

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

TENDÊNCIAS RECENTES E ALTERAÇÕES NO REGIME DE PRECIPITAÇÕES NA BACIA DO RIO PARAOPEBA

Gabriel Augusto Freitas França¹; Bennie Barreto Pereira de Oliveira²; Raíssa Nepomuceno Freitas³; Paula Ferreira Castro⁴; Caio Vinícius Voigt⁵

Abstract: The hydrographic basin of the Paraopeba River plays an important role in water public supply, especially in the metropolitan region of Belo Horizonte, capital of the state of Minas Gerais. To evaluate the water availability in the basin studied, watercourse flow data and precipitation data can be evaluated. This study evaluated data from rainfall stations located in the region of the Paraopeba River basin region, with available records on the ANA HidroWeb portal. To evaluate the current scenario of the basin, the Standard Precipitation Index (SPI), defined by McKee (1993), was used. The method allows the observation of the historical series by defining moments of drought or excess precipitation based on the z-score metric. In addition, the temporal trend of the historical series was evaluated using three statistical tests: Mann-Kendall, Pettitt and Spearman's coefficient. The results indicate that, in recent years, more intense and frequent drought events have been observed, while years with extreme floods have become less frequent in the last decade. A trend of reduction in total annual rainfall was also identified through the results, with emphasis on the months of the dry period (April to September). These results highlight the need for continuous monitoring of precipitation for the management of water uses and for ensuring water availability in the Paraopeba River basin, especially in view of the potential impacts of climate change.

Resumo: A bacia hidrográfica do Rio Paraopeba apresenta importante papel no abastecimento público de água, especialmente da região metropolitana de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais. A fim de avaliar a disponibilidade hídrica na área da bacia estudada podem ser avaliados dados de vazão dos cursos d'água e dados de precipitação. Este estudo avaliou dados das estações pluviométricas, localizadas na região da bacia do Rio Paraopeba, com dados disponíveis no portal HidroWeb da ANA. Para avaliação do cenário atual da bacia foi utilizado o Standart Precipitation Index (SPI), definido por McKee (1993). O método permite a observação da série histórica definindo momentos de seca ou excesso de precipitação com base na métrica z-score. Adicionalmente, a tendência temporal das séries históricas foi avaliada por meio de três testes estatísticos: Mann-Kendall, Pettitt e Coeficiente de Spearman. Os resultados indicam que, nos anos recentes, eventos mais intensos e frequentes de seca tem sido observados, enquanto os anos com cheias extremas tornaram-se menos frequentes na última década. Uma tendência de redução da precipitação total anual também foi identificada, com ênfase para os meses do período seco (abril a setembro). Tais resultados evidenciam a necessidade do monitoramento contínuo da precipitação para o gerenciamento dos usos da água e para garantir a disponibilidade hídrica na bacia do rio Paraopeba, especialmente frente aos potenciais impactos das mudanças climáticas.

Palavras-Chave – Tendência, SPI, Precipitação.

1) HIDROBR, gabriel.franca@hidrobr.com

2) Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (EHR) , bennie@ufmg.br

3) Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (EHR), raissanf@ufmg.br

4) HIDROBR, paula.castro@hidrobr.com

5) HIDROBR, caio.voigt@hidrobr.com

INTRODUÇÃO

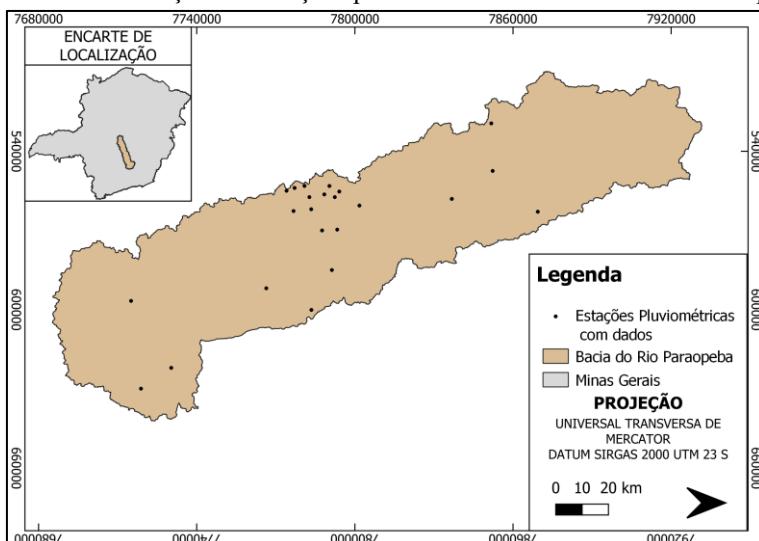
A bacia hidrográfica do rio Paraopeba, uma das principais sub-bacias do rio São Francisco, abrange uma área de 12.054,25 km² e é responsável pelo abastecimento de aproximadamente 53% da população da Região Metropolitana de Belo Horizonte (CBHSF, 2017). Dada a relevância estratégica da bacia para o abastecimento público da capital mineira, o monitoramento sistemático da disponibilidade hídrica torna-se fundamental para subsidiar a gestão eficiente dos recursos hídricos locais. Entre as principais variáveis de monitoramento, destacam-se a vazão dos cursos d'água e a precipitação, distribuída por toda a área da bacia. A análise dessas variáveis possibilita compreender o comportamento hidrológico da bacia e identificar possíveis alterações de padrão ao longo do tempo, especialmente em função de pressões antrópicas e mudanças climáticas.

No âmbito regional, estudos como os de Holender e Santos (2023) e Tavares (2024) aplicaram metodologias estatísticas não paramétricas, como o teste de Mann-Kendall e o estimador de Sen, para identificar tendências de precipitação e frequência de eventos extremos. No presente estudo, foi realizada a avaliação de 17 estações pluviométricas, selecionadas dentre as 30 existentes na bacia do rio Paraopeba, com base em critérios de extensão e continuidade das séries históricas, priorizando estações com pelo menos 30 anos de dados sem falhas significativas. A partir dos registros dessas estações, foram conduzidos testes estatísticos de análise de tendência considerando, como variáveis de entrada, a precipitação total anual, precipitação total mensal e o número de dias de chuva por mês. Complementarmente, aplicou-se o Índice Padronizado de Precipitação (SPI), metodologia que permite qualificar eventos de cheias e secas ao longo da série histórica, a fim de caracterizar o cenário mais recente das precipitações na bacia.

ÁREA DE ESTUDO E DISPONIBILIDADE DE DADOS

Para as análises de mudanças climáticas, foram utilizadas séries históricas de precipitação diária das estações pluviométricas disponibilizadas pela Rede Hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O inventário das estações, bem como as respectivas séries históricas, são disponibilizados abertamente no Portal HidroWeb da ANA. Durante a execução do presente estudo, os dados disponíveis para download são limitados a dezembro de 2024. A avaliação realizada contemplou, inicialmente, todas as estações que estavam contidas na área da bacia hidrográfica do rio Paraopeba (Figura 1).

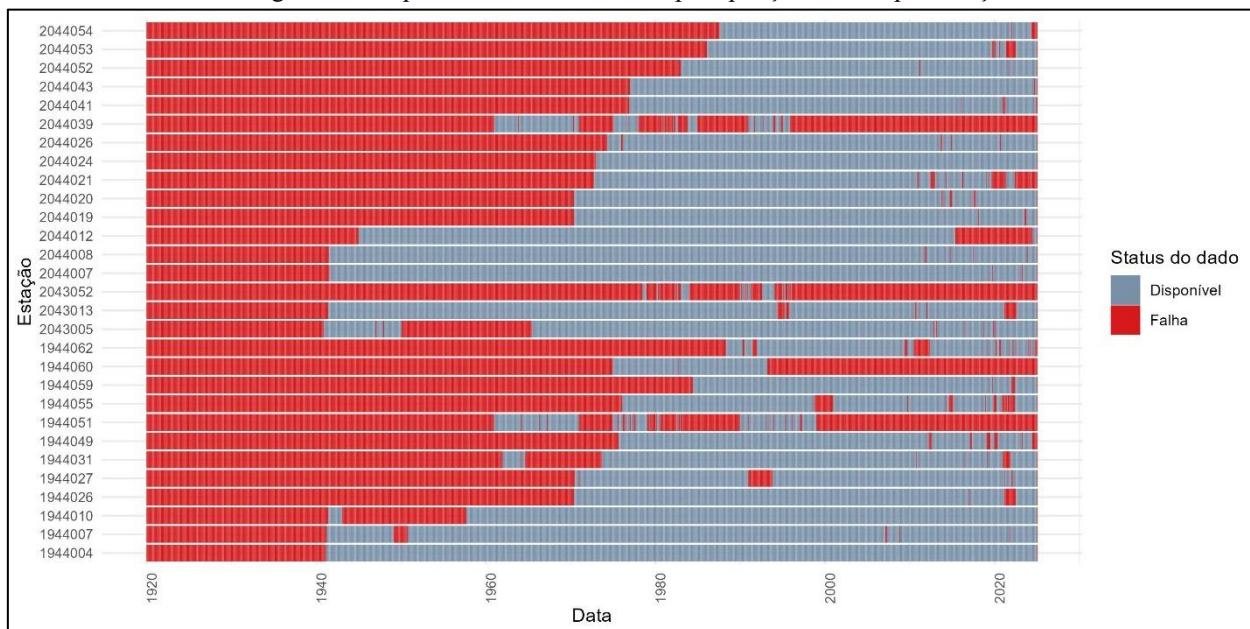
Figura 1 – Localização das estações pluviométricas na Bacia do Rio Paraopeba



Os dados de precipitação utilizados apresentam registros tanto consistidos quanto brutos, disponibilizados pela ANA. Com o objetivo de garantir maior confiabilidade aos resultados, optou-se por utilizar, sempre que disponível, os dados já consistidos. Nos casos em que ainda não foram realizadas as etapas de consistência por parte da ANA, foram considerados os dados sem consistência, de modo a não comprometer a extensão de dados da série analisada, embora com a devida atenção às limitações inerentes a essa condição.

De modo a viabilizar as definições das estações a serem utilizadas no presente estudo, bem como o período de avaliação, foram avaliadas as extensões da série histórica de precipitação de cada uma das estações e as falhas observadas ao longo do tempo. As séries de precipitações e as falhas ao longo dos anos, que podem compreender falhas na série de dados e/ou período fora de operação, de todas as estações analisadas são apresentadas na Figura 2

Figura 2 – Disponibilidade de dados de precipitação mensal por estação



Conforme pode ser observado, algumas estações não apresentam dados suficientes para compor uma série de pelo menos 30 anos e, dessa forma, foram descartadas da presente análise. As estações utilizadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estações Pluviométricas Utilizadas

Código da Estação	Longitude	Latitude	Código da Estação	Longitude	Latitude
1944004	-44,47	-19,95	2044007	-44,07	-20,66
1944007	-44,42	-19,88	2044008	-44,12	-20,20
1944010	-44,40	-19,27	2044012	-44,04	-20,04
1944026	-44,45	-19,96	2044019	-44,45	-20,05
1944027	-44,33	-19,96	2044020	-44,49	-20,07
1944031	-44,55	-19,42	2044021	-44,40	-20,11
1944049	-44,72	-19,43	2044024	-44,33	-20,01
1944055	-44,19	-19,97	2044026	-44,47	-20,13
1944059	-44,45	-19,56	2044041	-44,48	-20,10
1944062	-44,49	-19,98	2044043	-44,46	-20,00
2043005	-43,75	-20,63	2044052	-44,41	-20,05
2043013	-43,83	-20,52			

Por fim, para garantia de ausência de falhas ao longo do período avaliado, foi conduzida um estudo de preenchimento de falhas, para complementar dados de total precipitado por mês no período entre os anos de . Dentre as metodologias de preenchimento existentes foi utilizada a metodologia de ponderação regional descrita por Tucci (2009) e apresentada na equação abaixo.

$$y = \frac{1}{3} \left(\frac{x_1}{x_{m1}} + \frac{x_2}{x_{m2}} + \frac{x_3}{x_{m3}} \right) y_m \quad (1)$$

Sendo:

- y : a precipitação estimada para área de interesse em um período (mm);
- x_i : a precipitação mensal acumulada observada no mesmo período em estações próximas (mm);
- x_{mi} : a precipitação média mensal da estação próxima correspondente (mm);
- y_m : a média das precipitações mensais acumuladas da estação de interesse (mm).

STANDARD PRECIPITATION INDEX (SPI)

O método definido por McKee *et al.* (1993), é utilizado para estimar condições de seca ou cheia ao longo de uma série histórica de precipitação. Para definição do índice para região de interesse, devem ser utilizadas estações com período mínimo de dados monitorados de 30 anos (MCKEE, et al. 1993). Além disso, é fundamental que a série seja contínua, sem falhas temporais, uma vez que a ausência de dados compromete o ajuste estatístico da distribuição e, consequentemente, a confiabilidade do índice padronizado.

Para fins de definição da probabilidade de ocorrência dos eventos observados ao longo da série histórica de precipitação, foi utilizada a distribuição gamma, disponível na equação abaixo.

$$g(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (2)$$

Sendo

- α : parâmetro de forma;
- β : parâmetro de escala;
- $G(x)$: função Gamma;
- x : precipitação total (mm);

Para definição dos parâmetros de forma e escala foi utilizado o método dos momentos-L (MML). Cabe destacar que a definição do método se deu em função do comprimento da série de precipitações avaliadas, que inviabiliza o uso do método mais robusto (Método da Máxima Verossimilhança), e por se tratar de um método com resultados mais aderentes aos dados observados.

Por fim, em posse da distribuição de probabilidade, foi realizada a transformação em uma variável aleatória normalizada com média zero e desvio padrão 1. Na avaliação, o resultado decorrente da normalização dos dados é o valor denominado z-score, valor que pode ser interpretado de acordo com o estabelecido na Tabela 2 (MCKEE, *et al.* 1993).

Tabela 2 – Interpretação dos resultados do SPI

SPI	Probabilidade de ocorrência	Interpretação
Z-score < -2,0	2,30%	Seca extrema
-2,0 < Z-score < -1,5	4,40%	Seca severa

SPI	Probabilidade de ocorrência	Interpretação
-1,5 < Z-score < -1,0	9,20%	Seca moderada
-1,0 < Z-score < 1,0	68,2%	Condição de normalidade
1 < Z-score < 1,5	9,20%	Cheia moderada
1,5 < Z-score < 2,0	4,40%	Cheia severa
Z-score > 2,0	2,30%	Cheia extrema

TESTES DE ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Os testes de análise de tendência são utilizados para identificação de padrões de variação de determinada variável ao longo de uma série temporal. No caso de estudos relacionados a pluviometria, a análise é aplicada para avaliar comportamentos de crescimento, redução ou ausência de tendência ao longo do tempo. Como os dados de precipitação não seguem uma distribuição específica, como a distribuição normal, foram utilizados testes não paramétricos.

Para a identificação da existência de tendência significativa, ou não, nas séries históricas de precipitação, foram utilizados o teste de Pettitt (PETTITT, 1979), a Correlação de Spearman (HOLLANDER e WOLF, 1973) e o teste de Mann-Kendall (KENDALL, 1975), todos ao nível de significância de 5%. Sendo assim, para considerar a tendência significativa, foi necessário que em pelo menos 2 dos 3 testes aplicados fosse observado um p-valor menor que 5%.

O p-valor é uma variável estatística que indica a probabilidade de aceitação da hipótese nula (H_0), referente a afirmação inicial que serve de base para realização de testes. No caso dos testes avaliados a hipótese nula sugere que não há tendência nos dados avaliados, nesse sentido um p-valor abaixo de 5% indica que o resultado tende a rejeitar a hipótese nula, sendo então observada tendência. Caso o p-valor seja superior a 5% temos um resultado mais aderente a H_0 , indicando que os dados apresentam aleatoriedade ao longo do tempo.

Os testes foram realizados para 3 variáveis, incluindo o número de dias de chuva por mês, a precipitação total mensal e a precipitação total anual. Para as avaliações anuais, considerou-se o ano hidrológico da região de estudo, que tem início em outubro.

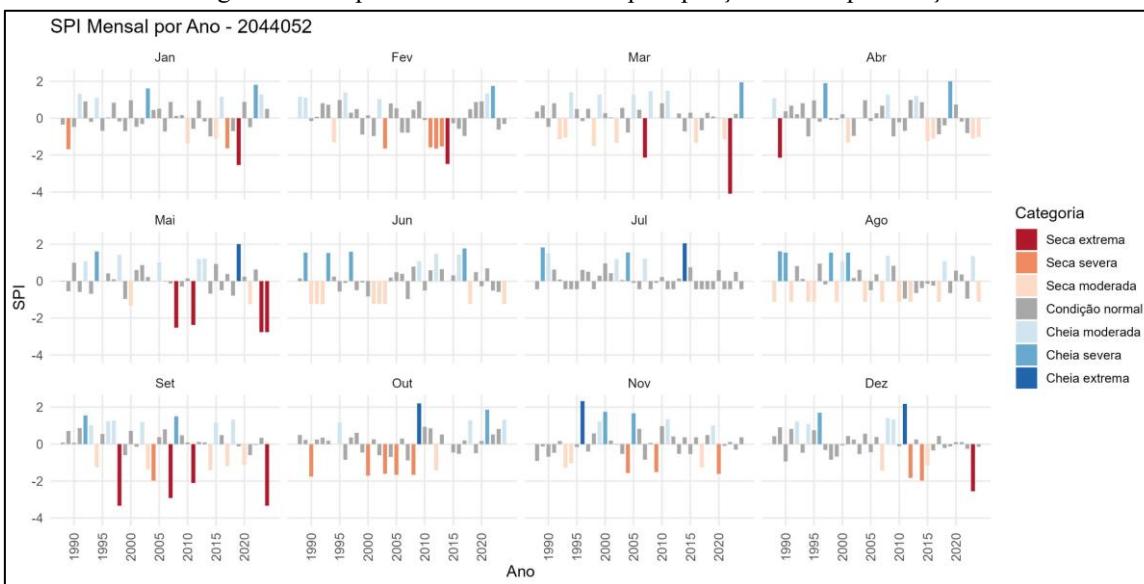
RESULTADOS

No decorrer do presente capítulo, são apresentados os principais resultados obtidos através do estudo realizado. Primeiramente serão apresentados os valores de SPI determinados pra área de interesse tanto na escala mensal quanto na escala anual, onde foi utilizado como referência o valor obtido para o mês de fim do ano hidrológico na região (setembro). Num segundo momento são descritos os resultados dos testes de tendência aplicados e, por fim, a discussão dos resultados.

SPI – 1 Mês

A Figura 3 apresenta o SPI mensal para a estação pluviométrica 2044052, situada na porção central da bacia do rio Paraopeba, escolhida como representativa do comportamento observado entre as 17 estações analisadas. Nota-se que, ao longo dos últimos dez anos, predominou a ocorrência de condições de seca, especialmente nos meses de dezembro e março, correspondentes ao período chuvoso. Cabe destacar que não foram observada diferenças discrepantes entre os resultados das diferentes estações e por isso optou-se por apresentar apenas o resultado da estação na parte central da bacia.

Figura 3 – Disponibilidade de dados de precipitação mensal por estação



Os meses de setembro e maio se destacaram por apresentarem maior frequência de eventos de seca extrema em comparação aos demais períodos. Por outro lado, eventos de cheia extrema foram pontuais e menos recorrentes ao longo da série histórica, ocorrendo de forma esporádica nos diferentes meses avaliados.

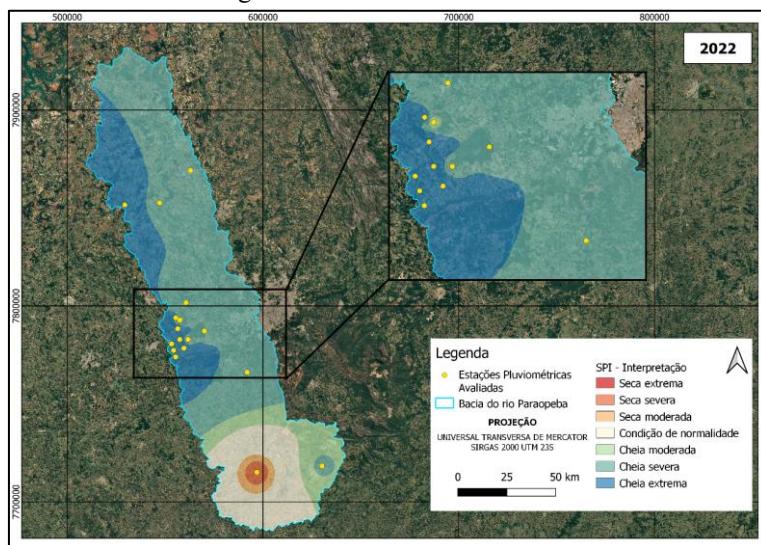
Adicionalmente, ressalta-se que os meses de junho e julho, caracterizados por frequentes registros de precipitação mensal igual a zero, apresentaram menor representatividade na análise do SPI. Isso é justificável pela elevada incidência de valores nulos nesses meses impacta a distribuição estatística utilizada, tendendo a normalizar a ausência de precipitação como uma condição climatológica típica, o que limita a interpretação dos resultados do SPI para esse período.

SPI – 12 meses

A fim de espacializar o resultado do SPI de 12 meses, foi realizada uma interpolação dos dados obtidos para o período entre 2012 e 2024. Para interpolação dos resultados, foi utilizado método da Inverse Distance Weighted (IDW), que realiza a interpolação atribuindo peso aos pontos amostrais, no caso as estações pluviométricas, de acordo com a distância entre o pixel avaliado e os pontos com dados.

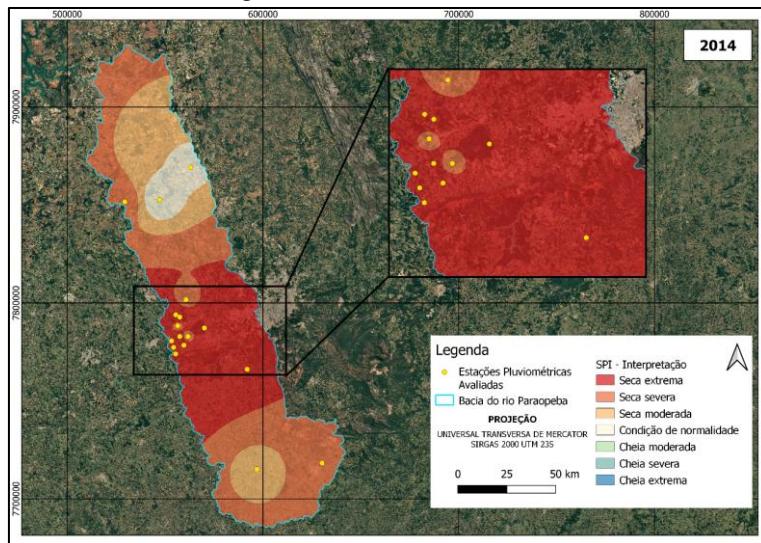
Quando avaliado o resultado do SPI de 12 meses, foi observado que nos últimos 12 anos existe maior ocorrência de eventos de seca nas estações pluviométricas analisadas. Apesar disso, no mesmo intervalo são observados anos de cheia extrema, como por exemplo o no ano de 2021-2022, onde foi observada ocorrência de eventos de precipitação de grandes magnitudes que ocasionaram enchentes e alagamentos recorrentes na região metropolitana de Belo Horizonte, capital de MG (Figura 4).

Figura 4 – SPI 12 meses – 2022



Outro evento relevante da série ocorreu no ano de 2013 – 2014, em que a região sudeste do Brasil enfrentou um período de seca significativo que culminou no racionamento da distribuição de água para abastecimento público. Tal evento foi caracterizado na presente avaliação e o resultado obtido no SPI é apresentado na Figura 5.

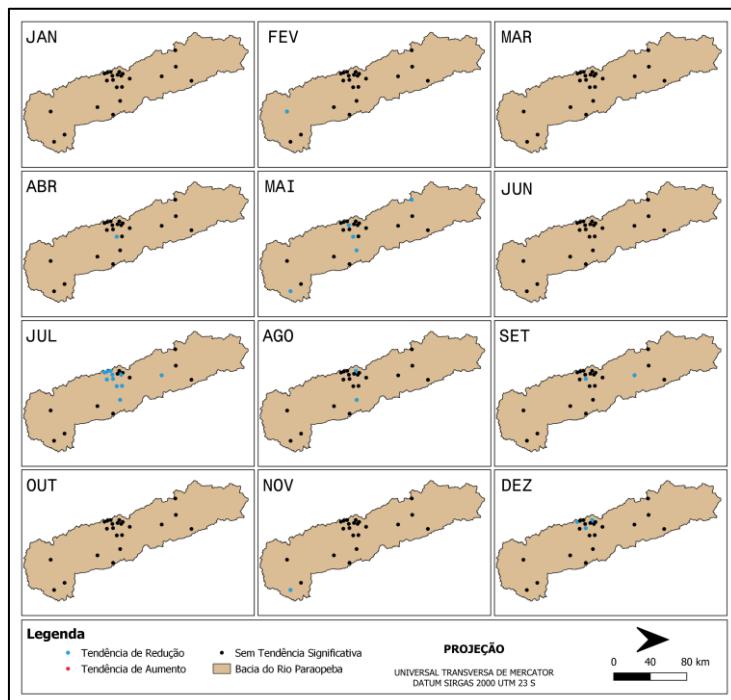
Figura 5 – SPI 12 meses - 2022



Testes de tendência

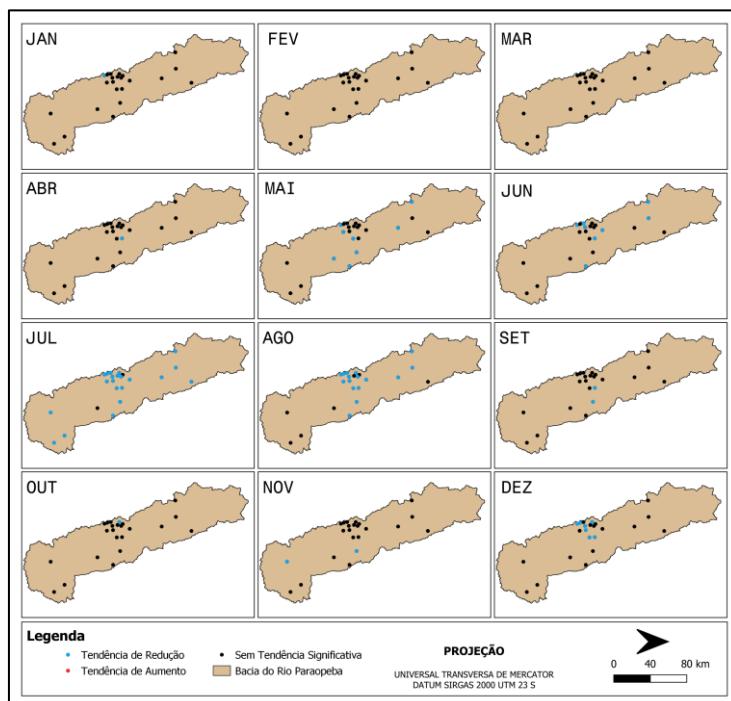
No geral, os testes de análise de tendência realizados indicaram tendências apenas de redução nas estações avaliadas. Os resultados da avaliação da precipitação mensal acumulada (Figura 6) realizada sugerem que a tendência de redução é observada majoritariamente nos meses do período seco, com destaque ao mês de julho onde 11 das 23 estações pluviométricas avaliadas apresentaram tendência de redução nos testes analisados. Nos meses do período chuvoso existem algumas estações que apresentam tendência de redução, mas o comportamento é isolado e no geral não foi observada existência de tendência no período chuvoso (outubro a março).

Figura 6 – Resultado dos testes de análise de tendência – Precipitação total mensal



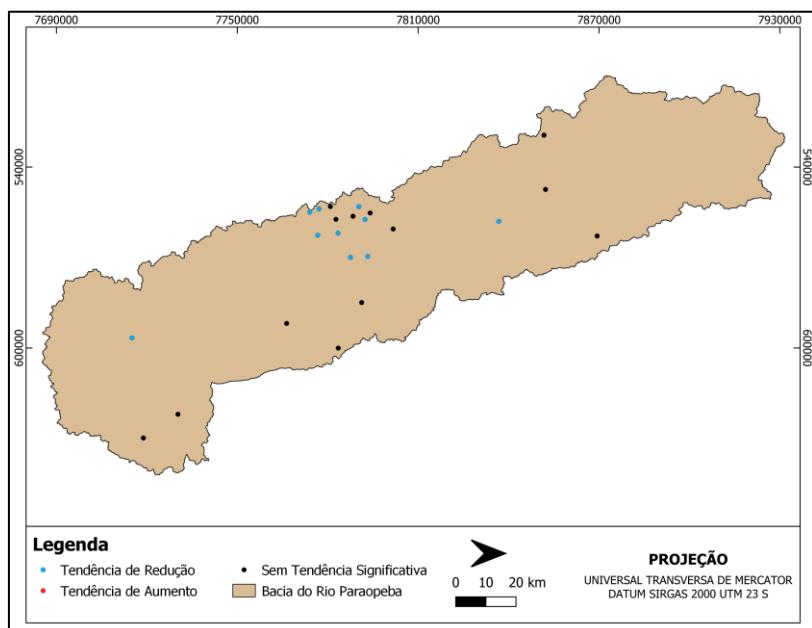
Quando avaliado o número de dias de chuva tem-se um resultado semelhante ao da avaliação de precipitação total mensal, com tendência de redução majoritariamente em meses do período seco (Figura 7). A diminuição do número de dias de chuva pode estar tanto associada a redução da precipitação quanto ao aumento da magnitude dos eventos, uma vez que o mesmo volume de precipitação em um menor número de dias indica a ocorrência de eventos de maior magnitude, normalmente associados a enchentes.

Figura 7 – Resultado dos testes de análise de tendência – Número de dias de chuva



Por fim, o resultado de precipitação total anual indicou que existe uma tendência de redução da precipitação em 10 das estações avaliadas (Figura 8). Tal resultado vai de encontro ao observado no SPI que indicou que anos recentes vem apresentando comportamento mais secos, fator associado a redução da precipitação.

Figura 8 – Resultado dos testes de análise de tendência – Precipitação total anual



O cenário identificado por meio dos testes de tendência é congruente com estudos em escala nacional e internacional. Ao se comparar os resultados obtidos no presente estudo com as projeções globais apresentadas pela UNCCD (2024) no relatório The Global Threat of Drying Lands, observa-se uma tendência consistente de intensificação da aridez no território brasileiro, com destaque para a região central do estado de Minas Gerais. Essa tendência é especialmente evidente nos cenários futuros mais pessimistas, como o SSP5-8.5, que pressupõe aumento do uso de combustíveis fósseis, e o SSP3-7.0, que projeta baixo investimento em ações ambientais e cooperação internacional limitada.

Nas projeções contidas no documento supracitado, é possível observar que, até o ano 2100, há uma transição significativa de zonas úmidas para classes mais secas do índice de aridez (AI), resultando em valores negativos e expansão das áreas classificadas como semiáridas e áridas. Esse padrão global de aridificação se mostra compatível com a redução estatisticamente significativa da precipitação total anual observada nas estações pluviométricas avaliadas na área de estudo, reforçando a confiabilidade dos resultados obtidos em escala local.

Nesse contexto, os resultados tanto dos testes de tendência quanto do SPI evidenciam uma redução no volume precipitado na bacia do rio Paraopeba. Diante desse cenário, destaca-se a necessidade de atenção quanto à disponibilidade hídrica regional e a importância da continuidade do monitoramento pluviométrico. O acompanhamento sistemático permite identificar cenários preditivos e subsidia a elaboração de planos de gestão dos recursos hídricos, especialmente frente a possíveis alterações futuras no regime de precipitação.

Resultados obtidos neste estudo são coerentes com análises conduzidas em diferentes escalas. Holender e Santos (2023) identificaram redução na frequência de eventos de precipitação intensa em grande parte do Sudeste brasileiro, enquanto Tavares (2024) verificou diminuição da intensidade e da ocorrência desses eventos na faixa central e no Triângulo Mineiro, com aumento no norte do

estado. No contexto local, Fraga e Ribas (2020) observaram intensificação do período seco e redução da precipitação média anual em setores específicos da bacia do Paraopeba. A convergência entre os padrões identificados neste trabalho e os relatados na literatura reforça a robustez das conclusões apresentadas e evidencia a importância de estratégias de gestão adaptadas às particularidades climáticas e hidrológicas regionais.

REFERENCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Portal HidroWeb. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 23 dez. 2023.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAOPÉBA (CBH Paraopeba). Apresentação – CBH Paraopeba/MG. Agência Peixe Vivo, jun. 2019. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixevivo.org.br/media/2019/06/APRESENTA%C3%87%C3%83O-CBH-PARAOPÉBA-MG.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.
- FRAGA, M.; RIBAS, J. Análise do comportamento das vazões nas bacias dos rios Paraopeba e Velhas. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, v. 1, n. 2, p. 1-19, 2020.
- HOLENDER, B. V.; SANTOS, E. B. Análise de tendência dos eventos de precipitação intensa no Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 32, n. 19, p. 584-606, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16411>.
- HOLLANDER, M.; WOLFE, D. A. Nonparametric statistical methods. New York: John Wiley & Sons, 1973.
- KENDALL, M. G. Rank correlation methods. 4. ed. London: Charles Griffin, 1975.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anaheim. Proceedings... Anaheim: American Meteorological Society, 1993. p. 179–183.
- NAGHETTINI, M. C. Notas de aula de Engenharia de Recursos Hídricos. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1999. Apostila.
- PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, v. 28, p. 126–135, 1979.
- TAVARES, M. G. Analysis of trends in extreme precipitation in the State of Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 39, e39240033, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863910033>.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION (UNCCD). The global threat of drying lands. Bonn: UNCCD, 2024. Disponível em: https://www.unccd.int/sites/default/files/2024-12/aridity_report.pdf. Acesso em: 4 jun. 2025.