ANÁLISE DE ALTERAÇÕES DE VAZÕES NA BACIA DO RIO DAS VELHAS CONSIDERANDO VARIÁVEIS ANTRÓPICA E CLIMÁTICAS

Clara Demattos Nogueira [1] ; Thaís Baêta Costa Barbosa [2]; Francisco Eustáquio Oliveira e Silva [3]; Priscilla Macedo Moura [4]; & Veber Afonso Figueiredo Costa [5]

Palavras-Chave – Modelo hierárquico Bayesiano, Gerenciamento de recursos hídricos, *framework* de Budyko

INTRODUÇÃO

As atividades humanas e a variabilidade climática exercem influência sobre a disponibilidade de recursos hídricos e o regime de vazões dos cursos d'água. Entretanto, a separação da contribuição de cada um desses fatores representa um desafio devido à interação entre seus efeitos ao longo do tempo. A quantificação dessas contribuições é importante para subsidiar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Nesse contexto, o *framework* de Budyko tem sido amplamente empregado para avaliar os impactos da variabilidade climática e das atividades antrópicas nos recursos hídricos, destacando-se por sua simplicidade conceitual e pela reduzida necessidade de dados de entrada (Zhang *et al.*, 2019).

A metodologia foi proposta pelo climatologista Mikhail Budyko (Budyko, 1974). A partir do balanço hídrico e do balanço energético, o autor estabeleceu uma relação entre a precipitação, a evapotranspiração e a vazão média de longo termo em função da condição de aridez da bacia hidrográfica. Posteriormente, outros autores propuseram diferentes formulações para a curva de Budyko buscando representar de forma mais flexível o balanço hídrico de longo termo das bacias hidrográficas (Zhang *et al.,* 2019). Entre essas formulações, destaca-se a introdução do parâmetro w, que proporciona maior flexibilidade à curva. Esse parâmetro pode ser expresso em função de covariáveis explicativas, como variáveis climáticas e antrópicas, possibilitando avaliar a contribuição relativa desses fatores para o comportamento hidrológico da bacia.

O presente artigo tem como objetivo aplicar o *framework* de Budyko para avaliar o impacto de variáveis antrópica e climáticas na variabilidade das vazões na bacia hidrográfica do rio das Velhas. Para tanto, faz-se uso de um modelo hierárquico Bayesiano que permite estimar a contribuição de cada covariável, além de quantificar as incertezas associadas aos parâmetros na análise.

METODOLOGIA

Como área de estudo, foi escolhida a bacia hidrográfica do rio das Velhas, o qual compreende o maior afluente em extensão do rio São Francisco. A bacia hidrográfica abriga uma população superior a 4,4 milhões de habitantes (CBH Velhas, s. d.), abrange o município de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, e é palco de um crescimento urbano expressivo.

Com base na análise de balanço hídrico, em um ano qualquer, considerando a variação do armazenamento desprezível, o deflúvio pode ser calculado pela diferença entre a precipitação e a evaporação. A precipitação pode ser obtida a partir de estações meteorológicas, enquanto a evaporação pode ser obtida por meio da equação de Budyko:

1) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, BH/MG. clarademattosnogueira@gmail.com
2) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. thaisbcb@gmail.com
3) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. fcoeustaquio@ufmg.br
4) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. pmmoura@ufmg.br
5) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. veber@ehr.ufmg.br

$$E_t = B_k(\phi, w) \cdot P_t \quad (1)$$

Pela equação de Turc-Pike (Turc, 1954; Pike, 1964), tem-se:

$$B_k(\phi, w) = (1 + \phi^{-w})^{-\frac{1}{w}} \quad (2)$$

na qual o índice de aridez ϕ é dado pela razão entre a evapotranspiração potencial e a precipitação. O parâmetro w permite incorporar características da bacia hidrográfica em questão e pode ser considerado variável no tempo em função de covariáveis $\boldsymbol{x_t} = (x_{1,t}, x_{2,t}, x_{3,t})$ (Jiang *et al.*, 2015):

$$\ln(w_t) = \alpha + \beta_1 \cdot x_{1,t} + \beta_2 \cdot x_{2,t} + \beta_3 \cdot x_{3,t} \quad (3)$$

em que α é o parâmetro que representa o intercepto e β_1, β_2 e β_3 são os coeficientes de regressão estimados.

Neste estudo, adotou-se uma variável antrópica e duas climáticas, conforme Zhang *et al*. (2019). O parâmetro w foi considerado variável no tempo, permitindo representar alterações na curva de Budyko decorrentes da variabilidade climática e das atividades antrópicas.

A variável $x_{1,t}$ corresponde à área urbana da bacia, enquanto $x_{2,t}$ e $x_{3,t}$ representam, respectivamente, a temperatura média anual e a precipitação anual. Destaca-se que os preditores são considerados independentes entre si. Além disso, em função das diferentes ordens de grandeza entre as covariáveis, essas foram previamente padronizadas antes da estimação dos parâmetros.

Foram utilizados dados anuais de vazão, evapotranspiração potencial, precipitação, temperatura e uso do solo para o período de 1991 a 2024. As vazões médias anuais foram obtidas na estação fluviométrica 41990000 (Várzea da Palma), disponível na HidroWeb (ANA). A evapotranspiração potencial foi obtida da Normal Climatológica 1991–2020 do INMET (estação Belo Horizonte código 83587). Os dados de precipitação e temperatura foram extraídos da base meteorológica em grade de Xavier *et al.* (2022), enquanto a área urbanizada foi obtida a partir da Coleção 10 do MapBiomas.

Melo *et al.* (2023) aplicaram quatro equações de Budyko, sendo elas Turc-Pike, Fu, Zhang e Wang-Tang, e encontraram resultados similares. Assim, por simplicidade, foi adotada a equação de Turc-Pike. Para obtenção dos coeficientes, foi empregado um modelo hierárquico Bayesiano utilizando formulação proposta por Zhang *et al.* (2019) e apresentada a seguir, por meio do *software* STAN.

Primeiro nível do modelo:

$$Y_t \sim N(\mu_t, \sigma^2) \quad (4)$$

$$\mu_t = P_t(1 - B_k(PE_t, P_t, w_t)) \quad (5)$$

$$\ln(w_t) = \alpha + \beta_1 \cdot x_{1,t} + \beta_2 \cdot x_{2,t} + \beta_3 \cdot x_{3,t} \quad (6)$$

na qual Y_t são os deflúvios, P_t é a precipitação e PE_t é a evapotranspiração potencial em um ano t.

Segundo nível do modelo:

$$\beta_1, \beta_2, \beta_3 \sim N(0, 2^2) \quad (7)$$

$$\alpha \sim N(0, 2^2) \quad (8)$$

$$\sigma \sim N(0, 10^2) \quad (9)$$

As distribuições *a posteriori* dos parâmetros foram simuladas por meio do Método de Monte Carlo por Cadeias de Markov (MCMC), utilizando quatro cadeias, 10.000 iterações de *warm-up*, 10.000 iterações para amostragem e *thinning* de 10. A convergência foi avaliada por meio do diagnóstico $\hat{R}$, critério de Brooks-Gelman-Rubin recomendado por Vehtari, *et al.* (2021). Foram testadas diferentes

combinações de covariáveis para avaliar sua influência no modelo: (i) todas as covariáveis, (ii) apenas a antrópica, (iii) apenas a climática de precipitação, e (iv) ambas. O desempenho foi avaliado pelas métricas Eficiência Kling-Gupta (KGE; Gupta *et al*., 2009) e probabilidade de cobertura (PC) do intervalo de credibilidade de 95%.

RESULTADOS

Para todos os modelos simulados, o $\hat{R}$ apresentou valores iguais a 1, indicando convergência das cadeias MCMC. Os modelos com apenas uma covariável apresentaram desempenho inferior (KGE = 0,75 e PC = 90% para o modelo ii; KGE = 0,69 e PC = 87% para o modelo iii). Já os modelos i e iv apresentaram desempenho semelhante (KGE = 0,82 e PC = 93%; KGE = 0,82 e PC = 90%, respectivamente). Dessa forma, optou-se pelo modelo iv, por apresentar melhor equilíbrio entre probabilidade de cobertura e parcimônia.

A Figura 1 apresenta distribuições a *posteriori* unimodais e aproximadamente simétricas. Observa-se influência ligeiramente superior da covariável antrópica (β_1) em relação à climática de precipitação (β_3), com coeficientes médios de 0,17 e 0,15, respectivamente. Como a área urbanizada apresentou aumento sistemático ao longo do período, esse resultado indica maior contribuição das alterações antrópicas para a variabilidade do parâmetro w. Também foi observada baixa correlação entre os parâmetros, corroborando a hipótese de independência entre as covariáveis.

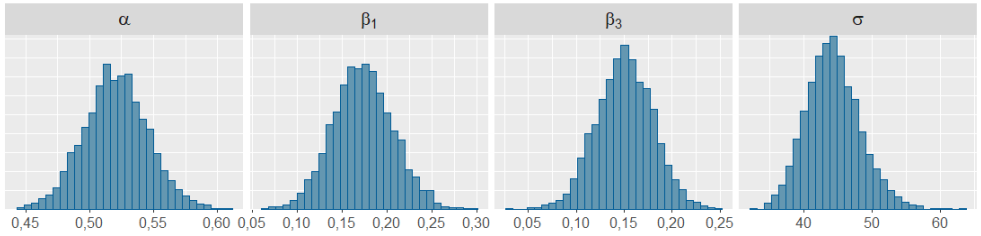


Figura 1. Distribuição a posteriori dos parâmetros. Fonte: autoria própria.

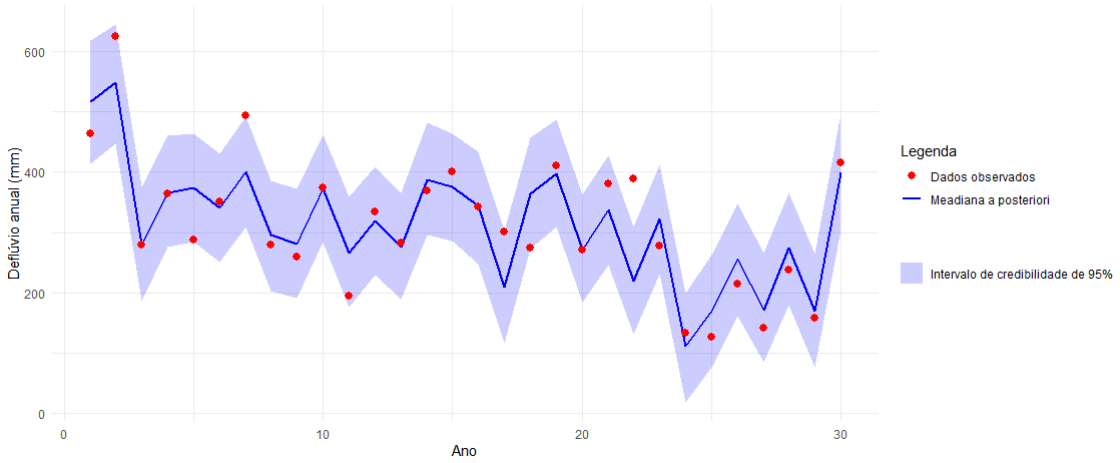


Figura 2. Comparação entre deflúvio simulado e observado. Fonte: autoria própria.

A partir da distribuição *a posteriori* dos parâmetros e da Equação 4, foram estimadas as vazões com intervalo de credibilidade de 95% (Figura 2). Observa-se boa aderência aos dados, com o intervalo abrangendo 90% das observações e adequada representação das vazões mais baixas registradas na década de 2010, evidenciando sua capacidade de representar períodos críticos de escassez hídrica.

CONCLUSÕES

O artigo realizou uma análise exploratória do impacto de covariáveis climáticas e antrópica na variação das vazões da bacia do rio das Velhas por meio de um modelo hierárquico Bayesiano

baseado no *framework* de Budyko. A covariável antrópica apresentou coeficiente de regressão ligeiramente superior ao da covariável climática de precipitação, e o modelo reproduziu adequadamente as menores vazões observadas na década de 2010. Como limitação, o modelo de Budyko assume variação desprezível do armazenamento anual da bacia, hipótese que pode não ser válida, além das incertezas inerentes aos dados utilizados. Apesar disso, o modelo permitiu separar os efeitos das covariáveis climáticas e antrópicas sobre o parâmetro w, podendo subsidiar estudos sobre a influência desses fatores na dinâmica hidrológica e no gerenciamento de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. "*HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas*". Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb/ apresentacao.

BUDYKO, M. I. (1974). "*Climate and Life. Academic Press*", New York, 508 p.

CBH RIO DAS VELHAS - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS. "*A bacia hidrográfica do Rio das Velhas*". Disponível em: https://cbhvelhas.org.br/a-bacia-hidrografica-do-rio-das-velhas/.

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. (2009). "*Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling*". Journal of Hydrology, v. 377, n. 1–2, p. 80–91.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (s.d.). "*Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)*". Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/.

JIANG, C.; XIONG, L.; WANG, D.; LIU, P.; GUO, S.; XU, C.-Y. (2015). "*Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters*". Journal of Hydrology, v. 522, p. 326–338.

MELO, L. S.; COSTA, V. A. F.; FERNANDES, W. S. (2023). "*Assessing the Anthropogenic and Climatic Components in Runoff Changes of the São Francisco River Catchment*". Water Resources Management, v. 37, p. 3615–3629.

PIKE, J. G. (1964). "*The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate*". Journal of Hydrology, v. 2, n. 2, p. 116–123.

TURC, L. (1954). "*The water balance of soils: relationship between precipitations, evaporation and flow*". Annales Agronomiques, v. 5, p. 491–569.

VEHTARI, A.; GELMAN, A.; SIMPSON, D.; CARPENTER, B.; BÜRKNER, P.-C. (2021). "*Rank-normalization, folding, and localization: An improved R-hat for assessing convergence of MCMC*". Bayesian Analysis, v. 16, n. 2, p. 667–718.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. (2022). "*New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)*". Int. J. Climatol. 42(15), 8106–8125.

ZHANG, X.; DONG, Q.; COSTA, V.; WANG, X. (2019). "*A hierarchical Bayesian model for decomposing the impacts of human activities and climate change on water resources in China*". Science of the Total Environment, v. 665, p. 836–847.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao grupo de pesquisa hydro_stat pelas discussões e contribuições científicas. Agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido.