

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

FRAMEWORK MULTIESCALA PARA SELEÇÃO DE MODELOS CMIP6: APLICAÇÃO À PRECIPITAÇÃO NA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

Larissa Zaira Rafael Rolim¹ & Francisco de Assis de Souza Filho²

Abstract: This study introduces a multiscale framework for evaluating the performance of global climate models (CMIP6) in simulating precipitation over the Ceará Metropolitan Basin. The methodology integrates traditional metrics (RMSE and Kullback–Leibler divergence) with information-theoretic diagnostics (Normalized Mutual Information) and spectral analysis via the Continuous Wavelet Transform. The seasonal evaluation quantifies each model’s ability to reproduce the monthly climatological cycle, while the interannual component examines multi-year oscillations in the 2–32 year band. Normalized metrics are aggregated through adjustable weighting to produce a composite index that ranks models according to their fidelity across temporal scales. Applied to the Ceará Metropolitan Basin, the framework identified IPSL-CM6A-LR, BCC.CSM2.MR, and CMCC-ESM2 as the most suitable, achieving composite scores above 0.9 under various weighting schemes. The flexibility in weighting allows adaptation to studies focused on short-term (seasonal) or medium-term (plurennial) variability, and its modular design facilitates extension to other climate variables and future scenarios. Overall, this approach provides a quantitative and versatile tool for the rigorous selection of GCMs in climate-impact assessments.

Resumo: Este trabalho apresenta um framework multiescala para avaliar o desempenho de modelos climáticos globais (CMIP6) na simulação da precipitação na Bacia Metropolitana do Ceará. A metodologia integra métricas clássicas (RMSE e divergência de Kullback–Leibler) com diagnósticos de teoria da informação (Informação Mútua Normalizada) e análise espectral via Transformada Contínua de Wavelet. A avaliação sazonal quantifica a capacidade dos modelos em reproduzir o ciclo climatológico mensal, enquanto a componente interanual examina oscilações plurianuais em bandas de 2–32 anos. As métricas normalizadas são agregadas por ponderação ajustável, gerando um índice composto que hierarquiza os modelos segundo sua fidelidade em múltiplas escalas temporais. Aplicado à Bacia Metropolitana do Ceará, o framework identificou IPSL-CM6A-LR, BCC.CSM2.MR e CMCC-ESM2 como os mais adequados, com escores compostos superiores a 0,9 em diferentes cenários de peso. A flexibilidade na escolha de ponderações permite adaptar o método a estudos de curto (sazonal) ou médio prazo (plurianual), e sua estrutura modular facilita extensão a outras variáveis climáticas e cenários futuros. Em suma, a abordagem oferece uma ferramenta quantitativa e versátil para seleção criteriosa de GCMs em avaliações de impacto climático.

Palavras-Chave – Avaliação multiescala; Modelos CMIP6; Seleção de modelos climáticos.

1) Pós-Doutoranda no Centro Estratégico de Excelência em Políticas de Águas e Secas (CEPAS), Universidade Federal do Ceará.
larissazairarr@gmail.com

2) Professor Associado, Diretor do Centro Estratégico de Excelência em Políticas de Águas e Secas (CEPAS), Universidade Federal do Ceará.
assis@deha.ufc.br

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho de modelos climáticos globais (GCMs) é fundamental para aferir a confiabilidade tanto das reconstruções históricas quanto das projeções futuras. Os projetos de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP) oferecem simulações padronizadas de variáveis como temperatura e precipitação, permitindo comparações sistemáticas em múltiplas escalas espaciais e temporais (Eyring et al., 2016). Apesar dos avanços na formulação física e na resolução dos modelos, ainda persistem grandes dispersões entre as saídas de diferentes modelos — por vezes superiores à resposta média do conjunto — e erros estruturais que resultam em discrepâncias com as observações mesmo em janelas decenais (Gallegati, 2022). Tais inconsistências ressaltam a necessidade de estruturas de avaliação sensíveis ao tempo e à escala.

Projeções regionais confiáveis — essenciais para estimar impactos socioeconômicos no século XXI — dependem do uso de modelos regionais de clima (RCMs), que realizam o downscaling dos campos GCM em resoluções mais finas. No entanto, vieses nos padrões de circulação em larga escala e de teleconexões dos GCMs propagam-se pelo processo de downscaling, distorcendo os sinais climáticos regionais e potencialmente comprometendo o planejamento de adaptação (Kristóf et al., 2020). Por isso, tornou-se prática comum selecionar e ponderar GCMs de acordo com sua habilidade em reproduzir características climáticas observadas. Diversos estudos aplicam métodos de classificação multi-critérios — combinando métricas de variabilidade de temperatura, estrutura de precipitação e estabilidade de teleconexões — para identificar subconjuntos de modelos adequados a aplicações específicas (Feyissa et al., 2023). Outros avaliam a sensibilidade do desempenho dos modelos a diferentes algoritmos de classificação de padrões de pressão ao nível do mar (Stryhal & Huth, 2019).

Entretanto, nenhuma métrica isolada captura a complexidade da variabilidade climática, que se manifesta de modo distinto em escalas sub-sazonais a decenais (Gallegati, 2022). Estatísticas convencionais — viés, erro quadrático médio (RMSE) e correlação — muitas vezes deixam de refletir dinâmicas dependentes de escala ou mudanças de regime (Tamaddun et al., 2019). Para superar essas limitações, são necessários métodos multiescala e multimétricos, integrando diagnósticos de teoria da informação a medidas tradicionais.

Este estudo propõe um framework de avaliação multiescala para as simulações de precipitação do CMIP6 no Nordeste do Brasil. A metodologia combina RMSE e divergência de Kullback–Leibler com decomposição espectral baseada em wavelets, informação mútua normalizada (NMI) para quantificar variabilidades sazonais e interanuais. Um índice de agregação ponderada identifica os modelos que melhor reproduzem os sinais observados em múltiplas escalas temporais. Ao aplicar conjuntamente métricas de consistência estatística e ferramentas de teoria da informação, este framework preenche uma lacuna na avaliação de modelos, permitindo a análise simultânea de padrões de curto prazo e de variabilidade de longo prazo para uma seleção mais robusta de ensembles em estudos de impacto e adaptação.

2. DADOS

Para esta análise, selecionaram-se 16 modelos do CMIP6 do ScenarioMIP sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, mas utilizou-se apenas o período histórico de 1980 a 2014. As séries mensais de precipitação desses modelos foram interpoladas para a Bacia Metropolitana do Ceará por polígonos de Thiessen e submetidas a correção de viés, comparando-se diretamente com os dados observados de 1980–2014. A precipitação teve viés ajustado via transformação gamma–gamma (Sharma & Babel, 2018)

3. METODOLOGIA

3.1. Visão geral do framework de avaliação

O processo de avaliação proposto organiza-se em duas dimensões principais. A primeira, avaliação sazonal, verifica o grau em que cada modelo captura o ciclo climatológico mensal da precipitação (distribuição intraanual). A segunda, avaliação interanual, utiliza a Transformada Contínua de Wavelet (CWT) e métricas de teoria da informação para examinar a capacidade dos modelos em reproduzir variabilidade em diferentes escalas temporais (especialmente ano a ano). Essas duas dimensões são integradas num índice composto de desempenho, permitindo hierarquizar os modelos CMIP6 conforme sua habilidade de reproduzir os sinais observados em escalas múltiplas.

3.2. Avaliação Sazonal

A avaliação sazonal tem como objetivo quantificar o grau em que cada modelo climático reproduz a distribuição mensal de precipitação observada no período de referência. Para isso, foram calculadas duas métricas estatísticas a partir da média climatológica mensal, expressa em termos percentuais. A primeira métrica é o Erro Quadrático Médio (RMSE), que mede o desvio médio entre as porcentagens mensais simuladas e observadas. A segunda métrica é a divergência de Kullback–Leibler (KL), que quantifica a dissimilaridade entre as distribuições mensalmente observadas e simuladas, interpretadas como distribuições de probabilidade discretas. Matematicamente, a divergência KL entre uma distribuição de referência $p = (p_1, p_2, \dots, p_{12})$ e uma distribuição de modelo $q = (q_1, q_2, \dots, q_{12})$ é definida pela Equação 1.

$$D_{KL}(p \parallel q) = \sum_{i=1}^{12} p_i \log \left(\frac{p_i}{q_i} \right) \quad (1)$$

onde p_i e q_i representam as proporções relativas mensais de precipitação (Thiesen et al., 2019). Essa medida penaliza discrepâncias na massa de probabilidade atribuída pelo modelo a cada mês e tem sido amplamente utilizada em estudos climáticos para comparar distribuições.

Para garantir a comparabilidade entre as métricas, cada uma delas foi normalizada na escala $[0,1]$ por meio de min–max scaling, de modo que valores mais altos indicam melhor desempenho. As métricas normalizadas foram então agregadas em um único score sazonal, denotado por $Eval_{sazonal}$, segundo uma média ponderada apresentada na Equação 2.

$$Eval_{sazonal} = w_{rmse} \times RMSE_{Norm} + w_{kl} \times KL_{Norm} \quad (2)$$

em que w_{rmse} e w_{kl} são pesos definidos pelo usuário, cujo somatório é igual a 1. Neste estudo, salvo indicação em contrário, aplicou-se ponderação igual a ambas as métricas.

3.3. Avaliação Interanual com Transformada Contínua de Wavelet (CWT)

Para investigar e comparar a variabilidade interanual e a estrutura multiescala nas séries temporais de precipitação, este estudo emprega a Transformada Contínua de Wavelet (CWT) como ferramenta diagnóstica. A abordagem por wavelets oferece um poderoso framework de decomposição multirresolução, que permite localizar a variabilidade tanto no tempo quanto em diferentes bandas de frequência. Ao contrário da análise de Fourier — que supõe estacionariedade e utiliza funções de base globalmente definidas — a transformada wavelet é adequada para sinais climáticos não estacionários, pois aplica funções localizadas, dilatadas e transladadas versões de uma “wavelet-mãe” compacta (Torrence & Compo, 1998; Labat, 2005). Matematicamente, a CWT de um sinal $x(t)$ em relação à wavelet-mãe ψ é dada pela Equação 3.

$$Wx(s, u) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (3)$$

onde s é a escala (relacionada à frequência) e uuu é o parâmetro de translação temporal. Os coeficientes $Wx(s, u)$ capturam a contribuição do sinal em cada escala e instante, possibilitando a localização tempo–frequência.

Neste estudo, foi escolhida a wavelet de Morlet devido ao seu bom equilíbrio entre resolução temporal e de frequência, sendo ideal para séries climáticas com componentes oscilatórios (Rolim et al., 2023).

Para avaliar a capacidade dos modelos do CMIP6 de reproduzir a variabilidade interanual da precipitação em múltiplas escalas temporais, aplicamos a CWT às séries anuais observadas e simuladas. Essa decomposição permite representar o sinal num domínio conjunto tempo–frequência, capturando oscilações estacionárias e transitórias em diferentes periodicidades. Para cada modelo e para a referência observacional, foi calculado o espectro de potência global wavelet, cuja energia foi agregada em bandas de frequência predefinidas (por exemplo, 2–4, 4–8, 8–16 anos). Assim, construíram-se assinaturas espectrais específicas para cada série. Para comparar essas assinaturas, calculamos a divergência de Kullback–Leibler (KL) e a Informação Mútua Normalizada (NMI).

A Informação Mútua Normalizada (NMI), também chamada de coeficiente de incerteza (Press et al., 1986), foi usada para quantificar a dependência estatística entre duas séries — aqui, precipitação e vazão — em múltiplas localidades. A NMI mede a redução relativa de incerteza de uma variável dado o conhecimento da outra, variando de 0 (nenhuma dependência) a 1 (dependência perfeita). Essa normalização é especialmente apropriada para comparar relações entre conjuntos de dados com unidades ou magnitudes diferentes. Formalmente definido pela Equação 4.

$$NMI(X, Y) = \frac{I(X; Y)}{\sqrt{H(X) \cdot H(Y)}} \quad (4)$$

onde X e Y são as variáveis aleatórias das séries, $H(X)$ e $H(Y)$ suas entropias de Shannon, e $I(X; Y)$ a informação mútua (Ning et al., 2022).

A energia de cada banda de frequência também foi comparada pela distância euclidiana entre histogramas normalizados de potência espectral de cada modelo e da referência observada. Essas três métricas — KL, NMI e distância euclidiana — foram normalizadas em $[0, 1]$ e combinadas com pesos iguais para gerar o escore interanual, denominado $Eval_{interannual}$ (Equação 5)

$$Eval_{interannual} = w_{dist} \times DIST_{Norm} + w_{kl} \times KL_{Norm} + w_{NMI} \times NMI_{Norm} \quad (5)$$

Esse diagnóstico multiescala identifica os modelos que melhor reproduzem a estrutura espectral da precipitação observada, oferecendo insights sobre a fidelidade dos modelos em bandas de variabilidade climática dominantes, como oscilações tipo ENSO ou decadal.

3.4. Avaliação Composta e Ordenação dos Modelos

O índice composto final, denominado $Eval$, foi obtido pela combinação linear dos componentes sazonal e interanual, usando agregação ponderada. Essa formulação permite ajustar a ênfase entre diferentes escalas temporais conforme o objetivo da avaliação. Matematicamente, o índice é expresso pela Equação 6.

$$Eval = w_{sazonal} \cdot Eval_{sazonal} + w_{interannual} \cdot Eval_{interannual} \quad (6)$$

Neste estudo, aplicaram-se diferentes esquemas de ponderação (por exemplo, 0,5/0,5; 0,6/0,4; 0,7/0,3) para avaliar a sensibilidade do ranking dos modelos à importância relativa dada à variabilidade de curto e longo prazo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1, observa-se, para cada um dos 16 modelos CMIP6, o desempenho sazonal quantificado pelos escores normalizados de RMSE (barras vermelhas) e KL (barras azuis-

esverdeadas). Modelos como BCC.CSM2.MR, IPSL-CM6A-LR e CMCC-ESM2 exibem valores próximos de 1 em ambas as métricas, evidenciando excelente concordância com o ciclo climatológico mensal observado.

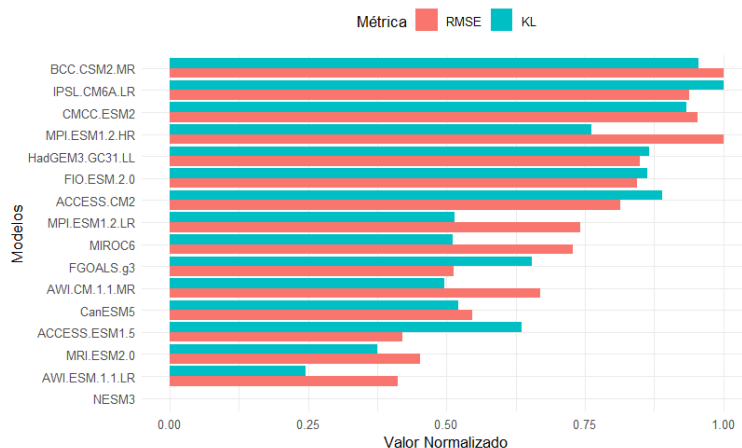


Figura 1 - Escores Sazonais Normalizados de RMSE e KL por Modelo.

Na Figura 2, as distribuições mensais de precipitação simuladas são sobrepostas às observadas para cada modelo na Bacia Metropolitana do Ceará. O alinhamento das duas cores ao longo dos meses de abril a maio reforça a capacidade dos melhores modelos em reproduzir corretamente o pico da estação chuvosa. Em contraste, discrepâncias como chuva subestimada em abril–junho ou superestimada em dezembro, visíveis em modelos de menor desempenho (por exemplo, ACCESS.ESM1.5 e MRI-ESM2.0), ilustram claramente os padrões de viés sazonais que levaram aos escores inferiores na Figura 1.

A comparação espectral via CWT revelou diferenças significativas na capacidade de reproduzir oscilações plurianuais. Na Figura 3, cada barra agrupa os escores normalizados de três métricas interanuais para os 16 modelos CMIP6: divergência de Kullback–Leibler, Informação Mútua Normalizada e variância explicada. Modelos como MPI-ESM1.2-HR, FGOALS-g3 e AWI.CM1.1.MR apresentam elevados valores em todas as métricas, indicando forte concordância com a observação no domínio plurianual. Em contrapartida, ACCESS.ESM1.5 e AWI.ESM1.1.LR exibem baixos escores de KL e VAR, sinalizando dificuldades em capturar corretamente a distribuição de energia espectral das oscilações de 2 a 16 anos.

A Figura 4 mostra, para cada modelo, o espectro de potência global obtido pela Transformada Contínua de Wavelet aplicado à série anual de precipitação: a curva preta representa a observação e a vermelha o modelo. O eixo vertical indica os períodos (em anos) e o horizontal a intensidade de potência normalizada. Modelos de melhor desempenho — como BCC.CSM2.MR e CMCC-ESM2 — replicam os picos espectrais observados em bandas ~2–7 anos e decadais. Em contraste, modelos como ACCESS.ESM1.5 e AWI.ESM1.1.LR, cujas curvas vermelhas da Figura 4 se afastam consideravelmente da curva preta em certos períodos, registram escores reduzidos de KL e VAR — reflexo de distorções na distribuição de energia espectral — e NMI menor, o que demonstra que falham em capturar corretamente as dinâmicas plurianuais observadas.



Figura 2 - Comparação das Distribuições Mensais de Precipitação CMIP6 versus Observação na Bacia Metropolitana do Ceará

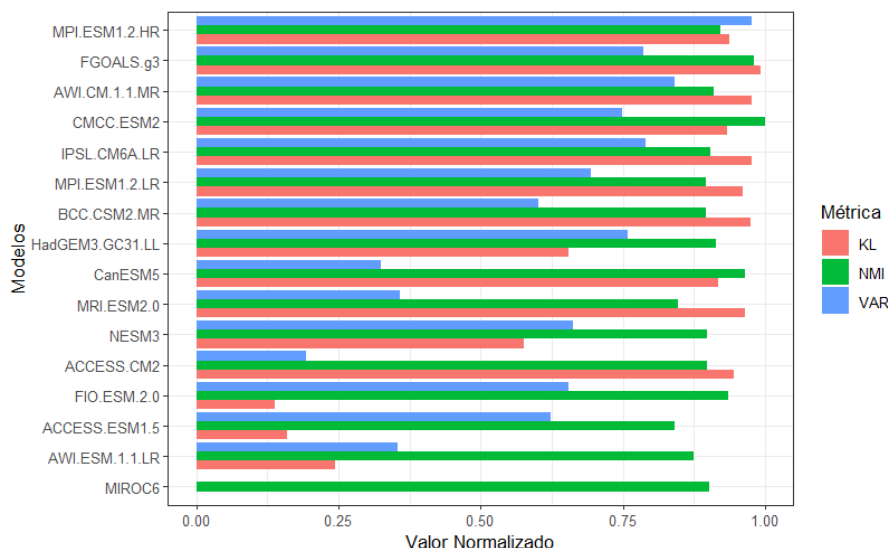


Figura 3 - Comparação das Métricas Interanuais Normalizadas (KL, NMI e VAR) por Modelo

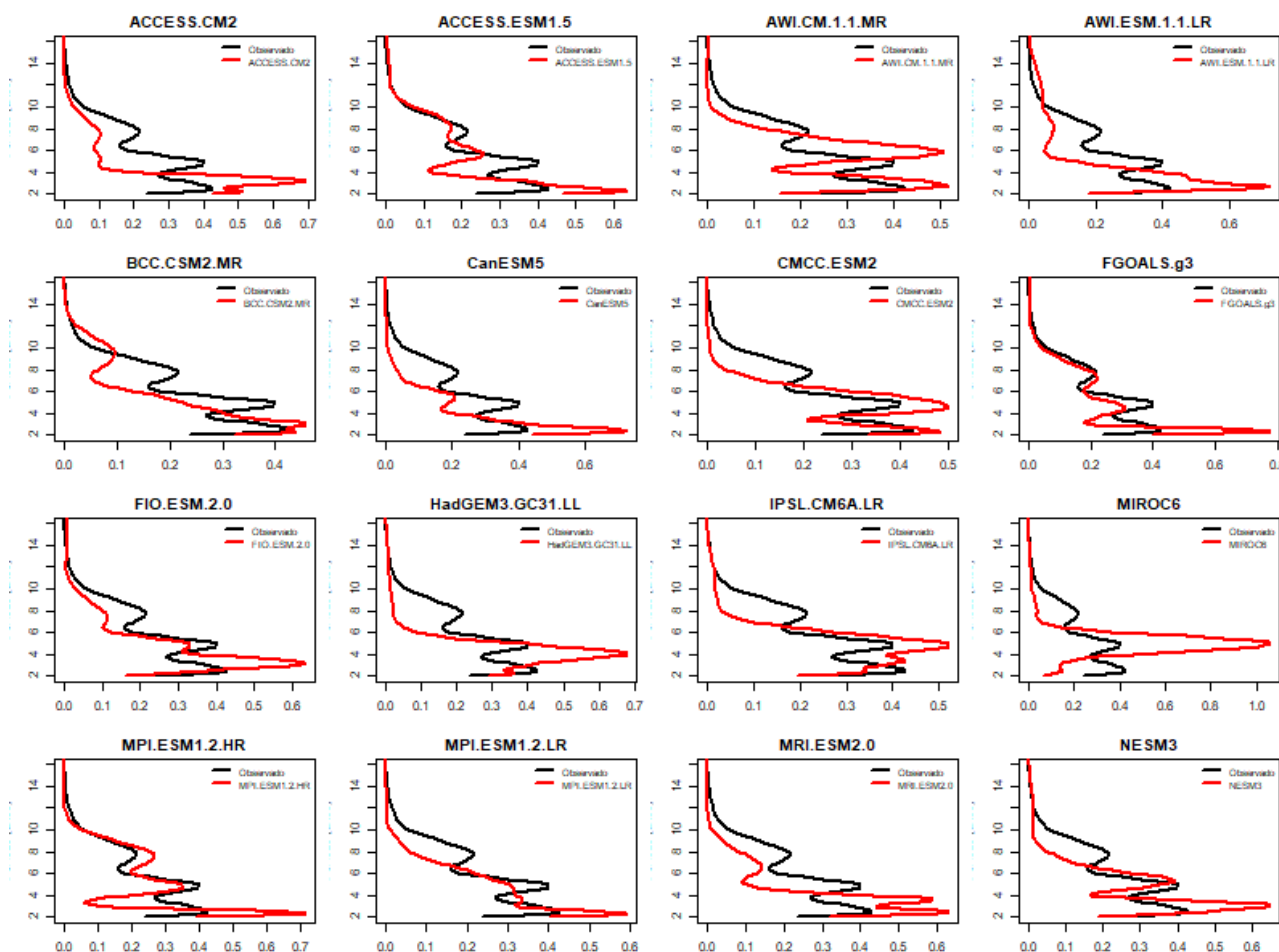


Figura 4 – Espectro de Potência Global via CWT: Precipitação Anual Modelo vs Observado

O índice final revela que IPSL-CM6A-LR, BCC.CSM2.MR e CMCC-ESM2 lideram o ranking geral, obtendo escores acima de 0,9 com a ponderação 0,5/0,5 (Figura 5). Mesmo com esquemas 0,6/0,4 e 0,7/0,3, esses modelos mantêm seu desempenho superior, conciliando precisão sazonal na reprodução do ciclo mensal e robustez plurianual. Em contraste, AWI.ESM1.1.LR e NESM3 apresentam desempenho substancialmente inferior em todas as métricas — consistentemente abaixo de 0,5 no índice composto — e, portanto, não são recomendados para estudos de impacto regional nesta bacia.

Os resultados indicam que a escolha de GCMs para downscaling no Nordeste brasileiro deve priorizar conjuntos que equilibrem desempenho em escalas sazonais e interanuais. Modelos líderes garantem sinal climático coerente para estudos de variabilidade pluvial e extremos sazonais, minimizando vieses de início/fim de estação e preservando modos de oscilação naturalmente presentes. A sensibilidade do ranking às diferentes ponderações ressalta a necessidade de ajustar pesos conforme o foco de aplicação — seja estudos de secas sazonais ou avaliação de riscos hidrológicos plurianuais.

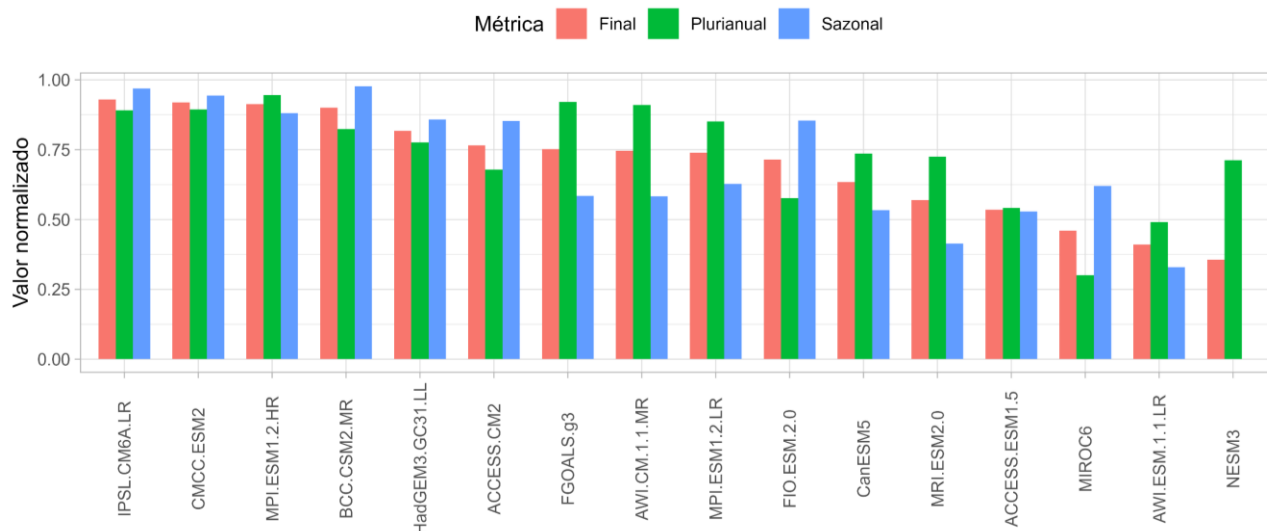


Figura 5 - Ranking Comparativo dos Modelos CMIP6 pelos Escores Sazonal, Plurianual e Composto

5. CONCLUSÕES

O framework multiescala desenvolvido neste trabalho, que integra RMSE, divergência de Kullback–Leibler, Transformada Contínua de Wavelet, Informação Mútua Normalizada e variância explicada, provou ser eficaz na discriminação de modelos CMIP6 quanto à sua capacidade de reproduzir padrões de precipitação tanto em escalas intraanuais quanto interanuais. Entre os modelos avaliados, IPSL-CM6A-LR, BCC.CSM2.MR e CMCC-ESM2 destacaram-se com escores compostos superiores a 0,9, indicando sua maior adequação para estudos regionais na bacia avaliada. A possibilidade de ajustar os pesos atribuídos às componentes sazonal e interanual confere flexibilidade ao método, permitindo que o usuário privilegie a fidelidade ao ciclo climatológico mensal ou às oscilações plurianuais, conforme os objetivos específicos de cada aplicação. Além disso, o framework poderá ser facilmente estendido para outras variáveis climáticas, como temperatura ou eventos extremos, e adaptado a diferentes localidades ou cenários futuros (RCP/SSP), ampliando seu potencial de uso em avaliações de impacto climático. Em suma, esta abordagem quantitativa e versátil contribui para a seleção criteriosa de GCMs e fortalece a base de projeções confiáveis e coerentes em múltiplas escalas temporais.

AGRADECIMENTOS - O presente trabalho foi realizado com apoio da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, da Fundação ASTEF, do Centro Estratégico de Excelência em Políticas de Águas e Secas – CEPAS e da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP.

REFERÊNCIAS

- FEYISSA, T. A. et al. (2023). “Evaluation of general circulation models CMIP6 performance and future climate change over the Omo River Basin, Ethiopia”. Sustainability, v. 15, n. 8, p. 6507.
- GALLEGATI, M. (2022). “Multiscale evaluation of CMIP5 models using wavelet-based descriptive and diagnostic techniques”. Climatic Change 170(3), p. 41.

- KRISTÓF, E. et al. (2020). “*Evaluation of historical CMIP5 GCM simulation results based on detected atmospheric teleconnections*”. *Atmosphere*, v. 11, n. 7, p. 723.
- LABAT, D. (2005). “*Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts*”. *Journal of Hydrology*, v. 314, p. 275–288. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.003>
- ROLIM, L. Z. R.; DE SOUZA FILHO, F. A.; BROWN, C. (2023). “*A multi-model framework for streamflow forecasting based on stochastic models: an application to the state of Ceará, Brazil*”. *Water Conservation Science and Engineering*, v. 8, n. 1, p. 7.
- SHARMA, D.; BABEL, M. S. (2018). “*Assessing hydrological impacts of climate change using bias-corrected downscaled precipitation in Mae Klong basin of Thailand*”. *Meteorological Applications*, v. 25, n. 3, p. 384–393. DOI: 10.1002/met.1706.
- STRYHAL, J.; HUTH, R. (2019). “*Classifications of winter atmospheric circulation patterns: validation of CMIP5 GCMs over Europe and the North Atlantic*”. *Climate Dynamics*, v. 52, n. 5, p. 3575–3598.
- TAMADDUN, K. A. et al. (2019). “*CMIP5 models’ ability to capture observed trends under the influence of shifts and persistence: an in-depth study on the Colorado River Basin*”. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 58, n. 8, p. 1677–1688.
- TAYLOR, K.E.; STOUFFER, R.J.; MEEHL, G.A. (2012). “*An overview of CMIP5 and the experiment design*”. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4), pp. 485–498.
- THIESEN, S.; DARSCHIED, P.; EHRET, U. (2019). “*Identifying rainfall-runoff events in discharge time series: a data-driven method based on information theory*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 23, n. 2, p. 1015–1034. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1015-2019>
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. (1998). “*A Practical Guide to Wavelet Analysis*”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, p. 61–78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)