



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Análise da variação térmica e índice pluviométrico em Bacias Hidrográficas no Semiárido Brasileiro de acordo com projeções do CMIP6

Matheus Henrique Bezerra de Melo<sup>1</sup>, Helber Barros Gomes<sup>2</sup>, Madson Tavares Silva<sup>3</sup>, Samuellson Lopes Cabral<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande e-mail: [matheushbm10@gmail.com](mailto:matheushbm10@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Alagoas, e-mail: [helber.gomes@icat.ufal.br](mailto:helber.gomes@icat.ufal.br)

<sup>3</sup> Graduado em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande (2008). Mestre em Meteorologia, com área de concentração em Agrometeorologia e Micrometeorologia pela Universidade Federal de Campina Grande, Doutor em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande (2014). Atualmente é Professor Adjunto Nível I - Classe C da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) no Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN), lotado na Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA). E-mail: [madson.tavares@professor.ufcg.edu.br](mailto:madson.tavares@professor.ufcg.edu.br)

<sup>4</sup> Hidrólogo do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN/MCTI). Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (2014), Mestre em Recursos Hídricos pelo Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (2011) e Bacharel em Meteorologia pelo Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas (2009). Tem experiência na área de Recursos Hídricos, com ênfase em Modelos Hidrológicos, Extremos Hidrológicos e Planejamento Integrado dos Recursos Hídricos. E-mail: [samuellsoncabral@hotmail.com](mailto:samuellsoncabral@hotmail.com)

Artigo recebido em 16/02/2024 e aceito em 09/09/2024

### RESUMO

A relevância deste estudo está na análise detalhada das sub-bacias hidrográficas de Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo, que são parte do importante Rio São Francisco, um dos principais cursos de água do Brasil, abrangendo uma vasta região que inclui grande parte do Nordeste. Essas sub-bacias desempenham um papel fundamental na produção sustentável de biomassa, essencial para a economia regional, e na oferta de água de boa qualidade, que é vital para o abastecimento das populações e atividades agrícolas e industriais. Além disso, essas áreas são importantes para a conservação da biodiversidade, contribuindo para a manutenção dos ecossistemas locais. O objetivo principal deste estudo é avaliar, de forma precisa, como as mudanças climáticas globais e regionais estão afetando o ciclo hidrológico nessas sub-bacias, buscando gerar conhecimento que possa ser utilizado na criação de políticas e práticas mais eficientes de gestão dos recursos hídricos. A metodologia utilizada no estudo inclui a análise de dados climatológicos históricos do período de 1990 a 2014, combinados com projeções baseadas em dois cenários futuros de mudanças climáticas (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para três intervalos temporais: 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100. Utilizando modelos climáticos avançados, como o ACESSESM1, MRIESM2, MIROC6 e CanESM2, o estudo compara variações tanto nas temperaturas médias quanto nas precipitações esperadas ao longo desses períodos. Com isso, é possível entender melhor como esses fatores podem afetar a disponibilidade de água e a integridade dos ecossistemas. Entre os principais resultados encontrados, destaca-se o aumento projetado nas temperaturas médias, que varia entre 1,5 e 2°C em todas as sub-bacias analisadas, especialmente entre 2015 e 2065. No entanto, as projeções de precipitação apresentam maior variabilidade entre os modelos: enquanto o MIROC6 e o CanESM2 sugerem uma redução das chuvas na região, o ACESSESM1 e MRIESM2 indicam um aumento das precipitações. Essa disparidade entre os cenários destaca a complexidade das projeções climáticas. A principal conclusão é que, embora o aumento da temperatura seja um ponto de consenso, as variações nas previsões de precipitação sugerem a necessidade urgente de estratégias de gestão hídrica flexíveis e adaptáveis, capazes de responder a diferentes condições climáticas futuras, garantindo assim a sustentabilidade dos recursos hídricos na região. Essas estratégias precisam considerar tanto o impacto das mudanças climáticas quanto as demandas crescentes da população e da agricultura.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Disponibilidade hídrica; Conservação da biomassa; IPCC AR6.

## Analysis of thermal variation and rainfall index in Hydrographic basins in the Brazilian semi-arid rid according to CMIP6 projections

### ABSTRACT

The relevance of this study lies in the detailed analysis of the Sobradinho, Três Marias, and Retiro Baixo sub-basins, which are part of the important São Francisco River, one of Brazil's major watercourses, spanning a vast region that includes much of the Northeast. These sub-basins play a crucial role in the sustainable production of biomass, essential to the regional economy, and in providing good quality water, which is vital for supplying populations and supporting agricultural and industrial activities. Moreover, these areas are important for biodiversity conservation, contributing to

the preservation of local ecosystems. The main objective of this study is to accurately assess how global and regional climate changes are affecting the hydrological cycle in these sub-basins, aiming to generate knowledge that can be used to develop more efficient water resource management policies and practices. The methodology used in the study includes the analysis of historical climatological data from the period of 1990 to 2014, combined with projections based on two future climate change scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) for three time intervals: 2015-2035, 2045-2065, and 2079-2100. Using advanced climate models, such as ACESSESM1, MRIESM2, MIROC6, and CanESM2, the study compares variations in both average temperatures and expected precipitation over these periods. This approach allows for a better understanding of how these factors might impact water availability and the integrity of ecosystems. Among the key findings, the projected increase in average temperatures stands out, ranging between 1.5 and 2°C across all analyzed sub-basins, particularly between 2015 and 2065. However, the precipitation projections show greater variability among the models: while MIROC6 and CanESM2 suggest a decrease in rainfall in the region, ACESSESM1 and MRIESM2 indicate an increase in precipitation. This disparity between scenarios highlights the complexity of climate projections. The main conclusion is that, although the temperature increase is a point of consensus, the variations in precipitation forecasts suggest the urgent need for flexible and adaptable water management strategies, capable of responding to different future climate conditions, thus ensuring the sustainability of water resources in the region. These strategies must consider both the impact of climate change and the growing demands from the population and agriculture.

Keywords: Climate changes; Water availability; Biomass conservation; IPCC AR6.

## Introdução

As sub-bacias de Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo estão situadas na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF), que engloba grande parte da região Nordeste do Brasil, incluindo estados como Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, além de porções do Ceará, Paraíba, Piauí, Alagoas e Sergipe. Essa bacia atravessa cinco estados brasileiros e possui uma extensa malha de canais, rios e igarapés, que são fundamentais para a geração de biomassa e o fornecimento de água para a região. A BHSF é também essencial para a preservação da biodiversidade, abrigando várias espécies de flora e fauna ameaçadas de extinção (JONG et al., 2018).

A administração dos recursos hídricos, por meio do controle de vazões e da regulamentação dos usos da água, é crucial para assegurar a utilização sustentável deste recurso vital. A adoção de políticas eficientes de conservação hídrica é imprescindível, sobretudo à medida que a disponibilidade de água potável se torna cada vez mais dependente das medidas de preservação. As alterações climáticas, provocadas pelas atividades humanas, contribuem para o aumento das temperaturas globais, afetando diretamente o ciclo hidrológico planetário (PÖRTNER, 2022).

Os impactos diretos das mudanças climáticas envolvem diversos fenômenos, incluindo o aumento das temperaturas, que contribuem para o derretimento das geleiras e elevam o nível dos mares e oceanos, resultando em maior intensidade de chuvas e inundações em regiões costeiras (Chen et al., 2023; Bolan et al., 2024). Esses efeitos também alteram as correntes marinhas e o regime de chuvas, modificando a hidrologia global e levando a eventos climáticos severos, como secas e incêndios florestais. Além disso, as temperaturas mais elevadas reduzem a quantidade de água armazenada em rios, lagos e

lençóis freáticos, o que afeta diretamente a disponibilidade hídrica no curto e longo prazo (Griggs & Reguero, 2021; Thirthar et al., 2023).

Kim et al. (2021) e Dao et al. (2024) afirmam que o aumento das temperaturas intensifica a evaporação, reduzindo o volume de água armazenada em rios, lagos e, principalmente, em aquíferos. Essa diminuição da recarga hídrica subterrânea, somada aos impactos diretos das mudanças climáticas sobre a hidrologia, como alterações no regime de chuvas e aumento da evapotranspiração, compromete a disponibilidade de água doce a curto e longo prazo. Além disso, a elevação do nível do mar e a intrusão salina em aquíferos costeiros, decorrentes do aquecimento global, contaminam as fontes de água subterrânea e reduzem ainda mais a disponibilidade de água potável.

Investigações em bacias hidrográficas revelam tendências de aumento da temperatura e variações na precipitação, o que pode levar à redução do escoamento durante períodos críticos e comprometer a geração de energia. Projetos hidrelétricos em construção também são vulneráveis a esses impactos. É fundamental que o setor de energia hidrelétrica incorpore a variabilidade climática em seus planejamento e operação, a fim de garantir a segurança energética e a sustentabilidade dos projetos (SINGH et al., 2022).

Conforme Zilli, Carvalho e Lintner (2019), a ZCAS é um fenômeno dinâmico responsável por precipitações entre os meses de novembro e março nas áreas das sub-bacias do Alto e Médio São Francisco. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um padrão sinótico ativo que se manifesta próximo à linha do equador. A ZCIT forma uma ampla região de convergência dos ventos alísios do Nordeste, deslocando-se a partir do sistema de alta pressão ou anticiclone subtropical no Hemisfério Norte (HN). No norte da América do Sul, verifica-se um aumento da

convecção sobre essa área, resultando no transporte de umidade em direção ao Nordeste Brasileiro (UTIDA et al., 2019), sendo uma das responsáveis pelas chuvas nas sub-bacias.

De acordo com Fedorova et al. (2016), as massas de ar frio são pouco investigadas no Nordeste do Brasil (NEB), porém, estudos anteriores mostram que essas massas, cujas extremidades atingem o NEB, influenciam as condições meteorológicas da região. O uso da dispersão lateral da temperatura potencial equivalente e o transporte associado são elementos inovadores na identificação de zonas frontais e apoiarão a projeção para uma operação diária mais eficaz, gerando volumes de precipitação e afetando as regiões centro-oeste, sudeste e sul do Nordeste Brasileiro, onde se encontra a maior parte da bacia do Rio São Francisco.

A escassez hídrica na bacia do Rio São Francisco, historicamente marcada por períodos de seca, tem se intensificado nas últimas décadas. A redução do fluxo de base, ou seja, a contribuição das águas subterrâneas para os rios, é um fator crucial para essa crise. A combinação de altas taxas de evapotranspiração, diminuição da precipitação e o aumento da demanda por água para irrigação têm exacerbado a depleção dos aquíferos, impactando diretamente o volume de água disponível nos reservatórios e comprometendo o abastecimento de diversas regiões (Lucas et al., 2020; Bhaga et al., 2023; Laghrib et al., 2024).

De acordo com Zhou (2021), o IPCC AR6 (2021) apresenta novas projeções climáticas que abordam cenários de emissões de baixo custo, compatíveis com as metas de emissões líquidas zero para 2050.

Além disso, destacou vários aspectos importantes, incluindo o fato de que o dióxido de carbono é cumulativo, ou seja, cada tonelada emitida contribui para o aquecimento do planeta. Isso significa que, sem uma redução significativa das emissões de GEE, os desafios enfrentados pela humanidade na Terra aumentarão. No entanto, ainda há tempo para prevenir os piores efeitos das mudanças climáticas, sendo que os benefícios da redução de emissões podem ser percebidos ao longo das próximas décadas (Ming, 2021; Slingo & Slingo, 2021).

O sexto relatório de avaliação do painel intergovernamental sobre o clima (AR6, 2021) consiste em avaliar o estado geral do conhecimento climático. Esse relatório específico tem como objetivo descrever as principais noções atuais de como mudanças climáticas globais afetam a temperatura, chuva, vento, névoa, eventos extremos e vários outros elementos climáticos.

O grupo de trabalho I do sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre

Mudanças Climáticas (IPCC) resumiu que as atividades antrópicas são responsáveis pela mudança do clima (IPCC, 2023)

O objetivo principal deste estudo é examinar as variáveis de temperatura e precipitação nas sub-bacias de Retiro Baixo, Sobradinho e Três Marias, pertencentes à bacia hidrográfica do Rio São Francisco, com o intuito de aprofundar a compreensão sobre os potenciais impactos climáticos nessas áreas. Para investigar a variabilidade climática no período presente (1990-2014) e identificar tendências futuras (2015-2100), foram utilizados quatro modelos do CMIP6 (ACCESS-ESM1-5, CanESM5, MIROC6 e MRI-ESM2-0) em dois cenários futuros (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

## Material e métodos

### Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF), com suas sub-bacias de Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo, tem sido objeto de crescente pressão antrópica nas últimas décadas. A expansão da agricultura irrigada, a urbanização e a industrialização têm alterado significativamente os regimes hidrológicos dessas sub-bacias, com consequências para a disponibilidade de água, a qualidade ambiental e a biodiversidade. A escolha dessas sub-bacias como área de estudo principal permite uma análise mais detalhada dos impactos dessas alterações, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de gestão mais eficientes e sustentáveis dos recursos hídricos da BHSF.

A área de estudo deste projeto é a Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF; Figura 1), que inclui três sub-bacias principais: Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo. O rio São Francisco desempenha um papel estratégico e crucial para o Brasil, atendendo a múltiplas demandas, desde o abastecimento de água até outros usos, como irrigação e navegação. Seus benefícios ultrapassam os limites da própria bacia, contribuindo para a geração de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) e fornecendo água para outras regiões por meio de transposições.

Como ilustrado na Figura 1, além da delimitação da BHSF como área de estudo, foram selecionadas essas três sub-bacias para análises mais detalhadas sobre os impactos das mudanças antrópicas no ciclo hidrológico. Essa abordagem permite uma compreensão mais aprofundada dos efeitos das atividades humanas nessas áreas específicas da Bacia do Rio São Francisco.

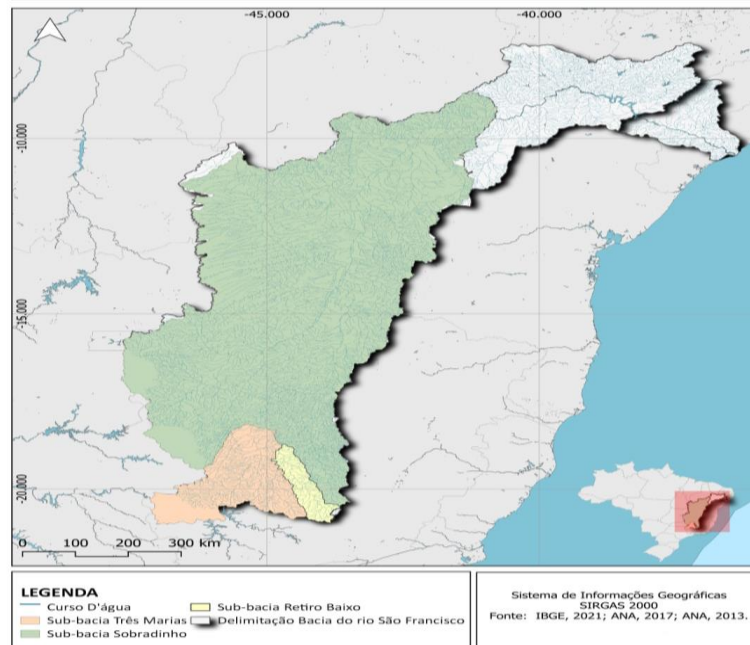


Figura 1 - Mapa de localização das sub-bacias de três marias, sobradinho e retiro baixo, na bacia hidrográfica do rio São Francisco. Fonte: Elaborada pelo autor.

A Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF) é uma das mais relevantes do Brasil, localizada principalmente na região Nordeste. Ela inclui partes das macrorregiões Sudeste e Nordeste, abrangendo parcialmente o Distrito Federal e seis estados: Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. Com uma área de drenagem de 639.129 km<sup>2</sup> e um comprimento de 2.863 km, a BHSF exibe grande diversidade climática e ambiental, variando entre zonas semiáridas e tropicais úmidas, além de conter remanescentes da Mata Atlântica e ecossistemas de estuários. A bacia possui 28 afluentes e desemboca no Oceano Atlântico, na divisa entre Alagoas e Sergipe (CBHSF, 2016).

Além de ser crucial para a geração de energia elétrica, a BHSF é usada para irrigação, pesca, transporte fluvial, abastecimento de água e diversas atividades econômicas. No entanto, a exploração intensiva dos recursos hídricos, associada ao clima semiárido e às alterações climáticas, têm levado à redução das reservas de água, promovendo disputas pelo uso do recurso e resultando em degradação ambiental.

Os reservatórios da BHSF são essenciais para a regulação do fluxo de água, além de servirem para a geração de energia, abastecimento público, irrigação e navegação. O Reservatório de Sobradinho, localizado na Bahia, é o maior da bacia e é destinado principalmente à geração de energia. O Reservatório de Três Marias, situado em Minas Gerais, é utilizado

tanto para geração de eletricidade quanto para irrigação e abastecimento. Já o Reservatório de Retiro Baixo, também em Minas Gerais, é empregado na produção de energia e na regulação da vazão do rio São Francisco (CGEE/ANA, 2012; ONS, 2020).

#### Dados e metodologia

A obtenção dos dados climáticos foi realizada por meio de interações de simulações históricas geradas por quatro modelos climáticos participantes do projeto CMIP6/IPCC. Estes modelos foram selecionados por sua capacidade de simular as condições climáticas nas sub-bacias de Sobradinho, Retiro Baixo e Três Marias, bem como por suas resoluções espaciais. Detalhes adicionais sobre as características físicas e a resolução espacial dos modelos, assim como sua disponibilização pelo Centro Meteorológico, podem ser acessados no site oficial do CMIP6: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>.

Para as projeções climáticas futuras, foram utilizados dois cenários representativos de concentração de gases de efeito estufa, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, e três intervalos de tempo: 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100. A escolha desses cenários se baseia na ampla utilização e relevância no contexto das mudanças climáticas globais e regionais, os quatro modelos utilizados nesse estudo são descritos no quadro 1.

Quadro 1 - Modelos do CMIP6

| Modelos      | Instituição ou Organização (país)                                                                                                                             |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MRI-ESM2-0   | <i>Meteorological Research Institute Earth System Model version 2 (Japão)</i>                                                                                 |
| MIROC6       | <i>Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japão)</i> |
| ACCESS-ESM1- | <i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Austrália)</i>                                                                               |
| CanESM5      | <i>Canadian Earth System Model 5nd generation (Canadá)</i>                                                                                                    |

Com o intuito de atingir os objetivos delineados, a metodologia adotada possui uma abordagem predominantemente quantitativa, incorporando procedimentos estruturados que seguem padrões formais de coleta de dados. Nesse sentido, a análise é conduzida por meio da aplicação de métodos estatísticos como média aritmética das precipitações e temperaturas dos modelos. Para isso, foram examinadas as relações entre essas duas variáveis no âmbito dos experimentos do histórico dos modelos, dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e de altas emissões (ssp5-8.5) do AR6/IPCC, abrangendo o período de 1990 a 2100.

Dessa maneira, é possível inferir a extensão na qual as projeções desses experimentos do IPCC se apresentam como ferramentas analíticas para a compreensão do estado futuro da Temperatura e sua influência na precipitação nas sub-bacias de Retiro Baixo, Três Marias e Sobradinho. Utilizando a plataforma *RStudio* ocorreram os cálculos das médias de temperatura e precipitação dos quatro modelos.

#### Resultados e discussão

##### *Climatologia das sub-bacias de retiro baixo, três marias e sobradinho*

Durante o período investigado, foram observados resultados significativamente distintos para a temperatura média e a precipitação anual em Retiro Baixo, considerando diferentes cenários e períodos dos quatro modelos.

No histórico de temperatura média, entre 1990 e 2014, conforme as médias dos modelos apresentados na figura 2a, a temperatura variou entre 22,73°C e 15,74°C, com as maiores temperaturas ocorrendo

entre os meses de outubro e abril. A temperatura mais alta foi registrada em janeiro (22,73°C) e a mais baixa em julho (15,74°C).

No que diz respeito à temperatura média na sub-bacia de Retiro Baixo, durante o intervalo de 2015 a 2035, conforme a figura 3a, os cenários de altas emissões (SSP5-8.5) indicaram temperaturas superiores em comparação aos cenários de emissões moderadas (SSP2-4.5). Nesse período, as temperaturas médias variaram entre 17°C e 30°C, com os meses de setembro a março registrando as temperaturas mais elevadas. A maioria dos modelos demonstrou uma tendência crescente nas temperaturas ao longo dos anos, com um aumento significativo em relação ao histórico.

No período subsequente, de 2045 a 2065, conforme ilustrado na figura 3b, os cenários de emissões mais elevadas também registraram temperaturas altas. Esta fase apresentou médias de temperatura superiores à do período anterior, com destaque para temperaturas mais intensas nos meses de setembro a março. As temperaturas médias mensais oscilaram entre 17°C e 31°C.

No último intervalo de análise, de 2079 a 2100, conforme visível na figura 3c, os modelos projetam cenários com temperaturas ainda mais elevadas, com médias variando entre 17°C e 32°C. Essa fase revelou maior variação nos extremos de temperatura e uma tendência mais acentuada de aumento ao longo do tempo.

Conforme estudo de Nóbrega et al. (2022), a aplicação de modelos climáticos do CMIP6 aos cenários SSPs revelou um aumento generalizado e intensificado da aridez em toda a Bacia Estendida do São Francisco, com destaque para a região Nordeste, caracterizada por clima semiárido, dados semelhantes a este estudo.

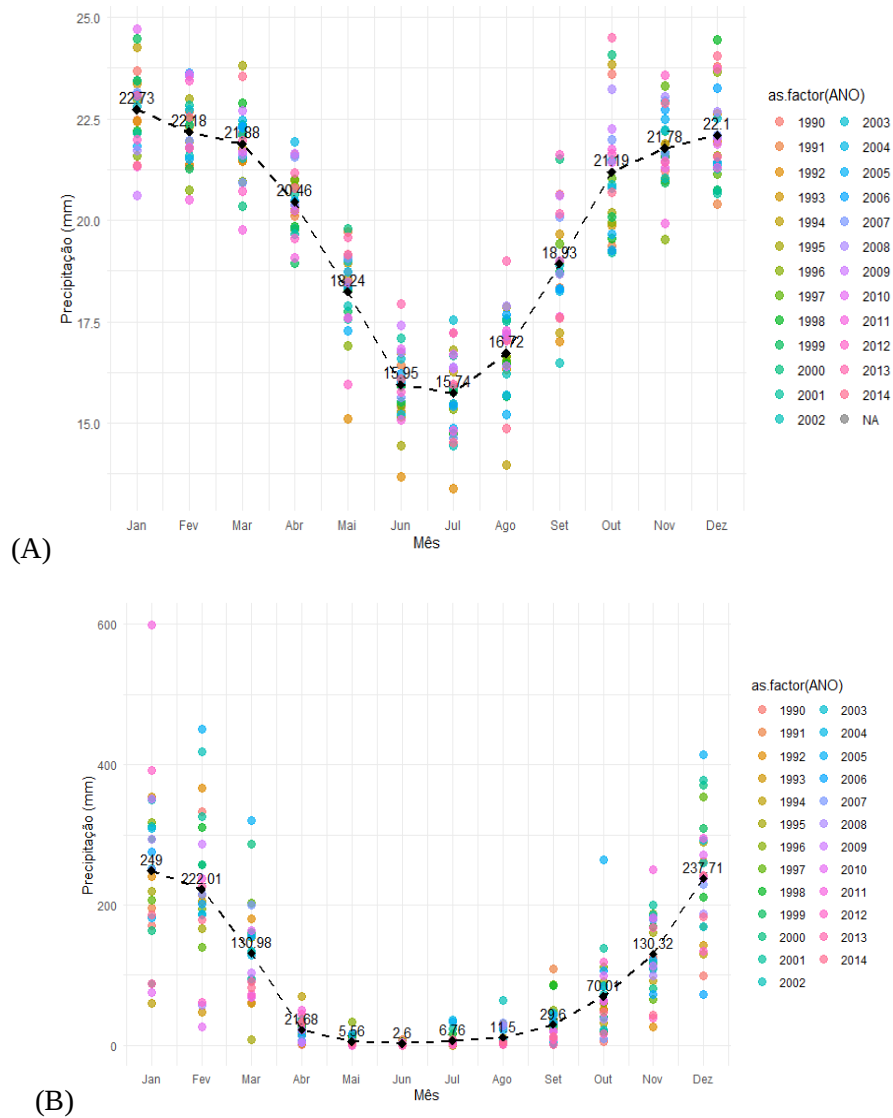
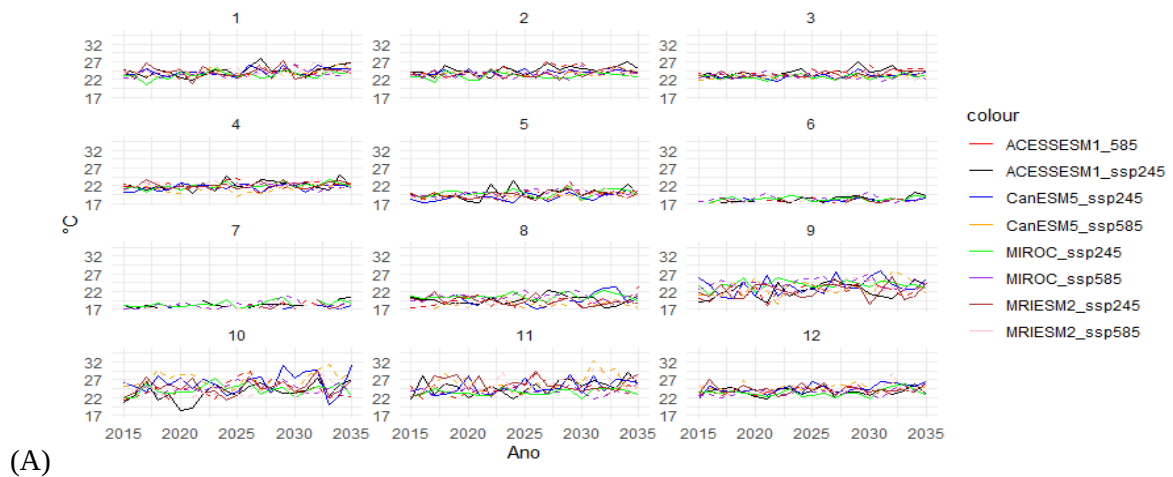


Figura 2 - Média de temperatura (A) e precipitação (B) do histórico dos modelos em Retiro Baixo nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).



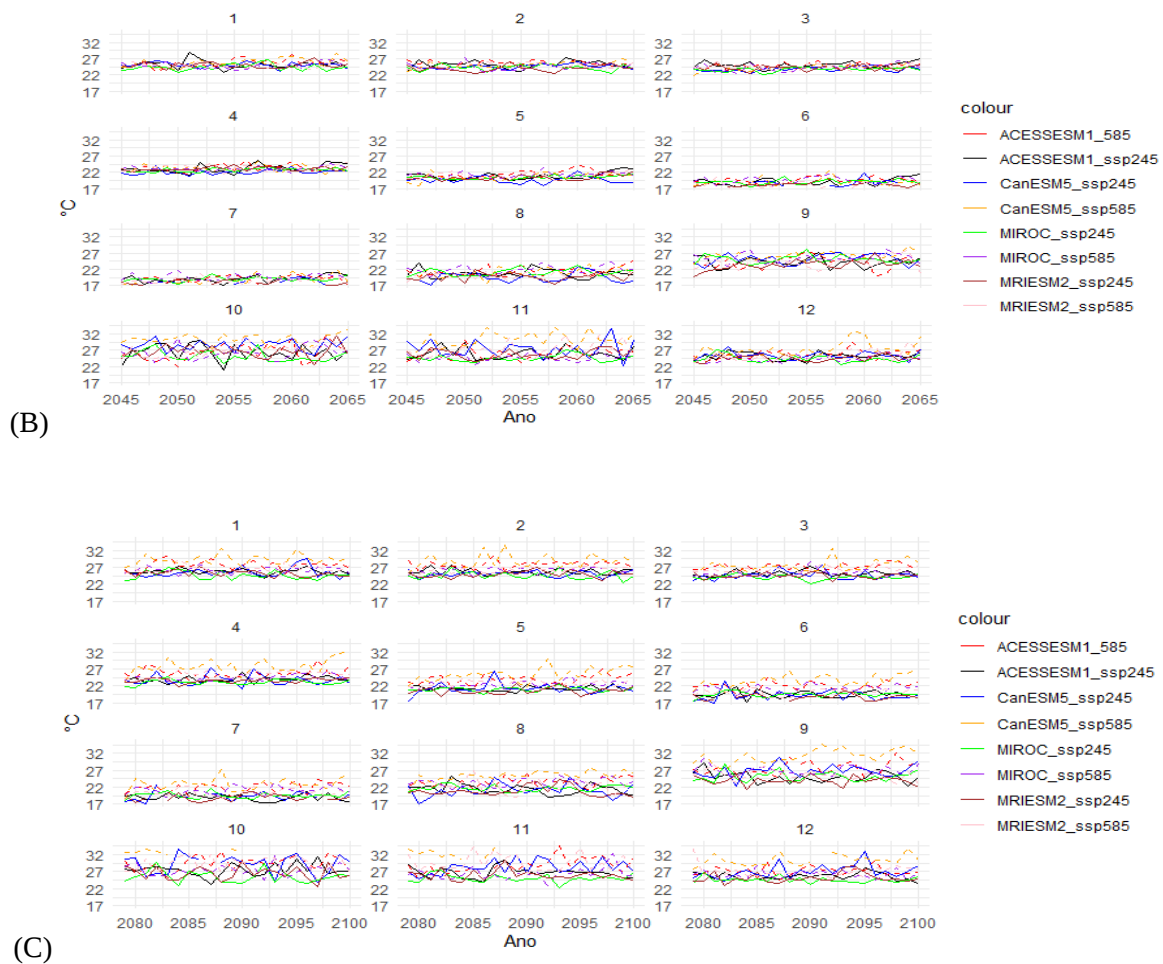


Figura 3 - Temperatura média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035 (A), 2045-2065(B) e 2079-2100(C).

No que diz respeito à precipitação, os dados dos modelos para o período de 1990 a 2014, apresentados na figura 2b, indicam um ciclo de chuvas de novembro a março e uma fase seca de abril a outubro. As variações incluem 249 mm em janeiro, sendo o mês com maior volume de precipitação, e 2,6 mm em junho, que registra o menor índice de precipitação em comparação aos demais meses.

Para os períodos de 2015-2035 (figura 4a), 2045-2065 (figura 4b) e 2079-2100 (figura 4c), os modelos indicaram precipitações superiores à média

histórica, especialmente nos meses de novembro a março. O cenário de emissão SSP5-8.5 projeta maiores volumes de precipitação na região, uma vez que esse cenário considera um aumento substancial na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Esse aumento contribui para o aquecimento global, que eleva as temperaturas, intensificando a evaporação da água. Isso resulta em maiores quantidades de vapor d'água na atmosfera, que, ao se condensar, provoca uma maior ocorrência de chuvas.

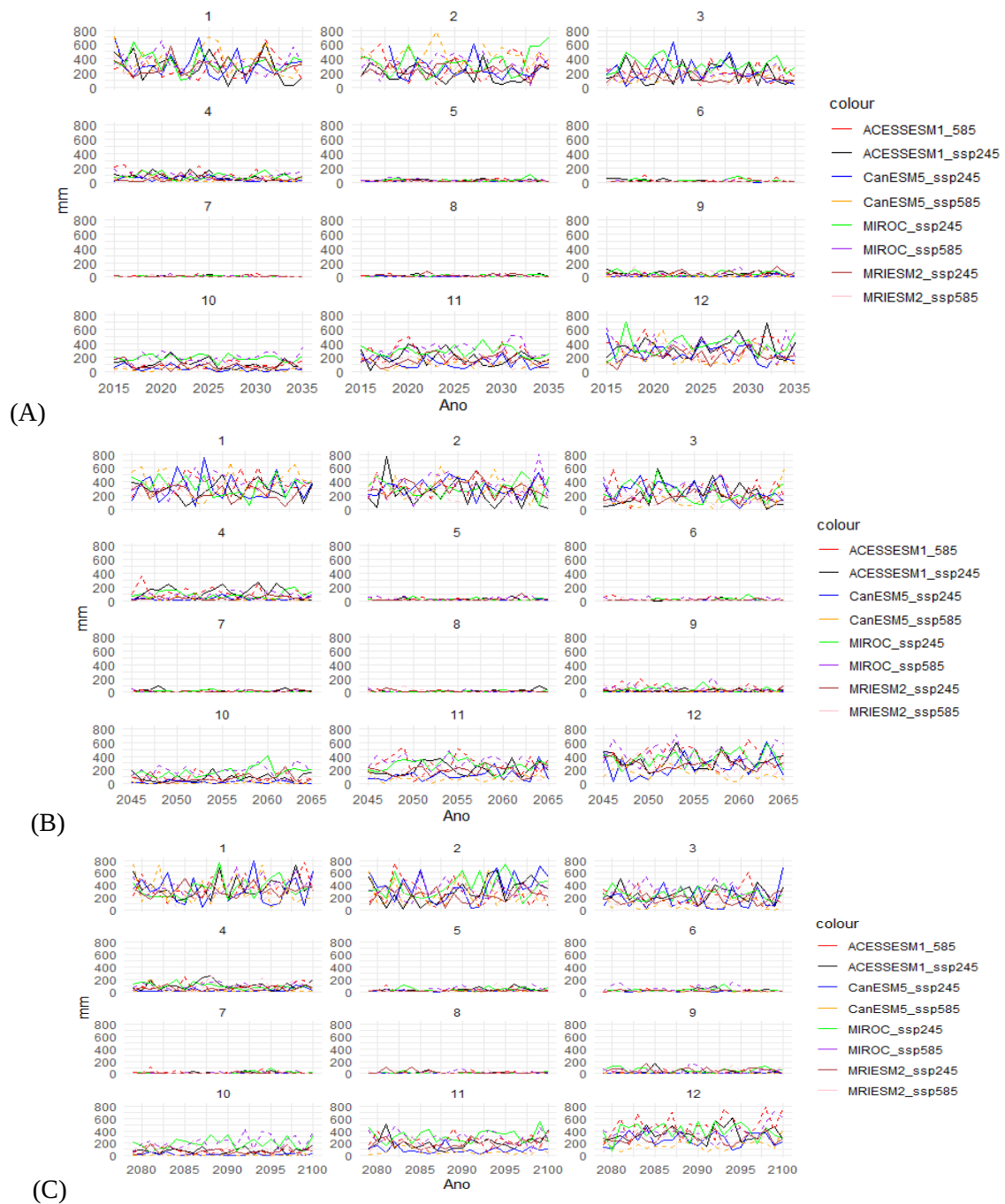


Figura 4 - Precipitação média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035 (A), 2045-2065 (B) e 2079-2100 (C).

Na sub-bacia de Retiro Baixo, durante os períodos de 2015-2035 e 2045-2065, conforme mostrado na Figura 5, houve um aumento de temperatura em todos os modelos climáticos, variando de 1,5 a 2°C. Entretanto, surgiram divergências em relação à precipitação: os modelos ACESSESM1 e MRIESM2 indicaram um aumento, enquanto os modelos MIROC6 e CanESM2 apontaram para uma redução nas chuvas nessa região. A análise das faixas temporais e dos modelos que estudam a evolução da temperatura média nos cenários de emissões intermediárias (SSP2-4.5) e emissões elevadas (SSP5-8.5) mostra um cenário em que ambos apresentam um aumento significativo nas temperaturas. Sob o SSP2-4.5, a elevação térmica ocorre de forma gradual. No cenário de emissões altas (SSP5-8.5), o aumento das temperaturas é mais acentuado, com o maior pico sendo observado no período de 2079-2100.

Entre os períodos de 2015-2035 e 2045-2065, os modelos ACESSESM1 e MRIESM2 apresentaram aumento de precipitação em todos os cenários,

enquanto o modelo MIROC6 mostrou um aumento apenas no cenário de emissões moderadas, e o CanESM5 indicou redução nas precipitações em ambos os cenários.

A análise das faixas temporais e modelos, no que diz respeito à precipitação média nos cenários de emissões intermediárias (SSP2-4.5) e elevadas (SSP5-8.5), revela variações importantes nos volumes de precipitação. Entre 2079-2100, os modelos MIROC6 e MRIESM2 apresentaram um aumento significativo nos volumes de precipitação, especialmente sob o cenário de altas emissões. No entanto, os modelos CanESM5 e ACESSESM1 mostraram uma tendência contrária, com uma redução dos volumes de precipitação no mesmo período sob altas emissões. No cenário de emissões intermediárias, houve um aumento geral nos volumes de precipitação em todos os modelos durante a última faixa temporal, com exceção do modelo CanESM5, que registrou uma queda.

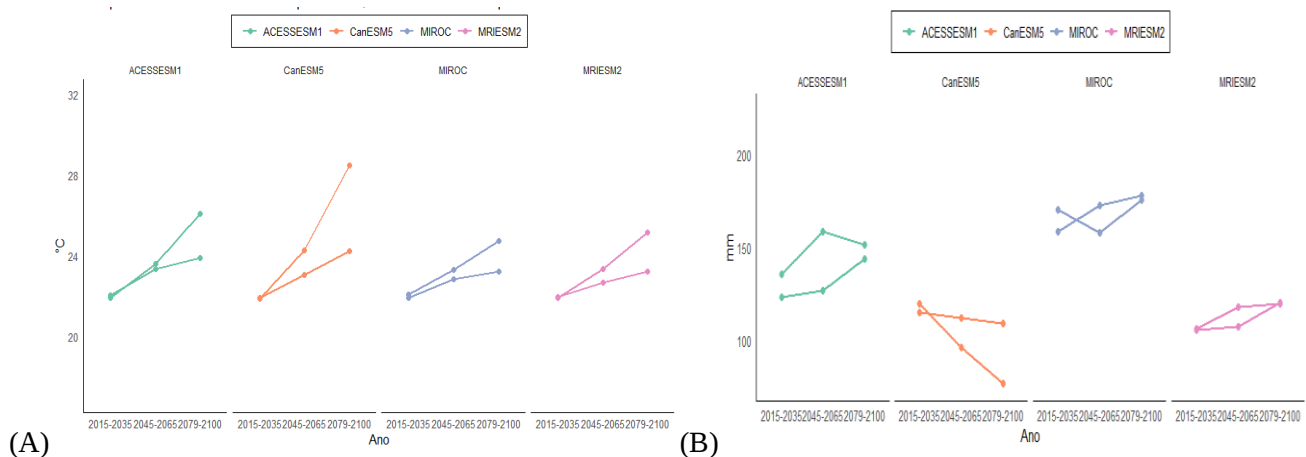


Figura 5 - Faixas temporais e modelos de acordo com a temperatura média (A) e precipitação média (B) dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5) em Retiro Baixo.

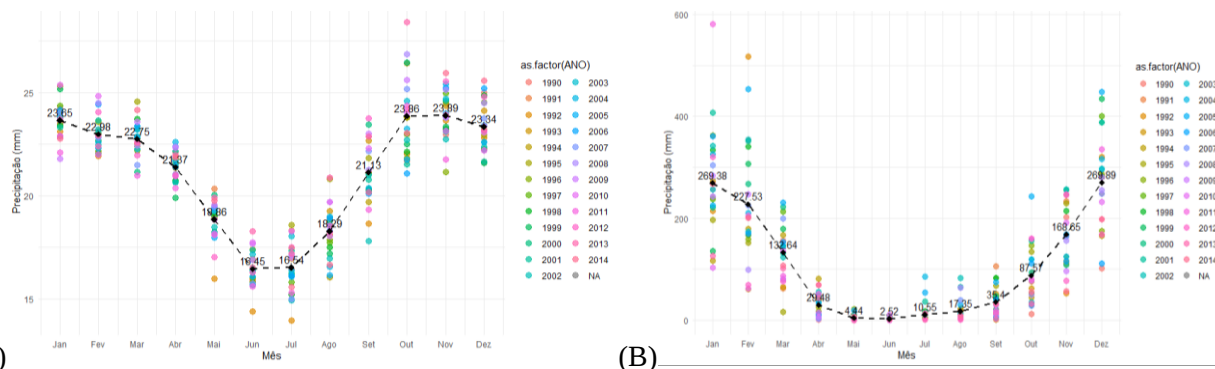
No período histórico de 1990-2014, conforme mostrado na Figura 6, a temperatura média em Três Marias foi de 21,09°C, com um total de precipitação anual de 1038,38 mm. Contudo, ao compararmos esses valores com os dados da Figura 7 para o cenário SSP2-4.5 no período de 2015-2035, observa-se um aumento na temperatura média dos modelos para 21,97°C e um acréscimo na precipitação anual, chegando a 1193,56 mm. No cenário SSP5-8.5 para o mesmo período, a temperatura média foi de 21,95°C, com uma precipitação anual de 1176,82 mm.

Para o período de 2045-2065, no cenário SSP2-4.5, a temperatura média continuou a subir, alcançando 22,70°C. Ao mesmo tempo, a precipitação anual apresentou um aumento expressivo, totalizando 1326,01 mm. Sob o cenário SSP5-8.5, a temperatura

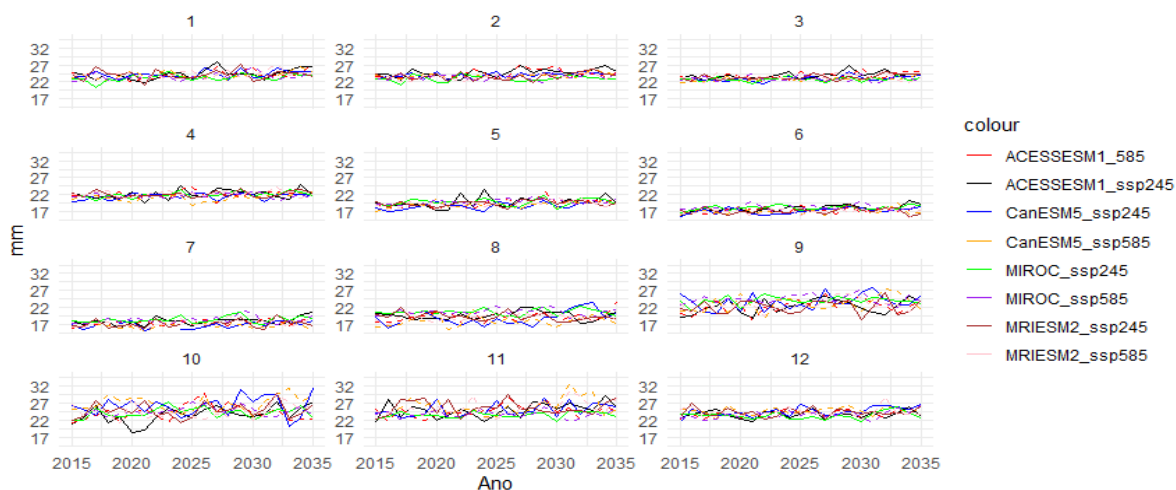
média anual também subiu, atingindo 23,16°C, enquanto a precipitação total anual foi de 1201,20 mm. Esses resultados indicam um futuro com aquecimento mais acentuado e um aumento considerável na quantidade de chuvas em Três Marias.

Ao projetar para o futuro distante, especificamente para o período de 2079-2100, no cenário SSP2-4.5, a temperatura média continuou a aumentar, chegando a 23,36°C, e a precipitação anual também subiu significativamente, totalizando 1339,61 mm. No cenário SSP5-8.5 para o mesmo período, a temperatura média foi ainda mais alta, atingindo 25,08°C, com um aumento na precipitação anual para 1382,40 mm. As diferenças observadas nesses resultados destacam a importância de considerar

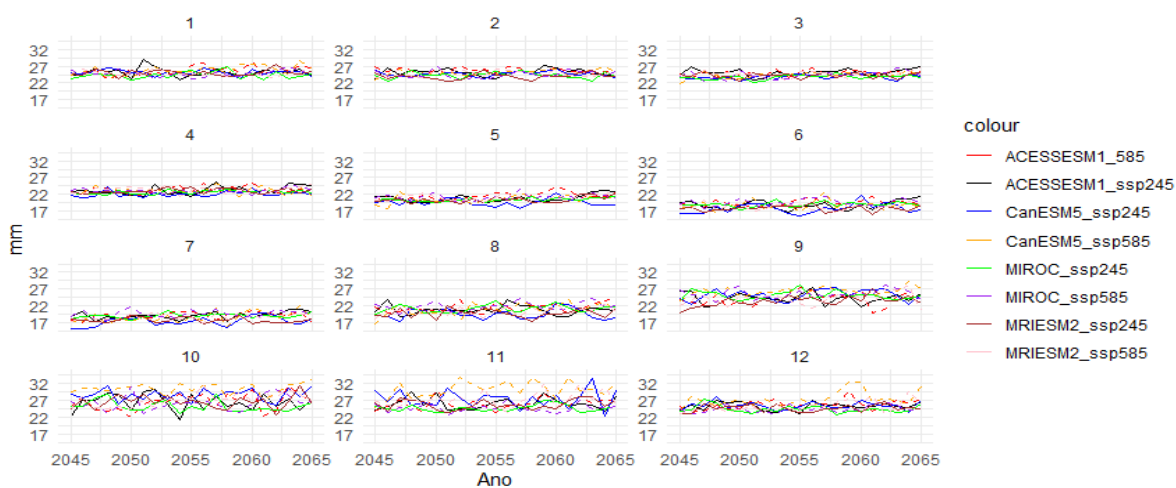
múltiplos cenários e períodos ao analisar as mudanças climáticas na sub-bacia de Três Marias.



(A) (B)  
Figura 6- Média de temperatura (A) e precipitação (B) do histórico dos modelos em Três Marias nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).



(A)



(B)

(C)

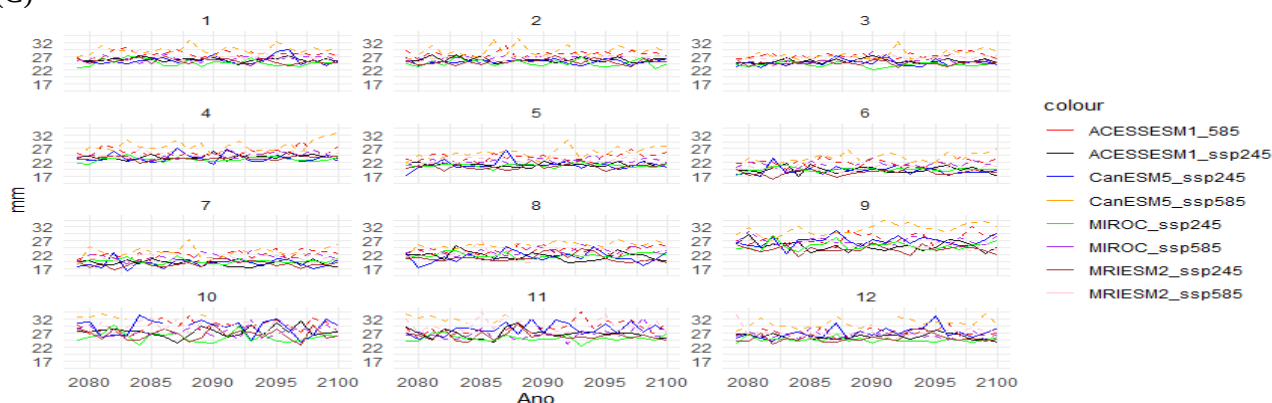


Figura 7 - Temperatura média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Três Marias, para as faixas temporais de 2015-2035 (A), 2045-2065(B) e 2079-2100(C).

Na Figura 8, em Três Marias, durante os períodos de 2015-2035 e 2045-2065, os modelos climáticos ACESSES1 e MRIESM2 indicaram um incremento na precipitação. Em contrapartida, os modelos MIROC6 e CanESM2 sinalizaram uma redução das chuvas nessa sub-bacia, assim como em Retiro Baixo. Entretanto, todos os modelos convergiram no consenso de um aumento nas temperaturas.

Na avaliação dos cenários de emissões SSP2-4.5 e SSP5-8.5, observou-se um crescimento expressivo nas temperaturas, tanto no cenário de emissões moderadas (SSP2-4.5) quanto no cenário de emissões elevadas (SSP5-8.5).

Nas faixas temporais de 2079 a 2100, ao examinar a precipitação média nos cenários de emissões intermediárias (SSP2-4.5) e altas emissões (SSP5-8.5), nota-se um padrão em que, no cenário de emissões elevadas, apenas o modelo MIROC6 apresentou um aumento na curva de precipitação, sugerindo um comportamento peculiar nesse contexto.

Em contraste, nos cenários de emissões intermediárias, as precipitações mostraram uma

tendência de aumento constante. Contudo, destaca-se uma exceção: o modelo CanESM5, que registrou uma queda na precipitação.

Conforme Da Silva et al. (2021), quatro cenários de demanda consuntiva de energia hidrelétrica foram projetados para o período de 2017 a 2051, cruzados com os cenários climáticos futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Os resultados indicam que, para o cenário SSP5-8.5, as projeções apontam para reduções mais expressivas na geração hidrelétrica dos reservatórios de Sobradinho e Três Marias em comparação ao cenário SSP2-4.5. Sobradinho se mostrou o reservatório mais vulnerável às mudanças climáticas futuras, apresentando a maior magnitude de redução na geração de energia hidrelétrica, conforme o modelo CanESM5 no qual indica aumento na temperatura e diminuição de precipitação.

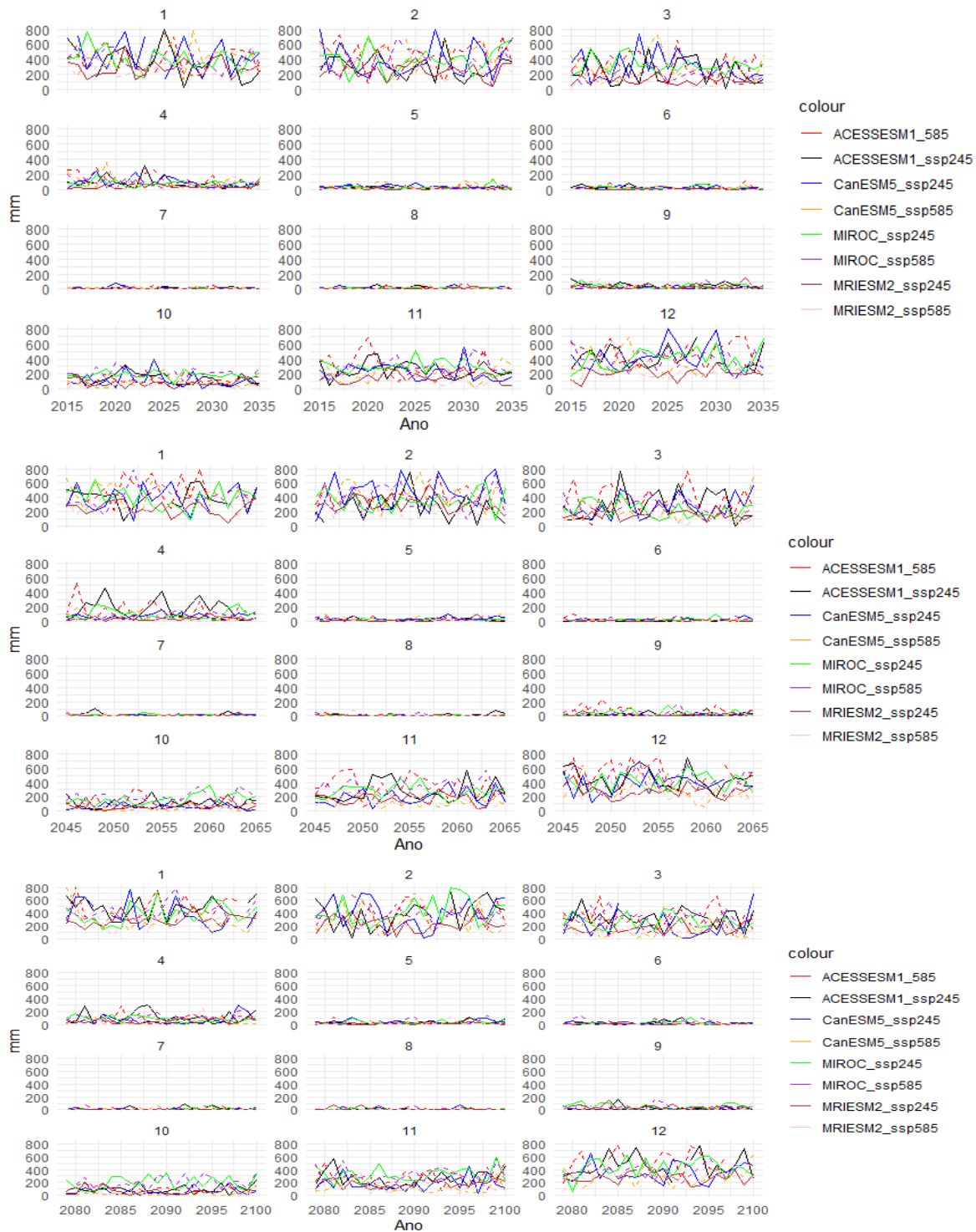


Figura 8 - Precipitação média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035 (A), 2045-2065 (B) e 2079-2100 (C).

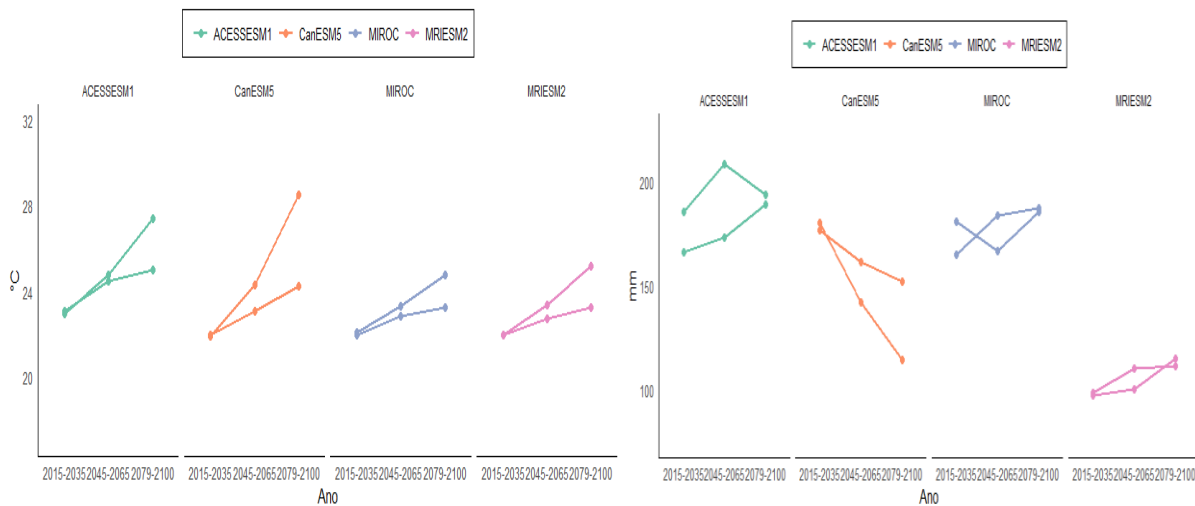


Figura 9 - Faixas temporais e modelos de acordo com a temperatura (A) e precipitação média (B) dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5) em Três Marias.

A avaliação do histórico e dos dois cenários climáticos aponta variações significativas nos resultados de temperatura média e precipitação anual na sub-bacia de Sobradinho (Figura 10). De acordo com o histórico dos modelos, o período entre 1990 e 2014 registrou uma temperatura média de 23,5°C e uma precipitação anual de 1222,18 mm.

Ao analisar o cenário SSP2-4.5 para o intervalo de 2015 a 2035, constatou-se um aumento considerável na temperatura média, chegando a 26,17°C, enquanto a precipitação anual diminuiu para 1070,66 mm. Nesse mesmo intervalo, o cenário SSP5-8.5 também apresentou um aumento na temperatura média para 26,21°C, com a precipitação anual caindo para 1038,62 mm, resultados obtidos a partir da média dos quatro modelos (ACESSES1, CanESM5, MIROC e MRIESM2).

Seguindo com as análises de precipitação e temperatura, no cenário de emissões intermediárias de CO<sub>2</sub> (SSP2-4.5) para o período de 2045 a 2065, a temperatura média continuou subindo, alcançando 26,96°C, e a precipitação anual aumentou em comparação ao intervalo de 2015 a 2035, totalizando

1202,18 mm. Por outro lado, no cenário de maiores emissões de CO<sub>2</sub> (SSP5-8.5), a temperatura média chegou a 27,43°C, e a precipitação anual foi de 1156,72 mm.

Para o período de 2079 a 2100, verificou-se um aumento ainda mais expressivo na temperatura média em ambos os cenários. No SSP2-4.5, a temperatura média chegou a 27,46°C, enquanto no SSP5-8.5 foi registrada uma média de 29,08°C. Em relação à precipitação anual, o SSP2-4.5 atingiu 1262,03 mm, e o SSP5-8.5 apresentou um valor ligeiramente maior, com 1284,01 mm. Esses dados indicam um cenário de aquecimento progressivo ao longo do tempo, acompanhado de alterações nas médias de precipitação anual.

De acordo com De Jong (2021), o modelo HADGEM2-ES/Eta projeta um aumento de até 8°C na temperatura média no Brasil de 2070-2099, comparado ao período de 1961-1990. Essa tendência de aquecimento, também observada nos cenários do RCP8.5 para a América do Sul, corrobora com os resultados obtidos neste estudo para as bacias do rio São Francisco.

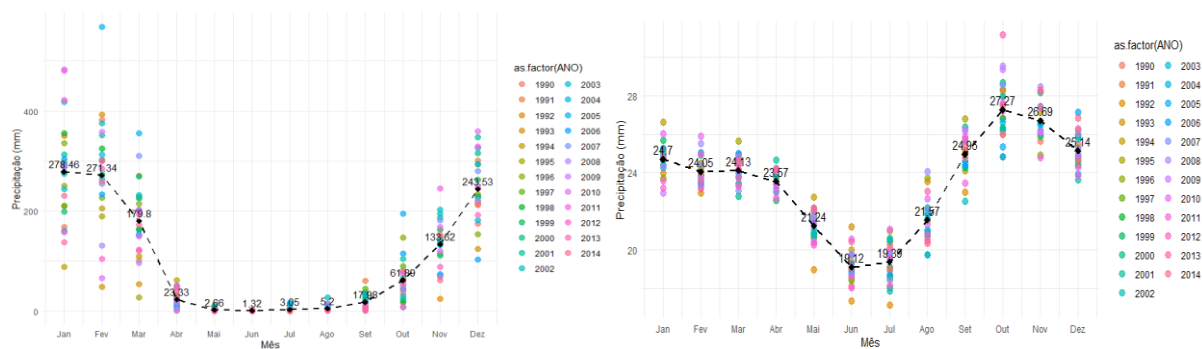
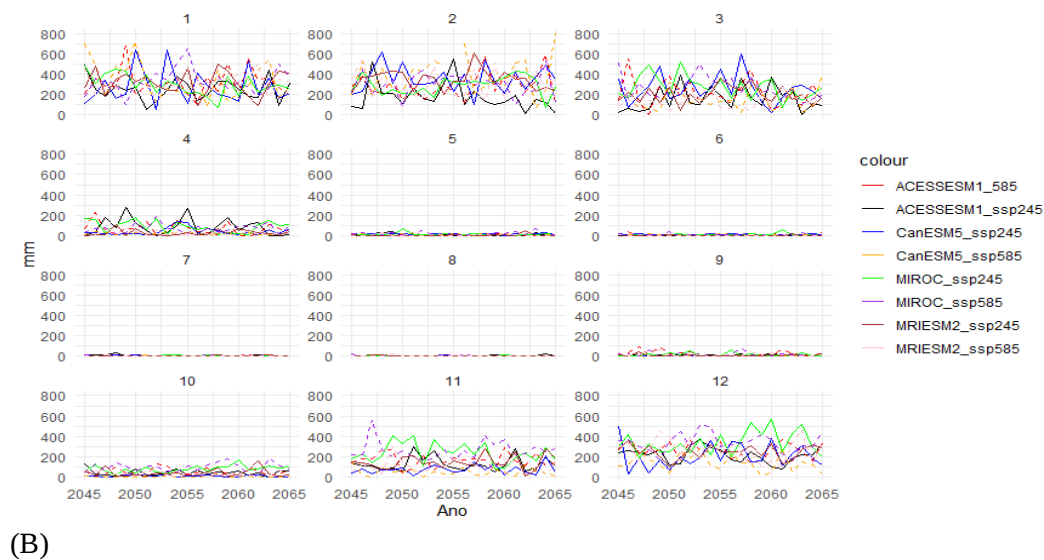
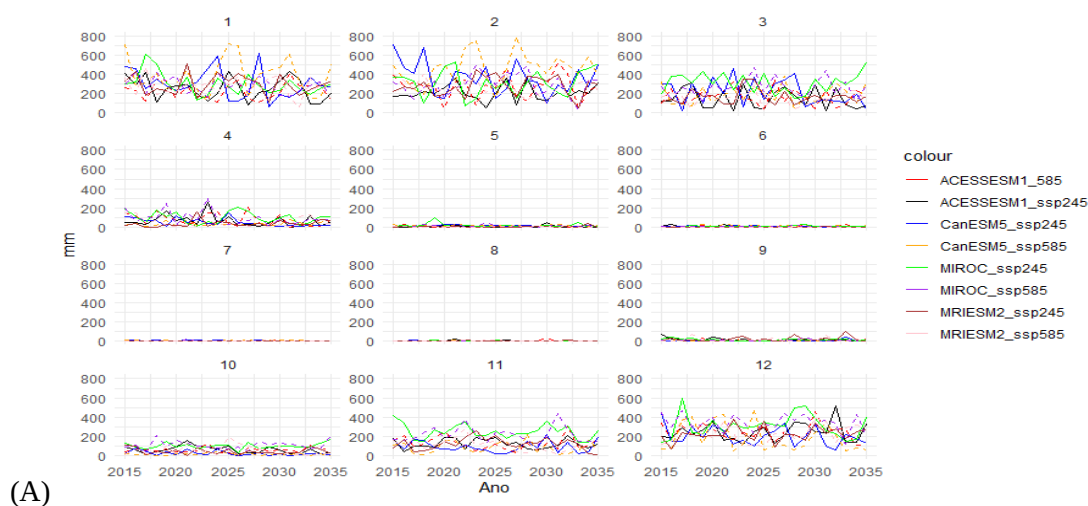


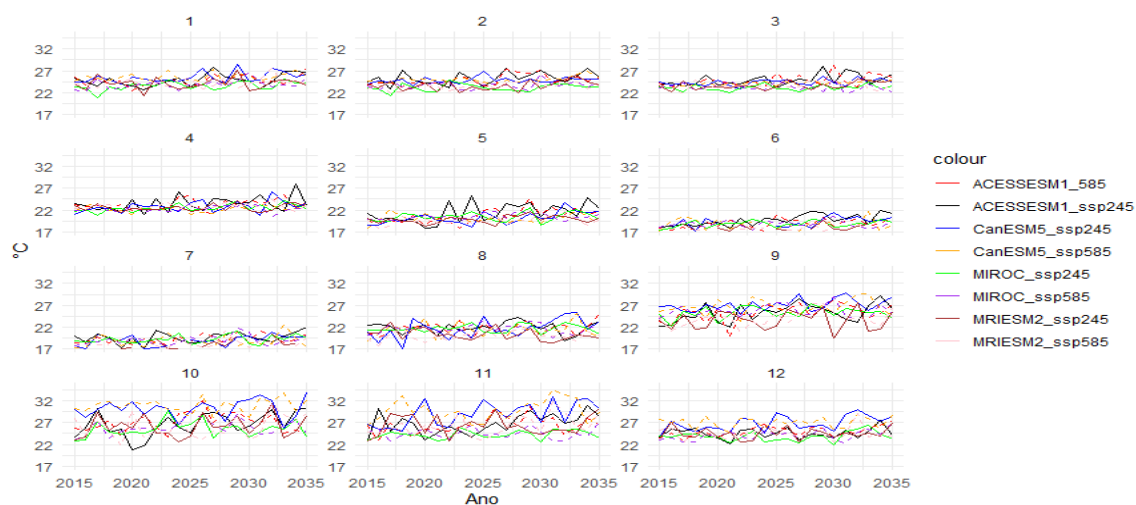
Figura 10- Média de precipitação média (A) e temperatura (B) do histórico dos modelos em Sobradinho nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).



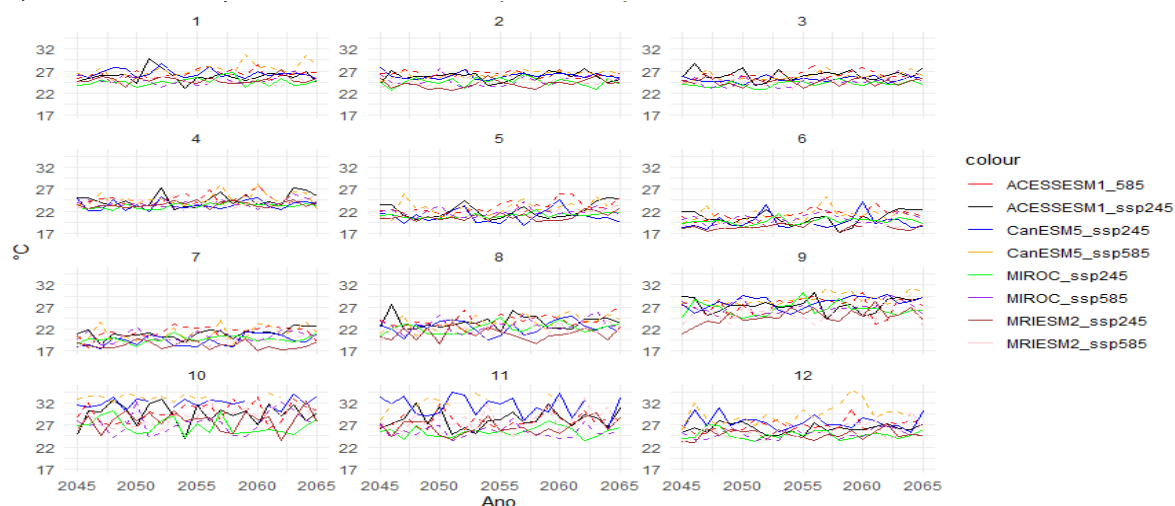


(C)

Figura 11 - Precipitação média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Sobradinho, para as faixas temporais de 2015-2035 (A), 2045-2065 (B) e 2079-2100 (C).



(A)



(B)

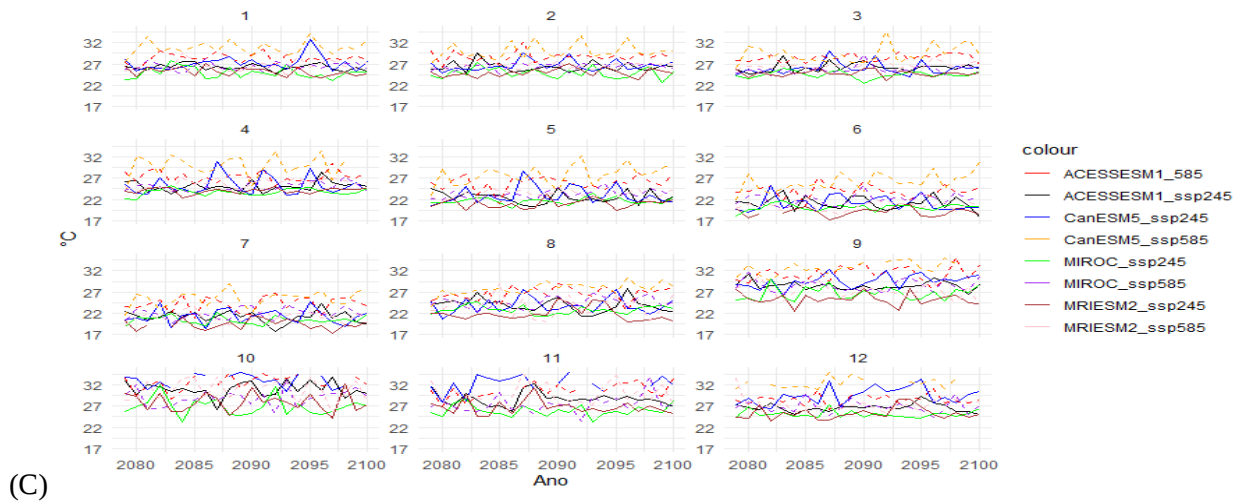


Figura 12 - Temperatura média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Sobradinho, para as faixas temporais de 2015-2035 (A), 2045-2065 (B) e 2079-2100 (C).

Nas diferentes faixas temporais e modelos dos cenários (SSP2-4.5) e (SSP5-8.5) em relação à temperatura média, verifica-se que as temperaturas mais altas ocorreram em ambos os cenários. Esse resultado reforça a preocupação com o aumento das temperaturas em projeções futuras para a sub-bacia de Sobradinho, mostrando uma elevação entre os períodos de 2015-2035 e 2045-2065, semelhante ao que foi observado em Retiro Baixo e Três Marias. No entanto, Sobradinho apresenta temperaturas mais elevadas e um regime de precipitação inferior ao de Retiro Baixo e Três Marias, com variações entre 0 e 150 mm nas médias mensais anuais.

No cenário de emissões moderadas (SSP2-4.5), todos os modelos estudados indicaram um aumento na precipitação entre 2079 e 2100, com apenas uma exceção: o modelo CanESM5, que mostrou uma redução.

Em contraste, nos cenários de emissões elevadas (SSP5-8.5), observou-se um comportamento inverso. Todos os modelos apontaram para uma diminuição nas precipitações durante o mesmo

intervalo, evidenciando a divergência nas projeções climáticas em condições de emissões altas.

A temperatura do ar indica um futuro cada vez mais quente na região Nordeste do Brasil. Projeções indicam um aumento de pelo menos 1 °C nas próximas décadas, com um potencial de ultrapassar 5 °C até 2100 no pior cenário (SSP5-8.5). Esse aquecimento extremo pode desencadear uma série de impactos devastadores, como o aumento do nível do mar, a intensificação de eventos climáticos extremos e a perda de biodiversidade (Dantas et al., 2022).

As temperaturas médias do ar, em relação ao histórico, foi entre 17 e 29 °C, enquanto para o futuro, as projeções indicam que esses valores devem oscilar entre 23 e 32 °C nos cenários SSP. Na região submédia na qual abriga as principais áreas de água superficial as temperaturas foram mais elevadas superando 30°C (Andrade et al., 2024). Essa análise está alinhada com as observações feitas na sub-bacia de Sobradinho, onde o aumento a temperatura é uma preocupação crescente, refletindo tendências semelhantes de aquecimento em cenários futuros.

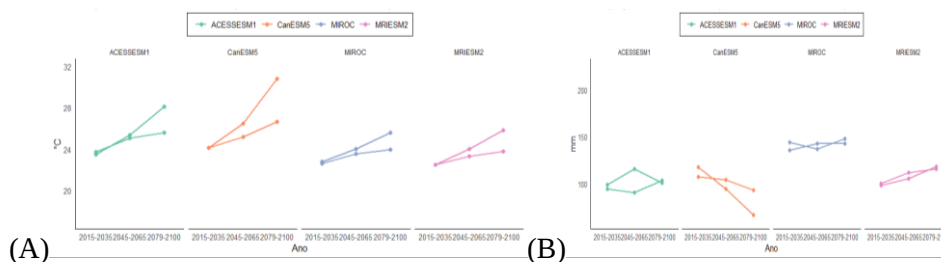


Figura 13 - Faixas temporais e modelos de acordo com a temperatura (A) e precipitação média (B) dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5) em Sobradinho.

## Conclusão

Os resultados da análise climatológica nas sub-bacias de Retiro Baixo, Três Marias e Sobradinho indicam uma tendência clara de aumento da temperatura nas próximas décadas, corroborando as projeções dos modelos climáticos globais. No entanto, as projeções de precipitação apresentam maior variabilidade entre os modelos, com alguns indicando aumento e outros diminuição. Essas divergências podem estar relacionadas a diferentes fatores, como a resolução espacial dos modelos e as incertezas nas projeções de emissões.

Além disso, este estudo reforça a necessidade de implementar medidas de adaptação para mitigar os impactos das mudanças climáticas na região, como a otimização da gestão dos recursos hídricos, o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce para

eventos extremos e a promoção de práticas agrícolas sustentáveis.

É fundamental que estudos futuros investiguem em maior detalhe os impactos das mudanças climáticas em setores específicos, como a agricultura e a energia, e que considerem a incerteza associada às projeções climáticas. Além disso, a incorporação de dados observacionais de alta resolução pode contribuir para melhorar a confiabilidade das projeções e auxiliar na tomada de decisões mais assertivas para a gestão dos recursos hídricos na região.

## Agradecimentos

Os autores deste trabalho expressam sua sincera gratidão à CAPES pelo apoio financeiro e à Universidade Federal de Campina Grande pela infraestrutura e recursos oferecidos.

## Referências

- ANA. (2020). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual. Agência Nacional de Águas. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursoshidricos/conjuntura-2020>
- Andrade, C., de Souza, I., & da Silva, L. (2024). A sustentabilidade futura da bacia do rio São Francisco no Brasil: um estudo de caso. *Sustainability*, 16(13), 5521. <https://doi.org/10.3390/su16135521>
- AR6 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, 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, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Bhaga, T. D., Dube, T., Shekede, M. D., & Shoko, C. (2023). Investigando a eficácia dos dados dos satélites Landsat-8 OLI e Sentinel-2 MSI no monitoramento dos efeitos da seca nos recursos hídricos superficiais na Província do Cabo Ocidental, África do Sul. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, 32(101037), 101037. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101037>
- Bolan, S., et al. (2024). Impacts of climate change on the fate of contaminants through extreme weather events. *The Science of the Total Environment*, 909, 168388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168388>
- CBHSF. (2016). Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025. Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco. Disponível em: [https://2017.cbhsaofrancisco.org.br/wp-content/uploads/2016/08/PRHSF\\_Apresentacao\\_26ago16.pdf](https://2017.cbhsaofrancisco.org.br/wp-content/uploads/2016/08/PRHSF_Apresentacao_26ago16.pdf)
- Chen, F., Wang, J., Li, B., Yang, A., & Zhang, M. (2023). Variabilidade espacial no derretimento em geleiras cobertas de detritos do Himalaia de 2000 a 2013. *Sensoriamento remoto do ambiente*, 291, 113560. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113560>
- CGEE; ANA. (2012). A Questão da Água no Nordeste. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Agência Nacional de Águas. Brasília.
- da Silva, M. V. M., Silveira, C. da S., Costa, J. M. F. da, Martins, E. S. P. R., & Vasconcelos Júnior, F. das C. (2021). Projeção dos impactos das mudanças climáticas e das demandas consuntivas na geração de energia hidrelétrica na Bacia do Rio São Francisco, Brasil. *Água*, 13(3), 332. <https://doi.org/10.3390/w13030332>
- DAO, P. U., et al. (2024). Os impactos das mudanças climáticas na qualidade das águas subterrâneas: Uma revisão. *The Science of the Total Environment*, 912, 169241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169241>
- Dantas, L. G., dos Santos, C. A. C., Santos, C. A. G., Martins, E. S. P. R., & Alves, L. M. (2022). Mudanças futuras na temperatura e precipitação sobre o nordeste do Brasil pelo modelo CMIP6.

- Water, 14(24), 4118.  
<https://doi.org/10.3390/w14244118>
- de Jong, P., Tanajura, C. A. S., Sánchez, A. S., Dargaville, R., Kiperstok, A., & Torres, E. A. (2018). Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. *The Science of the Total Environment*, 634, 1540–1553.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.256>
- de Jong, P., Barreto, T. B., Tanajura, C. A. S., Oliveira-Esquerre, K. P., Kiperstok, A., & Andrade Torres, E. (2021). O impacto das mudanças climáticas regionais nos recursos hidrelétricos na América do Sul. *Energia Renovável*, 173, 76–91.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.077>
- Fedorova, N., Levit, V., & Cruz, C. D. (2016). On Frontal Zone Analysis in the Tropical Region of the Northeast Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 173, 1403–1421.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-015-1166-y>
- Griggs, G., & Reguero, B. G. (2021). Adaptação costeira às mudanças climáticas e à elevação do nível do mar. *Water*, 13(16), 2151.  
<https://doi.org/10.3390/w13162151>
- Kim, J.-B., Habimana, J. de D., Kim, S.-H., & Bae, D.-H. (2021). Assessment of climate change impacts on the hydroclimatic response in Burundi based on CMIP6 ESMs. *Sustainability*, 13(21), 12037.  
<https://doi.org/10.3390/su132112037>
- Laghrib, F., Bahaj, T., El Kasmi, S., Hilali, M., Kacimi, I., Nouayti, N., Dakak, H., Bouzekraoui, M., El Fatni, O., & Hammani, O. (2024). Hydrogeochemical study of groundwater in arid and semi-arid regions of the Infracenomanian aquifers (Cretaceous Errachidia basin, Southeastern Morocco). Using hydrochemical modeling and multivariate statistical analysis. *Journal of African Earth Sciences* (Oxford, England: 1994), 209(105132), 105132.  
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105132>
- Lucas, M. C., et al. (2020). Redução significativa do escoamento de base na Bacia do Rio São Francisco. *Água*, 13(1), 2.
- Ming, A., et al. (2021). Key messages from the IPCC AR6 climate science report. *IPCC AR6 Climate Science Report*, 1–32.
- Nóbrega, M. R. R., Silva, M. V. M. da, Lima, C. E. S., Silva, G. K. da, Gonçalves, S. T. N., & Silveira, C. da S. (2022). Impacto das Mudanças Climáticas na Aridez da Bacia Estendida do rio São Francisco, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37(2), 185–197.  
<https://doi.org/10.1590/0102-77863710032>
- ONS. (2020). Plano de Operação Energética 2020/2024 - PEN. Disponível em: [http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/REVISTA\\_PEN2020\\_versao20201112.pdf](http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/REVISTA_PEN2020_versao20201112.pdf)
- Pörtner, H.-O., et al. (2022). IPCC, 2022: Summary for policymakers. *IPCC AR6*, 1–32.
- Shiogama, H., ABE, M., & Tatebe, H. (2019). MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. *Earth System Grid Federation*.
- Singh, R., et al. (2022). Impacto da variação em parâmetros climáticos na geração de energia hidrelétrica: Um caso de projeto hidrelétrico no Nepal. *Heliyon*, 8(12), e12240.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12240>
- Slingo, M. E., & Slingo, J. M. (2021). Climate impacts of anaesthesia. *British Journal of Anaesthesia*, 126(6), e195–e197.  
<https://doi.org/10.1016/j.bja.2021.03.004>
- SWART, N. C., et al. (2019). CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *Earth System Grid Federation*.
- Thirithar, A. A., Panja, P., Khan, A., Alqudah, M. A., & Abdeljawad, T. (2023). An ecosystem model with memory effect considering global warming phenomena and an exponential fear function. *Fractals*, 31(10).  
<https://doi.org/10.1142/s0218348x2340162x>
- UTIDA, G., et al. (2019). Influência do Atlântico Sul Tropical na precipitação do Nordeste do Brasil e deslocamento da ZCIT durante os últimos 2300 anos. *Scientific Reports*, 9(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-36654-y>
- Yukimoto, S., et al. (2019). MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *Earth System Grid Federation*.
- Zilli, M. T., Carvalho, L. M. V., & Lintner, B. R. (2019). The poleward shift of South Atlantic Convergence Zone in recent decades. *Climate Dynamics*, 52(5), 2545–2563.  
<https://doi.org/10.1007/s00382-018-4335-3>
- Zhou, T. (2021). New physical science behind climate change: What does IPCC AR6 tell us?. *The Innovation*, 2(4), 100124.  
<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100124>