AVALIAÇÃO DE TENDENCIAS DE PRECIPITAÇÃO NO BRASIL SOB CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Ronaldo Adriano Alves [1]
Anderson Paulo Rudke [2]
Jorge Alberto Martins[3]
Mauricio Moreira dos Santos [4]

[1] UEL; Londrina, PR – E-mail: ronaldo.adriano@uel.br - ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4934-5117
[2] CEFET; Belo Horizonte, MG – E-mail: rudke@ufmg.br - ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2970-5453
[3] UTFPR; Londrina, PR – E-mail: jmartinseae@gmail.com - ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4284-0676
[4] UEL; Londrina, PR – E-mail: mmsantos.geo@gmail.com - ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5632-2020

RESUMO EXPANDIDO

Os eventos hidrológicos extremos têm se tornado uma preocupação crescente devido à sua intensificação e recorrência. Um estudo recente da World Weather Attribution (2024) apontou que a ocorrência do fenômeno El Niño, por exemplo, tem aumentado tanto a probabilidade quanto a intensidade das tempestades severas. Além disso, o estudo destaca que o aumento do aquecimento global exerce um papel crucial na intensificação desses eventos, contribuindo para a intensificação da frequência e da severidade das tempestades, com projeções indicando um acréscimo de 6% a 9% na intensidade desses fenômenos.

As projeções climáticas futuras são essenciais para a compreensão do sistema climático, a identificação de riscos socioambientais e a orientação de estratégias de adaptação e mitigação em resposta às mudanças climáticas. Desde as primeiras publicações dos Relatórios de Avaliação do IPCC (IPCC, 2014), avanços significativos têm sido observados na compreensão dos padrões projetados dessas mudanças, impulsionados pela evolução dos modelos climáticos baseados em simulações computacionais. Esses modelos permitem a estimativa de condições futuras por meio de intercomparações entre múltiplos cenários climáticos, aumentando a confiabilidade das projeções (Tebaldi et al., 2021).

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar as tendências futuras nos padrões de precipitação no Brasil, com base na avaliação de diferentes cenários climáticos projetados pelo Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados, Fase 6 (CMIP6). Para analisar as tendências nos eventos climáticos extremos. Foram avaliados dois índices, o Índice Simples de Intensidade Diária (SDII), que mede a intensidade média da chuva nos dias chuvosos, e o índice de Precipitação Total (PRCPTOT), que mede o total de chuva acumulada em um determinado período. Ambos os índices são expressos em milímetros (mm) e fornecem uma medida da variação da precipitação ao longo do tempo, permitindo avaliar tendências e intensidade de eventos extremos associados às mudanças climáticas. As tendências projetadas são apresentadas por meio de uma abordagem regionalizada, complementada por análises em nível municipal.

TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

No presente estudo, os dados diários de precipitação foram utilizados para caracterizar tanto as séries históricas quanto as projeções futuras para todos os 5.570 municípios do Brasil. O estudo baseou-se nas Projeções Globais Diárias Reduzidas da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA) (Thrasher et al., 2022), e projeções Globais Diárias Reduzidas da Earth Exchange (NEX-GDDP), que fornecem cenários climáticos globais. Também foi utilizado um subconjunto de 16 Modelos de Circulação Geral (MCGs) (Tabela 1), desenvolvidos no âmbito do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6), com resolução de grade de 0,25º de latitude × 0,25º de longitude (~27,8 km), previamente definida pelo processo de redução de escala estatística aplicado pela NASA. Esses MCGs são ajustados por meio de redução de escala estatística, correção de viés e desagregação espacial com base no Conjunto de Dados de Forçamento Meteorológico Global (Sheffield et al., 2006).

Tabela 1 – Lista de modelos do NEX-GDDP usados neste estudo

Modelos	Países	Resolução nativa	Histórico	SSP2-4.5	SSP2-8.5
ACCESS-CM2	Australia	1.25° × 1.875°	✓	✓	✓
BCC-CSM2-MR	China	1.12° × 1.12°	✓	✓	✓
CESM2	Estados Unidos	0.94° × 1.25°	✓	✓	✓
CNRM-CM6-1	França	1.4° × 1.4°	✓	✓	✓
CNRM-ESM2-1	França	1.4° × 1.4°	✓	✓	✓
GFDL-CM4	Estados Unidos	1.0° × 1.25°	✓	✓	✓
IITM-ESM	Índia	~1.9° × 1.9°	✓	✓	✓
INM-CM4-8	Rússia	1.5° × 2.0°	✓	✓	✓
INM-CM5-0	Rússia	1.5° × 2.0°	✓	✓	✓
IPSL-CM6A-LR	França	1.26° × 2.5°	✓	✓	✓
MIROC-ES2L	Japão	2.8° × 2.8°	✓	✓	✓
MIROC6	Japão	1.4° × 1.4°	✓	✓	✓
MPI-ESM1-2-LR	Alemanha	1.87° × 1.87°	✓	✓	✓
MRI-ESM2-0	Japão	1.125° × 1.125°	✓	✓	✓
NorESM2-MM	Noruega	0.94° × 1.25°	✓	✓	✓
UKESM1-0-LL	Reino Unido	1.25° × 1.875°	✓	✓	✓

Na modelagem de projeções futuras, são utilizados diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa. No caso de simulações históricas (1950–2014), os modelos climáticos são influenciados por fatores antropogênicos, como emissões de gases de efeito estufa e aerossóis, bem como por fatores naturais externos, como atividade solar e vulcânica (J. Jiang et al., 2020; Thrasher et al., 2022). Para projeções climáticas futuras (2015–2100), as simulações são guiadas pelos diferentes Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs), que incluem mudanças explícitas em indicadores de desenvolvimento social, como população e economia. Os SSPs foram projetados para estabilizar as concentrações de dióxido de carbono e responder ao forçamento radiativo ao longo do próximo século (Huang et al., 2024; Kii, 2021). Neste estudo, as tendências nas mudanças futuras do regime de chuvas foram avaliadas sob cenários climáticos moderados (SSP2-4.5) e pessimistas (SSP5-8.5).

O conjunto de dados observacionais utilizado neste estudo para validação dos modelos CMIP6 foi desenvolvido por Xavier et al. (2022). O conjunto de dados fornece informações diárias de precipitação e foi desenvolvido utilizando o método de interpolação por ponderação do inverso da distância, aplicado a 11.473 pluviômetros e 1.252 estações meteorológicas distribuídas por todo o território brasileiro, com resolução espacial de 0,1° × 0,1°, abrangendo o período de 1961 a 2024 (https://sites.google.com/site/alexandrecandidoxavierufes/brazilian-daily-weather-gridded-data).

Com base nos índices climáticos SDII e PRCPTOT, foram realizadas análises estatísticas para detectar possíveis tendências de aumento ou redução ao longo do tempo. Esses índices fazem parte de um conjunto de índices desenvolvidos pela Equipe de Especialistas em Detecção e Índices de Mudanças Climáticas (ETCCDI) que monitoram as mudanças climáticas globais. Mais detalhes sobre estes índices podem ser encontrados em https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.

Foi aplicado o teste não paramétrico de Mann-Kendall (Kendall, 1948; Mann, 1945), amplamente empregado em estudos hidrometeorológicos para identificar a persistência de variações positivas ou negativas nos dados analisados (F. Jiang et al., 2023; Mallakpour & Villarini, 2017). Apesar de sua eficácia na detecção de tendências, esse teste não quantifica a intensidade das variações observadas, apenas indica a direção da tendência e sua significância estatística. Para complementar essa análise, foi utilizado o estimador de Theil-Sen (Sen's Slope), que permite mensurar a magnitude das mudanças ao longo do período estudado (Bal, 2024).

RESULTADOS

As simulações do conjunto multimodelo do CMIP6, representando projeções das condições climáticas associadas aos índices SDII e PRCPTOT são apresentados nesta sessão. Para o índice PRCPTOT, os dados médios de múltiplos modelos foram processados para gerar projeções específicas para cada região do Brasil, incorporando também o período histórico das simulações. Esta abordagem proporciona uma compreensão clara dos padrões de mudança com base nos cenários de forçamento SSP2-4.5 (intermediário) e SSP5-8.5 (alta emissão) durante o período de 2015 a 2100, em comparação com a linha de base histórica (1950-2014) (Figura 1). As linhas e a área suavizada em preto representam os valores de precipitação registrados no período histórico (1950-2014), enquanto as linhas e áreas suavizadas em azul e vermelho representam os valores de precipitação projetados para o período futuro (2014-2100) nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 que corresponde aos cenários moderado e pessimista respectivamente.

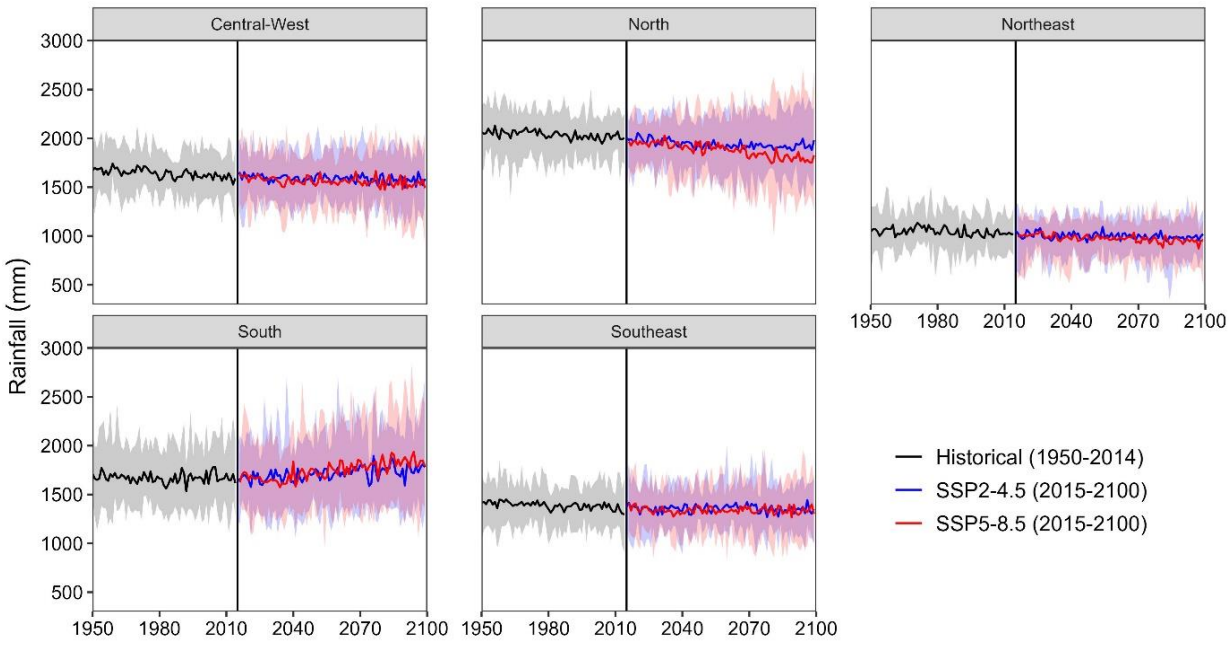


Figura 1. Médias anuais da precipitação acumulada mensal para o período histórico (representado pela linha preta horizontal) e projeções futuras [SSP2-4.5 (mostrada em azul) e SSP5-8.5 (mostrada em vermelho)]

O padrão mostrado na Figura 1 reforça a intensificação esperada das mudanças nos regimes de precipitação ao longo do tempo, impulsionada pelo fortalecimento dos processos atmosféricos associados ao aquecimento global. As tendências previamente identificadas são ainda corroboradas pela análise percentual do índice PRCPTOT. A região Sul, situada em latitudes mais elevadas, apresenta tendência de aumento do PRCPTOT, com variação positiva de até 4,43% no período analisado. Esse comportamento contrasta com o observado nas regiões Centro-Oeste, Norte, Nordeste e Sudeste, que apresentam variações negativas nos totais anuais de precipitação. Entre elas, a região Norte se destaca pela redução mais acentuada, com decréscimos entre 4,81% e 7,76% em relação à média de precipitação, a depender do cenário analisado (Tabela 2). Por outro lado, o Sudeste apresenta a maior estabilidade relativa entre as regiões, com pequenas variações entre os cenários e sem evidências claras de aumento ou redução substancial do PRCPTOT.

Tabela 2. Variação projetada do PRCPTOT nas regiões brasileiras até o final do século, considerando a média multimodelo (MMM).

Regiões	**Histórico**	**Projeções Futuras**	
		SSP2-4.5	**SSP5-8.5**
Centro Oeste	1.639 mm	1.588 mm	1.561 mm
Norte	2.037mm	1.939 mm	1.879 mm
Nordeste	1.044 mm	998 mm	974 mm
Sul	1.670 mm	1.712 mm	1.744 mm
Sudeste	1.387 mm	1.355 mm	1.338 mm

Para apresentar os resultados do índice SDII, sobre a intensidade média da chuva nos dias chuvosos[1] foi estruturada uma figura como matrizes codificadas por cores (mapas de calor), permitindo a visualização da variabilidade espacial no desempenho dos modelos. As tendências são apresentadas em termos de intensidade, expressa em milímetros (mm), que representa a taxa de aumento da intensidade média da chuva nos dias chuvosos. Essa representação destaca, para cada estado brasileiro, a classificação e a inclinação das tendências, mostra também as tendencias estratificadas por região geográfica e cenários climáticos.

As cores representam a inclinação mediana das tendências entre os municípios de cada estado. Os valores centrais indicam a porcentagem de municípios com tendências estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$). O valor médio, apresentado na última linha, representa a média multimodelo (MMM).

O que se observa na Figura 2, é a indicação de uma tendência predominantemente positiva do SDII para os estados brasileiros nos dois cenários analisados, sugerindo aumento da intensidade média da precipitação em dias chuvosos ao longo do século XXI. Esse padrão é mais evidente no cenário SSP5-8.5, no qual a linha média dos modelos apresenta tendências positivas mais generalizadas e intensas em praticamente todas as regiões do país. No SSP2-4.5, embora também predominem tendências de aumento, observa-se maior heterogeneidade espacial e maior dispersão entre os modelos, especialmente em partes do Centro-Oeste, Norte e Sudeste.

[1] Consideram-se dias chuvosos aqueles com acúmulo de precipitação ≥ 1 mm.

É importante observar que, a interpretação no slope de tendencia deve considerar o efeito acumulado ao longo do século XXI. Tendências positivas entre 0,02 e 0,06 mm/dia/ano, como podem ser observadas no gráfico, podem representar aumentos aproximados de 1,7 a 5,1 mm/dia na intensidade média da precipitação em dias chuvosos até o final do século. Esses resultados sugerem que, em um contexto de maior aquecimento climático, a precipitação tende a ocorrer de forma mais concentrada e intensa, mesmo em regiões onde o total anual de precipitação (PRCPTOT) pode não apresentar aumento expressivo.

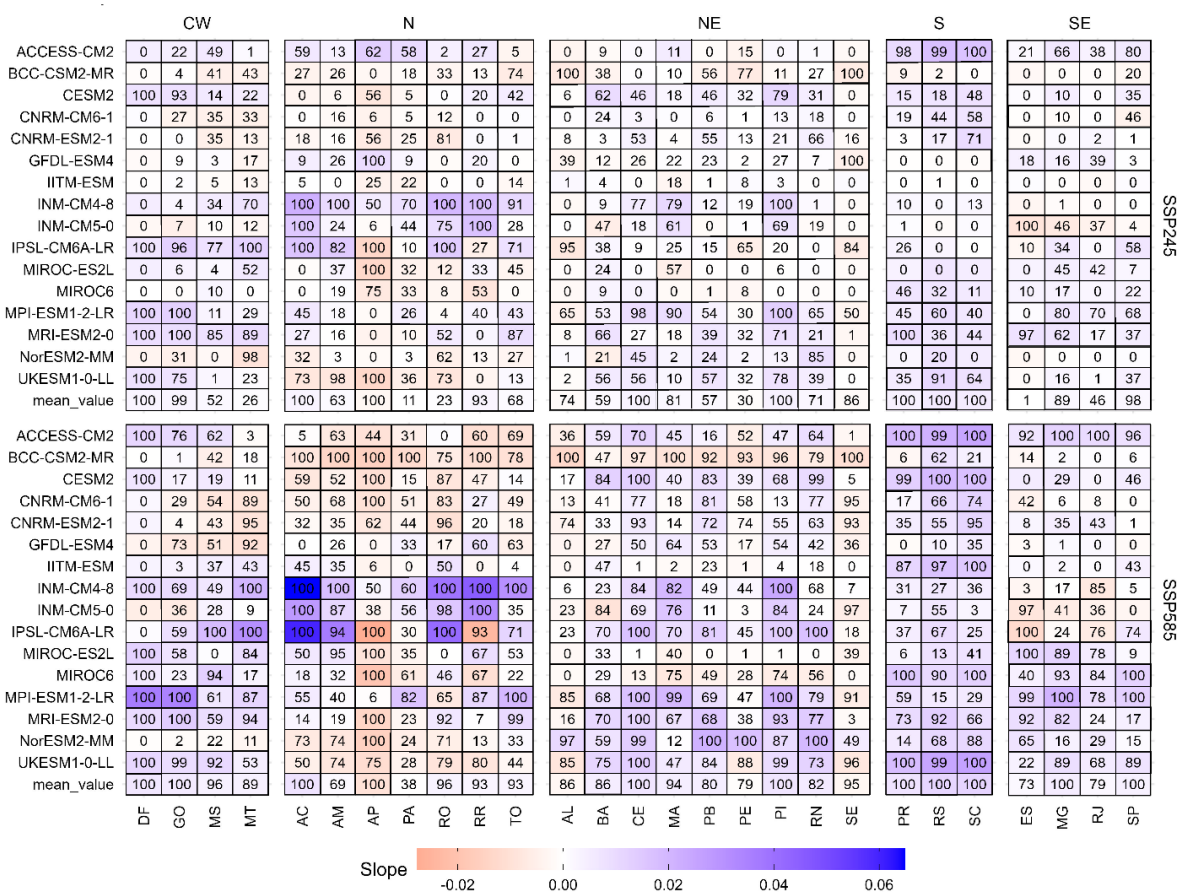


Figura 2. Médias anuais do índice SDII por estado brasileiro, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (CMIP6).

O aumento do SDII aponta para potenciais impactos sobre a drenagem urbana, a erosão do solo, a ocorrência de enxurradas e a gestão dos recursos hídricos. A análise das tendências do SDII, em conjunto com outros índices de extremos climáticos, é fundamental para compreender possíveis mudanças na intensidade e na distribuição da precipitação ao longo do século XXI. Esses resultados fornecem subsídios importantes para o planejamento urbano, a gestão da drenagem, a redução de riscos hidrometeorológicos e a formulação de estratégias de adaptação climática, contribuindo para o desenvolvimento de cidades mais resilientes, seguras e preparadas para enfrentar os impactos das mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE

Mudanças climáticas; extremos de chuva; modelagem climática; CMIP6; resiliência urbana.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, por meio da concessão de bolsa de estudo - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

Bal, A. (2024). Improving the Robustness of the Theil-Sen Estimator Using a Simple Heuristic-Based Modification. *Symmetry*, *16*(6), 698. https://doi.org/10.3390/sym16060698

Huang, X., Wang, Y., & Ma, X. (2024). Simulation of extreme precipitation changes in Central Asia using CMIP6 under different climate scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, *155*(4), 3203–3219. https://doi.org/10.1007/s00704-023-04802-9

IPCC. (2014). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Jiang, F., Wen, S., Gao, M., & Zhu, A. (2023). Assessment of NEX-GDDP-CMIP6 Downscale Data in Simulating Extreme Precipitation over the Huai River Basin. *Atmosphere*, *14*(10). https://doi.org/10.3390/atmos14101497

Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., & Zhang, L. (2020). Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections. *Environmental Research Letters*, *15*(5), 054009. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7d03

Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods. In *American Psychological Association*.

Kii, M. (2021). Projecting future populations of urban agglomerations around the world and through the 21st century. *Npj Urban Sustainability*, *1*(1), 10. https://doi.org/10.1038/s42949-020-00007-5

Mallakpour, I., & Villarini, G. (2017). Analysis of changes in the magnitude, frequency, and seasonality of heavy precipitation over the contiguous USA. *Theoretical and Applied Climatology*, *130*(1–2), 345–363. https://doi.org/10.1007/s00704-016-1881-z

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *The Econometric Society*, *13*. https://doi.org/10.2307/1907187

Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). *Development of a 50-Year High-Resolution Global Dataset of Meteorological Forcings for Land Surface Modeling*.

Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K. B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Meehl, G., … Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, *12*(1), 253–293. https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Scientific Data*, *9*(1). https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4

World Weather Attribution. (2024, June 3). *Climate change, El Niño and infrastructure failures behind massive floods in southern Brazil*.

Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, *42*(16), 8390–8404. https://doi.org/10.1002/joc.7731