A Distribuição de Extremos de Precipitação Diária no Brasil Ainda é Estacionária? Uma Análise Multirregional (1961–2025)

Azrael Levi Oliveira Mendonça [1] ; Antonio Luigi de Souza Carvalho [2] ; Elis Ferreira Lopes [3]; Samuel Lira de Brito [4] & Cleiton da Silva Silveira [5]

Palavras-Chave – não-estacionariedade, precipitações extremas, infraestrutura hídrica.

INTRODUÇÃO

Extremos de precipitação tendem a tornar-se mais frequentes com a intensificação das mudanças climáticas, levantando questionamentos acerca da validade das estimativas de frequência e dos tempos de retorno adotados. Nesse contexto, compreender os processos climáticos que influenciam a ocorrência e a intensidade desses eventos torna-se essencial para aprimorar sua representação e previsão.

Fenômenos como o aquecimento global têm potencial para alterar a dinâmica das precipitações extremas, uma vez que o aumento da temperatura do ar eleva a pressão de saturação de vapor e, consequentemente, a capacidade atmosférica de armazenar umidade, favorecendo a ocorrência de eventos pluviométricos mais intensos (Trenberth, 2011). Além disso, a atuação de mecanismos de variabilidade climática em diferentes escalas temporais, associada às mudanças climáticas observadas nas últimas décadas, pode modificar a frequência e a magnitude dos extremos de precipitação (Westra et al., 2014). Nesse contexto, surge o questionamento acerca da validade da hipótese de estacionariedade, amplamente adotada em análises hidrológicas e climáticas (Milly et al., 2008).

A hipótese de estacionariedade constitui a base para o dimensionamento de diversas obras hidráulicas, uma vez que os tempos de retorno utilizados em projeto são estimados a partir da premissa de que as características estatísticas das séries hidrológicas permanecem constantes ao longo do tempo (Obeysekera & Salas, 2014). No entanto, alterações na frequência e magnitude dos extremos de precipitação ao longo da vida útil das estruturas podem tornar inadequados os níveis de proteção inicialmente adotados, comprometendo a confiabilidade e o desempenho das infraestruturas hidráulicas.

Os eventos extremos de precipitação estão entre os principais responsáveis por enchentes e inundações, ocasionando perdas econômicas, danos à infraestrutura e impactos significativos à população (Marengo et al., 2021; Tabari, 2020). Em razão dos riscos associados à sua ocorrência, a adequada caracterização da magnitude e da frequência desses eventos constitui etapa fundamental para análises de risco e para o planejamento de infraestruturas sujeitas a eventos hidrológicos extremos.

Diante disso, este artigo realiza uma avaliação da estacionariedade dos extremos de precipitação em diferentes regiões do Brasil por meio da comparação de distribuições estatísticas ajustadas para

[1]) Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: azraelmendonca@alu.ufc.br
[2]) Mestrando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: luigicarvalho.eng@gmail.com
[3]) Doutoranda em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: elis_f.lopes@hotmail.com
[4]) Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: samuellira@alu.ufc.br
[5]) Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: cleitonsilveira@ufc.br

distintos períodos temporais, verificando possíveis alterações nos tempos de retorno associados aos eventos extremos.

METODOLOGIA

As etapas metodológicas consistem na avaliação da hipótese de não-estacionariedade em séries históricas de precipitação extrema diária em cinco regiões: Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), Amazônia, São Paulo, Rio Grande do Sul e Brasília/BR-060. A seleção das áreas baseou-se na representatividade geoeconômica e climática das cinco macrorregiões brasileiras. Dada a extensão continental do país, os regimes de chuva exibem forte heterogeneidade espaço-temporal controlada por múltiplos sistemas atmosféricos (REBOITA et al., 2010). Essa abordagem multirregional permite diagnosticar se os padrões de não-estacionariedade nos extremos de precipitação respondem a tendências globais ou a especificidades regionais. Toda a trajetória do processamento de dados e os procedimentos de modelagem estatística adotados estão sequenciados no fluxo analítico detalhado na Figura 1.

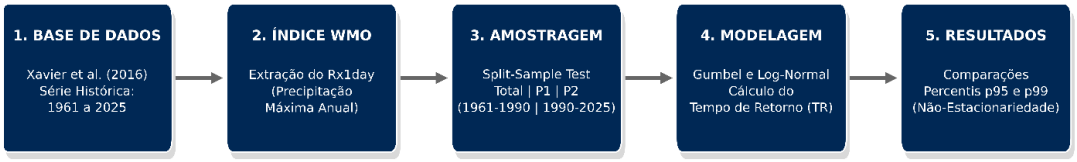


Figura 1 – Fluxograma metodológico do processamento de dados e análise de não-estacionariedade multirregional. **Fonte:** Elaborado pelo autor (2026).

A primeira etapa do trabalho consistiu na obtenção dos dados a partir de uma base de informações meteorológica, composta por uma série temporal contínua que abrange o intervalo de 1961 a 2025. Das séries diárias originais, foi extraído o índice de precipitação máxima diária anual (Rx1day), definido pelo volume máximo de chuva acumulado em 24 horas para cada ano (Zhang et al., 2011). A análise das mudanças nos padrões locais ao longo do tempo, foi estruturada a partir de três períodos de interesse: o período Total, P_{total}, corresponde a 1961–2025, o período P_1 equivale a 1961–1990 e o período P_2 é de 1990–2025. Essa abordagem permite comparar diretamente o comportamento estatístico da precipitação e identificar possíveis alterações nos regimes de chuva entre as janelas temporais antiga e recente em relação à série completa.

Na sequência, aplicou-se o ajuste de distribuições de probabilidade aos dados observados de cada um dos três períodos avaliados (P_{total}, P_1 e P_2). Para isso, foram utilizadas as distribuições Gumbel e Log-Normal, estimando-se os seus respectivos parâmetros para modelar o comportamento dos máximos anuais.

Por fim, para evidenciar e mensurar as diferenças entre os períodos e verificar a quebra de estacionariedade, realizou-se o cálculo e a análise comparativa de percentis e estatísticas descritivas, com foco na média dos máximos, no desvio padrão e nos percentis 95 ($_{p95}$) e 99 ($_{p99}$).

RESULTADOS

O comportamento integrado dessas funções de densidade de probabilidade (PDF) e de distribuição acumulada (CDF) em termos espaciais e gráficos é ilustrado de forma complementar nas Figuras 2 e 3, relacionando as equações aplicadas e os mapas das regiões sob análise.

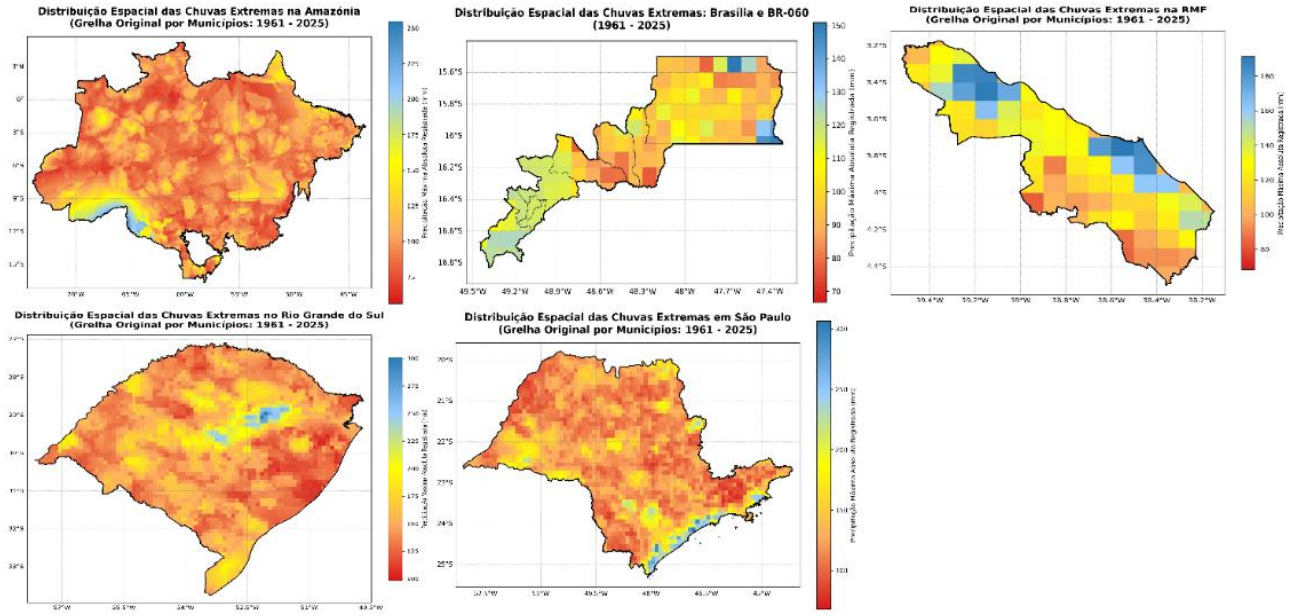


Figura 2 – Painel de mapas das regiões de estudo sob análise de extremos de precipitação. **Fonte:** Elaborado pelo autor (2026).

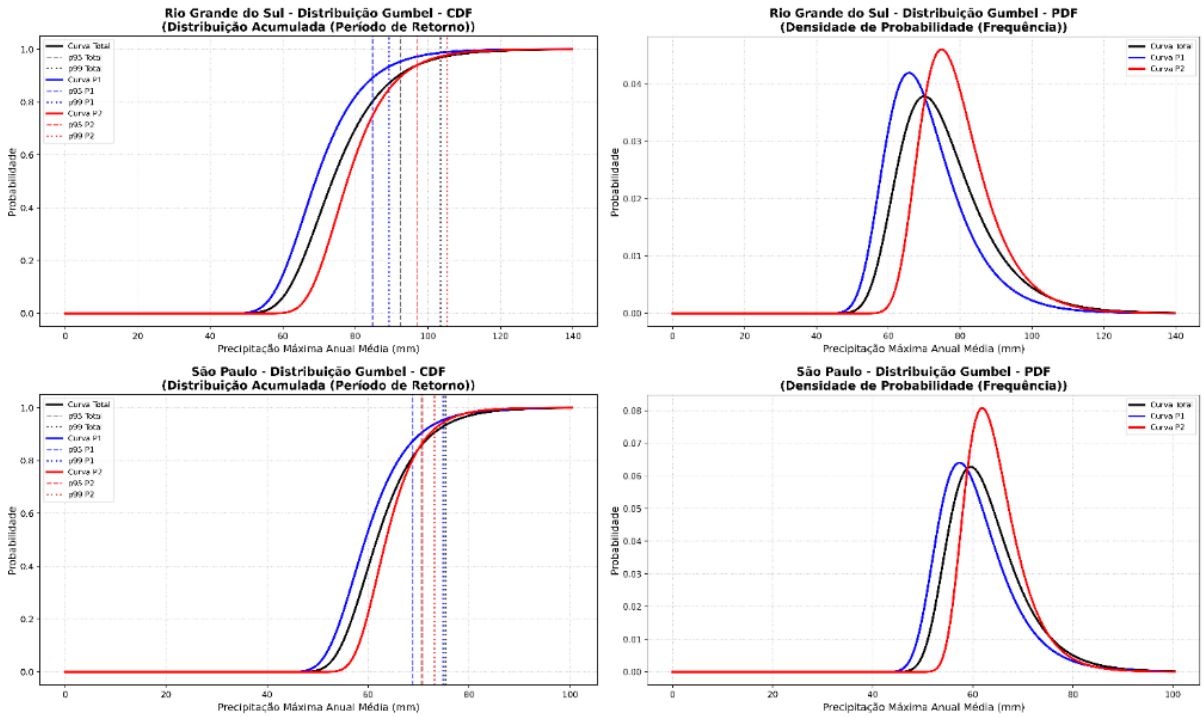


Figura 3 – Curvas das distribuições Gumbel (PDF e CDF) para as séries de extremos, evidenciando o comportamento comparativo entre o período P_{total}, P_1 e P_2. **Fonte:** Elaborado pelo autor (2026)

Os mapas das regiões de estudo ilustram a distribuição espacial das precipitações máximas diárias, enquanto as curvas de distribuição de probabilidade (PDF e CDF) expõem um deslocamento generalizado dos extremos para a direita no período recente (P_2). Observa-se uma tendência de elevação nos percentis de criticidade ($_{p95}$), com destaque para os incrementos observados no Rio Grande do Sul e em São Paulo. Essa dinâmica estatística sugere a não-estacionariedade climática nas regiões avaliadas, indicando potenciais riscos de subdimensionamento na infraestrutura hídrica atual

CONCLUSÕES

- Análise estatística aponta para a não-estacionariedade nos extremos de precipitação nas regiões estudadas.
- Os resultados indicam um aumento dos valores associados aos percentis elevados (P95 E P99), sugerindo maior intensidade dos eventos extremos nas séries recentes.
- A alteração observada no Tempo de Retorno (TR) sugere a necessidade de reavaliar a premissa de estabilidade climática.
- Projetos de engenharia dimensionados exclusivamente com dados do passado podem apresentar risco de subdimensionamento frente aos cenários atuais.
- Recomenda-se a atualização dos manuais de drenagem urbana e das estratégias de gestão de riscos.

REFERÊNCIAS

MARENGO, J. A. et al. (2021). “Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil”. Frontiers in Climate, v.3, art. 610433, p.1–17.

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, Julio; FALKENMARK, Malin; HIRSCH, Robert M.; KUNDZEWICZ, Zbigniew W.; LETTENMAIER, Dennis P.; STOUFFER, Ronald J. Stationarity is dead: whither water management? Science, v. 319, p. 573-574, 2008.

OBEYSEKERA, Jayantha; SALAS, Jose. Quantifying the Uncertainty of Design Floods under Nonstationary Conditions. Journal of Hydrologic Engineering, v. 19, p. 1438-1446, 2014.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

TABARI, H. (2020). “Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability”. Scientific Reports, v.10, art. 13768, p.1–10.

TRENBERTH, Kevin E. Changes in precipitation with climate change. Climate Research, v. 47, n. 1-2, p. 123-138, 2011.

WESTRA, S. et al. (2014). “Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall”. Reviews of Geophysics, v.52, p.522–555.

ZHANG, X.; ALEXANDER, L.; HEGERL, G. C.; JONES, P.; TANK, A. K.; PETERSON, T. C.; TRENBERTH, K. E.; ZWIERS, F. W. Indices for monitoring changes in extreme climate. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 2, n. 6, p. 851-858, 2011.