Alterações no regime de chuvas: um estudo de caso na bacia do rio Piracicaba

Ronalton Machado[1]; Carlos Trucíos[2]; Tárcio R. Lopes [3] Sérgio N. Duarte [4]; Matheus H. Mortene [5]

RESUMO – Este estudo analisou séries temporais de precipitação de 1961 a 2025, utilizando dados de 159 pontos de grade regularmente espaçados ao longo da bacia do rio Piracicaba/SP. Os testes não paramétricos de Pettitt, Mann-Kendall e Sen foram aplicados tanto aos totais anuais quanto à precipitação máxima anual em 24 horas. Tendências foram identificadas em 35 pontos de grade para a precipitação anual e em 14 pontos para a precipitação máxima diária anual. Os pontos de inflexão concentraram-se no início da década de 1980 e na década de 2000 entre os anos de 2005 e 2009. Os totais anuais exibiram inclinações negativas consistentes no teste de Sen, indicando uma redução cumulativa na precipitação. Em contraste, a precipitação diária extrema apresentou tendências espacialmente heterogêneas e de menor magnitude, sem evidências de intensificação generalizada. As tendências de declínio concentraram-se na paste oeste da bacia, na região onde localiza-se o aquífero Guarani, sugerindo potenciais impactos na recarga do aquífero. Os resultados destacam a necessidade de monitoramento contínuo e estratégias adaptativas de gestão hídrica em um contexto de variabilidade climática.

Palavras-Chave – precipitação, rio Piracicaba, testes não-paramétricos

INTRODUÇÃO E OBJETIVO

As mudanças nos padrões de precipitação e a sua natureza inerentemente complexa, impulsionadas pela interação de múltiplos processos atmosféricos e controles geográficos, apresenta desafios significativos para a identificação de tendências consistentes a longo prazo (Silva & Vargas, 2018). Essa lacuna de conhecimento é particularmente relevante em regiões de importância estratégica para o abastecimento de água e o setor produtivo, como a Bacia do Rio Piracicaba.

Ainda há uma escassez de estudos que integrem análises temporais e espaciais das tendências de precipitação em alta resolução espacial dentro da bacia, especialmente aqueles que utilizam métodos estatísticos robustos aplicados a séries históricas de longo prazo. Permanece incerto, por exemplo, se as mudanças observadas são localizadas ou generalizadas, se seguem padrões regionais coerentes e como essas mudanças se relacionam com eventos climáticos extremos ou mudanças no uso da terra. Neste contexto, este estudo teve como objetivo analisar tendências e potenciais pontos de mudança na série temporal de precipitação anual em 159 pontos regularmente interconectados na bacia do rio Piracicaba, no período de 1961 a 2025.

METODOLOGIA

As possíveis tendências no conjunto de dados históricos de precipitação foram analisadas para 159 pontos hidrológicos que formam uma grade dentro da Bacia do Rio Piracicaba no período de 1961 a 2025 (Figura 1). Os dados foram obtidos de Xavier et al. (2022), que estabeleceram uma grade de pontos regularmente espaçados (~11 km) cobrindo todo o território brasileiro, com resolução temporal diária, a partir da qual os totais anuais de precipitação e a precipitação máxima anual de 24 horas foram derivados neste estudo.

A resolução espacial uniforme dos pontos permite a avaliação de padrões locais e regionais com maior detalhe, superando as limitações de estudos anteriores (Pellegrino et al., 2001; Machado et al., 2017; Silva & Vargas, 2018) baseados em estações pluviométricas isoladas ou mal distribuídas.

As tendências nas séries históricas foram identificadas aplicando-se o teste não paramétrico de Pettitt (Pettitt, 1979) em combinação com os testes de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945)

[1] Afiliação: Faculdade de Tecnologia/UNICAMP - ronalton@unicamp.br
[2] Afiliação: Departamento de Estatística/UNICAMP - ctrucios@unicamp.br
[3] Afiliação: UEM - trcrch@gmail.com
[4] Afiliação: Departamento de Biossistemas/ESALQ/USP - snduarte@usp.br
[5] Afiliação: Faculdade de Tecnologia/UNICAMP - mat_hm@hotmail.com

e Sen (Sen, 1968). Esses testes são amplamente utilizados em estudos relacionados à análise de tendências de precipitação e vazão (Machado, 2017) e também são frequentemente aplicados na classificação climática de diferentes regiões do mundo (Armond, 2018). Os testes permitem a análise de tendências em séries sem assumir uma distribuição de probabilidade específica para os dados. Todos os testes foram aplicados com um nível de significância de 10% ($\alpha = 0,1$) para aumentar a sensibilidade na detecção de mudanças em séries ambientais naturalmente ruidosas. Esse limiar é frequentemente adotado em estudos exploratórios com foco regional, embora seja menos conservador do que o nível convencional de 5% (Júnior & Landim, 2014).

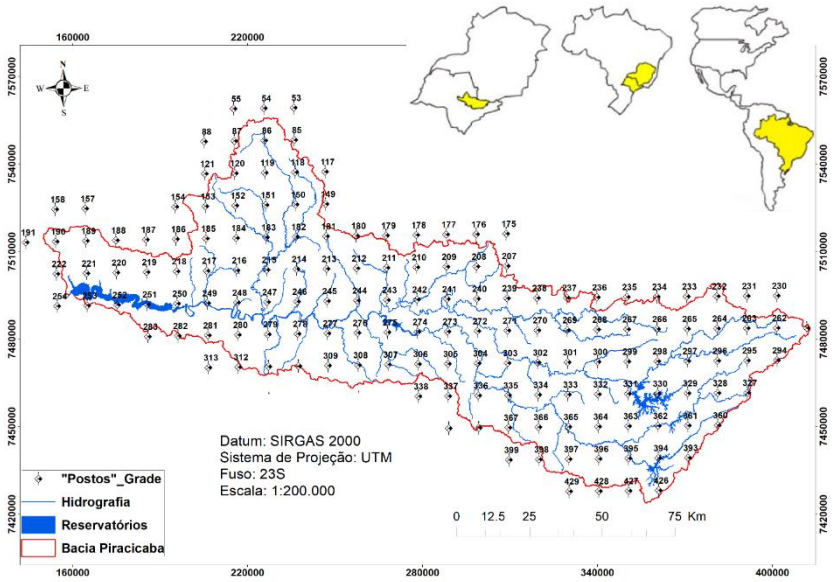


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Piracicaba e a distribuição espacial da grade dos postos pluviométricos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação dos testes de Pettitt e Mann-Kendall identificou mudanças estatisticamente significativas em 35 dos 159 pontos da grade analisados, indicando pontos de inflexão nos padrões históricos da precipitação anual (Figura 2). Essas mudanças se concentraram no início da década de 1980. A aplicação dos testes de Pettitt e Mann-Kendall à série anual de precipitação máxima de 24 horas identificou mudanças estatisticamente significativas em 14 pontos da grade, indicando mudanças estruturais no comportamento da precipitação extrema (Figura 3), particularmente no início da década de 1980 e na década de 2000 entre os anos de 2005 e 2009.

A distribuição espacial dos pontos que apresentaram mudanças de inflexão (Figuras 4A e 4B) revela coerência regional, sugerindo que as mudanças não foram aleatórias, mas refletem padrões regionais possivelmente associados a modificações na circulação atmosférica.

O método da inclinação de Sen permite, quando uma tendência é detectada, a estimativa de sua magnitude (intercepto e inclinação). Os resultados mostraram uma inclinação negativa em todas as séries com mudanças detectadas, indicando uma diminuição na precipitação média anual na bacia do Rio Piracicaba. Essa descoberta reforça alertas anteriores (Cumplido et al., 2023) sobre o aumento da frequência e magnitude de eventos extremos, incluindo secas prolongadas. Para a precipitação máxima diária de 24 horas, pôde-se observar que alguns pontos da grade apresentaram valores positivos para a inclinação de Sen, enquanto a maioria exibiu valores negativos, embora com magnitudes significativamente menores do que as observadas para os totais anuais.

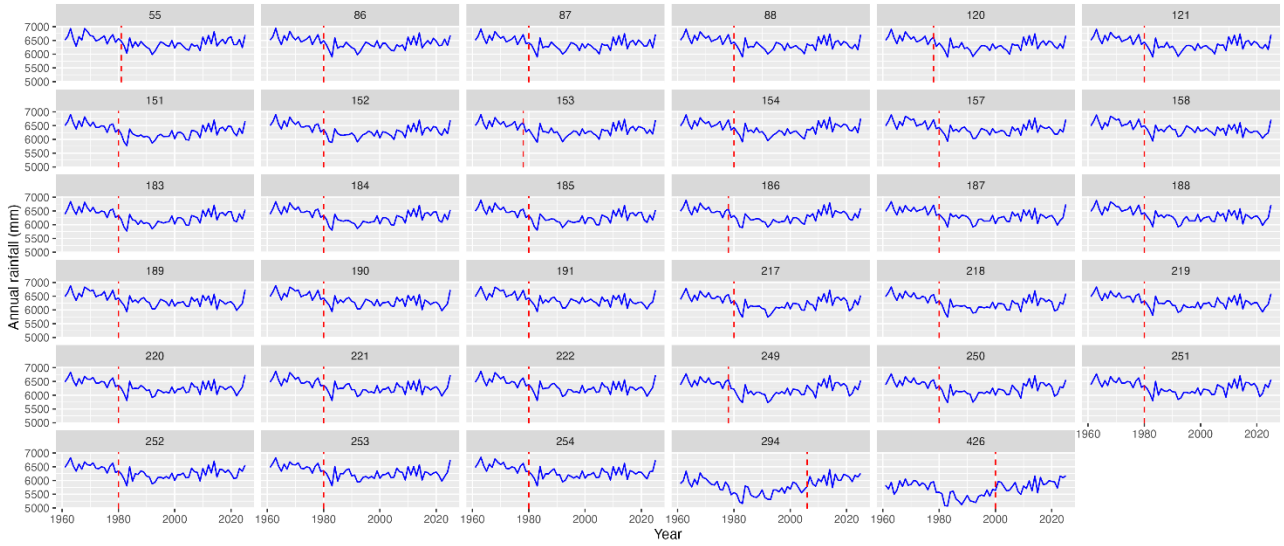


Figura 2 - Gráficos das séries temporais anuais onde o Teste de Pettitt e Mann-Kendall, com nível de significância α = 0.1, foi significativo e seus respectivos pontos de ruptura.

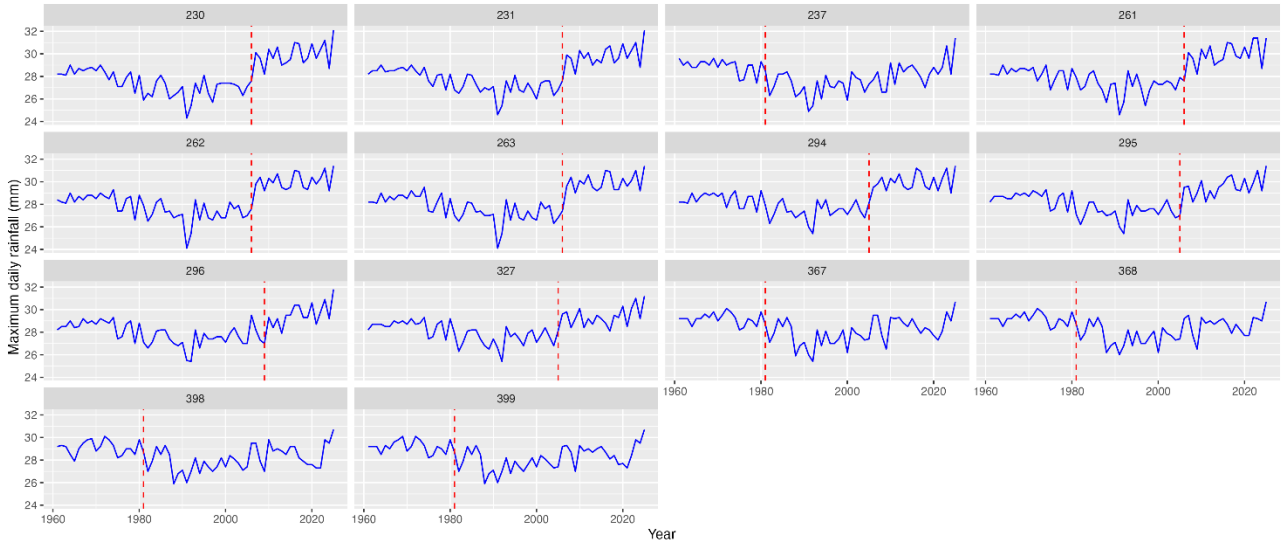


Figura 3 - Gráficos das séries temporais máxima em 24 horas onde o Teste de Pettitt e Mann-Kendall, com nível de significância α = 0.1, foi significativo e seus respectivos pontos de ruptura.

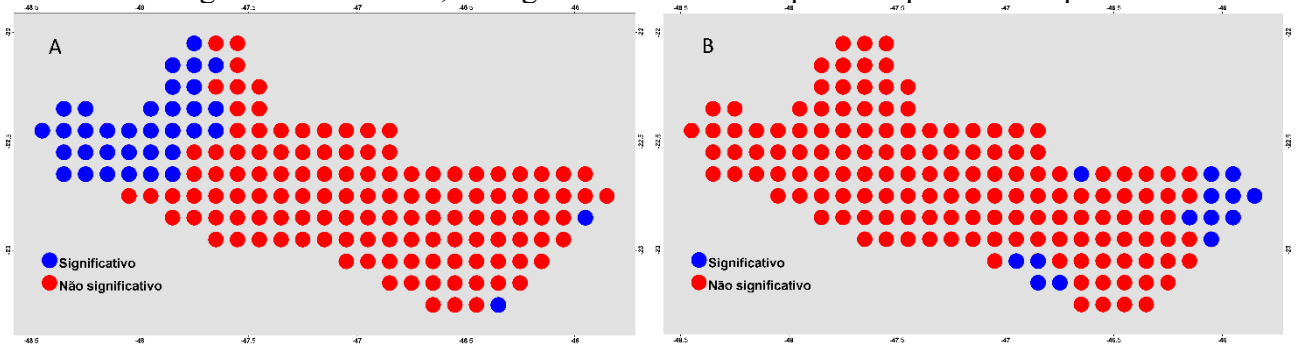


Figura 4. Mapa mostrando agrupamentos de pontos onde os testes de Pettitt e Mann-Kendall foram significativos a um nível de significância de α = 0,1. (A) Precipitação anual e (B) precipitação máxima diária.

CONCLUSÃO – Os resultados deste estudo revelam mudanças significativas no regime de precipitação anual da Bacia do Rio Piracicaba no período de 1961 a 2025. A aplicação combinada dos testes de Pettitt, Mann-Kendall e Sen permitiu a identificação de tendências estatisticamente significativas em 22 dos 159 pontos da grade avaliados para precipitação anual, com pontos de inflexão notáveis, ocorrendo no início da década de 1980. A análise da precipitação máxima anual em 24 horas mostrou um comportamento espacial mais heterogêneo, com tendências positivas e negativas de menor magnitude, indicando que as mudanças observadas estão principalmente associadas a reduções na precipitação acumulada, e não a uma intensificação generalizada de eventos extremos de precipitação.

AGRADECIMENTOS – À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia (PPGT)/FT/Unicamp e a FAEPEX pela ajuda de custo para participação nesse Simpósio.

REFERÊNCIAS

ARMOND, N. B. *Dinâmica Climática, Excepcionalidades e Vulnerabilidade: Contribuições para uma classificação geográfica do clima do estado do Rio de Janeiro*, 2018.

CUMPLIDO, M. A., Inocente, M. C., Medeiros, T. P., Oliveira, G. S., Marengo, J. A. 2023. Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: um histórico comparativo entre os eventos de 2001, 2014 e 2021 com enfoque na bacia do rio Paraná. Revista Brasileira de Climatologia, 32, 129-153. https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16154

JÚNIOR, N. C.; LANDIM, P. M. B. *Análise da chuva e vazão na bacia hidrográfica do rio Pardo*. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 33, n. 2, p.244-260, 2014.

KENDALL, M. G. *Rank Correlation Methods*, 4th ed., Charles Griffin, London, 1975.

MACHADO, R. E.; RICARTE, I. L. M.; MARTINS, P. S. & SENTELHAS, P. C. *Análise de tendências da precipitação em Piracicaba/SP* In: XXII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos 26 de novembro a 01 de dezembro de 2017 Florianópolis-SC.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. (1947). *On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other*. Annals of Mathematical Statistics. 18 (1): 50–60. doi: 10.1214/aoms/1177730491. MR 0022058. Zbl 0041.26103.

PELLEGRINO, G. Q., Moraes, J. M., Guandique, E.M., Ballester, M.V., Martinelli, L.A., Victória, R.L. 2001. Análise Espaço Temporal de componentes hidroclimáticos na bacia do Rio Piracicaba. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 9, 1, 125-135. https://repositorio.usp.br/single.php?_id=001246446&locale=en_US

SEN, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63, 1379–1389. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1968.10480934

SILVA, F. G., Vargas, E. V. 2018. Análise de tendências climáticas em 243 municípios brasileiros. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, 4, 695-703. https://www.scielo.br/j/sa/a/mt8Rh3qpZcZVBjnWyVnct9L/?format=pdf.

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