DETECÇÃO DE TENDÊNCIAS DE VAZÃO: MANN-KENDALL ANUAL VERSUS SAZONAL NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Isabela Schneider Bezerra de Menezes[1] *& Franciele Zanandrea*[2]

Palavras-Chave – Regime hidrológico, sazonalidade, disponibilidade hídrica.

INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul constitui um sistema hídrico estratégico para o Brasil, sustentando abastecimento público, irrigação, geração de energia e diluição de efluentes em uma das regiões mais densamente ocupadas do país (CEIVAP, 2021). A variabilidade e as tendências de longo prazo das vazões na bacia têm sido objeto de diversos estudos, revelando evidências de alterações no regime hidrológico (Marengo; Alves, 2005; Ferreira; Santana; Santos, 2025). Marengo e Alves (2005) identificaram tendência sistemática de redução nas vazões de diversos postos ao longo do canal principal desde a década de 1920, dissociada de tendência correspondente na precipitação, o que sugere origem predominantemente antrópica para essas alterações.

A quase totalidade desses estudos, no entanto, baseia-se em séries de vazão média anual, que sintetizam doze meses em um único valor. Essa agregação pode diluir sinais de tendência concentrados em determinados períodos do ano, sobretudo em bacias com sazonalidade marcada, como o Paraíba do Sul, onde maio a outubro concentra a menor disponibilidade hídrica. Este trabalho investiga em que medida a escolha da escala temporal de análise, anual ou sazonal, condiciona a detecção de tendências de vazão na bacia.

METODOLOGIA

Foram utilizadas séries de vazão média mensal e anual, consistidas, de 23 estações fluviométricas situadas em afluentes não regularizados da bacia, operadas pela CPRM e pela ANA, com períodos de registro entre 20 e 96 anos (Tabela 1; Figura 1). Para a detecção de tendência nas séries anuais, aplicou-se o teste de Mann-Kendall com o procedimento *Trend Free Pre-Whitening* (TFPW; Yue et al., 2002), que remove a autocorrelação serial antes da avaliação estatística. Para a análise sazonal, aplicou-se o teste de Mann-Kendall Sazonal (SMK; Hirsch, Slack e Smith, 1982), que compara as observações de cada mês exclusivamente com as do mesmo mês em anos diferentes, eliminando a influência do ciclo sazonal sem necessidade de remoção prévia da sazonalidade.

Tabela 1 – Estações fluviométricas analisadas.

ID	Código	Estação	ID	Código	Estação	ID	Código	Estação
1	58030000	Estrada do Cunha	9	58258000	Ponte Nova	17	58610000	Estevão Pinto
2	58040000	São Luís do Paraitinga 2	10	58270000	Glicério	18	58658000	Volta Grande
3	58040100	São Luís do Paraitinga 1	11	58470000	Chapéu d'Uvas	19	58670002	Faz. da Barra (Pirapetinga)
4	58045000	Ponte dos Mineiros	12	58525000	Visconde de Mauá	20	58820000	Fazenda Mendes
5	58060000	Ponte Alta 1	13	58530000	Ponte do Souza	21	58825000	Ponte Estrada Dona Mariana
6	58065000	Ponte Alta 2	14	58535000	Zelinda	22	58856900	Aldeia - RN
7	58142000	Buquirinha	15	58560000	Valença	23	58910000	Fazenda Umbauvas

[1] Universidade Federal Fluminense, isabelaschneider.bm@gmail.com
[2] Universidade Federal Fluminense, francielez@id.uff.br

ID	Código	Estação	ID	Código	Estação	ID	Código	Estação
8	58142200	Buquirinha II	16	58573000	Pentagna			

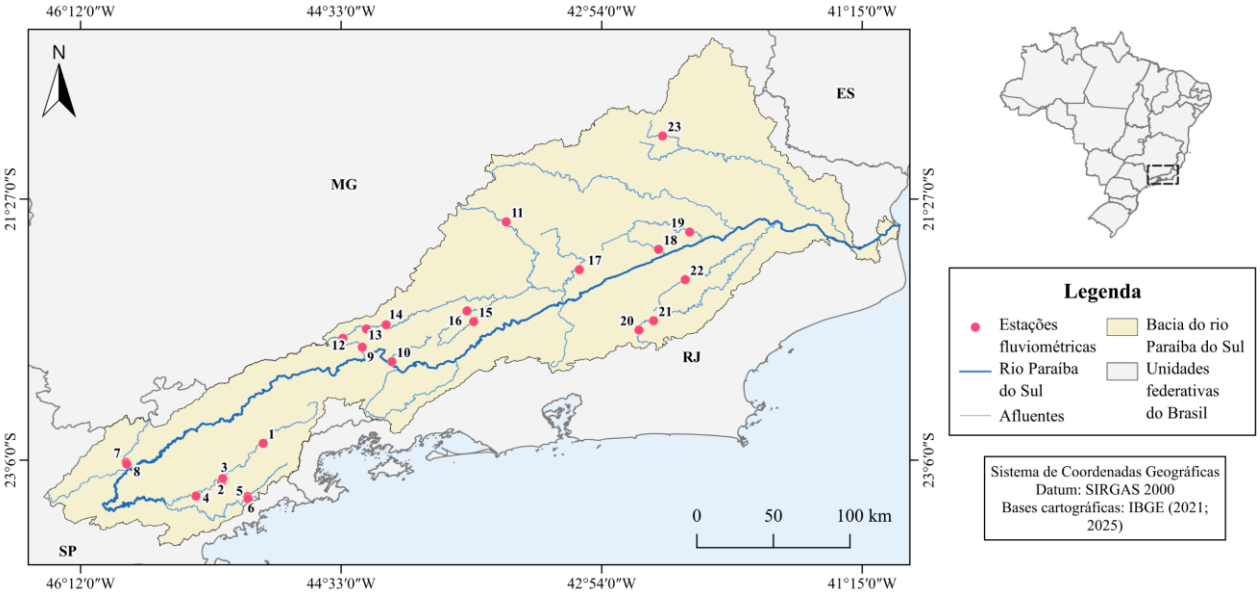


Figura 1. Bacia do rio Paraíba do Sul e estações analisadas.

O teste de Mann-Kendall retorna uma estatística padronizada Z: valores positivos indicam tendência crescente, negativos indicam tendência decrescente, e |Z| é proporcional à força do sinal. Rejeita-se a hipótese nula de ausência de tendência quando $|Z| > 1{,}96$ ($\alpha = 0{,}05$). No SMK, esse princípio é aplicado a cada um dos doze meses, gerando um Z mensal; o Z global resulta da soma das estatísticas S de todos os meses, combinando os doze sinais em um indicador único da tendência ao longo do ano. Ambos os testes foram bilaterais, em linguagem R.

RESULTADOS

O teste de Mann-Kendall com TFPW identificou tendência monotônica significativa em 9 das 23 estações analisadas (39,1%), com predomínio de tendências decrescentes: 7 estações com redução significativa e 2 com aumento significativo das vazões médias anuais. O teste de Mann-Kendall Sazonal identificou tendência significativa em 18 das 23 estações (78,3%), sendo 14 decrescentes e 4 crescentes. O predomínio de tendências decrescentes observado no MK anual se mantém e se intensifica no SMK, evidenciando a maior sensibilidade do teste sazonal para detectar sinais de tendência nas séries hidrológicas.

Todas as 9 estações com tendência significativa no MK anual também apresentaram tendência significativa no SMK, na mesma direção, sem nenhuma exceção, e com sinal consideravelmente amplificado. A Figura 2 apresenta, para cada uma das 23 estações, a estatística Z do MK anual e o Z global do SMK. Nas estações significativas nos dois testes, a barra do SMK ultrapassa consistentemente a do MK anual em magnitude, com |Z| médio passando de 1,52 (MK) para 3,97 (SMK).

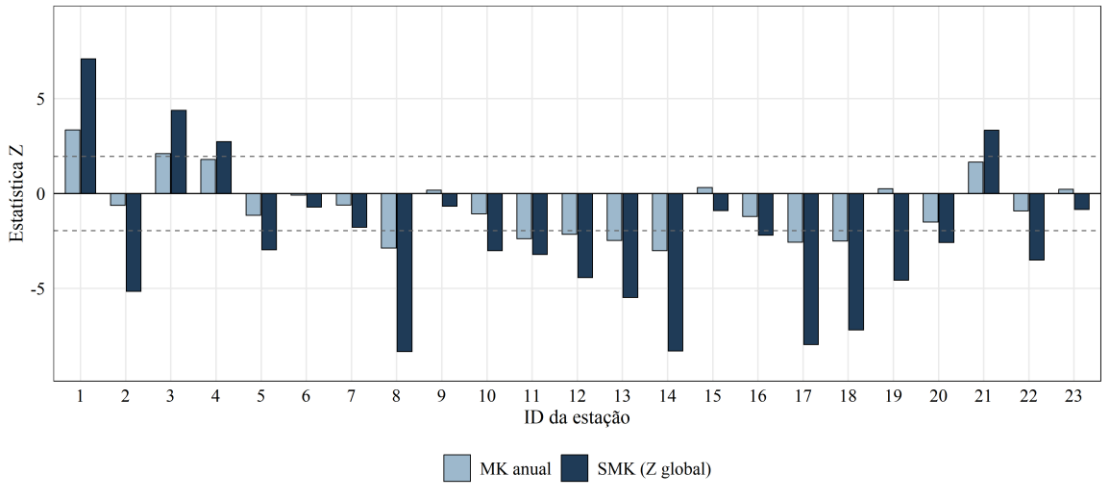


Figura 2. Estatística Z do teste de Mann-Kendall anual e do teste de Mann-Kendall Sazonal (Z global) para as 23 estações fluviométricas analisadas.

Em contrapartida, 9 estações adicionais apresentaram tendência significativa apenas no SMK, sendo 7 decrescentes e 2 crescentes. Além disso, é possível perceber que houve uma leve concentração de tendências de redução no período seco. A Figura 3 compara a distribuição do Z mensal do SMK entre o período úmido (novembro a abril) e o período seco (maio a outubro), considerando as 23 estações: a mediana do Z no período seco (-0,81) é mais negativa que no período úmido (-0,57), com toda a caixa de distribuição deslocada para valores mais negativos. A Figura 4 detalha esse padrão por estação, apresentando o Z mensal do SMK individualmente: observa-se maior concentração de tendências decrescentes significativas no período seco em estações como Buquirinha II (8), Zelinda (14), Estevão Pinto (17) e Volta Grande (18). Entre as decrescentes detectadas exclusivamente pelo SMK, quatro (S. Luís do Paraitinga 2, Glicério, Pentagna e Fazenda da Barra) apresentam meses com Z significativo concentrados especificamente no período seco.

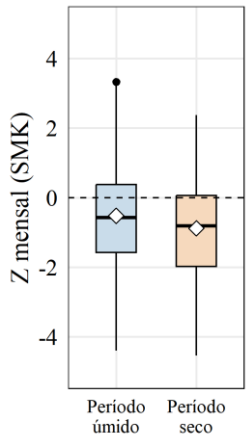


Figura 3. Distribuição do Z mensal do SMK por período

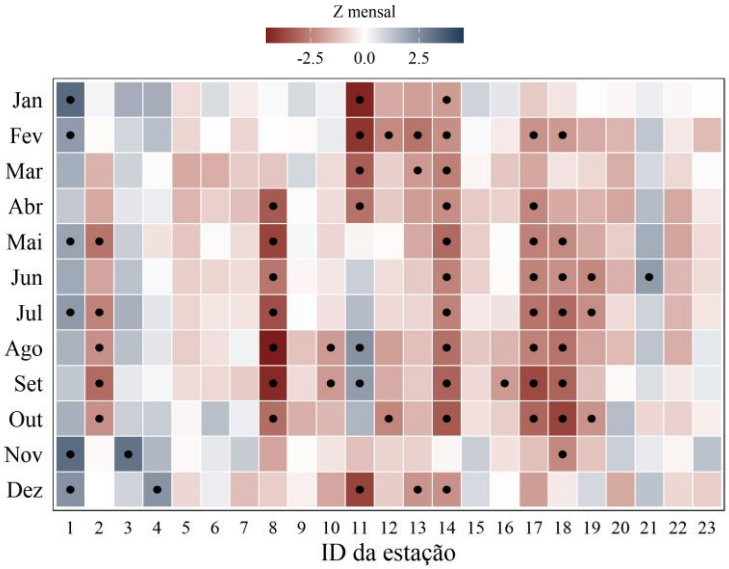


Figura 4. Z mensal do SMK por estação.

Essa concentração sazonal ajuda a explicar a diluição dos sinais na escala anual, como no caso da estação S. Luís do Paraitinga 2, onde o MK anual não detecta tendência ($Z = -0,62$; $p = 0,534$) e o SMK apresenta Z global de -5,14 ($p \approx 0,00$), com a tendência decrescente inteiramente concentrada no período seco: valores de Z entre -1,71 e -2,96 de abril a outubro, enquanto os meses úmidos

apresentaram valores próximos de zero. A estabilidade do período úmido compensa parcialmente a queda do período seco na média anual, tornando o sinal imperceptível ao MK tradicional.

Os resultados evidenciam que a agregação das vazões em escala anual tende a diluir tendências que se manifestam com maior intensidade em subconjuntos sazonais, conferindo ao SMK maior sensibilidade para a detecção de alterações no regime hidrológico da bacia. Tal comportamento tem implicação direta para a gestão da disponibilidade hídrica: a leve concentração das tendências decrescentes no período seco sugere que diagnósticos de mudança hidrológica baseados exclusivamente em médias anuais podem subestimar, ou mesmo não detectar, alterações que se manifestam justamente no período em que a disponibilidade hídrica já é mais baixa, o que é relevante para decisões de gestão que dependem da compreensão precisa de como o regime de vazões da bacia vem se alterando ao longo do tempo.

CONCLUSÕES

- O teste sazonal (SMK) detectou tendência significativa em quase o dobro das estações analisadas em relação ao teste anual (18 contra 9 de 23), dobrando a fração de sinais identificados na bacia (39,1% contra 78,3%);
- Todas as tendências detectadas pelo MK anual foram confirmadas pelo SMK, com amplificação evidente da magnitude de Z;
- Nove estações adicionais só revelaram tendência quando analisadas mensalmente;
- As tendências decrescentes identificadas pelo SMK apresentam leve concentração no período seco, mais evidente em estações como Buquirinha II, Zelinda, Estevão Pinto e Volta Grande, o que reforça a importância de uma análise sazonal para captar mudanças no regime hidrológico que ocorrem justamente no período de menor disponibilidade hídrica;
- Recomenda-se a aplicação complementar de testes sazonais, como o SMK, em bacias com sazonalidade pluviométrica marcada, de modo a subsidiar de forma mais completa diagnósticos de mudança hidrológica relevantes para a gestão da disponibilidade hídrica.

REFERÊNCIAS

CEIVAP. Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, 2021.

FERREIRA, D. S.; SANTANA, G. R. A.; SANTOS, E. B. Análise de vazões na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Revista Brasileira de Climatologia, Dourados, v. 37, p. 68-92, 2025.

HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. Water Resources Research, Washington, DC, v. 18, n. 1, p. 107-121, 1982.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Bacias e divisões hidrográficas do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Malhas territoriais. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do Rio Paraíba do Sul. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 20, n. 2, p. 215-226, ago. 2005.

YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. Hydrological Processes, Chichester, v. 16, n. 9, p. 1807-1829, 2002.