

PERSPECTIVAS CLIMÁTICAS FUTURAS COM BASE NOS MODELOS DO CMIP6 PARA MUNICÍPIOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE (PE), BRASIL

Vanine Elane Menezes de Farias

Universidade Federal de Pernambuco,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil
vanine.menezes@ufpe.br

Arivânia Bandeira Rodrigues

Universidade Federal de Pernambuco,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil
arivania.rodrigues@ufpe.br

Pedro Benjamin Carreiro Lima Monteiro

Universidade Federal de Pernambuco,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil
pedro.benjamin@ufpe.br

Diego Cesar dos Santos Araujo

Universidade Federal de Pernambuco,
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Recife, PE, Brasil
diego.caraujo@ufpe.br

Suzana Maria Gico Lima Montenegro

Universidade Federal de Pernambuco,
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Recife, PE, Brasil
suzanam.ufpe@gmail.com

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Universidade Federal de Pernambuco,
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Recife, PE, Brasil
jaimcabral@ufpe.br

RESUMO

Este estudo avalia as projeções de modelos climáticos globais do CMIP6 para municípios da Região Metropolitana do Recife (RMR) em três períodos futuros: curto (2015-2044), médio (2045-2074) e longo prazo (2075-2100), para dois cenários de emissão, SSP2.4-5 e SSP5.8-5. Utilizando dados do ACESS-ESM1, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM5, TaiESM1 e UKESM1-0-LL, foi estabelecida uma correlação com os históricos observados da região fornecido pelo Daily gridded meteorological variables in Brazil. A correção de viés foi aplicada aos modelos pelo método *Quantile Mapping* para normalizar os dados climatológicos, resultando em um ajuste satisfatório. Após a correção, os dados demonstraram maior consistência e revelaram aumento significativo nas temperaturas máximas e mínimas, com maior impacto nos meses mais frios, sugerindo um aquecimento gradual da região. Além disso, observou-se uma tendência de redução na precipitação, sobretudo no cenário mais pessimista (SSP5-8.5), o que pode afetar a gestão de recursos hídricos e a agricultura. Este estudo contribui para compreender as condições climáticas futuras em municípios da RMR, como forma de fornecer informações para enfrentar os desafios climáticos e sustentáveis na região, além de reforçar a importância de aplicar correções de viés e considerar múltiplos modelos climáticos para obter projeções mais precisas e confiáveis.

Palavras-chave: Modelos climáticos. Cenários do clima. Anomalias futuras. Correção de viés. Quantil mapping.

FUTURE CLIMATE PROJECTIONS BASED ON CMIP6 CLIMATE MODELS FOR MUNICIPALITIES IN THE METROPOLITAN REGION OF RECIFE (PE), BRAZIL

ABSTRACT

This study evaluates CMIP6 global climate models projections for municipalities in the Recife Metropolitan Region (RMR) in three future periods: short-term (2015-2044), medium-term (2045-2074), and long-term (2075-2100), for two emission scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-

8.5. Using data from ACESS-ESM1, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM5, TaiESM1, and UKESM1-0-LL, a correlation was established with the historical observations provided by the Daily Gridded Meteorological Variables in Brazil. Bias correction was applied to the models using the Quantile Mapping method to normalize the climatological data, resulting in satisfactory adjustments. After correction, the data demonstrated greater consistency and revealed a significant increase in maximum and minimum temperatures, with a greater impact in the coldest months, suggesting a gradual warming of the region. Furthermore, a tendency of reduced precipitation was observed, particularly in the most pessimistic scenario (SSP5-8.5), which could affect water resource management and agriculture. This study contributes to understanding future climate conditions in municipalities of the RMR, providing information to address climate and sustainability challenges in the region and highlights the importance of applying bias corrections and considering multiple climate models to obtain more accurate and reliable projections.

Keywords: Climate models. Climate scenarios. Future anomalies. Bias correction. Quantile mapping.

INTRODUÇÃO

As inundações e as secas representam fenômenos naturais que causam impactos significativos à escala global, superando outros perigos naturais em termos de danos. As mudanças climáticas provocam alterações na intensidade e frequência de eventos extremos, como chuvas intensas e eventos de estiagem com secas mais severas. Mudanças significativas na temperatura do ar, precipitação e umidade são esperadas no futuro devido às mudanças climáticas (Meresa, Tischbein e Mekonnen, 2022; IPCC, 2021).

Diante destas transformações climáticas e sob um cenário de clima mais quente, as alterações na distribuição e no ritmo das precipitações, bem como os efeitos resultantes nas temperaturas, representam desafios substanciais para a viabilidade das populações humanas, bem como para a preservação dos ecossistemas, disponibilidade de água e produção agrícola (Tenagashaw et al 2022; IPCC, 2021; Almagro et al., 2020). Assim, compreender a variabilidade da precipitação se torna crucial não apenas para previsão de eventos extremos como secas e cheias, mas também para uma eficiente gestão dos recursos hídricos (Abbas et al., 2022; IPCC, 2021; Jiménez-Navarro et al., 2021).

A análise das variáveis climáticas não só é essencial para entender as mudanças no regime de temperatura e precipitação, mas também desempenha um papel crucial na saúde pública. Estudos recentes têm inserido em suas discussões a correlação entre as condições climáticas e a incidência de doenças transmitidas por vetores, como a dengue, zika e chikungunya (Moreira et al., 2023; Mendes e Ferreira, 2023). A cidade do Recife, por exemplo, apresenta um ambiente propício para a propagação dessas arboviroses, especialmente nos meses mais quentes e chuvosos do ano (Moreira et al., 2023). A elevação das temperaturas e a alteração dos padrões de chuva, podem intensificar a veiculação de doenças hídricas,

A fim de garantir um planejamento eficaz para as mudanças climáticas e estratégias de mitigação, é fundamental realizar projeções. No entanto, essa tarefa representa um grande desafio para a comunidade científica, pois envolve a consideração de uma variedade de fatores climáticos sensíveis (Almagro et al., 2020). Os modelos climáticos globais (MCG) são as principais ferramentas utilizadas para realizar essas previsões (Teutschbein e Seibert, 2012; Marengo, 2007).

Estudos têm utilizado esses modelos para analisar os impactos de diferentes níveis de possibilidades de aquecimento global (IPCC, 2021; Jiménez-Navarro et al., 2021; Almagro et al., 2020; Avila-Diaz et al., 2020). Sabe-se, então, que há diferenciação regional tanto nos riscos climáticos futuros quanto nas vulnerabilidades a aumentos incrementais na temperatura média global. Em algumas regiões do Brasil, o aumento da frequência e intensidade de chuvas extremas combinado com a exposição populacional, tem desencadeado desastres como deslizamentos e inundações repentinas em várias regiões (Marengo et al., 2021).

Mudanças nos padrões observados de temperatura e precipitação em regiões brasileiras têm sido identificadas ao longo das últimas décadas (Luiz-Silva et al., 2022). Essas alterações refletem

diretamente no ciclo hidrológico através da evapotranspiração e precipitação (Xue et al., 2022; Tenagashaw et al 2022; Jiménez-Navarro et al., 2021). Em geral, a temperatura do ar está aumentando de forma estatisticamente significativa em todo o Brasil, enquanto a precipitação vem diminuindo na região Nordeste e aumentando na região Sul (Luiz-Silva et al, 2022). Em consonância, Ballarin et al. (2023) mostram que as temperaturas tanto máximas quanto mínimas sofreram um aumento de pelo menos 15% para dois dos novos cenários do CMIP6 (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). O aumento será maior na Amazônia, Pantanal e em partes do Cerrado, especialmente nos meses do segundo semestre do ano. A precipitação apresentou uma alta variabilidade com o Pantanal, Caatinga e Cerrado para o segundo semestre do ano contendo os maiores decréscimos, superando -45%.

O sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) afirma que na última década (2011-2020) o aumento médio da temperatura da superfície global foi o maior já registrado. Houve um aumento médio de 1,09 °C. A mitigação dessas mudanças no clima exige uma abordagem integrada que esteja intrinsecamente ligada à adaptação das práticas de gestão dos recursos hídricos. Isso é essencial para assegurar tanto a segurança alimentar, o abastecimento da população e dos animais, quanto a segurança das infraestruturas, mediante uma gestão abrangente dos riscos associados a inundações e secas (Chagas et al., 2022). Os processos de tomada de decisão vinculados à gestão dos impactos das mudanças climáticas se caracterizam pela complexidade e a incerteza (Brose, 2023).

É importante destacar a ação humana nos impactos das mudanças climáticas e os novos cenários projetados buscaram traduzir isso. Se antes, no quinto relatório, considerava-se apenas as forçantes radiativas, no atual há uma combinação entre as forçantes, as decisões governamentais e a integração entre as políticas públicas nacionais e internacionais para combater as mudanças climáticas (IPCC, 2021). Assim, existe um cenário ideal (SSP1-1.9) em que as forçantes radiativas são mínimas, os governantes estão seriamente comprometidos com as metas climáticas, a reduzir as desigualdades sociais, transição energética e o incentivo a tecnologias verdes e países desenvolvidos procuram ajudar os em desenvolvimento a fim de produzir um mundo mais igualitário. No extremo oposto, o cenário SSP5-8.5 apresenta uma sociedade impulsionada pelo uso e desenvolvimento de combustíveis fósseis, competitiva, com grandes desigualdades sociais e que preferiu focar em técnicas de mitigação ao invés das adaptativas.

Contudo, antes que se possa utilizar os cenários das mudanças climáticas, é preciso que algumas considerações sejam feitas. A primeira delas é que embora os modelos climáticos possuam uma estrutura semelhante, eles diferem nos detalhes, em qual elemento físico será dado mais ênfase e como a atmosfera será dividida (Hollander, 2015)..

O segundo ponto refere-se às incertezas de cada modelo. Enquanto em escala global há um maior nível de certeza sobre o aumento da temperatura, para outras variáveis climáticas, como a precipitação, há apenas um médio grau de confiança. O sexto relatório relata que a falta de dados, a descontinuidade do monitoramento e as lacunas na série de dados dificultam um diagnóstico mais preciso (IPCC, 2021). Por outro lado, também é preciso atentar-se que os modelos climáticos ainda têm muita dificuldade em representar o clima em nível local, aumentando ainda mais o grau de incerteza. Por isso, é bastante comum antes da análise dos cenários futuros a realização do processo de correção de viés dos modelos climáticos, que tenta diminuir a tendência e as incertezas dos modelos numa escala local.

A aplicação desses modelos é de extrema importância nas áreas costeiras e os deltas, que estão expostos a aumentos do nível do mar e a maiores mudanças no nível da água, resultando em uma maior probabilidade de ocorrência de inundações (Wu et al., 2021). Com cotas geralmente inferiores a 10 m, o litoral brasileiro torna-se bastante sensível aos efeitos das mudanças climáticas, principalmente aos decorrentes da elevação do nível do mar, como erosão costeira, desaparecimento da linha de pós-praia, intrusão salina, colapso do sistema de esgotamento sanitário, dentre outros (PBMC, 2016).

A cidade de Recife está situada em média a 4 metros acima do nível do mar, o que a coloca em uma posição sensível em relação ao que as mudanças no nível do mar podem ocasionar (Marengo, 2017). Até 2100, projeta-se que a elevação média global do NMM seja de 0,26 a 0,77 m para um aumento da temperatura média global de 1,5 °C. Quando considerado um aumento de 2 °C, o NMM aumenta em 0,1 m em relação ao cenário anterior. Embora pequeno, esse aumento implica numa exposição de ao menos 10 milhões de pessoas ao redor do mundo aos riscos associados às mudanças climáticas em zonas costeiras (IPCC, 2021).

Entretanto, o conhecimento sobre a costa brasileira frente às mudanças climáticas ainda é incipiente. O próprio Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas (MMA, 2015) reconhece isso, caracterizando a falta de conhecimento sistemático sobre a dinâmica costeira, e as informações imprecisas relacionadas à altimetria e batimetria como a maior vulnerabilidade da zona costeira. O PBMC reforça a situação lembrando que não existe no país um estudo integrado da vulnerabilidade das cidades costeiras. Os dados disponíveis no país são ainda insuficientes para a construção de cenários de impactos nas zonas costeiras decorrentes das mudanças climáticas. Embora estudos regionais tenham sido desenvolvidos, é difícil a sua comparação devido a metodologias e objetivos variados (PBMC, 2016).

Inundações em cidades com alta densidade populacional pode causar perdas e danos consideráveis (Esmail et al., 2022). O Recife é uma cidade litorânea fortemente urbanizada, que teve seu processo de ocupação urbana de forma desordenada, e possui um sistema de drenagem altamente vulnerável às oscilações de maré, podendo provocar sérios problemas de alagamentos em períodos de chuvas intensas combinados com eventos de sizzigia. Compõe, juntamente com outros 13 municípios, a Região Metropolitana do Recife (RMR), que constitui a maior aglomeração urbana do Nordeste brasileiro e quinta maior do país, sendo classificada como uma metrópole nacional (IBGE, 2010).

O IPCC reconhece Recife como uma das mais vulneráveis às mudanças climáticas globais, devido às suas características geográficas e histórico de ocupação urbana (IPCC, 2007; Leão et al., 2021). Todavia, a cidade se destaca por ser a primeira no Brasil a declarar estado de emergência climática e estabelecer o ambicioso objetivo de alcançar neutralidade de carbono até 2050. O Carbon Disclosure Project (CDP) (2021) posiciona Recife entre as 88 cidades do Mundo que em 2020 lideraram o combate à crise climática (Leão et al., 2021).

Espera-se que as mudanças climáticas provoquem modificações nas precipitações e temperaturas em escala global, engendrando, por conseguinte, transformações nos ciclos hidrológicos regionais. A Região Metropolitana do Recife não deve ser exceção a essa tendência, podendo resultar em uma diversificação nos padrões de fluxo dos rios. Evidências históricas destacam como a variabilidade climática incide em alterações marcantes nos ciclos hidrológicos, culminando em recorrentes eventos hidrológicos extremos, como inundações e secas (Xue et al., 2022).

Uma preocupação da sociedade atual é em relação às projeções climáticas futuras, especialmente no que concerne às potenciais modificações na frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos de curta duração. Fenômenos como ondas de calor, chuvas intensas, inundações, períodos de seca e outras manifestações climáticas extremas têm suscitado profundo interesse entre os pesquisadores, devido ao impacto considerável que exercem sobre a população. Esses eventos acarretam não apenas custos financeiros substanciais, mas também, em muitos casos, resultam em perdas humanas significativas. Uma indagação de importância surge em relação às metrópoles brasileiras: elas estão prontas para enfrentar os desdobramentos das mudanças climáticas?

Nesse sentido, o objetivo deste estudo é avaliar as projeções das mudanças de precipitação e temperatura em municípios da Região Metropolitana do Recife. Isso é realizado ao considerar os cenários de mudanças climáticas em curto, médio e longo prazo, conforme delineados pelas previsões derivadas dos modelos do CMIP6, que representam os dados mais atualizados do IPCC. Além de compreender a possível trajetória climática da região, este trabalho também assume o papel de fornecer uma base de informações científicas para estudos voltados a aprimorar a capacidade de enfrentar e mitigar a vulnerabilidade perante os impactos das mudanças climáticas na região.

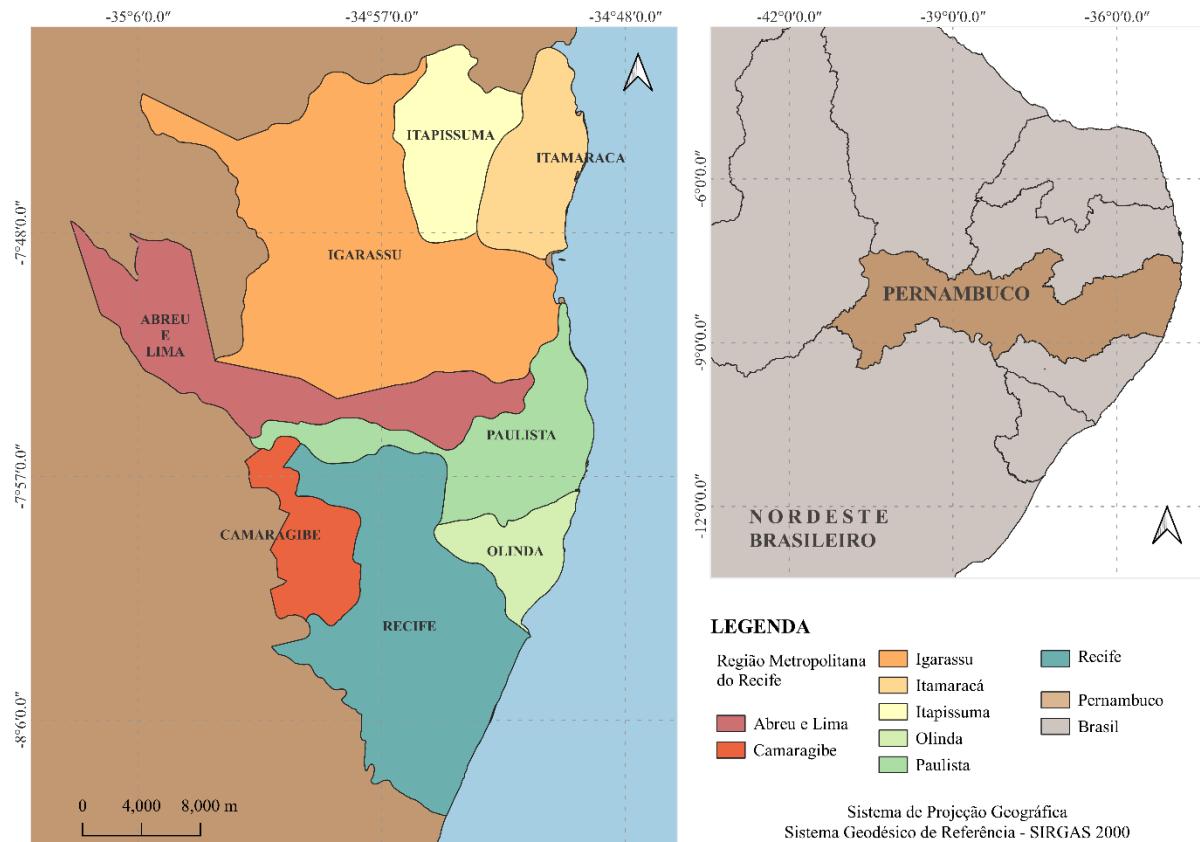
MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A Região Metropolitana do Recife (RMR), situada no nordeste brasileiro, engloba uma área em torno de 2.700 km², e uma população aproximada de 3,69 milhões de habitantes (IBGE, 2022). No escopo deste estudo, será dada ênfase aos municípios de Itapissuma, Itamaracá, Igarassu, Abreu e Lima, Paulista, Camaragibe, Recife e Olinda (Figura 1), que engloba 987,77 km² e 2,46 milhões de habitantes. A escolha desses municípios se deve ao fato de estarem totalmente contidos no pixel utilizado pelos modelos climáticos utilizados, o que permite uma análise mais precisa e coerente dos dados climáticos

projetados para a região. Essa seleção assegura que as projeções climáticas sejam diretamente aplicáveis, representando uma amostra significativa da complexidade urbana e das interações dentro da RMR.

Figura 1 - Localização dos municípios selecionados da RMR (PE), 2023



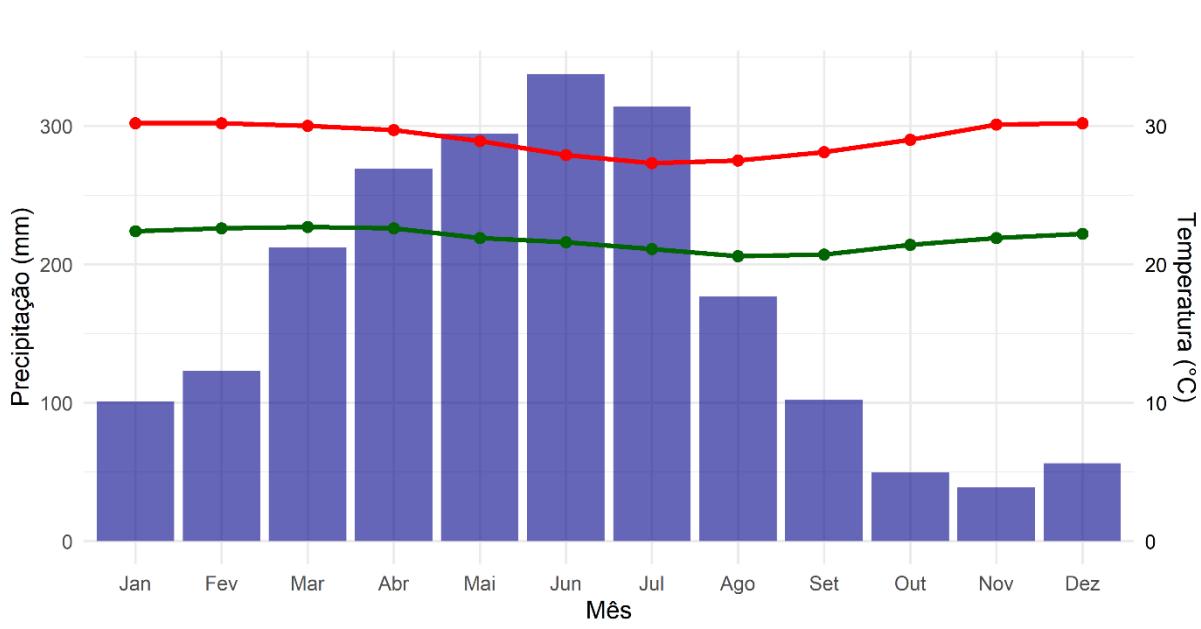
Fonte: IBGE, 2010. Elaboração: Os autores, 2023.

Conforme identificado por Leão et al. (2021), historicamente, a cidade de Recife tem enfrentado desafios significativos devido à ocorrência de extremos de precipitação sobre áreas com ocupação inadequada, aliados à insuficiência da infraestrutura de drenagem. Estes fatores têm contribuído para a recorrência de inundações e deslizamentos de terra na região.

Recife, uma das maiores e mais urbanizada cidade dentre as estudadas na RMR, ocupa uma posição sensível em relação às alterações climáticas e mudanças no nível do mar. Com base em projeções de elevação do nível do mar, um aumento de 0,5 metros no NMM poderia resultar na inundação de uma área de aproximadamente 25,38 km² da cidade (Marengo, 2017). Caso essa elevação seja ainda mais acentuada, atingindo 1 metro, a área inundada poderia se estender a cerca de 33,71 km² até o ano de 2100. Entre as regiões mais impactadas por esse cenário encontra-se o Recife Antigo, uma área de relevância significativa para a cidade, abrigando importantes centros econômicos e administrativos, além de possuir um valor histórico e cultural notável (Marengo, 2017). A Região Metropolitana do Recife é a área com maior vulnerabilidade no litoral pernambucano. Essa diferença entre as regiões é atribuída principalmente aos fatores sociais, que desempenham um papel significativo na determinação da vulnerabilidade.

De acordo com a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) para o ano de 2022, a RMR registrou uma precipitação acumulada de 2.518,9 mm, ou seja, 22,7% a mais do esperado. Pela figura 2, os meses de maio e junho foram os mais chuvosos, apresentando os maiores desvios da média. Por outro lado, os meses de abril e setembro apresentaram chuvas abaixo do normal para a região.

Figura 2 - Precipitação acumulada e temperaturas máxima e mínima da RMR



Fonte: APAC, 2022. Elaboração: Os autores, 2023.

Em relação à temperatura, dezembro é considerado um dos meses mais quentes em Pernambuco, caracterizando o primeiro mês da estação do verão e também considerado o período mais seco na RMR. As temperaturas médias variaram em torno de 26°C (APAC, 2022).

Compreender o regime de precipitações atual e de temperatura, associando com os cenários futuros é de grande importância, para adotar medidas de adaptação, e assim contribuir para que a região possa enfrentar melhor os desafios impostos pelas mudanças climáticas e trabalhar para construir um futuro mais sustentável e resiliente.

Seleção dos Modelos climáticos - CMIP6

Para avaliar as mudanças climáticas, extremos climáticos e seus impactos sobre a hidrologia e extremos hidrológicos, foram utilizados dados climáticos de modelos do CMIP6. Nesse estudo foram utilizados os dados diários do período histórico e dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 de cinco modelos, para as variáveis de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos climáticos selecionados do CMIP6

MODELO	País/Região	Resolução espacial	Referência
ACCESS-ESM1-5	Austrália	0.25° x 0.25°	Law et al. (2017) e Ziehn et al. (2020)
HadGEM3-GC31-LL	UK	0.25° x 0.25°	Williams et al. (2018)
INM-CM5	Rússia	0.25° x 0.25°	Volodin et al. (2017)
TaiESM1	Taiwan	0.25° x 0.25°	Wang et al. (2021)
UKESM1.0	UK	0.25° x 0.25°	Sellar et al. (2019)

Fonte: Adaptado de Ballarin et al. (2023).

Os dados foram obtidos a partir da base de dados brutos do CLIMBra (Ballarin et al., 2023), desenvolvido por pesquisadores da Universidade de São Paulo que realizaram o processo de redução de escala para 0,25º de resolução para todo o Brasil. Os dados do CLIMBra estão disponíveis para o período histórico de 1980 a 2013 e futuro de 2015 a 2100 para ambos os cenários de emissão.

Correção de Viés - Quantile mapping

O uso das projeções desses modelos climáticos globais e regionais para quantificar os efeitos das mudanças climáticas que estão por vir está sendo bastante aplicado nas pesquisas atuais. Ao utilizar esses dados, torna-se necessário avaliar a capacidade dos modelos em reproduzir o clima atual de forma adequada e ter maior confiança de que se está representando adequadamente as condições passadas, suas projeções para o futuro não se encontram comprometidas (Almagro et al., 2020; Deutschbein e Seibert, 2010). Dessa forma, ao empregar esses dados, é importante aplicar a correção de viés, uma vez que existe uma discrepância entre as informações diretamente derivadas dos modelos climáticos e as observações históricas (Xue et al., 2022; Wen et al., 2021). Esses erros podem ocorrer devido a coleta de dados de diferentes fontes, resolução espacial, informações de superfície subjacentes, discretizações e pela média espacial dentro das grades, bem como o erro do próprio modelo.

Para o processo de correção de viés foi utilizado o Quantil Mapping (QM), um método relativamente simples e que tem mostrado boa eficiência em corrigir dados provenientes dos modelos climáticos (Abbas et al., 2022; Anil e Raj, 2022; Shrestha et al., 2017; Heo et al., 2019). Foi utilizado um código elaborado e disponibilizado por Shrestha (2017) no RStudio. O código implementa uma técnica de redução de escala através do método de mapeamento quantil, empregando o pacote *qmap*. Os dados climáticos futuros provenientes do CLIMBra foram utilizados como entrada para o código, enquanto os dados observados do *Daily gridded meteorological variables in Brazil* (Xavier et al., 2016), compuseram a base de referência. O resultado consiste em dados climáticos futuros corrigidos, ajustados de acordo com os cenários estabelecidos. Por meio dessa abordagem, busca-se ajustar a variável modelada utilizando a equação da função distribuição acumulada (CDF) dos dados observados e os conjuntos de dados simulados. Esta técnica, que pressupõe estabilidade nos vieses dos modelos climáticos, segmenta a função de distribuição cumulativa em porções discretas e, em cada segmento, aplica um mapeamento de quantil individual, resultando em uma função de transferência mais ajustada. Além disso, o mapeamento de quantis frequentemente envolve a correspondência entre quantis empíricos ou quantis de distribuições gama ajustadas para ambos os conjuntos de dados (Maraun et al., 2010; Sian et al., 2022; Abbas et al., 2022).

Esses fatores de correção de viés são aplicados às projeções futuras de precipitação dos modelos de 2015 a 2100, assumindo que o viés é invariável em condições futuras. Da mesma forma, este método de correção é utilizado para dados de temperatura máxima e mínima, utilizando também a razão entre dados observados e simulados no período de referência.

Diagrama de Taylor

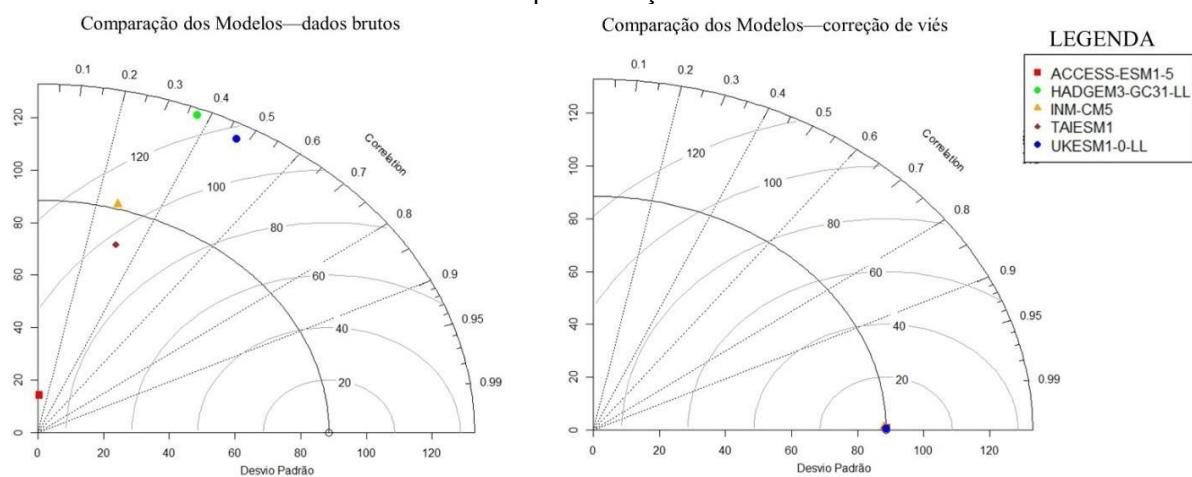
Uma das ferramentas utilizadas para avaliar a precisão dos modelos climáticos é o diagrama de Taylor (Taylor, 2001). Este diagrama é essencial para quantificar estatisticamente a similaridade entre os dados observados e os dados corrigidos gerados pelos modelos climáticos. O diagrama de Taylor fornece uma representação gráfica que inclui o desvio padrão, a correlação e o erro quadrático médio, permitindo uma análise abrangente da performance do modelo. Ao aplicar esta ferramenta, foi possível comparar os dados corrigidos dos modelos climáticos com os dados observados da área de estudo, proporcionando uma visão clara sobre a adequação e precisão das projeções climáticas para os municípios analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Correção de viés dos modelos do CMIP6

Para a utilização dos dados climáticos futuros em cenários projetados pelos modelos, é necessário que os dados utilizados estejam correspondendo de forma adequada com o comportamento do histórico. Essa avaliação tem como objetivo verificar se o modelo consegue representar de maneira adequada às condições anteriores, garantindo assim a integridade das suas projeções futuras. Na Figura 3, pode-se observar a relação dos dados simulados com os dados observados antes e após a correção de viés. A distância do ponto nos eixos representa o desvio padrão, as linhas de radiação representam o coeficiente de correlação e as linhas tracejadas são a raiz do erro quadrático médio.

Figura 3 - Estatísticas de padrões do Diagrama de Taylor para o ciclo climatológico de 5 modelos antes e após correção de viés

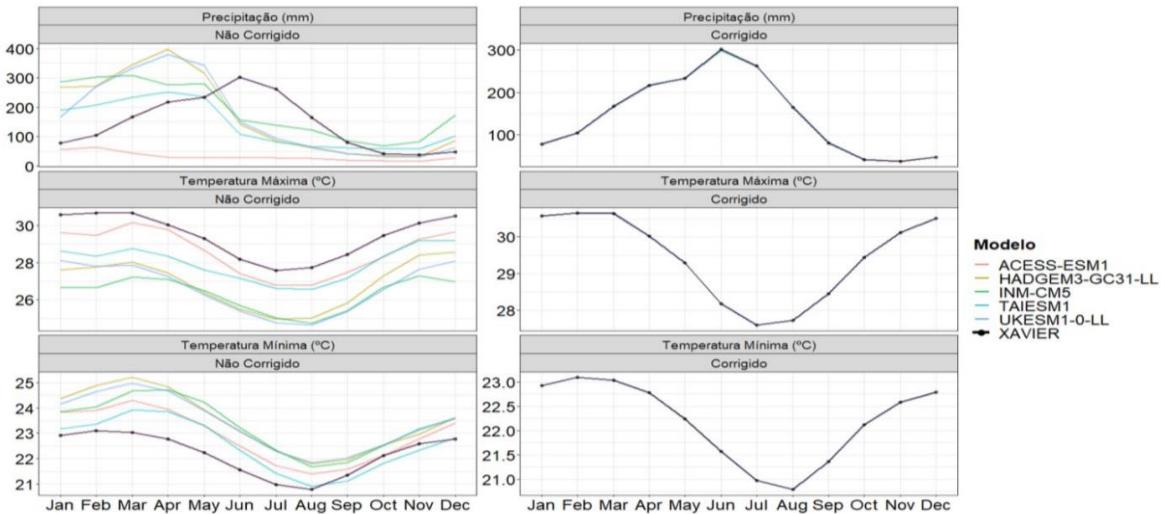


Fonte: Os autores, 2023.

Observa-se o efeito positivo da correção de viés nas séries de dados. Antes da aplicação do método QM, todos os modelos apresentaram estatísticas não satisfatórias, com um coeficiente de correlação abaixo de 0,5, desvio padrão elevado e um erro quadrático médio acima de 80. Após a correção, todos obtiveram resultados próximos a 1, com um menor erro quadrático médio e se mostrando muito próximos ao dado de referência.

Os dados foram agregados e calculados em nível de normais climatológicas para o período histórico (1980-2013), para comparar o comportamento sazonal da climatologia referente ao período histórico antes e após a correção de viés. Os resultados obtidos para as variáveis (precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima) após aplicação do método de correção com os dados observados, conforme discutido anteriormente, apresentaram ajustes satisfatórios. A Figura 4 apresenta a correlação dos dados observados com os dados brutos dos modelos e a correlação após a correção de viés para precipitação e temperaturas máximas e mínimas.

Figura 4 - Comportamento da precipitação e temperatura para os cinco modelos do CMIP6, em comparação com as observações de Xavier et al. (2016) durante o período 1980 - 2010, antes e depois da correção de viés



Fonte: Os autores, 2023.

Antes da aplicação do método de correção (QM), havia uma diferença na sazonalidade da precipitação, em que a concentração de chuva estava entre os meses de fevereiro a maio, em contraste com o real regime de chuvas da região que ocorrem de maio a agosto. Os quatro modelos originais analisados tendem a superestimar a precipitação mensal nos meses de janeiro a maio, enquanto o modelo ACESS-ESM1 apresenta um comportamento discrepante dos demais e subestima a precipitação para todos os meses do ano. Em relação a temperatura, os modelos subestimam as temperaturas máximas e superestimam as temperaturas mínimas, demonstrando uma amplitude menor das temperaturas dos modelos antes da correção. Após a correção, a sazonalidade e os totais de precipitação foram ajustadas, bem como as temperaturas máximas e mínimas o período.

Atualmente, os modelos melhoraram muito na projeção do clima futuro a nível global. No entanto, em nível local, ainda persiste incertezas, mostrando grande variabilidade entre os modelos principalmente na projeção da precipitação (Pino-Vargas et al., 2022). Esses modelos ainda estão sujeitos a incertezas intrínsecas devido à complexidade das interações climáticas e as resoluções espaciais. Essas incertezas podem resultar em uma ampla variedade de projeções, mesmo quando considerando um único modelo. Além disso, como apresentado na Figura 4, diferentes modelos climáticos podem produzir resultados discrepantes, levando a variações significativas nas projeções de mudanças climáticas. Dessa maneira, é crucial reconhecer essas incertezas e diferenças entre os modelos e abordagens. Essas diferenças podem ser atribuídas a várias fontes de incerteza, como os diferentes esquemas de parametrização, resoluções espaciais e condições iniciais usadas em cada modelo.

Portanto, é importante aplicar o método de correção de viés aos resultados dos modelos climáticos antes de utilizá-los em estudos hidrológicos ou outras análises. Essa correção visa reduzir as discrepâncias entre as projeções dos modelos e as observações históricas, contribuindo para projeções mais confiáveis e precisas. Ao considerar múltiplos modelos e aplicar a correção de viés, os pesquisadores podem mitigar incertezas e obter uma compreensão mais sólida das futuras mudanças climáticas e seus impactos.

Diante disso, pode-se observar que a abordagem QM corrigiu satisfatoriamente os vieses dos modelos para representar o histórico climatológico de municípios na Região Metropolitana do Recife e assim pode dar confiabilidade para conseguir representar os dados futuros. Outros trabalhos também apresentaram bons resultados ao corrigir os vieses dos dados por meio desse método. Heo et al. (2019) aplicaram o método QM para a correção de viés dos dados de precipitação em comparação com outros métodos na Coréia do Sul, obtendo resultados satisfatórios. O QM corrige o viés nos dados simulados de um RCM mapeando quantis na mesma probabilidade cumulativa dos dados simulados e dos

conjuntos de dados observados. Anil e Raj (2022) detectaram que os vieses nas projeções climáticas foram removidos usando o método empírico QM para a bacia hidrográfica Krishna localizada na península indiana. Babaousmail et al. (2022) utilizaram o mesmo procedimento aplicado nesse estudo para as regiões do Mediterrâneo e do Saara. Para a precipitação diária histórica e projetada, os dados são ajustados por viés usando uma abordagem do método QM antes de empregá-los para calcular as mudanças médias. Além disso, a análise também abrange os dados extremos de precipitação. Tong et al. (2021) aplicaram dois diferentes métodos de correção de viés, o mapeamento quantílico (QM) e o mapeamento quantil delta (QDM), aplicados à temperatura e precipitação diárias simuladas na China. Os impactos dos dois métodos sobre os vieses atuais e futuros são investigados e os resultados mostram que tanto o método QM quanto o QDM são eficazes na remoção dos vieses sistemáticos do modelo durante o período de validação. Xue et al. (2022) também utilizaram o QM para simular vazões na bacia de Lushi, na China, atentando para a importância de realizar a correção de viés nos modelos climáticos. Assim, o QM mostrou ser um método eficaz para remover vieses dos modelos climáticos globais com pouco gasto computacional e fornecendo correlações melhores com os preeditores observados (precipitação) na escala local de alta resolução.

Cenários futuros de mudanças climáticas

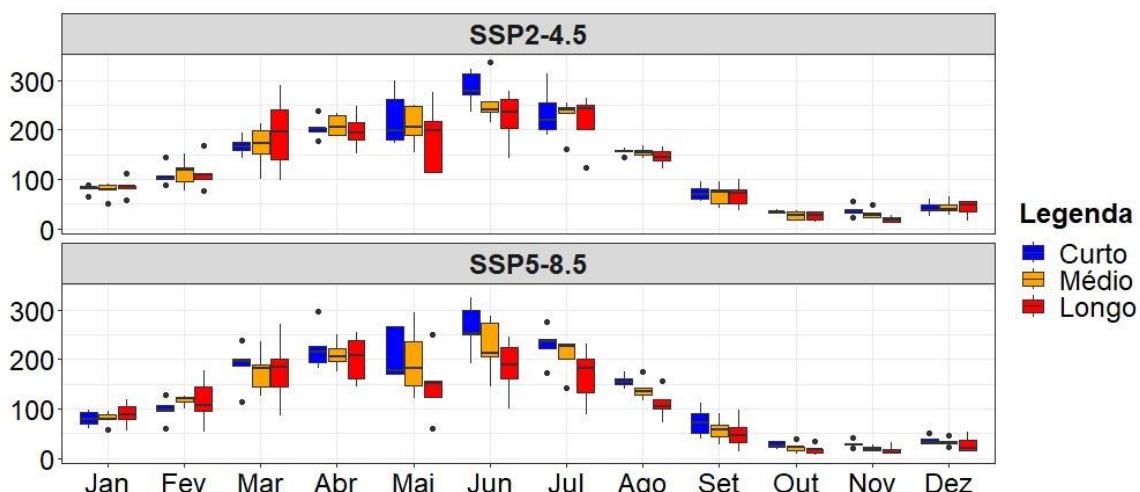
Variações nos dados de precipitação

As projeções climáticas originárias dos MCGs desempenham um papel essencial na avaliação das consequências das mudanças climáticas, além de desempenharem um papel fundamental na formulação de estratégias adaptativas tanto em escalas globais quanto regionais, com o intuito de mitigar os efeitos resultantes. Foram conduzidas análises das médias climáticas em relação aos conjuntos de dados de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, abrangendo intervalos temporais de curto (2015-2044), médio (2045-2074) e longo prazo (2075-2100), contemplando ambos os cenários de emissão: SSP 2.4-5 e SSP 5.8-5.

O cenário SSP 2.4-5 reflete desafios moderados em termos de mitigação e adaptação, juntamente com o desenvolvimento contínuo de recursos de combustíveis fósseis em escala global. Por outro lado, o cenário SSP 5.8-5 indica desafios significativos em relação à mitigação e sugere uma abordagem menos acentuada para a adaptação às mudanças climáticas (Gebrechorkos et al., 2023).

As normais climatológicas para os dados de precipitação para os períodos de curto, médio e longo prazo foram analisadas sob os dois cenários de emissão, SSP 2.4-5 e SSP 5.8-5. A Figura 5 apresenta a distribuição da precipitação mensal prevista pelos modelos climáticos para a RMR sob ambos os cenários de emissões.

Figura 5 - Projeções das precipitações mensais a curto, médio e longo prazo



Fonte: Os autores, 2023.

Em ambos os cenários e períodos, a maior concentração de precipitação ocorre nos meses de maio a julho, que é consistente com o regime pluviométrico da região. O gráfico mostra que há um consenso entre os modelos para o regime seco com relação à média pluviométrica. No entanto, para o período chuvoso, a variabilidade depende do mês analisado, do cenário e do período. Por exemplo, ao analisar a curto prazo o mês de maio no cenário SSP2-4.5, 50% dos valores variaram entre 176 mm a 280 mm, embora a média dos modelos esteja em torno de 222 mm. Comparativamente, a média observada no período histórico é de 232 mm. Isso indica que, em maio, a precipitação pode variar de -24% a 20% em torno da média do período histórico. Se for considerada a média de todos os cinco modelos, a precipitação para o mês de maio sofrerá um aumento de 4,0% nos próximos anos.

Contudo, à medida que vai se aumentando o período para médio e longo prazo, é possível observar que para o cenário SSP2-4.5, o limite superior do gráfico da figura diminui progressivamente. No médio e longo prazo, 50% dos valores variam entre 112 mm e 250 mm, com uma média de 183 mm. Isso mostra que a precipitação no longo prazo deverá diminuir em média 21%. A situação é ainda mais preocupante no cenário SSP5-8.5, no longo prazo, pois mostra que para o mês de maio a precipitação irá variar entre 92 a 200 mm, sofrendo um decréscimo entre 13% e 60%.

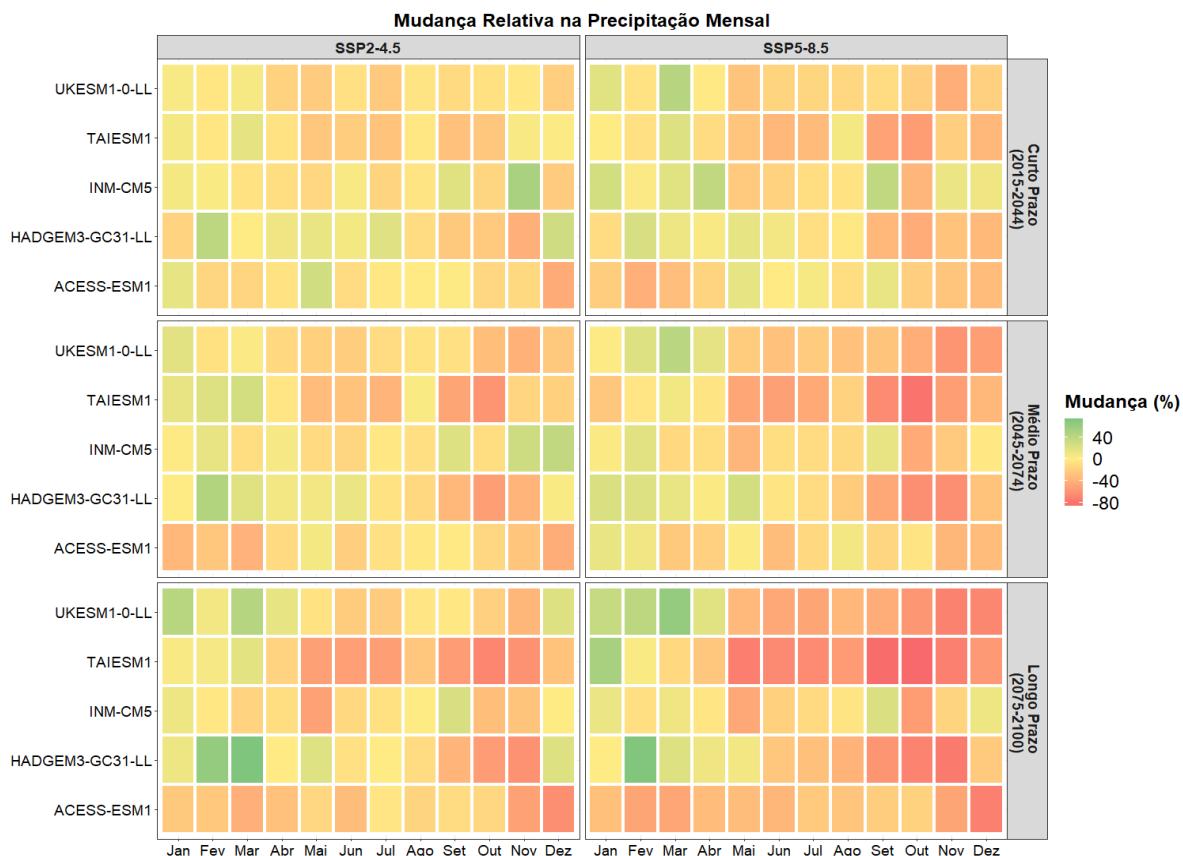
Para o trimestre novembro-dezembro-janeiro, no cenário SSP2-4.5, a média pluviométrica em todos os períodos oscila em torno da média histórica (Figura 2). No entanto, percebe-se uma leve diminuição nos meses de novembro e dezembro, enquanto há um aumento para o mês de janeiro. Essa variabilidade é maior quando considerado o cenário SSP5-8.5. No longo prazo (2075-2100), a precipitação mostra uma redução mais acentuada na precipitação principalmente para o mês de novembro.

Considerando os modelos utilizados, o mês de novembro apresentou precipitação média 40% inferior aos dados históricos (37,52 mm). O modelo INM-CM5 apresentou a menor diferença, com média de 31,30 mm, enquanto o modelo HadGEM3-GC31-LL a maior, 8,93 mm. No trimestre mais chuvoso maio-junho-julho, para ambos os cenários, há uma discordância maior entre os modelos e períodos.

Embora haja uma redução na precipitação média para todos os meses, essa redução é mais acentuada em cenário mais severo, no caso SSP5-8.5, e para períodos mais distantes, como o de longo prazo. No mês de junho, que é o mais chuvoso, a redução pluviométrica varia de 12,8% no curto prazo (2015-2044) a 39,1% no longo prazo (2075-2100). É interessante perceber que o modelo HadGEM3-GC31-LL é o único modelo em ambos os cenários para o qual o mês de junho apresenta um aumento da precipitação, contudo isso acontece apenas para o período curto e médio (SSP2-4.5) e curto (cenário SSP5-8.5). Já o modelo TaiSESM1, para todos os cenários, apresenta queda podendo chegar a 67,0% dependendo do período e do cenário considerado.

A Figura 6, a seguir, apresenta com mais detalhes as observações feitas nos parágrafos anteriores. O gráfico foi construído considerando o percentual de diferença entre a precipitação mensal dos períodos, cenários e modelos em relação aos dados observados. Quanto mais forte a coloração vermelha, maior é a queda na média pluviométrica e quanto mais escuro o verde, maior é o aumento.

Figura 6 - Mudança relativa percentual entre a precipitação mensal nos dados observados e as projeções do cenário e modelo para os três períodos



Fonte: Os autores, 2023.

As maiores discrepâncias percentuais foram identificadas durante o período de longo prazo, especialmente no cenário mais crítico SSP5-8.5.

Nóbrega et al. (2015), ao avaliar a Região Metropolitana do Recife, constataram que a aplicação de índices evidenciou uma tendência negativa, indicando uma redução na precipitação acumulada, bem como alterações desfavoráveis na distribuição sazonal e intensidade das chuvas. Além disso, foi observada uma tendência de aumento nos dias consecutivos sem chuva. Por sua vez, Silva Junior et al. (2020) investigaram as séries de precipitações máximas e totais (mensais e anuais). Embora a regressão linear simples não tenha apontado uma tendência significativa de redução, devido aos coeficientes de determinação serem baixos, os testes de Mann-Kendall e Curvatura de Sen revelaram uma tendência negativa estatisticamente significativa nas séries temporais dos totais precipitados apenas para os meses de março e setembro. No que se refere à frequência de eventos extremos, com precipitações acima de 100 mm em 24 horas, foi identificada uma tendência levemente significativa de aumento.

No estudo de Souza e Azevedo (2012), foi identificada uma redução não significativa na precipitação ao analisar uma série diária abrangendo o período de janeiro de 1961 a dezembro de 2008, coletada na estação climatológica do Recife situada no bairro da Várzea, de acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir dessa análise, sugere-se que a precipitação total anual esteja diminuindo. Esse padrão também foi corroborado pelos dados deste estudo para os municípios da RMR analisados.

É importante ressaltar que devido à interação de diferentes fatores de mudanças extremas de precipitação, as mudanças não são uniformes no espaço e variam por região (Tabari et al., 2019). A taxa crescente de precipitação extrema com a temperatura da superfície terrestre não é, portanto,

constante (Tabari, 2020). A projeção de mudanças na precipitação e nos eventos climáticos extremos terá consequências de grande impacto na agricultura e em diversos setores, caso não sejam implementadas medidas de adaptação apropriadas (Gebrechorkos et al., 2023).

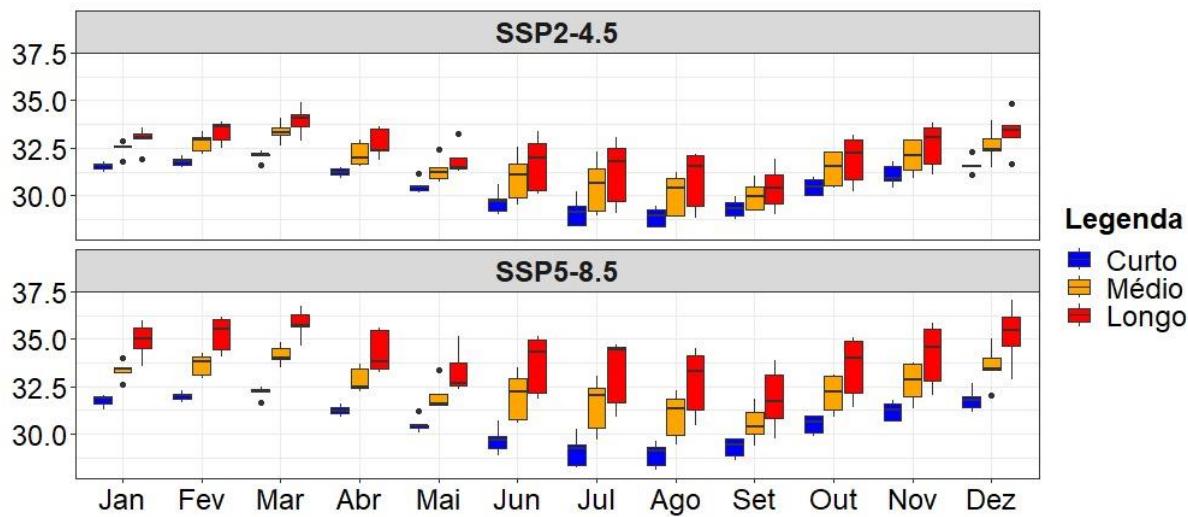
Variações nos dados de temperatura máxima

Os cenários de mudanças climáticas, conforme todos os modelos analisados, apresentam uma tendência de aumento tanto para a temperatura máxima quanto para a temperatura mínima. O aumento mínimo apontado pelos modelos é de 1 °C, em média, para o curto prazo, podendo chegar a 4° C no longo prazo. Pelo apresentado na Figura 7, há um consenso entre os modelos de que esse aumento já no curto período deve ser de pelo menos 1,25° C para os meses mais quentes. Para os meses mais frios, para o mesmo período de curto prazo, as temperaturas máximas devem variar entre 29 e 30 °C.

Para o longo prazo, principalmente no cenário SSP5-8.5, há uma maior variação entre os modelos, especialmente nos meses mais frios. A temperatura máxima em junho e julho pode chegar a 35 °C.

Além do aumento na temperatura máxima mensal para todos os meses, é também possível perceber um deslocamento no gráfico da Figura 7, com o mês de setembro apresentando a menor temperatura máxima média.

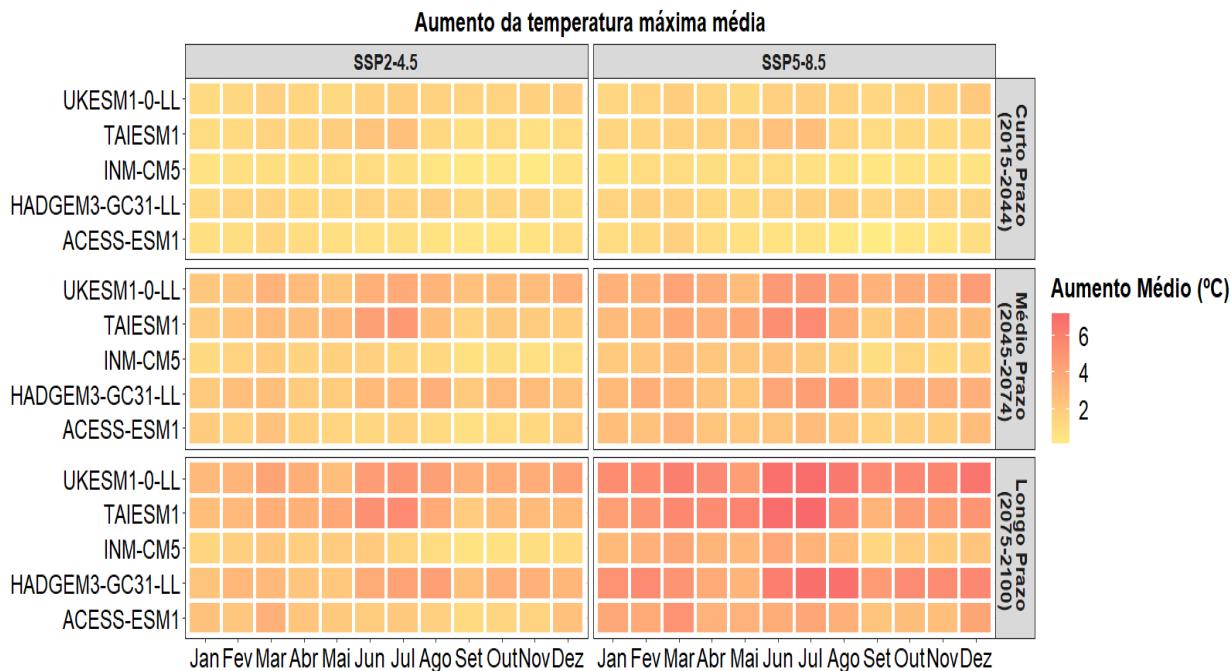
Figura 7 - Projeções das temperaturas máximas a curto, médio e longo prazo



Fonte: Os autores, 2023.

Para o período histórico analisado (Figura 2), julho foi o mês com a menor temperatura máxima. A Figura 8 mostra o aumento esperado na temperatura máxima, a depender do modelo, cenário e período considerado. A Figura 8 reforça as observações anteriores, mostrando que os meses mais frios do ano são os que devem apresentar maior aumento de temperatura, que no longo prazo pode chegar a 6 °C.

Figura 8 - Aumento da temperatura máxima média mensal para todos os modelos nos 3 períodos de estudo

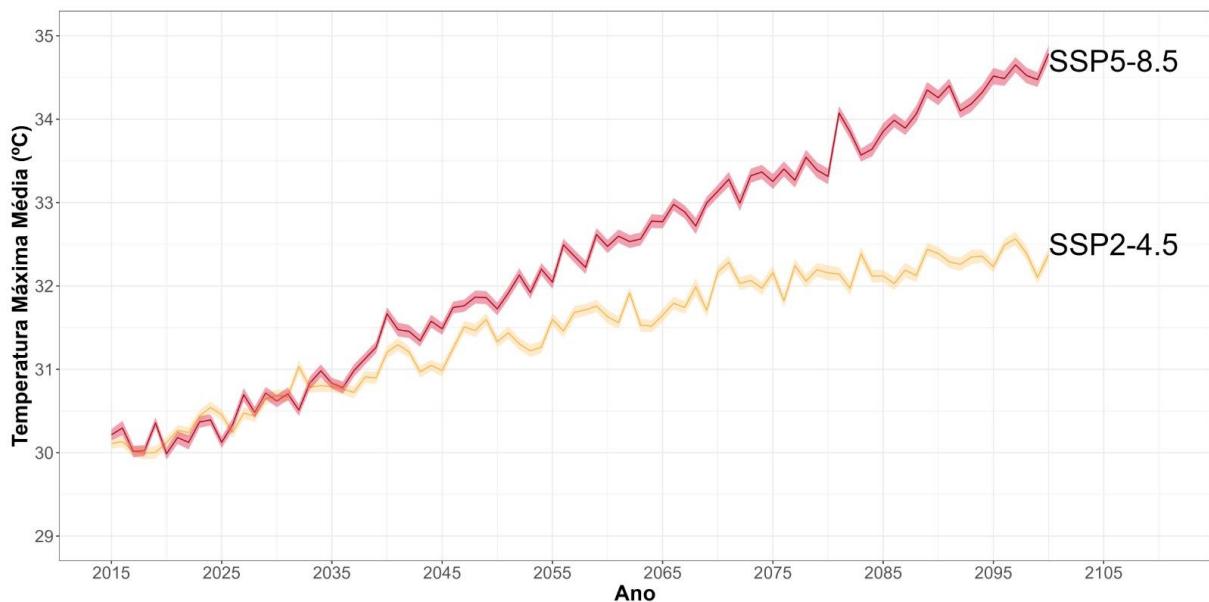


Fonte: Os autores, 2023.

Na RMR, percebe-se a tendência de aumento de temperatura no decorrer da década, com base nos dados do CMIP6, tanto no cenário moderado de emissões de GEE (SSP2-4.5) quanto no mais pessimista (SSP5-8.5). O impacto será maior no cenário mais drástico, com maior intensidade no final do século (2075-2100), quando se espera um aumento da temperatura em até 6 °C em todo o Estado.

Os dados previamente apresentados referem-se à climatologia da temperatura para os três períodos selecionados no estudo. No entanto, para melhor visualização do aumento da temperatura ao longo dos anos, os dados foram plotados em gráficos que expressam a variação da temperatura anualmente, entre o período de 2015 a 2100, tanto para o SSP2-4.5 quanto para o SSP5-8.5. Conforme esperado, nota-se uma grande discrepância entre os dois cenários, especialmente a partir do ano de 2035, quando o SSP5-8.5 tende a apresentar uma marcha crescente que se distancia cada vez mais do cenário menos pessimista. Em ambos os casos, no entanto, o aumento nos valores de temperatura é perceptível.

Figura 9 - Aumento da temperatura máxima ao longo das próximas décadas



Fonte: Os autores, 2023.

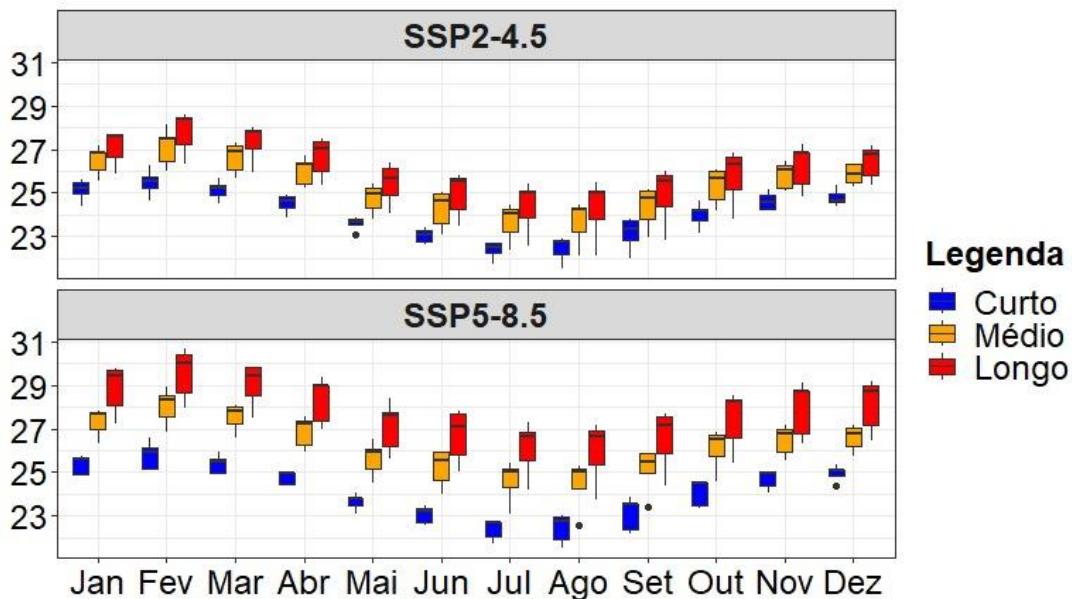
Souza e Azevedo (2012) analisaram índices associados às temperaturas, em que todos apontam tendências positivas, indicando aumento das temperaturas máximas e mínimas em torno de 1º C nos 47 anos analisados (1961-2008), constatando-se aumento de ondas de calor na região. De acordo com Silva Júnior et al. (2020), as análises das séries temporais relacionadas às temperaturas mínima, média e máxima revelaram uma tendência positiva e estatisticamente significativa, apontando para um aumento de aproximadamente 1 °C ao longo de um período de 57 anos, análogo ao apresentado por Souza e Azevedo (2012). A partir dos anos 2000, as médias das temperaturas mínima, média e máxima (tanto mensal quanto anual) excederam os valores históricos médios registrados no período de referência de 1961 a 2017. Esse incremento acentuado amplifica ainda mais a formação de ilhas de calor na cidade, que resulta da expansão urbana e do aumento da verticalização urbana.

Guedes et al. (2020) a partir de uma análise da série histórica de dados meteorológicos do INMET para o período de 1960 a 2020 revelaram uma tendência de aumentos das temperaturas máximas (Tmax) e mínimas anuais (Tmin), juntamente com uma diminuição da umidade relativa do ar. O Tmax acumulou uma taxa ascendente de 0,23 °C por década, e o Tmin apresentou um aumento de 0,13 °C por década, indicando uma tendência a noites mais quentes, indicando que as anomalias de temperatura em Recife estão se tornando mais pronunciadas e mais prováveis (Moreira et. al, 2023).

Variações nos dados de temperatura mínima

Para as temperaturas mínimas também se nota um aumento, embora haja um desacordo maior entre os modelos de quanto deve ser esse aumento. Contudo, a Figura 10 mostra que esse aumento será muito maior no médio e longo prazo para o cenário SSP5-8.5. Diferentemente da temperatura máxima, não se nota um deslocamento horizontal do gráfico, com o mês de agosto ainda apresentando a menor temperatura mínima média do ano. Todavia, enquanto os dados históricos apresentam uma temperatura mínima média de 21º graus para esse mês, os cenários futuros mostram um aumento de pelo menos 2º C para essa temperatura.

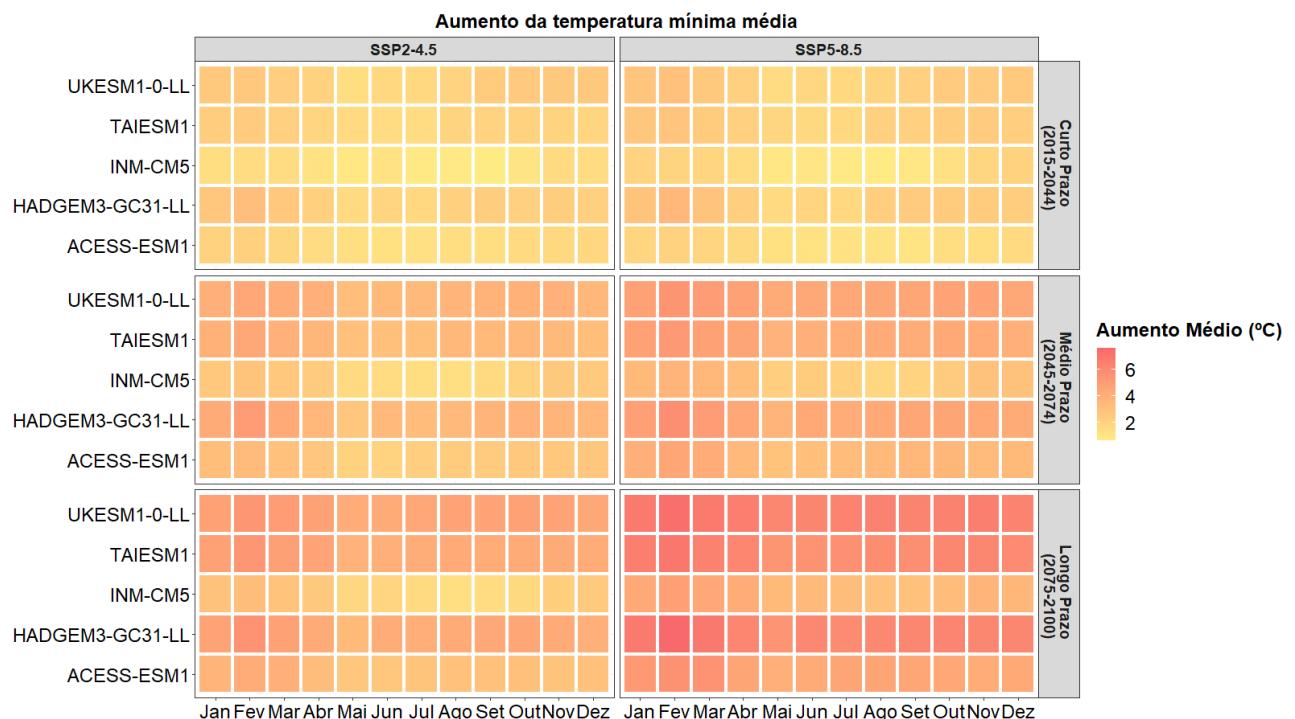
Figura 10 - Projeções das temperaturas mínimas a curto, médio e longo prazo



Fonte: Os autores, 2023.

Novamente, os meses que devem sofrer o maior aumento da temperatura são os mais frios (Figura 11). Para três dos cinco modelos analisados, demonstram isso especialmente no médio e longo prazo quando o aumento é mais perceptível.

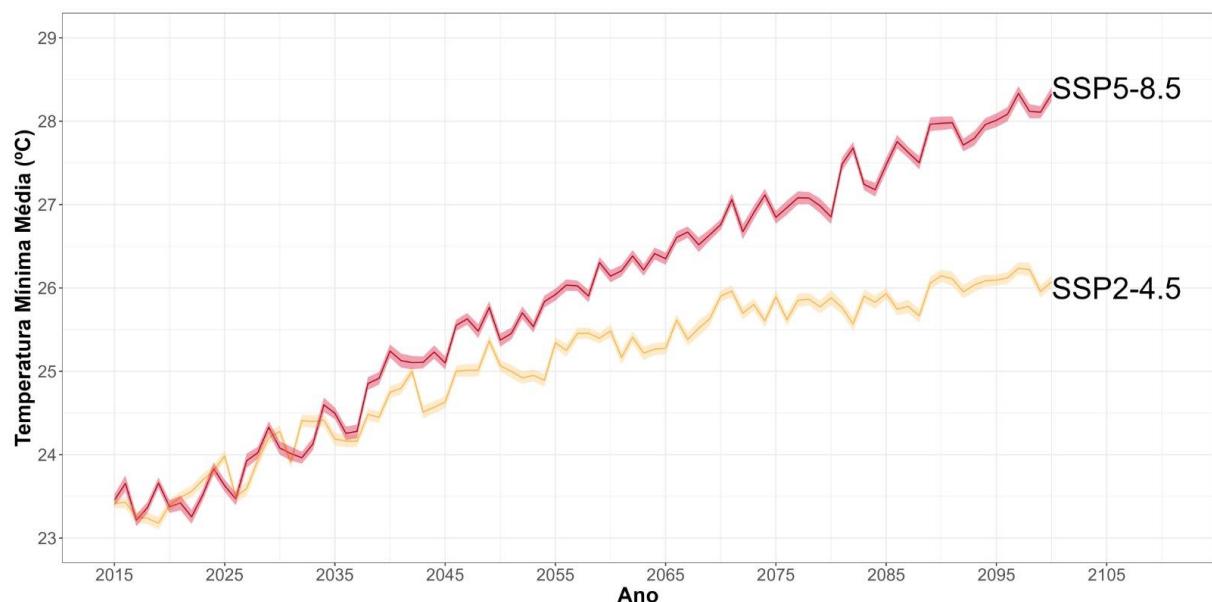
Figura 11 - Aumento da temperatura mínima média mensal para todos os modelos nos 3 períodos de estudo



Fonte: Os autores, 2023.

Quando se considera a evolução das temperaturas mínimas ao longo das décadas, até 2100, nota-se, novamente, grande tendência de aumento, especialmente no cenário mais pessimista. Enquanto o SSP2-4.5 parece aumentar e atingir um certo equilíbrio, o SSP5-8.5 aumenta de forma mais acelerada, gerando alertas mais preocupantes para o século seguinte. Em ambos os cenários, a adoção de estratégias de mitigação de eventos extremos, investimento em políticas públicas e aprimoramento de práticas para convivência produtiva com as secas será essencial para tentar reduzir os impactos do aumento da temperatura.

Figura 12 - Aumento da temperatura mínima ao longo das próximas décadas



Fonte: Os autores, 2023.

Os resultados são consistentes com Marengo (2017), que indica uma redução nas chuvas de verão ao longo do litoral, incluindo a cidade do Recife. As projeções de temperatura dos dois modelos globais utilizados em seu estudo sugerem um aquecimento significativo até o final do século XXI. Especificamente, as projeções para Recife indicam um aumento na frequência de temperaturas extremas, tanto durante o dia quanto à noite.

Os modelos climáticos avaliados estão também em concordância ao projetar uma tendência de aumento na temperatura da superfície. Moreira et al. (2022) apresentam estudos sobre o clima urbano realizados em Recife-PE, com foco nos eventos de calor urbano e suas implicações sociais e ambientais. Estes estudos destacam a vulnerabilidade da cidade às mudanças climáticas e a necessidade. Suas conclusões indicam um aumento na frequência e intensidade dos eventos de calor extremo, alinhando-se com os achados desta pesquisa, que aponta para uma intensificação dos eventos climáticos extremos de temperatura em municípios da região metropolitana de Recife. Além disso, a análise das variáveis termodinâmicas e a correlação com a ocorrência de epidemias reforçam a importância de um monitoramento climático detalhado, como o realizado nesta pesquisa, para desenvolver estratégias de mitigação e adaptação mais eficazes.

Mendes e Ferreira (2023) destacam a importância das análises das mudanças climáticas na transmissão da dengue, que pode incentivar o armazenamento inadequado em períodos de estiagens e assim contribuir para o surgimento de potenciais criadouros para o mosquito *Aedes aegypti*.

Além desse impacto associado aos dados de precipitação, esse cenário traz consigo diversas implicações, como evidenciado por Almeida (2021), que conduziu uma análise climática associada às arboviroses dengue, zika e chikungunya. O estudo apontou que a cidade do Recife apresenta condições climáticas propícias para a propagação dessas doenças ao longo de todo o ano. No entanto,

os meses com maior incidência de casos foram entre janeiro e abril, período de temperaturas mais elevadas, com uma média de 27,25 °C, e significativo índice pluviométrico, representando 38,5% da precipitação média total.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou as projeções climáticas de precipitação e temperatura para municípios da Região Metropolitana do Recife (RMR) utilizando os modelos climáticos ACESS-ESM1, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM5, TaiESM1 e UKESM1-0-LL do CMIP6. A correção de viés dos modelos utilizando o método do Quantil Mapping demonstrou ajustes satisfatórios dos dados em relação a climatologia observada na região, garantindo maior confiabilidade para as projeções climáticas futuras. Isso é especialmente relevante considerando as incertezas inerentes aos modelos climáticos, que, embora tenham melhorado, ainda apresentam variabilidade entre si. A correção de viés é um passo crucial para tornar as projeções dos modelos mais precisas e confiáveis, contribuindo para um entendimento mais sólido das futuras mudanças climáticas e seus impactos.

As projeções climáticas para os oito municípios estudados da RMR sob dois diferentes cenários de emissão (SSP 2.4-5 e SSP 5.8-5) revelaram impactos significativos nas variáveis climáticas analisadas. Os resultados dos modelos indicam um consenso na tendência de aumento nas temperaturas máximas e mínimas ao longo dos próximos anos, sendo esse aumento mais notável nos meses mais frios. Os meses quentes também mostram elevação nas temperaturas máximas, que sugere uma tendência de aquecimento gradual nos próximos anos, um pequeno deslocamento das estações. O cenário SSP5-8.5 mostra variações mais significativas nas temperaturas, indicando um potencial aumento das ondas de calor nesse cenário mais severo. Essas mudanças nos padrões de temperatura podem ter impactos profundos na saúde pública, na agricultura e nos ecossistemas, destacando a necessidade de estratégias de adaptação e mitigação.

As variações nas precisões nos dados de precipitação indicam um cenário complexo e variável. A análise dos modelos para os diferentes cenários de emissão e períodos revelou flutuações nas médias pluviométricas. Houve consenso entre os modelos em relação à sazonalidade do regime pluviométrico, com incertezas quanto aos volumes de chuva. Para o curto prazo, os modelos apontam para variações menores em relação à média histórica, enquanto no longo prazo, especialmente no cenário SSP5-8.5, prevê-se uma tendência de diminuição significativa da precipitação. Essas mudanças têm implicações profundas na gestão dos recursos hídricos e na agricultura, destacando a importância de medidas adaptativas.

Os achados deste estudo são consistentes com pesquisas anteriores, como Marengo (2017), que indicam redução das chuvas de verão ao longo do litoral leste, que inclui as cidades de Recife. As projeções de temperatura dos dois modelos globais são semelhantes, de maior aquecimento no final do século XXI. As projeções de mudanças de temperatura para Recife indicam aumento na frequência de temperaturas extremas durante o dia e à noite. Este estudo serve de auxílio para tomada de decisão e planejamento urbano, para auxiliar na mitigação dos impactos das mudanças climáticas e das estratégias de adaptação. É recomendável que os leitores interpretem esses resultados com cuidado, visto que as conclusões estão sujeitas a incertezas significativas. Qualquer pesquisa subsequente deve implementar a correção de viés como medida para reduzir essas incertezas. Isso se mostra essencial ao identificar padrões e tendências relevantes para o desenvolvimento sustentável e para avaliar futuras estratégias de adaptação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo incentivo à pesquisa e pela concessão de bolsas de Pós-Graduação. Aos projetos INCT- Observatório Nacional de Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa (Proc. 406919/2022-4) CHAMADA Nº 58/2022/CNPq, ao CNPq/MCTIC/BRICS 29/2017 (Proc. 442335/2017.2), ao Universal MCTIC/CNPq 28/2018 (Proc. 431980/2018-7). Pela bolsa de Produtividade em Pesquisa - PQ (313392/2020-0) da quarta autora.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, S. A.; XUAN, Y.; AL-RAMMAHI, A. H.; ADDAB, H. F. A Comparison Study of Observed and the CMIP5 Modelled Precipitation over Iraq 1941–2005. **Atmosphere**, v. 13, p. 1869, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13111869>
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P.T.S.; ROSOLEM, R.; HAGEMANN, S.; NOBRE, C. A. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105053 2020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105053>
- ANIL, S.; RAJ, P. A. Deciphering the projected changes in CMIP-6 based precipitation simulations over the Krishna River Basin. **Journal of Water and Climate Change**, v.13, n.3, p. 1389, 2022. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.399>
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Boletim do clima: Síntese climática**. v. 10, n. 12, dezembro de 2022. Disponível em: www.apac.pe.gov.br. Acesso em: 28/08/2023.
- AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v.55, p. 1403–1426, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- BABAUSMAIL, H.; HOU, R.; AYUGI, B.; SIAN, K.T.C.L K.; OJARA, M.; MUMO, R.; CHEHBOUNI, A.; ONGOMA, V. (2022). Future changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean and Sahara regions using bias-corrected CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v. 42, n.14, p. 7280–7297. <https://doi.org/10.1002/joc.7644>
- BROSE, M. E. Decisões para a adaptação climática: aproximando ciência e gestores na região dos Vales/RS. **Revista Caminhos de Geografia**, v.24, n.95, p. 85-96, 2023. <https://doi.org/10.14393/RCG249566921>
- BALLARIN, A.S.; SONE, J.S.; GESUALDO, G.C.; SCHWAMBACK, D.; REIS, A.; ALMAGRO, A.; WENDLAND, E.C. CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, p. 47, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01956-z>
- CHAGAS, V.B.P.; CHAFFE, P. L.B.; BLOSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. **Nat. Commun.** v. 13, p. 5136, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x>
- ESMAIEL, A.; ABDRABO, K.I.; SABER, M.; SLIUZAS, R.V.; ATUN, F.; KANTOUSH, S.A.; SUMI, T. Integration of flood risk assessment and spatial planning for disaster management in Egypt. **Progress in Disaster Science**, v. 15, p. 100245, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100245>
- GEBRECHORKOS, S.H.; TAYE, M.T.; BIRHANU, B.; SOLOMON, D.; DEMISSIE, T. Future changes in climate and hydroclimate extremes in East Africa. **Earth's Future**, v. 11, p. e2022EF003011, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022EF003011>
- GUEDES, R.V.D.S.; SILVA, T.L.D.V. Análise Descritiva da Precipitação, Temperatura, Umidade e Tendências Climáticas no Recife -Pe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, p. 3234, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3234-3253>
- HEO, J.-H.; AHN, H.; SHIN, J.-Y.; KJELDSEN, T.R.; JEONG, C. Probability Distributions for a Quantile Mapping Technique for a Bias Correction of Precipitation Data: A Case Study to Precipitation Data Under Climate Change. **Water**, v. 11, n. 7, p. 1475, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11071475>.
- HOLLANDER, A. Why So Many Climate Models? **California Climate Commons - Climate Modeling**, 2015. Acessado em: 24/08/2023. Disponível em: <http://climate.calcommons.org/article/why-so-many-climate-models>
- IPCC. **Intergovernmental panel on climate change. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers.** In Contribution of working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

IPCC. Technical Summary. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.

JIMÉNEZ-NAVARRO, I.C.; JIMENO-SÁEZ, P.; LÓPEZ-BALLESTEROS, A.; PÉREZ-SÁNCHEZ, J.; SENENT-APARICIO, J. Impact of Climate Change on the Hydrology of the Forested Watershed That Drains to Lake Erken in Sweden: An Analysis Using SWAT+ and CMIP6 Scenarios. **Forests**, v. 12, p. 1803, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12121803>

LAW, R.M. et al. The carbon cycle in the Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS-ESM1) - Part 1: Model description and pre-industrial simulation. **Geosci. Model Dev.**, v. 10, p. 2567–2590, 2017. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2567-2017>

LEÃO, E.B.S.; ANDRADE, J.C.S.; NASCIMENTO, L.F. Recife: A climate action profile. **Cities**, v. 116, p. 103270, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103270>

LUIZ-SILVA, W.; MACEIRA, M.E.P.; ROTUNNO FILHO, O.C.; CHOU, S.C. On the Observations and Environmental Modeling in Xingó Hydropower Plant - Northeast Brazil: Present and Future Hydroclimatic Features. **Environmental Modeling and Assessment**, v. 27, n.1, p. 13-28, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09810-5>

MARAUN, D., et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. **Rev. Geophys.**, v. 48, p. RG3003, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>

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. 2a. Série Biodiversidade, v. 26, 2007.

MARENGO, J.A. **Relatório Especial do Painel e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climática**, 2017.

MARENGO, J. A.; CAMARINHA, P. I.; ALVES, L. M.; DINIZ, F.; BETTS, R. A. Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 3, p. 610433, 2021. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.610433>

MENDES, J.A.; FERREIRA, M C. A epidemia de dengue em Campinas-SP em 2015 e sua relação com fatores socioeconômicos e ambientais. **Revista Caminhos de Geografia**, v.24, n.93, p. 402–423, 2023. <https://doi.org/10.14393/RCG249364255>

MERESA, H.; TISCHBEIN, B.; MEKONNEN, T. Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: observations from CMIP6 and hydrological models. **Natural Hazards**, v. 111, n. 3, p. 2649–2679, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05152-3>

MOREIRA, A.B.; DUARTE, C.C.; MATZARAKIS, A. A Review of Urban Heat Studies in Recife—PE (Brazil): Urban Heat Scales, Landscape Inequalities and Future Perspectives. **Atmosphere**, v. 14, n. 11, p. 1596, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14111596>

MOREIRA, A.B.; NÓBREGA, R.S.; WANDERLEY, L.S.A.; ANJOS, R.S.; ZAMPARONI, C.A.G.P. Os estudos de clima urbano e o seu desenvolvimento na cidade do Recife -PE: campos de estudo, técnicas de investigação e perspectivas futuras. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 23, n. 90, p. 230-251, 2022.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação às Mudanças do Clima**. Ed: Ministério do Meio Ambiente, Brasília (DF), 2015.

NÓBREGA, R.S.; DE LIMA FARIAS, R.F.; DOS SANTOS, C.A.C. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 2, p. 171-180, 2015. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130624>

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. S. (Eds) PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro (RJ), 2016.

- PINO-VARGAS, E.; CHÁVARRI-VELARDE, E.; INGOL-BLANCO, E.; MEJÍA, F., CRUZ, A.; VERA, A. Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. *Hydrology*, v. 9, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010010>
- SELLAR, A.A. et al. UKESM1: Description and Evaluation of the U.K. Earth System Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, v. 11, p. 4513–4558, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019MS001739>
- SHRESTHA, M.; ACHARYA, S.C.; SHRESTHA, P.K. Bias correction of climate models for hydrological modelling – are simple methods still useful? *Meteorological Applications*, v. 24, n. 4, p. 531–539, 2017. <https://doi.org/10.1002/met.1655>
- SIAN, K.T.C.L.; HAGAN, D.F.T.; AYUGI, B.O., NOONI, I.K.; ULLAH, W. Projections of precipitation extremes based on bias-corrected Coupled Model Intercomparison Project phase 6 models ensemble over southern Africa. *International Journal of Climatology*, v. 42, n. 14, p. 8269–8289, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7707>
- SILVA JUNIOR, M.A.B. da, FONSECA NETO, G.C. da; CABRAL, J.J. da S.P. Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 37, n. 1, p. 222, 2020. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2020.239373>
- SOUZA, W.M.; AZEVEDO, P.V. Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE (Detection Indexes Derived from Climate Change Rainfall and Temperatures in Recife-PE). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 5, n. 1, p. 143, 2012. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i1.232793>
- TABARI, H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Sci Rep.*, v. 10, p. 13768, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- TABARI, H.; HOSSEINZADEHTALAEI, P.; AGHAKOUCHAK, A.; WILLEMS, P. Latitudinal heterogeneity and hotspots of uncertainty in projected extreme precipitation. *Environ. Res., Lett.* 14, p. 124032, 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab55fd>
- TAYLOR, K.E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, n.7, p.7183-7192, 2001. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- TENAGASHAW, D.Y.; MULUNEH, M.; METAFERIA, G.; MEKONNEN, Y.A. Land Use and Climate Change Impacts on Streamflow Using SWAT Model, Middle Awash Sub Basin, Ethiopia. *Water Conserv Sci Eng*, v. 7, p. 183–196, 2022. <https://doi.org/10.1007/s41101-022-00135-2>
- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, v. 456-457, p. 12-29, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- TONG, Y.; GAO, X.; HAN, Z.; XU, Y.; XU, Y.; GIORGI, F. Bias correction of temperature and precipitation over China for RCM simulations using the QM and QDM methods. *Climate Dynamics*, v. 57, n. 5–6, p. 1425–1443, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05447-4>
- VOLODIN, E.M. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. *Clim. Dyn.*, v. 49, p. 3715–3734, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3539-7>
- WANG, Y.C. et al. Performance of the Taiwan Earth System Model in Simulating Climate Variability Compared With Observations and CMIP6 Model Simulations. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, v. 13, e2020MS002353, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020MS002353>
- WEN, K.; GAO, B.; LI, M. Quantifying the Impact of Future Climate Change on Runoff in the Amur River Basin Using a Distributed Hydrological Model and CMIP6 GCM Projections. *Atmosphere*, v. 12, 1560, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12121560>
- WILLIAMS, K.D. et al. The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, v. 10, p. 357–380, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017MS001115>

WU, C. F.; CHEN, S. H.; CHENG, C.; TRAC, L.V.T. Climate justice planning in global south: Applying a coupled nature-human flood risk assessment framework in a case for ho chi minh city, Vietnam.

Water, v. 13, n. 15, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13152021>

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 7, p. 2644–2659, 2016.

<https://doi.org/10.1002/joc.4518>

XUE, P.; ZHANG, C.; WEN, Z.; PARK, E.; JAKADA, H. Climate variability impacts on runoff projection under quantile mapping bias correction in the support CMIP6: An investigation in Lushi basin of China. **Journal of Hydrology**, v. 614, p. 128550, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128550>

ZIEHN, T. et al. The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. **J. South. Hemisph. Earth Syst. Sci.**, v. 70, p. 193-214, 2020. <https://doi.org/10.1071/ES19035>

Recebido em: 30/11/2023

Aceito para publicação em: 31/07/2024