MODELAGEM DOS RESÍDUOS DE SIMULAÇÃO PARA USO PROBABILÍSTICO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Jorgiane Pires Bezerra[1] ; Dirceu Silveira Reis Júnior[2] & Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins[3]

Palavras-Chave – heterocedasticidade, resíduos, transformação Box-Cox, transformação Log-Ratio.

INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos possuem um papel importante na engenharia de recursos hídricos, apoiando o planejamento, a operação e a avaliação de desempenho desses sistemas. A presença de resíduos entre as simulações e as séries observadas evidencia que esses modelos não são perfeitos. O uso determinístico desses modelos, sem considerar os resíduos, que refletem incertezas na simulação, resulta em simulações enviesadas e pode levar a interpretações equivocadas (Farmer; Vogel, 2016; Vogel, 2017). Uma forma de amenizar a situação é substituir o uso determinístico por uma abordagem probabilística, gerando um conjunto de simulações igualmente prováveis a partir da modelagem estatística dos resíduos. Essa abordagem tende a ser mais consistente, pois incorpora as incertezas da modelagem hidrológica, como mostram Romero-Cuellar et al. (2024). Porém, a natureza dos resíduos impõe desafios, como heterocedasticidade, correlação temporal e possível presença de caudas pesadas, o que exige cuidado na sua modelagem. Este estudo discute alguns desses aspectos, por meio de diferentes transformações, para construir um gerador mais adequado. As discussões baseiam-se em um estudo preliminar de simulação chuva-vazão com o modelo SMAP na estação fluviométrica de Lajeado (ANA 64442800, Paraná).

METODOLOGIA

Romero-Cuellar et al. (2024) demonstraram que o pós-processamento estatístico dos resíduos entre vazão observada e simulada possibilita a geração de ensembles probabilísticos que incorporam essa incerteza. Para isso, é vantajoso transformá-los de modo a apresentarem variância aproximadamente constante e distribuição próxima da normalidade (Hunter; McMillan; Peel, 2021). Neste trabalho, empregam-se duas transformações, a Box-Cox (Box; Cox, 1964) e a baseada no logaritmo da razão entre as vazões simuladas e observadas, denominada aqui de Log-Ratio, formulada por Shabestanipour et al. (2023).

A estação Lajeado, localizada no exutório de uma bacia de 1.319 km² no rio Imbituva, Paraná, foi selecionada após avaliação preliminar das séries fluviométricas da região Sul, considerando falhas nos registros, vazões nulas e influência de barragens a montante. Para a simulação chuva-vazão, utilizou-se o modelo SMAP em versão diária, no período de 1981 a 2023, com o ano de 1980 utilizado como aquecimento.

A precipitação média na bacia foi determinada por Polígonos de Thiessen e a evapotranspiração potencial estimada pelo método de Hargreaves e Samani (1985), com dados da grade climática de Xavier, King e Scanlon (2016). A calibração seguiu a técnica Split-Sample Test, utilizando 1981–2010 para ajuste e 2011–2023 para validação, por meio do algoritmo MOPSO (Multi-Objective Particle Swarm Optimization; Coello Coello; Pulido; Lechuga, 2004). A simulação apresentou NSE de 0,792 e PBIAS de 3,28%. Para a transformação Box-Cox, o parâmetro λ foi estimado por máxima verossimilhança, com incorporação do Jacobiano. A transformação Log-Ratio seguiu a formulação de Shabestanipour et al. (2023). Gráficos quantil-quantil foram usados para avaliar aderência com a

1) Afiliação: Universidade Federal do Ceará, jorgianepires@alu.ufc.br
2) Afiliação: Universidade de Brasília, dirceureis@unb.br
3) Afiliação: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, eduardo.martins@ufc.br

normalidade. Para tratar a correlação temporal, ajustou-se aos resíduos transformados um modelo autorregressivo de médias móveis (ARMA). A ordem do modelo foi definida pelos critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) e a função de autocorrelação foi analisada antes e depois do ajuste.

RESULTADOS

No espaço original (não transformado), a dispersão dos resíduos variou com a magnitude da vazão simulada (Figura 1), o que demonstra heterocedasticidade. A variância passou de 30,3 $(m^3/s)^2$, nas menores vazões, para 1.794,8 $(m^3/s)^2$, nas maiores. Acima de 125 m^3/s, o resíduo médio assumiu valores negativos, chegando a −107,5 m^3/s, indicando superestimativa no regime de vazões mais elevadas.

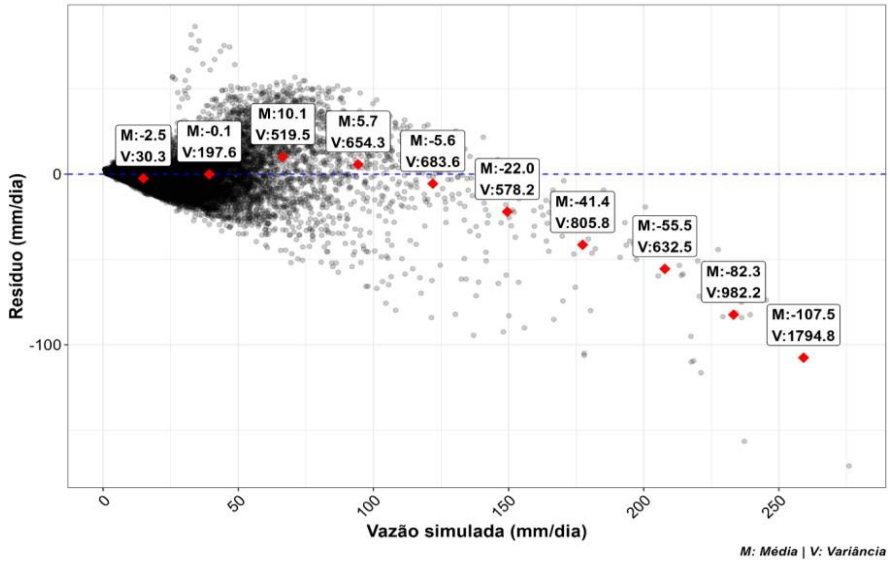


Figura 1. Dispersão dos resíduos em função da vazão simulada no espaço original. Fonte: autoria própria.

Com a transformação Box-Cox, considerando $\lambda = 0{,}128$, houve redução da heterocedasticidade observada no espaço original (Figura 2a). A variância dos resíduos ficou entre 0,11 e 0,33, e o coeficiente de variação das variâncias passou de 0,693 para 0,118. No espaço *Log-Ratio*, as variâncias dos resíduos ficaram entre 0,06 e 0,14, com CV de 0,272 (Figura 2b). Apesar da redução em relação ao espaço original, o CV permaneceu superior ao obtido com a Box-Cox calibrada.

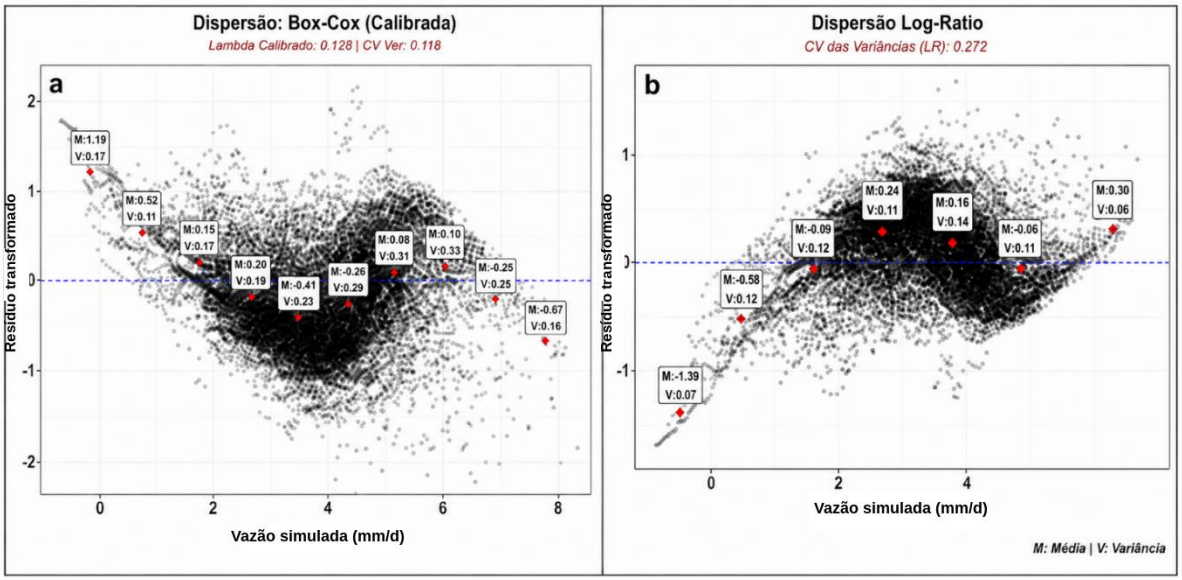


Figura 2. Dispersão dos resíduos transformados em função da vazão simulada pelos métodos Box-Cox calibrado (a) e Log-Ratio (b). Fonte: autoria própria.

Nos gráficos quantil-quantil de probabilidade normal (Figura 3), a Box-Cox apresentou $R^2 = 0{,}9951$ e coeficiente de assimetria $g = 0{,}20$. Para a transformação Log-Ratio, foram obtidos $R^2 = 0{,}9929$ e $g = -0{,}28$. Os desvios nas caudas foram menores quando se usou a transformação Box-Cox, permitindo concluir que essa transformação resultou em resíduos com distribuição mais próxima da normalidade, muito embora as duas transformações não tenham eliminado por completo a questão da heterocedasticidade.

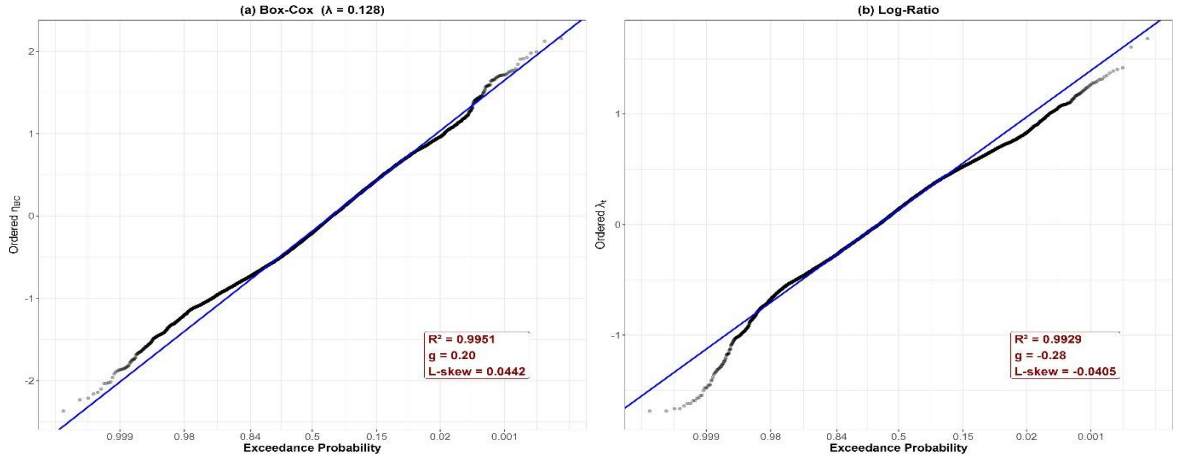


Figura 3. Gráficos de probabilidade normal dos resíduos transformados: (a) Box-Cox (b) Log-Ratio. Fonte: autoria própria.

Ainda que as duas transformações tenham aproximado os resíduos da normalidade e reduzido a heterocedasticidade do espaço original, a correlação temporal permaneceu nas séries transformadas. A autocorrelação dos resíduos, tanto na Box-Cox calibrada quanto na Log-Ratio, decaiu lentamente e manteve-se elevada ao longo dos lags analisados (Figura 4a e 4c), o que indicou forte persistência temporal nos resíduos transformados. Ajustou-se então um modelo ARMA(3,1) a cada série transformada. Nos resíduos do ARMA(3,1) (Figura 4b e 4d), a autocorrelação tornou-se não significativa em praticamente todos os lags, indicando que a estrutura de dependência temporal foi removida nas duas transformações.

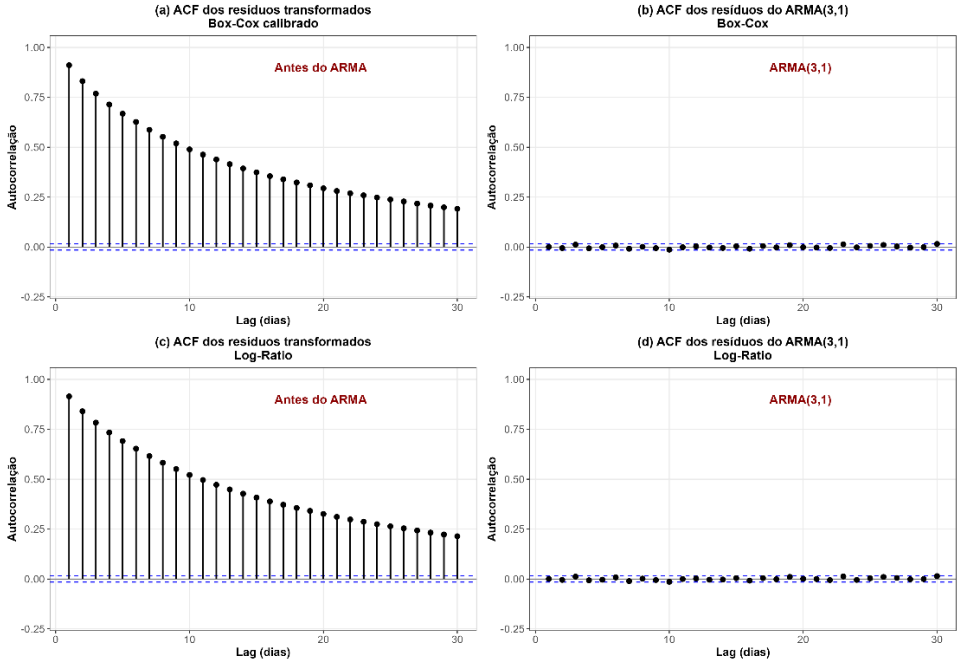


Figura 4. Funções de autocorrelação dos resíduos antes do ajuste do modelo ARMA(3,1) para as transformações Box-Cox calibrada (a) e Log-Ratio (c), e dos resíduos do modelo ARMA(3,1) para as transformações Box-Cox (b) e Log-Ratio (d). Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

A modelagem adequada dos resíduos é o que possibilita gerar, a partir de simulações determinísticas de modelos hidrológicos, ensembles de vazão que incorporam a incerteza do processo, o que motivou a avaliação das transformações dos resíduos neste trabalho. Os resíduos no espaço original apresentaram heterocedasticidade e superestimativa nas maiores vazões simuladas. Entre as transformações avaliadas, a Box-Cox com λ calibrado apresentou o melhor desempenho, com menor CV das variâncias, maior R^2 e g mais próximo de zero. Na Log-Ratio, as variâncias ficaram entre 0,06 e 0,14, com CV superior ao da Box-Cox. A correlação temporal permaneceu nos resíduos transformados e foi removida com o ajuste de um modelo ARMA, cujos resíduos não apresentaram autocorrelação significativa. Mesmo após as transformações, a variância dos resíduos manteve dependência em relação à vazão simulada. Como a homocedasticidade dos resíduos é um dos principais pressupostos para a geração dos ensembles, esse resultado indica a necessidade de um modelo dependente da vazão simulada.

REFERÊNCIAS

BOX, G. E. P.; COX, D. R. (1964). *An analysis of transformations*. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, v.26, n.2, p.211–252.

COELLO COELLO, C. A.; PULIDO, G. T.; LECHUGA, M. S. (2004).*Handling multiple objectives with particle swarm optimization*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, v.8, n.3, p.256–279.

FARMER, W. H.; VOGEL, R. M. (2016).*On the deterministic and stochastic use of hydrologic models*. Water Resources Research, v.52, n.7, p.5619–5633.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Applied Engineering in Agriculture, v.1, n.2, p.96–99.

HUNTER, S. W. D.; McMILLAN, H.; PEEL, M. C. (2021). *On the development of a residual error model for the SIMHYD daily rainfall-runoff model*. Water Resources Research, v.57, n.6, e2020WR028602.

ROMERO-CUELLAR, J.; ABRAMOWITZ, G.; JIANG, S.; ZHANG, Y. (2024). *A multi-model evaluation of probabilistic streamflow predictions via residual error modelling*. Journal of Hydrology, v.635, p.131152.

SHABESTANIPOUR, G.; BRODEUR, Z.; FARMER, W. H.; STEINSCHNEIDER, S.; VOGEL, R. M.; LAMONTAGNE, J. R. (2023). *Stochastic watershed model ensembles for long-range planning: verification and validation*. Water Resources Research, v.59, n.2, e2022WR032201.

VOGEL, R. M. (2017). *Stochastic watershed models for hydrologic risk management*. Water Security, v.1, p.28–35.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. (2016). *Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013)*. International Journal of Climatology, v.36, n.6, p.2644–2659.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP).