.; AQUINO, C. M. S de. Dinâmica Temporal do uso e cobertura da Terra na Fronteira Agrícola do MATOPIBA: análise na sub-bacia hidrográfica do rio Gurguéia-Piauí. **Revista Equador**. Universidade Federal do Piauí. v.9, n.1: p. 317-333, 2020.
- PEREIRA, C. N. et al. Aspectos Socioeconômicos da Região de MATOPIBA. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental** – IPEA. Campinas, SP, jan./jun. 2018.
- PIRES, G. F.; ABRAHÃO, G.M; BRUMATTI, L. M.; OLIVEIRA, L.J.C.; et al.(2016). Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: implications for land use in Northern Brazil. **Agricultura land Forest Meteorology**, 228(229), 286-298.
- RIAHI, K., GRUBLER, A., & NAKICENOVIC, N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 887-935.
- SALVADOR, M. A., BRITO, J. I. B. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2179-5>.
- SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Trends analysis of precipitation and temperature data in Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64–73, 2016.
- SANTOS, J.R.N.; ARAÚJO, M.L.S. et al. Tendências de extremos climáticos na região de transição Amazônia – Cerrado no estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.16, n. 26, p. 130-154, 2020.
- SIQUEIRA, M da. S de.; SILVA, M. T.; et al. Índices climáticos extremos de precipitação pluvial e temperatura do ar na região do MATOPIBA-Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.17, n.1 (2024) 446-464.
- SOUZA, A. de. et al. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO DA PRECIPITAÇÃO E DA TEMPERATURA NO MATO GROSSO DO SUL. **ACTA Geográfica**, Boa vista. V.6, n.12, p. 109-124. 2012.

VAN DER WALT, Adriaan J.; FITCHETT, Jennifer M.. Statistical classification of South African seasonal divisions on the basis of daily temperature data. **S. Afr. j. sci.**, Pretoria , v. 116, n. 9-10, p. 1-15, Oct. 2020.

WARD, J. H.; Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistical Association*, v. 58, p. 236-244, 1963.

### CAPÍTULO 3

## PROJEÇÕES DA TEMPERATURA MÁXIMA DO AR NA REGIÃO DO MATOPIBA A PARTIR DO CMIP6

### RESUMO

Impactos no meio ambiente em decorrência de alterações na variabilidade climática são cada vez mais presentes em todas as regiões do planeta. No Brasil estudos indicam que a região agrícola MATOPIBA (majoritariamente inserida em áreas do cerrado brasileiro, compreendendo porções dos estados Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) apresenta tendência positiva para aumento da temperatura do ar em diferentes microrregiões as quais a compõe. O estudo presente analisa a partir de modelos derivados do CMIP6 os cenários futuros para concentrações SSP2-4.5 e SSP5-8.5 ao longo das faixas tempo 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 de temperatura máxima de ar para o recente complexo agrícola brasileiro MATOPIBA com o objetivo de apresentar as projeções dos modelos para a região e comparar a variabilidade espaço temporal do histórico com os cenários de tempo e concentração utilizados. O Banco de dados utilizado nas projeções dos modelos climáticos pertence ao WorldClim – Global Climate Data. Para o ensemble foram escolhidos 7 modelos climáticos globais (BCC-CSM-MR, CanESM5, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L e MIROC6), ademais para a série histórica (1961-2018) foram utilizados dados de reanálises do CRU-TS-4.03. Os resultados obtidos indicam que a região passará a observar aumentos progressivos em sua temperatura máxima de ar, as médias obtidas pelos modelos indicam acréscimos de 1,2°C (2021-2040) para o futuro próximo, até 3°C para o futuro distante (2080-2100) para ao cenário de concentração SSP2-4.5 tido como otimista, no entanto a disparidade observada na projeção pessimista SSP5-8.5 indica um aumento de até 5,9°C para a região no futuro distante (2080-2100) e 1,3°C no futuro próximo. Observou-se que 5 dos modelos empregados apresentaram similaridade na sazonalidade da temperatura do conjunto, enquanto que o modelo CanESM5 apresenta maiores médias em suas magnitudes, já o IPSL-CM6A-LR é o que mais subestima o ensemble. Por fim, independentemente do cenário de concentração as projeções indicam que a região irá na média apresentar aumentos de temperatura máxima de ar.

**Palavras-chave:** Temperatura Máxima. Mudanças Climáticas. CMIP6. Modelos Climáticos Globais.

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Sánchez (2020), impacto ambiental é caracterizado como uma alteração da qualidade dos parâmetros ambientais, esta inicia por processos naturais ou mesmo antrópicos. As mudanças atingem propriedades físicas, químicas e ou biológicas, podendo serem temporárias ou permanentes, ainda podem gerar danos de pequena, média ou grande escala, atingem a flora, fauna, segurança alimentar e a própria qualidade de vida da população global.

Como aponta Matos (2006), o início da emissão massiva dos gases poluentes na atmosfera pode ser responsável por acelerar o processo físico-químico denominado efeito estufa, esse um dos principais responsáveis por desencadear as mudanças climáticas em escala global. Com o advento da globalização e a expansão dos centros urbanos houve um aumento exponencial do crescimento populacional a partir do século XVIII demandando da atmosfera uma alta taxa de consumo de energia.

A latente demanda por insumos agrícolas para suprir a demanda de consumo alimentício impulsionou a produção de grãos no mundo todo. Com o crescimento do setor agrícola a busca por terras agricultáveis, disponibilidade hídrica e com taxas de retorno de investimento competitivos torna o setor cada vez mais tecnológico (USDA, 2017).

Reis (2020), apresenta que o Brasil hoje ocupa o 2º lugar na produção de grãos no mundo, sendo a 1º na produção de soja de acordo com dados apresentados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), para ilustração em 2019 o país produziu 240,65 milhões de toneladas da cultura.

Na região Nordeste do Brasil o complexo agrícola denominado MATOPIBA, expressão originada pelo acrônimo das iniciais dos estados que o compõe, sendo eles Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia é hoje responsável pela produção de 10% de toda produção de soja no país (EMBRAPA, 2018). Essa nova fronteira agrícola possui em sua composição 336 municípios, tendo o bioma Cerrado como principal ecossistema natural. Ressalta-se que a região vem sofrendo alterações em distintas áreas, tais como a econômica, social e a ambiental em função da expansão agrícola vivenciada na região (PEREIRA et al., 2018).

Para ilustração diferentes autores apontam modificações geoclimáticas experimentadas na região do MATOPIBA (REIS, 2020; SALVADOR e BRITO, 2017). Oliveira e Aquino (2020) revelam redução de 31,76% da vegetação nativa presente na

bacia hidrográfica do rio Gurguéia, bacia que integra a região, entre os anos de 1987 a 2017, ao passo do aumento de 31,07% de áreas agrícolas nesta bacia. Tornando-se evidente que a região passa por modificações em sua estrutura física pelo uso e manejo do solo. Salienta-se que o desmatamento acarreta em erosão do solo, assoreamento de leitos e lençõs freáticos, alterando inclusive a vazão hídrica da bacia podendo impactar toda a biota presente no ecossistema local bem como a sustentabilidade dos recursos naturais disponíveis para a população adjacente.

França et al. (2018) analisaram a mudança de cobertura vegetal na bacia hidrográfica do rio Uruçuí-Preto, que fica localizada no estado do Piauí e integra a região de pesquisa e verificaram que entre os anos 1984 a 2015 a bacia apresentou perda de 45% de sua vegetação densa.

Reis (2020), realizou o agrupamento de áreas homogêneas em MATOPIBA com o objetivo de identificar e apontar as áreas mais suscetíveis a riscos agroclimáticos. A autora analisou o período entre 1980 a 2013 e os cluster gerados apontam para alterações no padrão do clima local, ocorrendo mudança de sazonalidade e aumento do período seco.

Salvador e Brito (2017), por meio da aplicação estatística dos testes de Kendall-Tau e da regressão linear em uma série temporal obtiveram tendências positivas para temperatura máxima e mínima do ar entre os anos de 1970 a 2012. Os resultados apresentados sugerem que ocorreu um aumento da frequência de dias quentes o que para os autores possui relação com o avanço do agronegócio e as implicações no uso e manejo do solo e recursos naturais presentes na área.

Em face da importância dos estudos de variabilidade do clima para identificação do padrão de sazonalidade de uma região, de mudanças climáticas locais com impacto direto na qualidade de vida da população e em direcionamento de investimentos financeiros fica evidente a importância de produzir pesquisas capazes de auxiliar os gestores em suas ações de curto, médio e longo prazo.

O uso de modelos climáticos para simulações de dados do clima futuro vem tornando-se comum, ressalta-se que os cenários se tratam de aproximações e contam com diferentes dados de entrada podendo assim apresentar taxas de incertezas sendo natural diferenças em metodologias empregadas na utilização dos modelos climáticos. O IPCC, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, é uma importante organização política científica e socioeconômica responsável por apresentar diferentes contribuições com foco em projetar, compreender e alertar sobre os principais riscos associados as mudanças climáticas podem acarretar ao planeta Terra (MARENGO e SOARES, 2003).

Andrade (2018) explica que mudanças climáticas representa uma variação com significância estatística na média do clima e em sua variabilidade, sendo necessário que esta ocorra em um horizonte de tempo capaz de representar o clima. Mas também, conforme a Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC) a mudança climática ocorre por uma alteração na composição da atmosfera produzida por forçantes externas desde que cause variabilidade além do observado com recortes de tempos diferentes. O IPCC (2021) entende que as mudanças climáticas são variações de clima de alto impacto desencadeadas pela ação humana.

Com o fito de simular as mudanças climáticas no globo, diferentes centros de pesquisa no mundo todo realizam projeções das alterações climáticas a partir de diferentes modelos, dados de entrada e diferentes estímulos são implementados nas projeções em disponibilidade. Igualmente o IPCC que produz conhecimento científico em seus grupos de trabalho e utiliza as projeções de cenários futuros reunidas pelo Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) para avaliar os impactos que as mudanças climáticas podem acarretar em diferentes simulações de desenvolvimento e consciência planetária para emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2021).

Em seu 6º relatório o IPCC considera cinco cenários de emissões bem como as possíveis implicações para aumento da temperatura e as mudanças do clima desencadeadas a partir dos cenários. As projeções para o século XXI compreendem 3 faixas temporais delimitadas para curto prazo (2021-2040), médio prazo (2041-2060) e longo prazo (2081-2100) possuindo como histórico o período de 1850-1900 (IPCC, 2021).

Portanto, o objetivo do presente estudo é apresentar e investigar a partir das projeções futuras o comportamento da temperatura máxima de ar para o século XXI e comparar os modelos com o período histórico de modo a verificar mudanças na variabilidade espaço temporal e sazonalidade da região.

Como apontado por Chen et al. (2020), o Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) utiliza em sua metodologia narrativas sociais as quais são responsáveis por diferentes níveis de aquecimento no globo na simulação dos modelos climáticos. Gouveia e Marengo (2019), informam que os cenários alternativos utilizam parâmetros como população habitacional, níveis de desenvolvimento, consumo de insumos e emissões dos gases de efeito estufa (GEE), dentre outros, sendo denominados de Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), o objetivo é apresentar os resultados para os quais ocorram cenários positivos e negativos em convergência com a recomendação assinado

no Acordo de Paris o qual foi estabelecido como meta uma taxa de aquecimento para o século xxi entre 2° a 1,5°C.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da área de estudos**

A região de MATOPIBA está inserida preponderantemente na região do semiárido nordestino do Brasil e parte da região Amazônica, compreendendo os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Em virtude da transformação pungente da área impulsionada pela indústria agrícola e o reconhecimento de sua importância econômica para o país, a região passou a ser delimitada por meio de decreto presidencial a partir de 2015, compreendendo 73,1 milhões de hectares, 337 municípios e 31 microrregiões geográficas, 15 delas no estado do Maranhão, 8 no Tocantins, 4 no estado do Piauí e 4 na Bahia (EMBRAPA, 2018).

O recorte do território divide a região em 3 biomas, correspondendo 66,5 milhões de hectares ao bioma de Cerrado, 5,3 milhões de hectares ao bioma Amazônia e 1,2 milhões de hectares a Caatinga. Aproximadamente 33% do MATOPIBA é inserido no estado do Maranhão, 38% no Tocantins, 11% no Piauí e 18% na Bahia (MIRANDA et al., 2014). Possui como principal fonte hídrica para a irrigação, uso industrial e abastecimento populacional as bacias hidrográficas do Rio Tocantins, do Atlântico e do Rio São Francisco (EMBRAPA, 2018).

De acordo com a classificação de Köppen o clima da região é tropical úmido com inverno seco (Aw), apresentando temperaturas médias mensais variando entre 22°C e 28°C ao longo do ano e precipitação média entre 800 a 2000mm ao ano, possuindo 2 estações do ano bem definidas, sendo a estação seca entre os meses de maio a setembro e a estação chuvosa com início no mês de outubro e se estendendo até abril (ALVARES et al., 2014).

Outrossim, a região apresenta topografia plana e a procura do setor agrícola pode ser motivada por um menor valor do hectare comparado a outras regiões do Brasil. Segundo dados da EMBRAPA em 2018 a safra de milho, soja e algodão da região do MATOPIBA correspondeu a 10% de toda produção agrícola brasileira (EMBRAPA, 2018).

## 2.2 Banco de dados

O presente trabalho foi elaborado a partir da consulta de dados climáticos globais disponibilizados no portal [https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6\\_clim30s.html](https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim30s.html) cujo domínio pertence a WorldClim – Global Climate Data. Os dados são originados por diferentes centros de pesquisa no mundo todo que desenvolvem modelos climáticos a partir de diferentes cálculos, em síntese trata-se de uma base de dados climáticos que oferece layers em distintas resoluções e cenários, os dados climáticos mensais são reduzidos do CMIP6 e são disponibilizados em formato geotiff. O conjunto dessas informações utilizadas correspondem a projeções de cenários futuros de tempo e concentração para o século XXI, com resolução de 1 km<sup>2</sup> para dados de temperatura máxima de ar. As faixas de tempo são divididas entre os anos de 2021-2040; 2041-2060; 2061-2080; e 2081-2100. E as faixas de emissões SSP1-2.6 correspondendo a emissões muito baixas de GEE com decaimento constante das taxas de emissões até alcançar condição líquida zero de emissão de CO<sub>2</sub>; SSP2-4.5 corresponde a faixa intermediária das emissões de GEE; SSP3-7.0 e SSP5-8.5 apresentando os cenários mais pessimistas correspondendo a emissões alta e muito altas de GEE (IPCC, 2021).

Além disso, para os dados de referência foram utilizados dados reformatados de reanálises do Climatic Research Unit- CRU-TS-4.0, produzidos pela Unidade de Pesquisa Climática da Universidade de East Anglia, os dados utilizados são séries históricas mensais de temperatura máxima compreendendo o período de tempo de 58 anos, iniciando em janeiro de 1961 até o mês de dezembro de 2018. Com resolução espacial de 0,5° e pontos de grade, as informações climáticas são obtidas por interpolação de ponderação de distância angular (AWD) (FICK; HIJMANS, 2017).

## 2.3 Determinação dos modelos e cenários futuros

A escolha dos modelos climáticos decorreu da disponibilidade dos dados de temperatura máxima de ar que atingisse toda a escala temporal pretendida. A partir do refino na busca pelos dados de temperatura máxima convergiu para a seleção de 7 modelos climáticos (Tabela 2) com representatividade para as 31 microrregiões que integram o MATOPIBA.

O Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado Fase 6 (CMIP6) é um conjunto de modelos e projeções de cenários futuros de clima para o século XXI apresentados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Com isso, traz narrativas de projeções futuras por meio dos denominados Caminhos

Socioeconômicos compartilhados (SSP). As variantes incorporadas ao modelo são causas de crescimento populacional, tecnológico e econômico a consequências de emissões de poluentes atmosféricos resultando em níveis de aquecimento ou acréscimo de temperatura de ar no globo.

**Tabela 2.** Conjunto dos modelos climáticos do CMIP6 utilizados para o ensemble.

Modelo CMIP6	Instituição	País	Resolução
BCC-CSM-MR	Beijing Climate Center China Meteorological Administration (BCC)	China	1,1°x 1,1°
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá	2,8°x 2,8°
CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Météorologiques	França	1,4°x 1,4°
CNRM-ESM2-1	Centre National de Recherches Météorologiques	França	1,4°x 1,4°
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace	França	2,5°x 1,3°
MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japão	2,8°x 2,8°
MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japão	1,4°x 1,4°

**Fonte:** Adaptado a partir de ALMAZROUI, M. et al (2021).

Os Caminhos Compartilhados Socioeconômicos selecionados no estudo são apresentados em quatro narrativas de desenvolvimento antropogênico e os fatores que corroboram para as mudanças climáticas, sendo elas:

- SSP1 - Apresenta a projeção mais otimista em busca da sustentabilidade. Nesta projeção os níveis de emissão de GEE são baixíssimos e decaem até atingir a emissão líquida zero em 2050, e obtendo emissão negativa de CO<sub>2</sub> até o ano de 2100 (SSP1-2.6). Ou seja, é um cenário que propõe limitar o aquecimento global abaixo de 1,5°C no século XXI de modo a ir na direção do Acordo de Paris. Em suma, a gestão global é voltada para o bem-estar humano, os investimentos em educação e saúde são maiores, o consumo material e as desigualdades sociais reduzidas (RIAHI et al. 2017; IPCC, 2021).
- SSP2 - Possui como denominação a expressão “no meio do caminho”, ou seja, as condições sociais, o setor econômico e tecnológico ruma de forma desigual e contínua. A preocupação com o meio ambiente é existente, no entanto os avanços são lentos permanecendo os mesmos desafios do início do século XXI em reduzir as desigualdades sociais e mitigar os impactos ambientais. Em resumo, as emissões de GEE são intermediárias (SSP2- 4.5). Ainda, de acordo com o IPCC (2021), há previsibilidade que

o incremento de temperatura seja superior a 2°C até o fim do século (RIAHI et al. 2017; IPCC, 2021).

- SSP3 - Trata-se de um cenário que representa a sociedade global divergente de interesses sociais comuns e por outro lado, uma busca maior por atingir a segurança nacional, as metas são segurança alimentar e energética. A desigualdade social aumenta no globo, a degradação com o meio aumenta e há pouca preocupação com a emissão de GEE (SSP3-7.0). Ainda, a classificação de emissão dos GEE são altas convergindo para incrementos de temperatura na superfície até o fim do século superiores a 3°C (RIAHI et al. 2017; IPCC, 2021).
- SSP5 - Apresenta a modelagem mais pessimista no tocante a sustentabilidade planetária. O mundo segue na busca por mercados globais competitivos, consumo exacerbados, a inovação tecnológica, educação e saúde são fatores importantes e seguem em desenvolvimento constante. Por outro lado, se investe como principal fonte energética os combustíveis fósseis e uma alta quantidade de energia é demandada para suprir todo esse impulso social e tecnológico vivenciado pela população, culminando em um alto crescimento econômico e graves impactos ao meio ambiente por meio de altas emissões de GEE (SSP5- 8.5), aumento de temperatura e poluição do ar (RIAHI et al. 2017; IPCC, 2021).

- 

## **2.4 Metodologia**

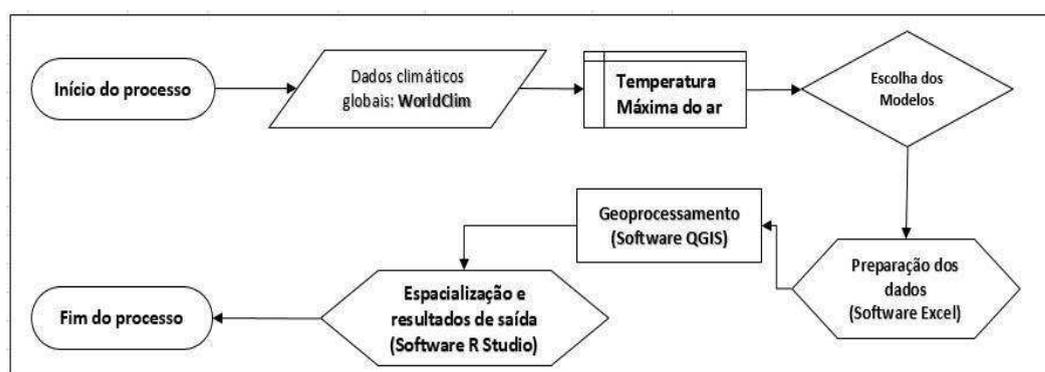
De posse do banco de dados climáticos do WorldClim com as principais projeções correspondentes aos principais centros de pesquisa global em estudos do clima, foram escolhidos 7 modelos (Tabela 2) de acordo com a disponibilidade de informações de temperatura máxima do ar que compreendam todo o período de 2021-2100 para o computo de valores médios dos modelos, ou seja, o ensemble. A importância de assumir diferentes modelos de clima de diferentes centros de pesquisa se dá ao resultado de convergência entre as projeções de cenários futuros e o histórico observado, visto que a média inibe a visualização de valores discrepantes obtidos em projeções e comumente mencionados na literatura como outliers.

Devido os dados primários pertencentes as camadas climáticas corresponderem à uma magnitude espacial superior a área de interesse para a representação do MATOPIBA realizou-se uma interseção a partir dos pontos centrais no software QGIS versão 3.16.5 por meio do complemento point sampling tool permitindo a coleta de amostragem com os dados de temperatura máxima de ar para a região, isto é, a composição da área formada

pelas 31 microrregiões para cada modelo e seu cenário futuro correspondente. Para a interseção entre a camada dos modelos e a área do MATOPIBA utilizou-se como arquivo shapefile o banco de dados do IBGE.

Em seguida, os dados de temperatura máxima de ar para cenários futuros dos 7 modelos foram descarregados e organizados em planilha eletrônica no software excel. A etapa seguinte consistiu na obtenção dos valores médios de todos os janeiros para a distribuição mensal da temperatura máxima do ar no MATOPIBA, onde realizou-se a média das temperaturas mensais para todo o período histórico.

Mais adiante, foi criada de uma rotina no software R de modo a permitir a espacialização dos cenários futuros da região, bem como, a sua climatologia. O fluxograma abaixo resume todo o processo para obtenção da espacialização dos modelos (Figura 5).



**Figura 5.** Resumo gráfico das etapas de espacialização climática.

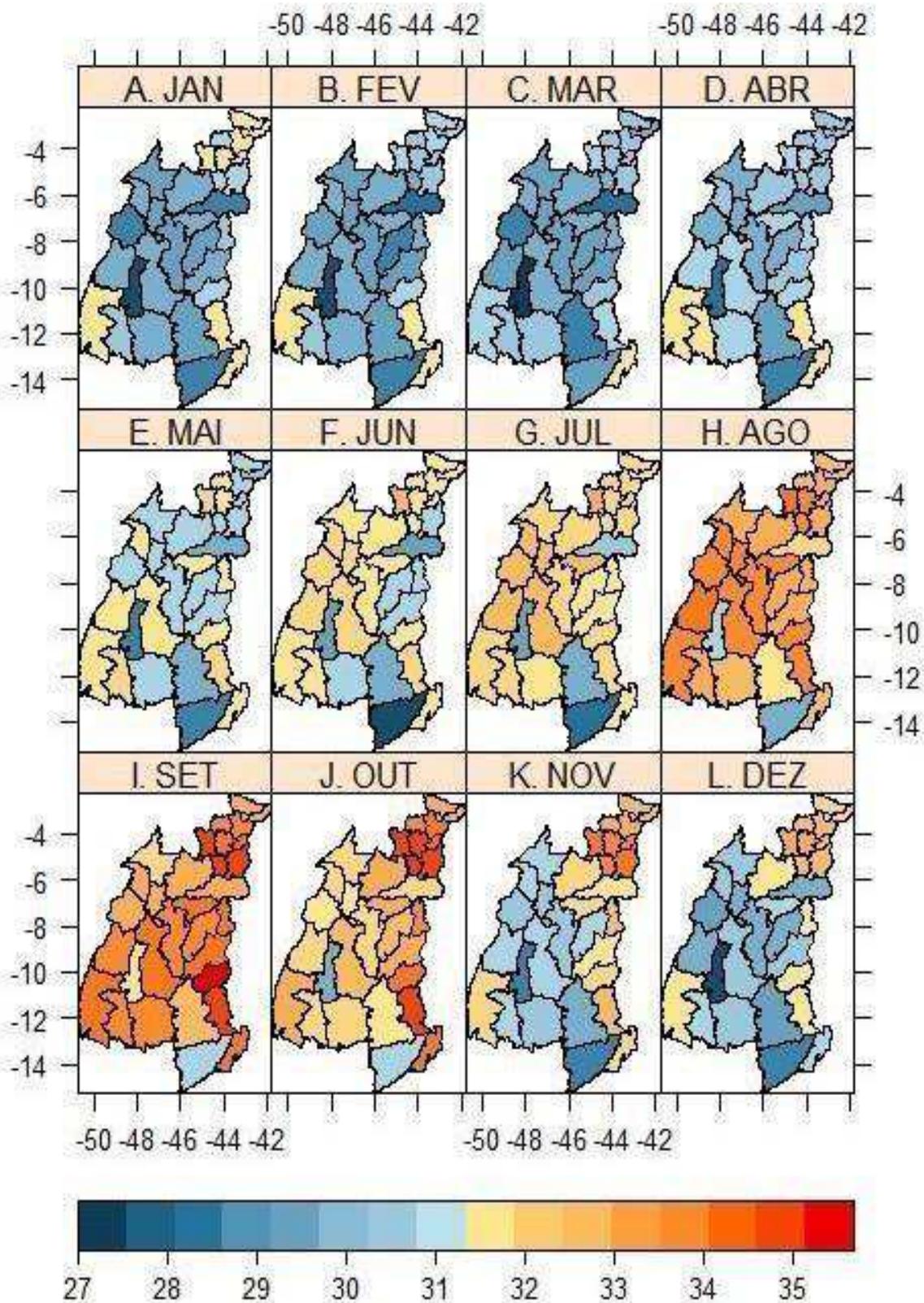
Realizada essa etapa, obteve-se a espacialização da variação espacial e temporal das microrregiões para cenários futuros do MATOPIBA, bem como a partir dos dados do histórico o seu padrão de climatologia.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da Figura 6 foi possível observar a variabilidade climática da região do MATOPIBA para o período histórico de janeiro de 1961 a dezembro de 2018. A variação sazonal apresenta uma divisão bem definida, em escala mensal, com as maiores magnitudes de temperatura máxima do ar entre os meses junho, julho, agosto, setembro e outubro em contraponto os meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio correspondem aos meses com menores magnitudes de temperatura máxima de ar na região.

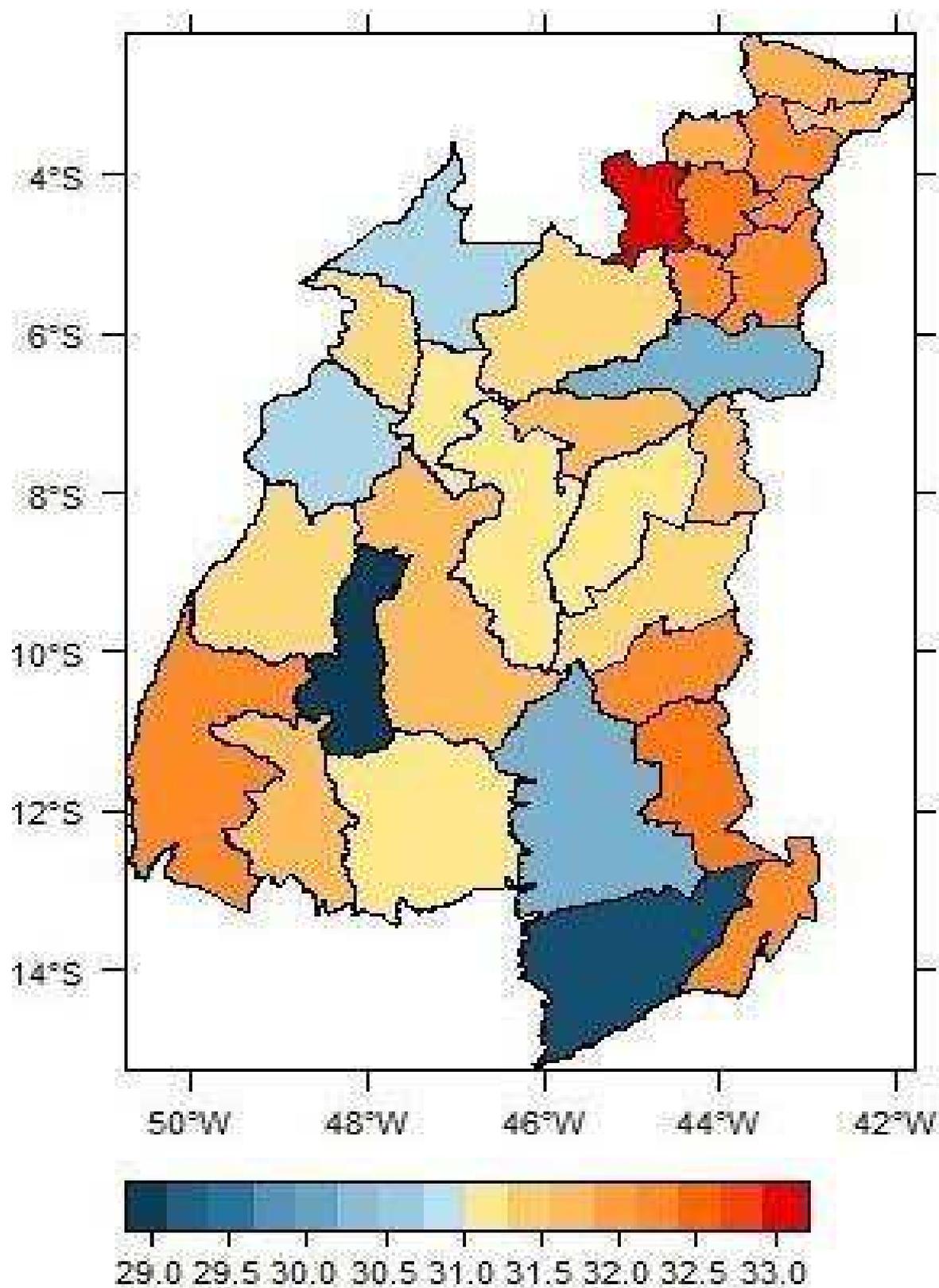
A distribuição da temperatura máxima do ar para o período histórico de 1961-2018 de MATOPIBA (Figura 7) apresenta valores de temperatura máxima do ar entre 30°C e 33.9°C com pico máximo ocorrendo nos meses de agosto e setembro, período de transição entre o fim do inverno e o início da primavera, é importante ressaltar que nessa época do ano (início do equinócio de primavera no Hemisfério Sul) a taxa de radiação solar incidente torna-se mais elevada associada ainda a pouca precipitação e baixa umidade do ar. Em contrapartida, as menores magnitudes de temperatura máxima do ar ocorrem no verão austral, estação que compreende os meses janeiro, fevereiro e março, pode-se atribuir tal comportamento ao intenso regime pluviométrico marcado pela estação chuvosa da área, com alta umidade do ar e elevada atividade formadora de nuvens o que inibe a radiação solar direta, aumenta a difusa e promove a absorção da radiação solar incidente nas nuvens (REIS, 2020). Outrossim, padrões de temperaturas elevadas ao longo de todo o ano como os observados no estudo são característicos de ambientes que sofrem influência de latitudes tropicais convergindo para o padrão climático apresentado a partir das médias anuais observadas.

Conforme Salvador (2014) o MATOPIBA possui duas estações climáticas definidas pelo seu regime pluviométrico, sendo a transição entre a estação chuvosa e a estação seca os meses de maio e junho, o que acaba corroborando com o comportamento observado para o período histórico da variável temperatura máxima de ar.



**Figura 6.** Distribuição espaço temporal mensal da variabilidade climática da Temperatura máxima do ar para as microrregiões do MATOPIBA para o período de janeiro de 1961 a dezembro de 2018. Fonte: Autor (2023).

É certo que as microrregiões do MATOPIBA apresentam distintas variações de temperaturas máximas de ar quando comparado ao todo, a título de exemplo, a microrregião Porto Nacional, localizada no estado do Tocantins, apresentou os valores mais amenos de temperatura máxima de ar nos meses de janeiro, fevereiro e março, com médias variando entre 27.5°C a 27.9°C, outras microrregiões que merecem destaque com valores de temperatura máxima abaixo de 30°C são Chapadas do Alto Itapecuru no Maranhão com temperaturas 28.1°C e 29°C entre os meses de janeiro e março e Santa Maria da Vitória localizada no estado da Bahia com temperatura média de 28°C no mês de junho. Já as microrregiões com valores de temperatura máxima de ar acima de 35°C encontrados ao longo do período histórico são Chapada do Extremo Sul Piauiense localizada no Piauí, Cotegipe no estado da Bahia e Médio Mearim no Maranhão com registros mensais respectivamente de 35.16°C, 35.09°C e 35.07°C todas registradas no mês de setembro. Além disso, acarreta atenção a diferença de aproximadamente 4°C para o período climatológico da região do MATOPIBA entre o mês de fevereiro com média histórica de 30°C em período de verão austral e a média histórica do mês de setembro com 33.9°C.



**Figura 7.** Distribuição espaço temporal anual da temperatura máxima do ar no MATOPIBA para o período de janeiro de 1961 a dezembro de 2018. Fonte: Autor (2023)

A seguir são apresentados, a partir dos modelos de circulação global (GCMs) do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), como resultado as projeções de temperatura máxima de ar para a região do MATOPIBA para o século XXI. As projeções futuras foram calculadas para 4 cenários de tempo: futuro próximo, futuros médios e futuro distante atribuídos respectivamente às faixas 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 e para cada faixa de temporal futura corresponde dois cenários de concentração de emissão dos modelos do CMIP6: SSP2-4.5 caracterizado como emissões globais intermediárias, o qual há uma consciência e preocupação com os níveis de emissividade dos GEE, no entanto, os avanços para reduzir e mitigar os impactos ao meio ambiente são lentos, e a projeção SSP5-8.5 que representa o cenário mais pessimista para as emissões dos GEE frente a sustentabilidade do planeta, a cadeia produtiva global possui como principal fonte energética os combustíveis fósseis e a preocupação do mercado é atender a elevada cadeia de produção e demanda social, aqui o meio ambiente é posto de lado e a atmosfera sofre um maior aquecimento em virtude dessa alta demanda energética desencadeando em maior poluição do ar e aumento de temperatura (IPCC, 2021).

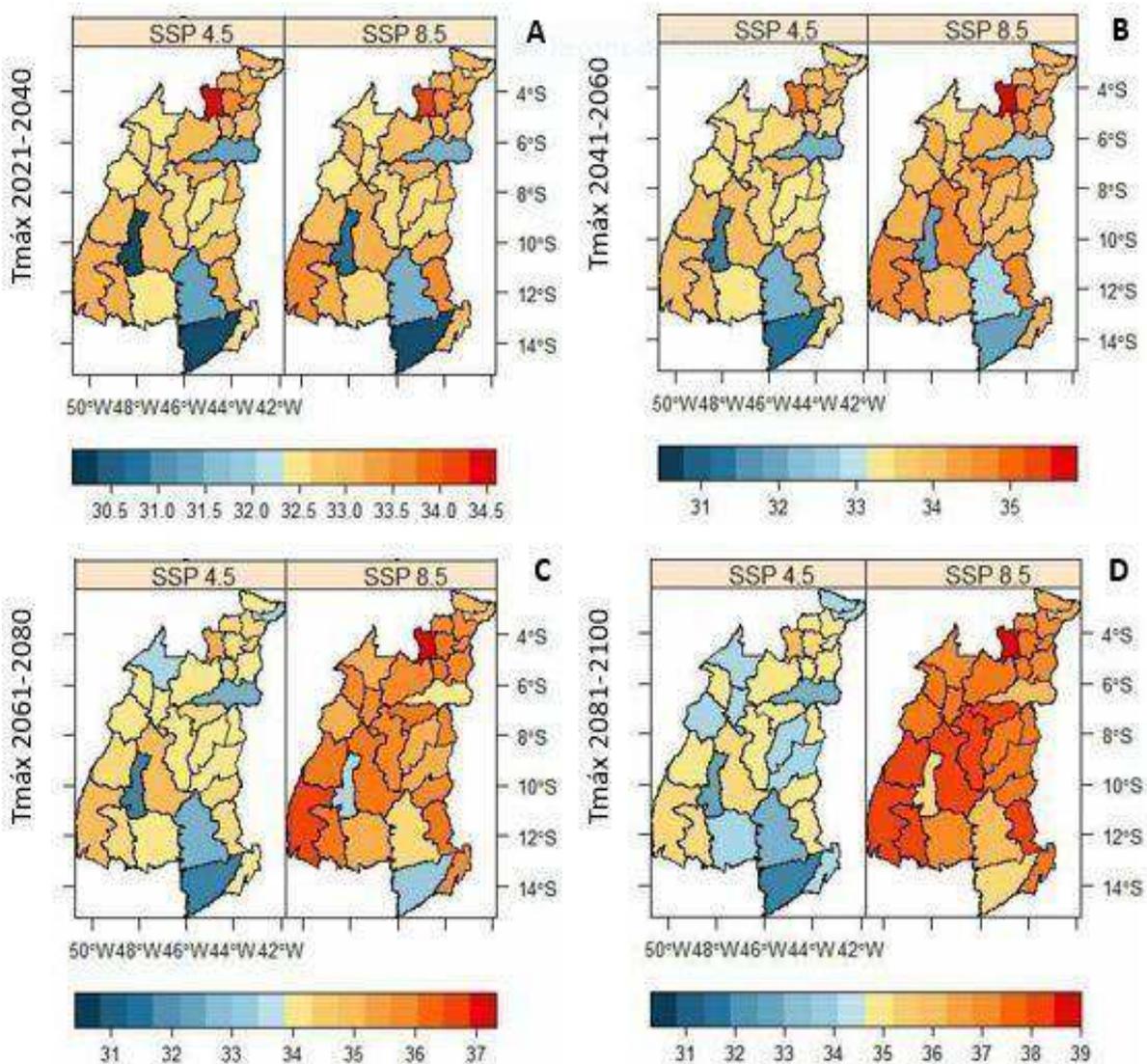
A Figura 8 representa a média anual da temperatura máxima do ar para os 7 modelos climáticos selecionados (BCC-CSM-MR; CanESM5; CNRM-CM6-1; CNRM-ESM2; IPSL-CM6A-LR; MIROC-ES2L; MIROC6) no estudo para avaliar as projeções dos cenários futuros de temperatura máxima de ar para a região do MATOPIBA no século XXI.

Como resultado da análise para o futuro próximo (2021-2040) a média dos modelos (ensemble) para o cenário de emissão SSP2-4.5 apresentaram aumento médio de 1,2°C na temperatura máxima do ar para a região do MATOPIBA em relação à média histórica de 31,7°C do período de referência 1961-2018, ainda, para o cenário de emissão SSP5-8.5 o incremento médio na região foi de 1,3°C, nota-se que na média ambas as projeções de emissão aqui observadas possuem uma elevada taxa de convergência para o aumento da temperatura máxima do ar no futuro próximo, microrregiões como Bom Jesus da Lapa e Cotegipe na Bahia, e Caxias no Maranhão representam as áreas de menor elevação de temperatura são aumentos na média de 0,7 a 0,9 °C para as projeções observadas. Observa-se que a microrregião Médio Mearim no Maranhão é a microrregião com maior magnitude de temperatura no período com 34,3°C para ambas as projeções de emissões, no entanto, os incrementos correspondem a 1,3°C enquanto que outras microrregiões (correspondentes a 43% do MATOPIBA) receberam incrementos

superiores a 1,5°C sendo elas: Bico do Papagaio, Araguaína, Miracema do Tocantins, Gurupi, Porto Nacional e Jalapão No Tocantins, além de Imperatriz, Alto Mearim e Grajaú, Porto Franco, Gerais de Balsas e Chapada das Mangabeiras no Maranhão e por fim Alto Parnaíba Piauiense no estado do Piauí.

Para as projeções de tempo médio 2041-2060 a região do MATOPIBA elevará sua temperatura máxima de ar na média em aproximadamente 2° a 2,6°C em relação ao histórico observado para os cenários de concentração SSP2-4.5 e SSP5-8.5 respectivamente com isso a média futura passaria a ser de 33,7°C e 34,2°C para os cenários de emissão do CMIP6 correspondentes. Observa-se que quando comparado ao futuro próximo (2021-2040) há uma diferença significativa em relação ao aumento médio entre as projeções das concentrações em análise. Para a concentração SSP2-4.5 todas as microrregiões do estado do Tocantins (Bico do Papagaio, Araguaína, Miracema do Tocantins, Rio Formoso, Gurupi, Porto Nacional, Jalapão e Dianópolis), além das microrregiões Imperatriz, Médio Mearim, Alto Mearim e Grajaú, Porto Franco, Gerais de Balsas, Chapada das Mangabeiras no Maranhão, Alto Parnaíba Piauiense e Alto média Gurgueia no estado do Piauí apresentaram incrementos igual ou maior que 2°C, sendo as microrregiões com menores incrementos: Bom Jesus da Lapa na Bahia, e Caxias no Maranhão com aumentos de 1,4°C.

Para as emissões de SSP5-8.5 e SSP2-4.5 nota-se uma distribuição na média semelhante para as microrregiões quem compõe o MATOPIBA. Os incrementos médios ao longo de toda a região foram de 0,6°C entre as 31 microrregiões para os dois modelos de concentração, a exemplo das microrregiões Miracema do Tocantins que passou de 2,4°C (SSP2-4.5) para 3°C (SSP5-8.5) e Rio Formoso 1,98°C (SSP2-4.5) para 2,62°C (SSP5-8.5). Médio Mearim no Maranhão é a única microrregião com temperatura máxima de ar na ordem de grandeza de 35,5°C. Entretanto, 62% do MATOPIBA (Rio Formoso, Miracema Do Tocantins, Jalapão, Gurupi, Bico Do Papagaio, Presidente Dutra, Porto Franco, Médio Mearim, Lençóis Maranhenses, Itapecuru Mirim, Gerais De Balsas, Coelho Neto, Codó, Chapadinha, Chapadas Das Mangabeiras, Caxias, Alto Mearim E Grajaú, Chapadas Do Extremo Sul Piauiense, Bertolândia, Alto Médio Gurgueia, Cotegipe E Bom Jesus Da Lapa) possuirá médias de temperatura máxima do ar acima de 34°C.



**Figura 8.** Distribuição espaço temporal dos cenários futuros de temperatura máxima do ar do MATOPIBA para os cenários de tempo A) 2021-2040, B) 2041-2060, C) 2061-2080 e D) 2081-2100 do ensemble dos modelos CMIP6 utilizados nesse estudo para concentrações de emissões SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Para os cenários futuros intermediários 2061-2080 com concentrações SSP2-4.5 e SSP5-8.5 a média dos incrementos de temperatura são de 2,5 e 4,1°C entre um cenário e outro há uma diferença de 1,6°C na média do MATOPIBA a qual passa a ser de 34,2°C e 35,7°C para o SSP2-4.5 e o SSP5-8.5.

Observa-se que para o cenário “no meio do caminho” (SSP2-4.5) as microrregiões com maiores valores de temperatura máxima do ar localizam-se no estado do Tocantins (Bico do Papagaio, Araguaína, Miracema do Tocantins, Rio Formoso, Gurupi, Porto Nacional, Jalapão e Dianópolis) com acréscimos partindo de 2,5°C em Rio

Formoso e atingindo 3,1°C no Jalapão ambas representadas com média de temperatura máxima de ar de 34,7°C , além disso, microrregiões como Imperatriz, Alto Mearim e Grajaú, Porto Franco, Gerais de Balsas, Chapada das Mangabeiras no Maranhão apresentam para a projeção aumento igual ou superior a 2,7°C. As microrregiões com menores magnitudes de temperatura projetadas ocupam parte da composição baiana representada pelas microrregiões Bom Jesus da Lapa, Cotegipe e Santa Maria da Vitoria com incrementos da ordem de 2°C com destaque para Caxias no Maranhão com menor acréscimo projetado sendo de 1,8°C. Ainda, para esse cenário de concentração 62% do MATOPIBA (Rio Formoso, Porto Nacional, Miracema Do Tocantins, Jalapão, Presidente Dutra, Porto Franco, Médio Mearim, Lençóis Maranhenses, Itapecuru Mirim, Bico Do Papagaio, Gerais De Balsas, Coelho Neto, Codó, Chapadinha, Chapadas Das Mangabeiras, Caxias, Alto Mearim E Grajaú, Chapadas Do Extremo Sul Piauiense, Bertolândia , Alto Médio Gurguéia, Cotegipe E Bom Jesus Da Lapa) apresenta média de temperatura máxima do ar igual ou superior a 34°C.

Para o cenário de tempo 2061-2080 e concentração 5-8.5 a região do MATOPIBA passou de média histórica de 31,7°C para 35,8°C correspondendo a um aumento na média de 4,1°C em sua temperatura máxima de ar. Ademais, microrregiões como Médio Mearim e Rio Formoso registram respectivamente 36,9 e 36,5°C tornando-se as microrregiões com maiores magnitudes de temperaturas máximas de ar. Além disso observou-se que 68% do MATOPIBA (Rio Formoso, Miracema Do Tocantins, Jalapão, Gurupi, Bico Do Papagaio, Araguaína, Presidente Dutra, Porto Franco, Médio Mearim, Itapecuru Mirim, Gerais De Balsas, Coelho Neto, Codó, Chapadinha, Chapadas Das Mangabeiras, Caxias, Alto Mearim E Grajaú, Chapadas Do Extremo Sul Piauiense, Bertolândia, Alto Parnaíba Piauiense, Alto Médio Gurguéia, Cotegipe e Bom Jesus da Lapa) registrará de acordo com as projeções médias igual ou superior a 35,5°C. As microrregiões mais amenas são Santa Maria da Vitória na Bahia com 33,3°C e Porto Nacional no Tocantins com 33,7°C.

Por fim, o futuro distante (2081-2100) apresenta as maiores magnitudes de temperatura máxima de ar, na média MATOPIBA passará a aferir máximas de temperaturas de até 36°C para cenários de concentração SSP2-4.5 contra até 38,5°C para cenários de concentração SSP5-8.5 registradas ambas na região Médio Mearim, além disso, observou-se um aumento médio de 3°C na região como um todo para os cenários de meio do caminho (SSP2-4.5) contra 5,9°C para o cenário mais pessimista (SSP5-8.5).

Ressalta-se que a média da variável climática da região passará a ser de 34,6°C para o cenário SSP2-4.5 como também de 37,5°C para o cenário SSP5-8.5. Além disso,

até o fim do século a média dos modelos para as projeções pessimistas preveem que 65% do MATOPIBA (Rio Formoso, Miracema do Tocantins, Jalapão, Gurupi, Bico do Papagaio, Araguaína, Presidente Dutra, Porto Franco, Médio Mearim, Lençóis Maranhenses, Gerais de Balsas, Codó, Chapadas Das Mangabeiras, Alto Mearim e Grajaú, Chapadas Do Extremo Sul Piauiense, Bertolínia, Alto Parnaíba Piauiense, Alto Médio Gurguéia, Cotegipe e Bom Jesus Da Lapa) possuíra temperatura máxima de ar igual ou superior à média.

A partir da Tabela 3 é apresentado o resumo do aumento médio de temperatura a partir dos modelos globais utilizados no computo d ensemble para a região.

Tabela 3. Aumento médio na temperatura máxima do ar para a região do MATOPIBA para cenários futuros de tempo e clima a partir do ensemble dos modelos CMIP6.

Cenário	2021-2040 (°C)	2041-2060 (°C)	2061-2080 (°C)	2081-2100 (°C)
<b>SSP2-4.5</b>	1,2	1,9	2,4	3
<b>SSP5-8.5</b>	1,3	2,6	4	5,9

Para a comparação dos modelos derivados do CMIP6 a Figura 9 reproduz a distribuição temporal mensal dos modelos escolhidos. Observou-se que o comportamento da variabilidade climática para a temperatura máxima de ar é mantido ao longo das projeções ao longo do tempo em escala anual, ou seja, as maiores temperaturas anuais seguirão sendo registradas nos meses de Agosto, Setembro, Outubro e Novembro período em que ocorre o equinócio de primavera no Hemisfério Sul e a taxa de radiação solar incidente tende a ser mais elava em baixas latitudes associadas ao fato de MATOPIBA apresentar nesse período baixo índice de precipitação e conseguinte baixa umidade do ar, compensatoriamente no verão austral período compreendido pelos meses de Janeiro, Fevereiro e Março as temperaturas máximas de ar projetadas seguem sendo as de menor magnitudes ao longo do tempo.

Observou-se que para as projeções de concentração SSP2-4.5 o modelo CanESM5 é o que mais superestima o ensemble para as 4 faixas temporais ao longo dos anos, além dele, o CNRM\_ES passa os 6 meses iniciais do ano acima da média ensemble e a partir de julho segue a mesma média do conjunto ensemble. Por outro lado, os modelos IPSL\_CM segue sendo o modelo que subestima o ensemble ao longo do ano para as faixas

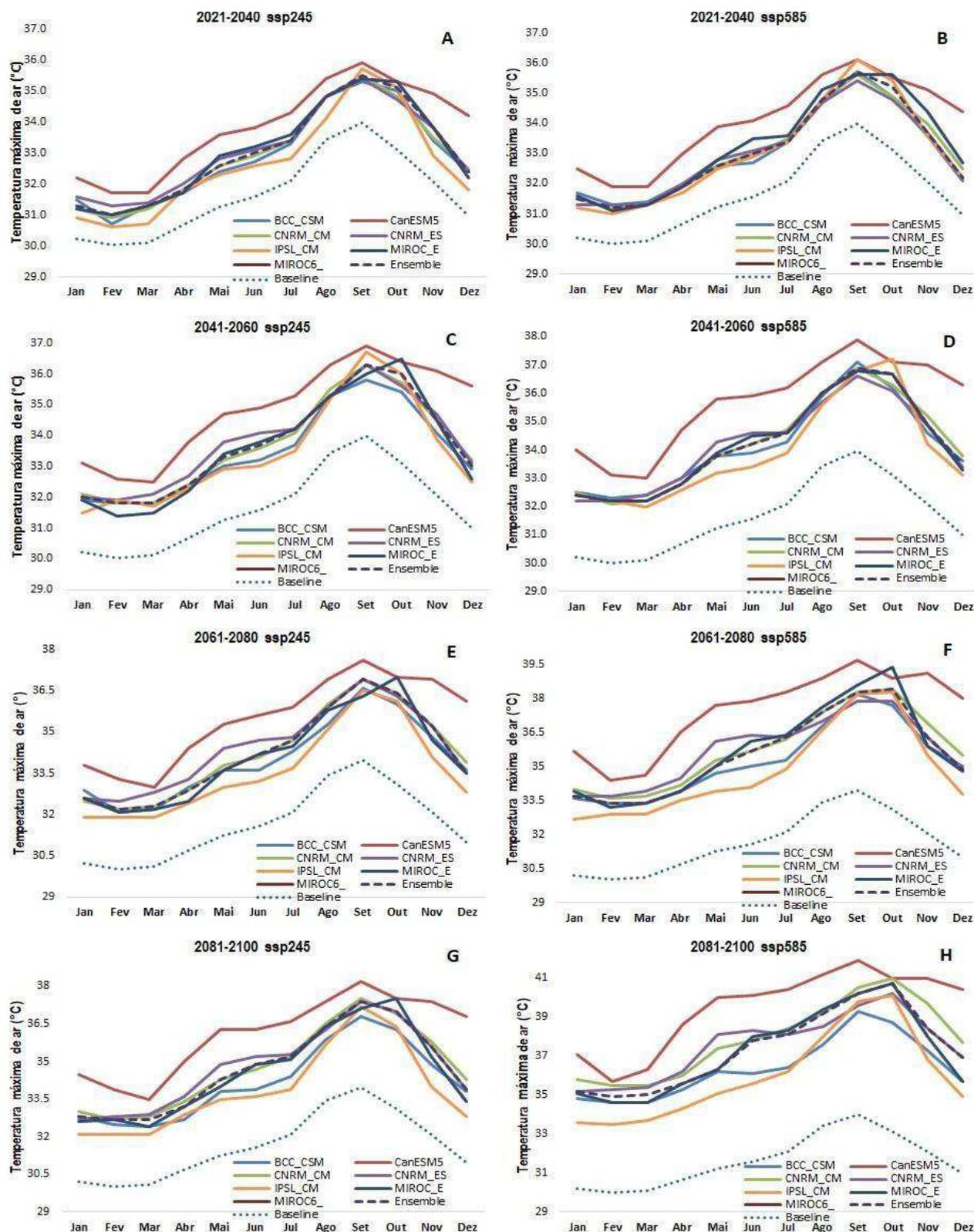
de concentração, os demais modelos CNRM\_CM, MIROC\_E BBC\_CSM e MIROC6 são os que descrevem magnitudes mais similares ao ensemble. Para as concentrações SSP5-8.5 observou-se comportamentos similares aos observados para a concentração de meio do caminho com a ressalva que o modelo BBC\_CSM nas faixas temporais 2061-2080 e 2081-2100 passa a subestimar o ensemble entre os meses de julho e dezembro.

Usta et al. (2022) analisaram projeções de mudanças de temperatura para 22 modelos climáticos utilizados pelo CMIP6 para países da América do Sul, incluindo o Brasil, e constaram que os modelos apresentaram boa representatividade a sazonalidade da região com base nos dados de referência, os resultados apresentados converge com os demonstrados para o MATOPIBA visto que para cenários de concentrações SSP2-4.5 as projeções indicam aumento na média entre 1,5°C para futuro próximo a 3°C para o futuro distante, enquanto que para as concentrações SSP5-8.5 os valores correspondem a acréscimos de 1,9°C para o futuro próximo a 6,1°C para o futuro distante.

Guimarães et al. (2016) analisaram projeções de mudanças climáticas para a região nordeste do Brasil a partir de modelos globais do CMIP5, em seus estudos identificaram que as projeções do CMIP5 para concentrações RCP4.5 e RCP8.5 para o futuro distante (2079-2099) geraram acréscimos na região Nordeste de 2,1°C e 4°C respectivamente.

Em resumo, os resultados obtidos pelo ensemble demonstram que a região irá experimentar um aquecimento significativo a médio e longo prazo, o que acarretará em mudanças de clima e em alterações em todo o ecossistema (NOBRE, 2017). Reis (2020) alerta que a exposição das culturas a taxas maiores de temperatura na região pode acarretar em redução de produtividade em função de danos fisiológicos e redução do ciclo da cultura. Além disso, é evidente que toda a população irá sofrer os efeitos do aumento de temperatura na região.

No entanto, como informado por Medeiros e Oliveira (2022) modelos globais climáticos podem apresentar erros médios em suas projeções como observados para a América do Sul e mesmo ao utilizar um conjunto de modelos faz-se importante a menção.



**Figura 9.** Distribuição temporal mensal dos modelos climáticos para os cenários de tempo e concentrações SSP2-4.5 (A, C, E, e G) e SSP5-8.5 (B, D, F e H) de temperatura máxima de ar para o MATOPIBA no século XXI.

#### 4. CONCLUSÃO

A partir dos cenários de tempo e concentração projetados para o MATOPIBA pelos modelos climáticos do CMIP6 para o século XXI é observado uma alta variação e graduação constante para aumento na magnitude da variável climática temperatura máxima de ar na região. Para os cenários de concentrações SSP2-4.5 o aumento na média da temperatura máxima do ar comparado ao período de referência (1961-2018) com média de 31,7°C parte de 1,2°C para o futuro próximo (2021-240), 1,9°C e 2,4°C para os cenários intermediários (2041-2060) (2061-2080) respectivamente até 3°C para o futuro distante (2080-2100). Já a média dos modelos selecionados para os cenários de concentrações SSP5-8.5 resultam em incrementos na média bem superiores ao mencionados anteriormente, sendo-os de 1,3°C para o futuro próximo (2021-2040), 2,6°C e 4°C para os cenários de tempo intermediários (2041-2060) (2061-2080) respectivamente até atingir 5,9°C de aumento na temperatura média da região.

Em relação aos modelos derivados do CMIP6 para ambas as concentrações de SSP o modelo CanESM5 é o modelo que mais superestima o ensemble, além dele é observado que o CNRM\_ES passa os primeiros 6 meses do ano acima da média e a partir de julho segue semelhante a média do conjunto. Em contrapartida, o modelo IPSL\_CM apresenta valores médios de temperatura máxima de ar que subestimam a média ensemble. Ademais, os demais modelos possuem boa representatividade para o ensemble, com destaque para o modelo CNRM\_CM.

Os resultados projetados indicam que a região do MATOPIBA é altamente vulnerável aos efeitos provenientes das mudanças climáticas seja para qual concentração de SSP analisada.

## 5. REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; de MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G.; 2014. Köppens climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6), 711–728.
- ANDRADE, M. F de. **Mudanças Climáticas**. Junho de 2018. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo. 33p. Notas de aula.
- CHEM, H.; SUN, J.; LIN, W.; XU, H. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Sci Bull* (Beijing). 2020 Sep 15;65(17):1415-1418. doi: 10.1016/j.scib.2020.05.015. Epub 2020 May 20. PMID: 36747394.
- CONAMA, **Resolução n° 001, de 23 de janeiro de 1986**, do Conselho Nacional de Meio Ambiente-CONAMA; “Dispõe sobre as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação de Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente”; publicada no Diário Oficial da União no em 23/01/1986; Brasília, DF.
- DE MEDEIROS, Felipe Jeferson; DE OLIVEIRA, Cristiano Prestrelo. Assessment of dry and heavy rainfall days and their projected changes over Northeast Brazil in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models. *International Journal of Climatology*, v. 42, n. 16, p. 8665-8686, 2022.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Visão 2030. **O futuro da Agricultura Brasileira**. Brasília, DF. 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbfaf8e89d62829?version=1.1>>. Acesso: 30 de agosto de 2022.
- FRANÇA, L. C. J de. et al. Análise espaço-temporal da cobertura vegetal em uma bacia hidrográfica na região de MATOPIBA, Brasil. *Revista Nativa*. Universidade Federal do Mato Grosso. v.6, n. especial, p737-744, dez. 2018.
- GOUVEIA, C. D.; MARENGO, J. S. Nova Abordagem de Projeções Climáticas do CMIP6 e os Modelos Globais de Alta Resolução do High-End Climate Impacts and Extremes (HELIX). **CPTEC-INPE**. Cachoeira Paulista, São Paulo. 2019.
- GUIMARAES, S. O. et al. Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do C ORDEX. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v.31, n.3, 337-365, 2016.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group 1 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.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceito e métodos**. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

MARENGO, J. A.; SOARES, W.R. Impactos das Mudanças Climáticas no Brasil e Possíveis Futuros Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC 2001. Cachoeira Paulista, São Paulo. **CPTEC-INPE**. 2003.

MATOS, T. F. L. **Diagnóstico dos Resíduos Poliméricos Presentes nos Resíduos Sólidos Domiciliares Gerados em São Carlos/SP**. 2006. p.21. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental – Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. Proposta de delimitação territorial do Matopiba. Nota técnica 1. EMBRAPA. Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE). Disponível em: <https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1DelimitaçãoMatopiba.pdf>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

NOBRE, C. P. C de. A influência da expansão agrícola nas mudanças climáticas na região de MATOPIBA. 2017. 28f., il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) -**Universidade de Brasília**, Brasília, 2017.

OLIVEIRA, L. N de.; AQUINO, C. M. S de. Dinâmica Temporal do uso e cobertura da Terra na Fronteira Agrícola do MATOPIBA: análise na sub-bacia hidrográfica do rio Gurguéia-Piauí. **Revista Equador**. Universidade Federal do Piauí. v.9, n.1: p. 317-333, 2020.

PEREIRA, C. N. et al. **Aspectos Socioeconômicos da Região de MATOPIBA**. Boletim Regional, Urbano e Ambiental – IPEA. Campinas, SP, jan./jun. 2018.

REIS, L. C dos. **Produtividade da soja sob diferentes cenários de variabilidade climática na região de Matopiba, Brasil**. 2020. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

SALVADOR, M. A., BRITO, J. I. B. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2179-5>.

- USDA- United States Department of Agriculture, (2017). **World Agricultural Supply and Demand Estimates**. Washington, D.C: WASDE-565. Available at: <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2023.
- USTA, D. F. B.; TEYMOURI, M.; CHATTERJEE, U. Projections of Temperature Chances over South America during the Twenty-First Century Using CMIP6 Models. **GeoJournal** 87 (Suppl 4), 739-763 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10531-1>

## CAPÍTULO 4

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mediante a aplicação do agrupamento de áreas homogêneas pelo método de Ward (1963) a partir dos dados de temperatura máxima de ar para a região do MATOPIBA para a série temporal de janeiro de 1961 a dezembro de 2018, foi possível gerar 5 grupos de áreas homogêneas e aplicar aos grupos os testes não paramétricos de Mann-Kendall para identificação de tendência e o teste de ruptura de Pettitt (quebra na série) o qual identifica o momento em que ocorre a mudança na média da variável analisada.

Para os 5 grupos homogêneos identificou-se tendência com extremo nível de significância p-valor  $<0,0001$  para ambas aplicações estatísticas. Sendo o Grupo 1 (G1) e o Grupo 3 (G3) representantes das microrregiões com maiores aumentos na média das temperaturas máximas ao longo da série além disso, observa-se através do teste de Pettitt que os grupos a partir do ano de 1994 apresentaram aumentos de  $1^{\circ}\text{C}$ .

Ao analisar as projeções dos modelos climáticos globais derivados do CMIP6 da região para as faixas temporais 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 para os cenários de concentração SSP2-4.5 e SSP5-8.5 as projeções implicam em aumento significativo para ambas as projeções de concentração com maiores aumentos no futuro distante (2081-2100) Na média no futuro distante a região irá receber incrementos de temperatura de  $5,9^{\circ}\text{C}$  para SSP5-8.5, ressaltasse que algumas microrregiões apresentam aumentos pontuais superiores é o caso da microrregião Gerais de Balsas no Maranhão que é projetada aumento de  $6,5^{\circ}\text{C}$  no futuro distante. Ainda, para todas as projeções de tempo e concentrações a microrregião Médio Mearim no Maranhão é a que possui maior temperatura máxima de ar.

Do conjunto de modelos climáticos do CMIP6 para as projeções da América do Sul observou-se boa representatividade na climatologia, isto é, ao longo do tempo a sazonalidade é mantida. Além disso, 5 dos 7 modelos utilizados no conjunto ensemble apresentaram convergência com a média, o modelo que mais superestima o conjunto para todos os cenários de tempo e de concentração foi o CanESM5 em contraponto o IPSL\_CM apresentou valores projetados abaixo da média do ensemble para todos os cenários de tempo e concentração em análise.

Em suma, esse padrão de aquecimento observado no período histórico, bem como nos cenários de tempo e concentração do CMIP6 alertam que o MATOPIBA poderá

sofrer ou agravar impactos relacionados ao clima, meio ambiente, ao setor agrícola e em consequente econômico e sociais. Por fim, acredita-se que os resultados obtidos na presente pesquisa podem servir de alerta para os impactos que as mudanças climáticas e eventos extremos podem acarretar a região para a geração atual e futura.