

## **XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**

# **PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE PRECIPITAÇÃO DOS MODELOS DO CMIP6 SOBRE A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO**

*Marx Vinicius Maciel da Silva*<sup>1</sup>; *Antônio Duarte Marcos Júnior*<sup>2</sup>; *Carlos Eduardo Souza Lima*<sup>3</sup>;  
*Greicy Kelly da Silva*<sup>4</sup> & *Cleiton da Silva Silveira*<sup>5</sup>

**RESUMO** – O objetivo deste trabalho foi analisar o impacto das mudanças climáticas na projeção da precipitação para a Bacia Hidrográfica do rio São Francisco Estendida (BHSFE) utilizando cinco modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)*, baseados nos cenários futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para o século XXI. As análises foram baseadas na avaliação da performance dos modelos em representar a sazonalidade das precipitações com o diagrama de Taylor e nas projeções através do cálculo das anomalias percentuais anuais para o século XXI. Os resultados mostraram que a maioria dos modelos apresentaram boa performance com correlação acima de 0,9 e, mesmo ocorrendo divergência espacial, o conjunto dos modelos projetaram possíveis reduções nas precipitações anuais para os dois cenários e para os três períodos analisados para as bacias hidrográficas de Itaparica, Sobradinho e Três Marias. Enquanto que para a bacia hidrográfica de Retiro Baixo a maioria dos modelos mostraram aumento da precipitação anual no período de 2051-2080 para o cenário SSP2-4.5 e no período de 2021-2050 para o cenário SSP5-8.5.

**ABSTRACT**– The objective of this work was to analyze the impact of climate change on the projection of precipitation for the São Francisco River Extended Watershed (BHSFE) using five models of the *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)*, based on the future scenarios SSP2-4.5 and SSP5 -8.5 for the 21st century. The analyzes were based on the performance evaluation of the models in representing the seasonality of the precipitation with the Taylor diagram and on the projections through the calculation of the annual percentage anomalies for the 21st century. The results showed that the majority of the models performed well with a correlation above 0.9 and, even with spatial divergence, the set of models projected possible reductions in annual rainfall for the two scenarios and for the three periods analyzed for the hydrographic basins of Itaparica, Sobradinho and Três Marias. While for the Retiro Baixo watershed, most models showed an increase in annual precipitation in the period 2051-2080 for the scenario SSP2-4.5 and in the period 2021-2050 for the scenario SSP5-8.5.

**Palavras-Chave** – Bacia Hidrográfica do rio São Francisco; Mudanças Climáticas; CMIP6.

<sup>1</sup>) Doutorando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, e-mail: marx.silva@alu.ufc.br

<sup>2</sup>) Mestrando em Ciências Físicas Aplicadas, Universidade Estadual do Ceará, e-mail: duarte.jr105@gmail.com

<sup>3</sup>) Mestrando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, e-mail: eduardolima@alu.ufc.br

<sup>4</sup>) Doutoranda em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, e-mail: greicykellysilvagks@gmail.com

<sup>5</sup>) Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, e-mail: cleitonsilveira@ufc.br

## INTRODUÇÃO

Atualmente inúmeros trabalhos vêm estudando o tema das mudanças climáticas com intuito de identificar padrões que possam explicar o perfil de aquecimento global e suas consequências, principalmente no que diz respeito à disponibilidade hídrica em diversas regiões do globo (GUIMARÃES *et al.*, 2016; KOUTROULIS *et al.*, 2019; NAZ *et al.*, 2018; SALES *et al.*, 2015; SILVEIRA *et al.*, 2016).

No Brasil, esses trabalhos mostram que as mudanças podem trazer grandes impactos que afetam diretamente a umidade do solo, as reservas de água subterrânea e a sazonalidade da vazão devido as mudanças nos padrões espaciais e temporais de precipitação e evapotranspiração (GUIMARÃES *et al.*, 2016; SILVEIRA *et al.*, 2016; SALES *et al.*, 2015). O Brasil, mesmo sendo detentor de 12% de toda a água doce do planeta, esses recursos não são igualmente distribuídos pelo seu território (BRASIL, 2017). Pois, enquanto a Região Norte concentra aproximadamente 80% da água disponível, regiões próximas ao Oceano Atlântico possuem menos de 3% (BRASIL, 2017), como é o caso da região Nordeste do Brasil (NEB).

A Região do NEB soma 1.561.178 km<sup>2</sup> e é composta de nove Estados: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Desses, com exceção do Estado do Maranhão, estão localizados no chamado “Polígono das Secas”, com 1.085.187 km<sup>2</sup>, no qual se acrescentam 120.701 km<sup>2</sup> do norte do Estado de Minas Gerais, para onde se estende o clima semiárido, ou seja, com precipitações abaixo de 600 mm/ano (ARAÚJO, 2001). Com a intenção de minimizar a crise hídrica nesses Estados, que atualmente dois sistemas independentes, denominados Eixo Norte e Eixo Leste, captarão água no rio São Francisco entre as barragens de Sobradinho e Itaparica, no Estado de Pernambuco para viabilizar o fornecimento de água para vários fins (abastecimento humano, irrigação, dessedentação de animais, criação de peixes e de camarão), numa área que possui cerca de 12 milhões de habitantes (BRASIL, 2017).

Dessa forma, estudos voltados na identificação de padrões de variabilidade e mudanças climáticas nessa região possuem grande importância, pois trazem informações úteis para redefinir políticas de gerenciamento de recursos para tornar o sistema mais resiliente aos desafios decorrentes das mudanças climáticas. Logo, esse trabalho teve por objetivo estimar os impactos que as alterações no clima futuro podem causar na precipitação nas bacias hidrográficas dos principais reservatórios que compõem o rio São Francisco, através dos cenários futuros dos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)*.

## METODOLOGIA

Os pontos centrais da metodologia do presente estudo se dividiu em três etapas: (i) Definição da área de estudo e extração dos dados observados e numéricos; (ii) avaliação da representatividade da precipitação sazonal dos modelos do CMIP6; e (iii) projeções dos cenários dos modelos do CMIP6 na precipitação. Os próximos tópicos dissertam sobre a área de estudo, dados observados, modelos do CMIP6, Avaliação dos modelos e Análise das projeções.

### Área de estudo

A região de estudo deste trabalho foi a Bacia Hidrográfica do rio São Francisco Estendida (BHSFE), que compreendeu as usinas de Retiro Baixo, Sobradinho, Três Marias e Itaparica, conforme Figura 1. A BHSFE drena uma área de 639.219 km<sup>2</sup>, o que equivale a cerca de 8% do território brasileiro. Nascendo na Serra da Canastra no Estado de Minas Gerais, o rio São Francisco possui 2.700 km de extensão. Escoa pelos Estados da Bahia e Pernambuco, no sentido sul-norte, alcançando o Oceano Atlântico por meio da divisa entre Alagoas e Sergipe. Em suma, a BHSF atravessa sete Estados: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal. Além disso, abrange 507 municípios (quase 9% do total de municípios no Brasil), com população residente que chega a 20 milhões de pessoas (BRASIL, 2016).

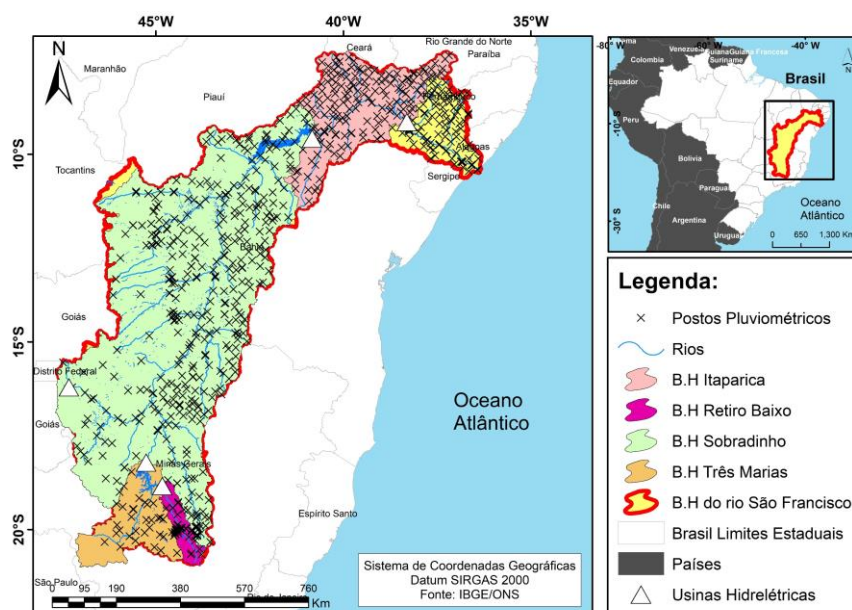


Figura 1 – Localização dos postos pluviométricos e bacias hidrográficas que compõem a BHSFE.

## Dados observados

Os dados históricos mensais de precipitação foram obtidos através dos postos pluviométricos (ver Figura 1) da Agência Nacional de Águas (ANA) no período de 1961 a 2016 e mediadas nas bacias hidrográficas através do método clássico de Thiessen (THIESSEN, 1911).

## Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

Neste estudo, para as projeções das mudanças climáticas, foram utilizados cinco modelos do CMIP6, conforme Tabela 1. Os dados provenientes do CMIP6 são resultados das simulações de cinco Modelos Climáticos Globais (GCM - *General Circulation Model*) com cenário *historical* (baseado nas observações históricas) e cenários futuros que combinam desenvolvimento socioeconômico e tecnológico, denominados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), com cenários futuros das forçantes radiativas (RCP, *Representative Concentration Pathways*) baseados em dados atualizados sobre tendências de emissões, em uma arquitetura de matriz de cenário (EYRING *et al.*, 2016; O'NEILL *et al.*, 2016).

Tabela 1 – Modelos do CMIP6.

Modelos	Instituição ou Organização (País)
CanESM5	<i>Canadian Earth System Model 5nd generation</i> (Canadá)
IPSL-CMSA-MR	<i>Institut Pierre-Simon Laplace</i> (França)
MIROC6	<i>Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i> (Japão)
BCC-CSM2-MR	<i>Beijing Climate Center climate system model version 2</i> (China)
MRI-ESM2-0	<i>Meteorological Research Institute Earth System Model version 2</i> (Japão)

Para este estudo, foram utilizadas o cenário *historical* (1901 a 2000, século XX) e cenários de projeções SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período de 2015 até o final do século XXI. O SSP2 é denominado de cenário do “meio da estrada”, com crescimento populacional moderado, convergência mais lenta dos níveis de renda entre os países. Enquanto que no SSP5 espera-se um mundo com forte crescimento econômico com o uso de combustíveis fósseis e impactos potencialmente grandes das mudanças climáticas (GIDDEN *et al.*, 2019).

## Avaliação dos modelos

Com a finalidade de analisar as performances dos modelos do CMIP6 em representar a sazonalidade da precipitação sobre as bacias hidrográficas que compõem a BHSFE, que foi utilizado o digrama de Taylor (TAYLOR, 2001). A mesma é uma ferramenta gráfica que permite visualizar três métricas estatísticas, são elas: coeficiente de correlação (CORREL) (equação 1), desvio padrão (equação 2) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (equação 3).

$$\text{CORREL} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x') \cdot (y_i - y')}{n-1}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x')^2}{n-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y')^2}{n-1}}}, \quad (1)$$

$$\text{desvio padrão} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2}, \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x')^2}{n}}, \quad (3)$$

em que  $n$  denota um espaço amostral,  $x_i$  a variável observada no tempo,  $x'$  é a média da variável  $x$ , e  $y_i$  a variável calculada e  $y'$  a média da variável  $y$ . Para CORREL, os valores -1 e 1 indicam, respectivamente, perfeita anticorrelação e perfeita correlação, existindo também a total ausência de correlação quando um resultado for igual a zero.

## Análise das projeções

Para as análises estatísticas das projeções foi utilizado o cálculo das anomalias percentuais de precipitação. O mesmo é expresso na equação 4 e utilizou os modelos do CMIP6 para as projeções relacionados com os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 divididos em dois intervalos de 30 anos (2021 a 2050 e 2051 a 2080) em comparação com a representação do século XX (1901 a 2000) do *historical*.

$$A_{\text{anual}} = \frac{(P_{\text{XXI}}^a - P_{\text{XX}}^a)}{P_{\text{XX}}^a} \cdot 100, \quad (4)$$

em que  $P_{\text{XXI}}^a$  é a média anual da precipitação média anual das projeções para os cenários do século XXI e  $P_{\text{XX}}^a$  é a média anual das precipitações do século XX.

## RESULTADOS

### Avaliação dos modelos

O diagrama de Taylor da sazonalidade da precipitação dos modelos do CMIP6 referente aos dados observados mostrou que a maioria dos modelos apresentaram boa performance, com CORREL acima de 0,9, conforme Figura 2. No entanto, nas bacias hidrográficas localizadas mais ao sul da BHSFE (Três Marias e Retiro Baixo) os modelos representaram melhor a sazonalidade das precipitações, com maiores CORREL e menores desvio padrão e RMSE. Tal fato pode estar relacionado com a maior variabilidade das precipitações nas bacias hidrográficas de Sobradinho e Itaparica devido à localização destas, em parte no caso de Sobradinho, na região Semiárida do Brasil – região conhecida por longos períodos de estiagens e alta variabilidade das chuvas.

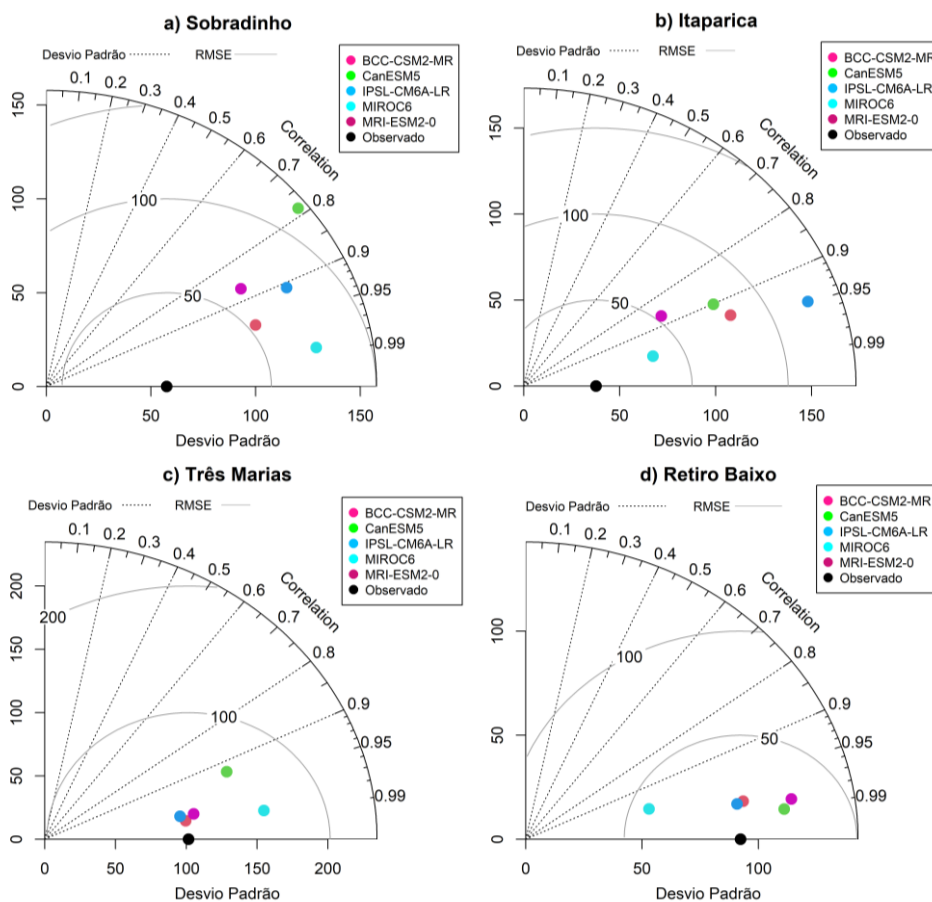


Figura 2 – Diagrama de Taylor da média sazonal de precipitação dos modelos do CMIP6 no cenário *historical* tendo por referência os dados observados da ANA, ambos no período de 1901 a 2000.

O modelo CanESM5, por exemplo, apresentou CORREL inferior a 0,8 e maiores desvio padrão e RMSE em relação aos demais modelos na bacia hidrográfica de Sobradinho. Enquanto que na bacia hidrográfica de Itaparica, o modelo IPSL-CM6A-LR foi o que apresentou o maior RMSE, acima de 100. Esse último caso coincide com o estudo de Silveira *et al.* (2016), no qual mostrou que, dentre os 27 modelos do CMIP5, o modelo francês foi um dos que apresentaram as piores performances na representação da sazonalidade das precipitações na bacia hidrográfica do rio São Francisco.

### Análise das projeções

A maioria dos modelos mostraram projeções com magnitudes das precipitações mais intensas no cenário SSP5-8.5 em detrimento ao cenário SSP2-4.5 (ver Figuras 3 e 4). Tal fato sugere que as bacias hidrográficas que compõem a BHSFE são sensíveis ao aumento das emissões dos gases de efeito estufa. Na Figura 3 observou-se que o conjunto dos modelos do CMIP6 mostrou redução na precipitação média anual nas bacias hidrográficas de Itaparica, Sobradinho e Três Marias. Enquanto que para a bacia hidrográfica de Retiro Baixo, a maioria dos modelos mostraram aumento no período de 2051-2080 para o cenário SSP2-4.5 e para o período de 2021-2050 no cenário SSP5-8.5. Destacase a anomalia percentual na bacia hidrográfica de Itaparica no cenário SSP5-8.5 para o período de 2051-2080, no qual os modelos indicaram reduções com mediana das anomalias percentual de -100%.

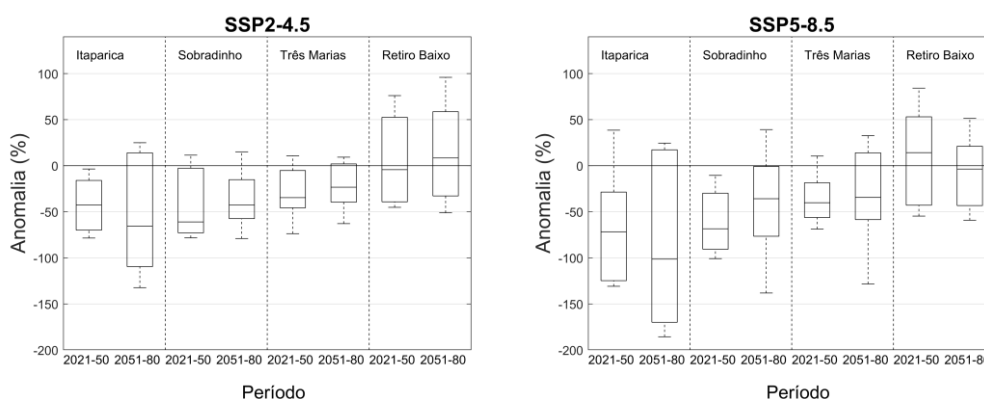


Figura 3 – Anomalia percentual anual da precipitação dos modelos do CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para as bacias hidrográficas que compõem a BHSFE.

A Figura 4 mostrou que existe divergência espacial entre os modelos do CMIP6 quanto as anomalias de precipitação percentual. O modelo CanESM5, por exemplo, indicou possível redução nas chuvas para todas as bacias hidrográficas da BHSFE, para todos os períodos e cenários analisados,

enquanto o modelo BCC-CSM2-MR sugeriu reduções com maior intensidade na região mais a norte da BHSFE do que na região Sul, com possível aumento da precipitação para o período de 2021 a 2050 no cenário SSP2-4.5. O aumento na precipitação também foram indicadas pelos modelos MIROC6 e MRI-ESM2-0 para a região central de Sobradinho para o período de 2051 a 2080 nos dois cenários analisados, enquanto que para as demais regiões são indicados reduções. O modelo IPSL-CM6A-LR, que foi o modelo que apresentou a pior performance para a bacia hidrográfica de Sobradinho, indicou aumento da precipitação na região mais a Sul para todos os períodos e cenários analisado e redução para as demais regiões. Essa divergência espacial entre os modelos para na anomalia de precipitação anual percentual também já havia sido mostrado no trabalho de Silveira et al. (2016) com os modelos do CMIP5.

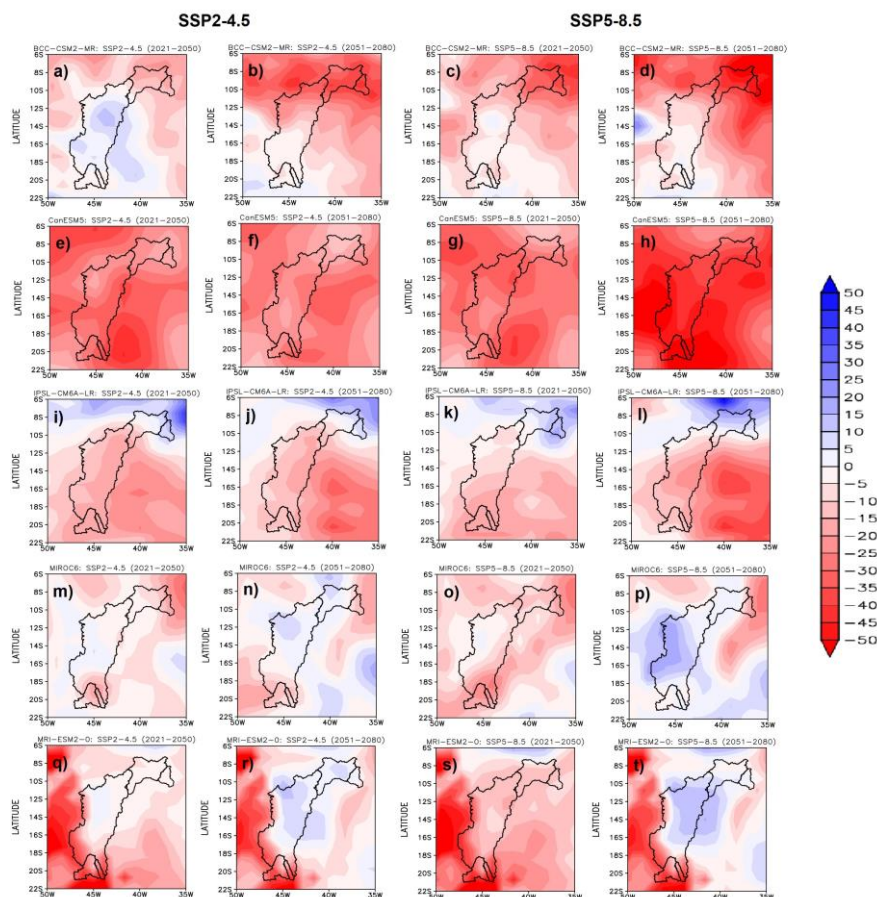


Figura 4 – Anomalia anual percentual da precipitação dos modelos do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para as BHSFE. Na sequência de cima para baixo estão localizados os modelos: BCC-CSM2, CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0; e da esquerda para direita os períodos e cenários na sequência: 2021-2050 e 2051-2080 no cenário SSP2-4.5 e 2021-2050 e 2051-2080 no cenário SSP5-8.5.



## CONCLUSÃO

A análise proposta neste estudo visou gerar informações sobre o possível impacto das mudanças climáticas na precipitação sobre as bacias hidrográficas que compõem a BHSFE utilizando os modelos do CMIP6 em cenários futuros, SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Tais informações são de grande importância para os órgãos de governo e sociedade, pois podem auxiliar em medidas que minimizem os impactos desses cenários em diversas áreas, em especial nos recursos hídricos.

A maioria dos modelos do CMIP6 demonstraram uma boa performance em representar a sazonalidade das precipitações das bacias hidrográficas analisadas, apresentando CORREL acima de 0,9. O conjunto dos modelos mostraram projeções com magnitudes das precipitações mais intensas no cenário SSP5-8.5 em detrimento ao cenário SSP2-4.5; sugerindo que as bacias hidrográficas que compõem a BHSFE são sensíveis ao aumento das emissões dos gases de efeito estufa.

Os modelos do CMIP6, especialmente, apresentaram divergência, em sinal (aumento ou diminuição) das anomalias percentual de precipitação. No entanto, o conjunto dos modelos projetaram, nos dois cenários analisados, redução da precipitação para as bacias hidrográficas de Itaparica, Sobradinho e Três Marias, com exceção da bacia hidrográfica de Retiro Baixo.

A possível redução na precipitação e conseqüentemente na disponibilidade hídrica, evidencia possíveis impactos pelos conflitos entre usos múltiplos, uma possível desaceleração da economia por causa da redução hídrica para a agricultura e a indústria, bem como o desabastecimento de cidades. Todavia, se faz necessário estudo mais avançados, por exemplo, acoplando as informações obtidas com os modelos do CMIP6 em modelos hidrológicos afim de identificar os impactos nos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. T. (2001). “*O semi-árido e a transposição das águas do Rio São Francisco*”. Revista do legislativo, Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 31(1), pp. 65-74.

BRASIL. (2016). “*Resumo Executivo do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025*”. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Alagoas: Agência Nacional de Águas (ANA), pp. 300.

\_\_\_\_\_. “*Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: Relatório Pleno*”. Brasília: ANA, 2017. Agência Nacional de Águas.

EYRING, V. et al. (2015). “*Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization*”. Geoscientific Model Development Discussions, [S.L.], 8(12), pp. 10539-10583.

GIDDEN, M. J et al. (2018). “*Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century*”. Geoscientific Model Development Discussions, [S.1], 9(1), pp. 1-42.

GUIMARAES, S. O. et al. (2016). “*Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX*”. Rev. bras. meteorol., São Paulo, 31(3), pp. 337-365.

KOUTROULIS, A. G. et al. (2019). “*Global water availability under high-end climate change: A vulnerability based assessment*”. Global and Planetary Change, [S.1.], 175(1), pp.52-63.

NAZ, B. S. et al. (2018). “*Effects of climate change on streamflow extremes and implications for reservoir inflow in the United State*”s. Journal of Hydrology, [S.1.], 556(1), pp.359-370.

O'NEILL, B. C. et al. (2016). “*The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6*”. Geoscientific Model Development, [S.1], 9(9), pp. 3461-3482.

SALES, D. C. et al. (2015). “*Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico*”. Rev. bras. meteorol. [S.1.], 30(4), pp.435-456.

SILVEIRA, C. et al. (2016). “*Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: uma análise para precipitação e temperatura*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [S.1], 21(2), pp. 416-428.

TAYLOR, K. E. et al. (2001). “*Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram*”. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, [S.1], 106(7), pp. 7183-7192.

THIESSEN, A. H. (1911). “*Precipitation averages for large areas*”. Monthly Weather Review, [S.1.], 39(7), pp. 1082-1089.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a Fundação Cearense de Apoio ao desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro; e a Universidade Federal do Ceará (UFC), através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), pelo apoio institucional e logístico.