

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

SIMULAÇÃO DA DINÂMICA HIDROLÓGICA DE RESERVATÓRIOS EM CASCATA NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Alisson Lopes Rodrigues¹; Ricardo Santos Silva Amorim²; Pedro Manuel Villa³

RESUMO – Rios de fluxo livre são essenciais para a resiliência dos ecossistemas, regulando vazões e mitigando impactos naturais e antrópicos. Contudo, apenas 37% dos rios com mais de 1.000 km permanecem livres de barramentos em todo o seu curso, e somente 23% chegam ao oceano sem intervenções humanas. A construção de grandes reservatórios tem fragmentado bacias hidrográficas e alterado seus regimes hidrológicos, gerando desafios para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Este estudo desenvolveu um modelo de Dinâmica de Sistemas (SD) capaz de avaliar e mitigar as alterações hidrológicas causadas pelos efeitos cumulativos de grandes reservatórios em cascata no regime de vazão, para promover o atendimento dos usos múltiplos da água na bacia do rio São Francisco, Brasil. O modelo SD foi desenvolvido utilizando o software Vensim® PLE Plus, incorporando todos os possíveis fluxos de entrada e saída que compõem um grande reservatório. Adicionalmente, utilizou-se a metodologia IHA (Indicadores de Alteração Hidrológica) e curvas de permanência (Q_5 e Q_{95}) para quantificação das alterações nas vazões mínimas e máximas. Dois cenários foram simulados. O primeiro mostrou que a operação coordenada dos reservatórios aumentou as vazões mínimas, promovendo maior regularização das vazões; o segundo aplicou a estratégia hedging, elevando a vazão Q_{95} em 80,9% otimizando o atendimento aos usos múltiplos da água. Os resultados indicam que a operação hedging, associada à gestão integrada, aumenta a resiliência dos reservatórios frente à variabilidade climática e às crescentes demandas por água.

ABSTRACT– Free-flowing rivers are essential for ecosystem resilience, regulating flows and mitigating natural and anthropogenic impacts. However, only 37% of rivers longer than 1,000 km remain free of dams along their entire course, and only 23% reach the ocean without human interventions. The construction of large reservoirs has fragmented river basins and altered their hydrological regimes, posing challenges for water resources planning and management. This study developed a System Dynamics (SD) model capable of evaluating and mitigating hydrological alterations caused by the cumulative effects of large cascade reservoirs on flow regimes, aiming to improve the supply of multiple water uses in the São Francisco River basin, Brazil. The SD model was developed using Vensim® PLE Plus software, incorporating all possible inflow and outflow components of a large reservoir. Additionally, the IHA methodology (Indicators of Hydrologic Alteration) and flow duration curves (Q_5 and Q_{95}) were used to quantify changes in minimum and maximum flows. Two scenarios were simulated. The first showed that coordinated operation of the reservoirs increased minimum flows, promoting greater flow regularization; the second applied the hedging strategy, raising the Q_{95} flow by 80.9%, optimizing the supply for multiple water uses. The results indicate that the hedging operation, combined with integrated management, enhances reservoir resilience against climatic variability and increasing water demands.

Palavras-Chave – Grandes Reservatórios; Dinâmica de Sistemas; Recursos hídricos.

¹⁾ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Avenida Peter Henry Rolfs, Viçosa, MG, 36570-900, Brasil, e-mail:alissonrodrigues@ufv.br

²⁾ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Avenida Peter Henry Rolfs, Viçosa, MG, 36570-900, Brasil, e-mail:rsamorim@ufv.br

³⁾ Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Estado de Minas Gerais, 36036-900, Brasil, Pedro.villa@ufjf.br

INTRODUÇÃO

Rios saudáveis e de fluxo livre das principais bacias hidrográficas do mundo possuem uma enorme capacidade natural de absorver distúrbios por meio da regulação das vazões de forma a mitigar os impactos de perturbações naturais e antrópicas (Luo et al., 2023). Contudo, apenas 37% dos rios com mais de 1.000 km permanecem com fluxo livre em toda a sua extensão, e somente 23% alcançam o oceano sem intervenção antropogênica (Luo et al., 2023). Entre as principais intervenções antropogênicas que afetam a conectividade fluvial dos rios até os oceanos, destaca-se a construção de grandes reservatórios, que fragmentam bacias hidrográficas e alteram seus regimes hidrológicos (Jumani et al., 2020). E representa um grande desafio para a gestão e planejamento dos recursos hídricos (Mezger et al., 2020).

Ainda são escassos os estudos que comparam os efeitos de reservatórios individuais com os múltiplos reservatórios em cascata sobre o regime de vazões das bacias hidrográficas (Zhang et al., 2023). Neste sentido, têm surgido importantes perguntas de pesquisa para elucidar estes padrões e processos. Por exemplo, como esses efeitos alteram o regime de vazões, a dinâmica de armazenamento e a distribuição da água ao longo do tempo? Como esses efeitos podem impactar nos usos múltiplos da água? Essas questões fundamentais e a falta de conhecimento sobre o impacto cumulativo dos grandes reservatórios no regime de vazões atualmente causam preocupações entre os pesquisadores frente às recentes mudanças climáticas e impactos antropogênicos negativos sobre o ambiente (Wen et al., 2018).

Existem diversos métodos estatísticos utilizados para avaliar as alterações hidrológicas no regime de vazões provocadas pela construção de grandes reservatórios em cascata (Wang et al., 2021). No entanto, esses métodos não representam as complexas interações entre os componentes do sistema hídrico. Para superar essas limitações, a modelagem Dinâmica de Sistemas (SD), é uma ferramenta capaz de capturar os feedbacks não lineares, os atrasos temporais e as relações de causa e efeito entre as variáveis que influenciam o comportamento dos sistemas hídricos (Teegavarapu e Simonovic, 2014). Além disso, a estrutura do modelo SD permite integrar métricas de indicadores hidrológicos (Richter et al., 1996) e estratégias operacionais como o hedging (Chong et al., 2021), proporcionando melhores estratégias de gestão e planejamentos dos recursos hídricos.

A proposta do modelo SD é de extrema relevância para o Brasil, que é um dos maiores construtores mundiais de reservatórios e o segundo país que mais gera energia hidrelétrica no mundo, ficando atrás apenas da China (Oliveira, 2018). Desde os anos 1970, a construção de reservatórios hidrelétricos é questionada sistematicamente no Brasil e no mundo por seus grandes impactos hidrológicos, ambientais e sociais causados (Veronez et al., 2022). Na Bacia do Rio São Francisco,

particularmente um dos principais desafios é a crescente pressão sobre os recursos hídricos, resultante da construção de usinas hidrelétricas, grandes projetos de irrigação e da transposição de água bruta para o semiárido nordestino (ANA, 2023). Esses empreendimentos impulsionaram um aumento significativo na demanda por água, o que tem comprometido a segurança hídrica e gerado conflitos entre os diferentes usuários (Bettencourt et al., 2022).

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo desenvolver um modelo de Dinâmica de Sistemas (SD) para avaliar as alterações hidrológicas causadas pelos efeitos cumulativos de grandes reservatórios em cascata na bacia do rio São Francisco. Com base nessa avaliação, busca-se aplicar estratégias operacionais que mitiguem alterações hidrológicas, para garantir o atendimento mais eficiente aos usos múltiplos da água.

METODOLOGIA

Área de estudo

O modelo de Dinâmica de Sistemas (SD) foi desenvolvido para os reservatórios das usinas hidrelétricas (UHE) Três Marias, (UHE) Sobradinho, (UHE) Luiz Gonzaga (Fig. 1D). Esses reservatórios estão localizados na bacia hidrográfica do rio São Francisco, Brasil, abrangendo a latitude $18^{\circ} 55' 06''$ S e a longitude $45^{\circ} 40' 01''$ W.

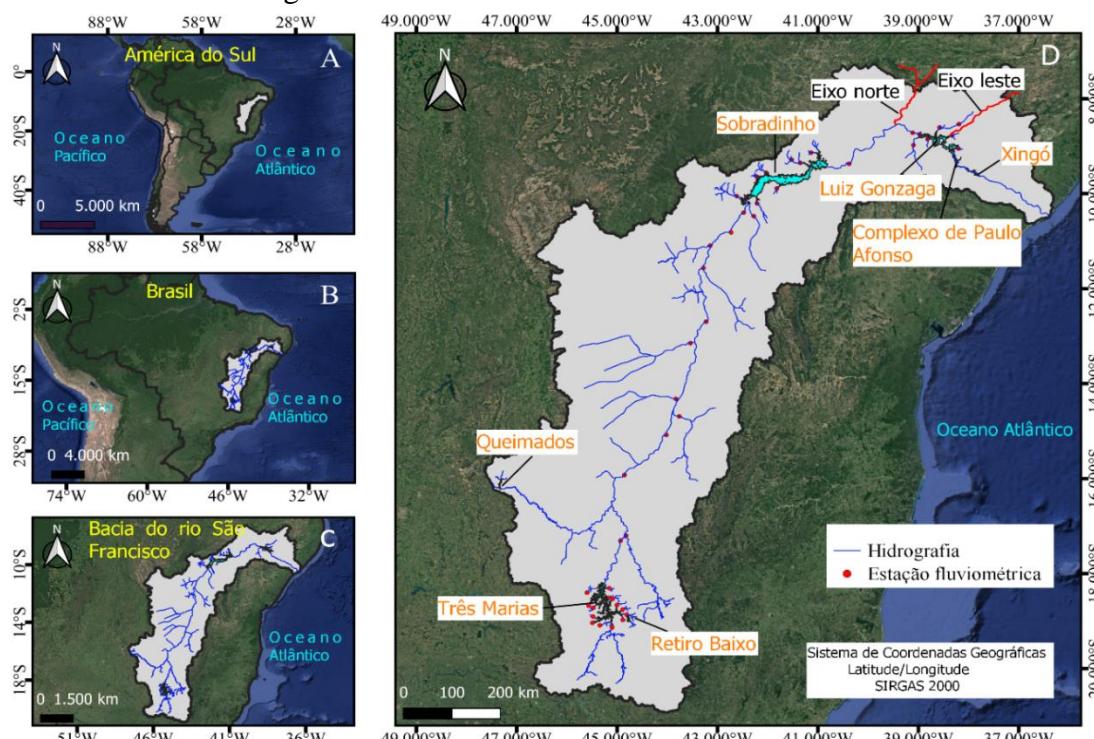


Figura 1. Localização dos reservatórios das usinas hidrelétricas (UHEs) Queimado, Retiro Baixo, Três Marias, Sobradinho, Luiz Gonzaga, complexo de Paulo Afonso e Xíngó, com destaque para os canais de irrigação e os eixos leste e norte da transposição do rio São Francisco.

O clima da região é predominantemente semiárido (58%), com precipitação média anual varia de 1500 mm no Alto São Francisco até 350 mm no Submédio São Francisco, onde ocorrem secas severas devido aos baixos índices de precipitação e alta evapotranspiração (INMET, 2023). Ao longo do ano, o fluxo natural do Rio São Francisco varia entre $1,077 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $5,290 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, com uma média anual de $2,846 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (ANA, 2023).

Monitoramento Hidrológico

A vazão afluente foi obtida de 51 estações fluviométricas e 31 estações pluviométricas pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Fig. 4D). A demanda hídrica em cada reservatório foi obtida a partir das outorgas declaradas à ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) (ANA, 2023).

Desenvolvimento do modelo Dinâmica de Sistemas

O modelo matemático para simular e avaliar os impactos cumulativos provocados pelos grandes reservatórios em cascata nos regimes de vazões, e aprimorar a gestão dos usos múltiplos da água em grandes reservatórios foi desenvolvido utilizando o software Vensim® PLE Plus na versão 10.2.1 (Ventana Systems, 2024).

Estratégias operacionais para mitigar alterações hidrológicas e otimizar o atendimento aos usos múltiplos da água

Para mitigar as alterações hidrológicas e otimizar o atendimento aos usos múltiplos da água em sistemas de reservatórios em cascata, foi implementada no modelo SD, a operação de hedging (Chong et al., 2021). Essa operação consiste em aplicar reduções pequenas, porém de maior frequência nas retiradas de água, com o objetivo de conservar volumes armazenados e, assim, diminuir a probabilidade de reduções extremas no futuro.

Modelo Sistema Dinâmico para grandes reservatórios em cascata

O modelo SD do complexo sistema hidrológico e hidráulico dos reservatórios em cascata na bacia do rio São Francisco desenvolvido no software Vensim® PLE Plus, utiliza diagrama de estoques e fluxos para capturar toda a estrutura do sistema. Foi desenvolvido com base em estudos anteriores (por exemplo, Stojkovic e Simonovic, 2019; Rodrigues et al., 2023). O modelo SD apresenta três tipos de variáveis: a variável de estado é representada pelo volume de água armazenado dos reservatórios. As variáveis de fluxo representada pela vazão afluente e a vazão turbinada. As variáveis

auxiliares são aquelas que influenciam nas variáveis de fluxos (por exemplo, área do espelho d'água) (Figura 2).

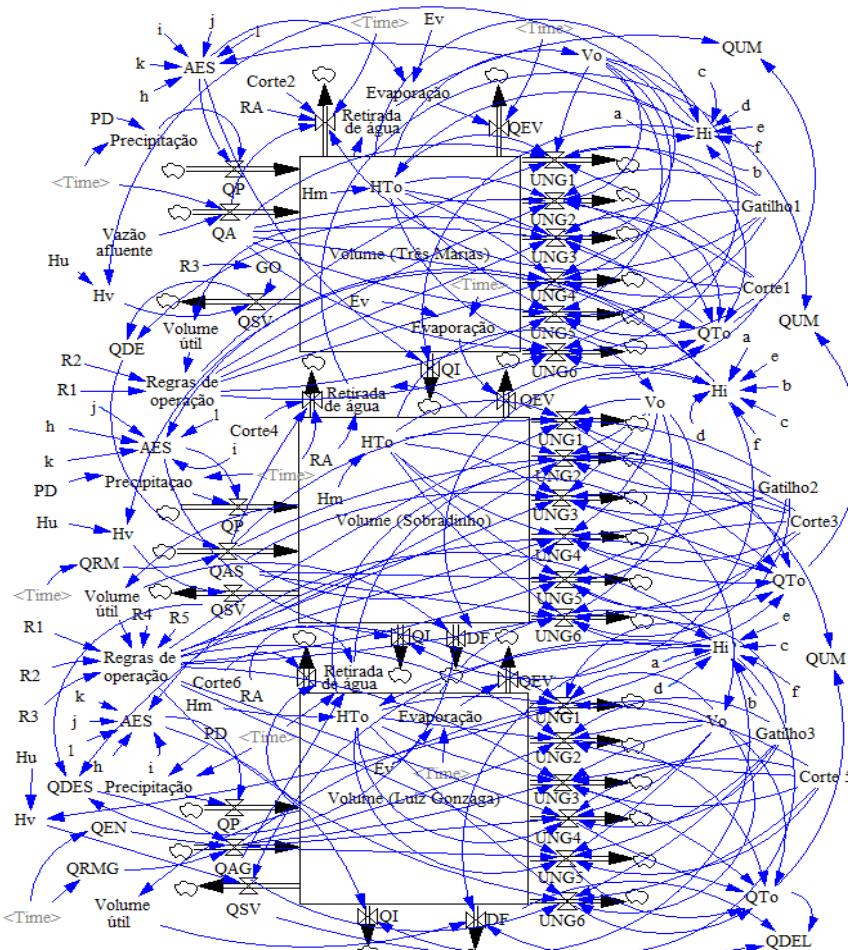


Figura. 2. Diagrama de laço causal do modelo Dinâmica de Sistemas para avaliar a dinâmica de água em grandes reservatórios em cascata (Q_A = vazão afluente; R_A = retirada de água; H_u = altura útil; H_m = altura mínima; Q_{DE} = Vazão defluente; Q_{UM} = usos múltiplos da água; Q_{TO} = vazão turbinada; Q_{EV} = evaporação; G_O = altura da abertura da comporta; Q_P = precipitação; E_V = lâmina de água evaporada; P_D = precipitação diária; Q_{SV} = vazão vertedouro; V_o = variação do volume; A_{ES} = área do espelho d'água; Q_{EV} = evaporação; Q_I = infiltração; H_{TO} = altura da coluna d'água acima das turbinas; D_F = descarregador de fundo; Q_{UM} = usos múltiplos d'água; R_1, R_2, R_3, R_4 e R_5 = regras de operação; $a, b, c, d, e, f, k, h, i, j, l$ e m coeficientes adimensionais; $UNG_1, UNG_2, UNG_3, UNG_4, UNG_5$ e UNG_6 ; refere-se às unidades geradoras de energia elétrica; Q_{AG} = vazão afluente de entrada no reservatório da UHE Luiz Gonzaga; Q_{EN} = vazão do eixo norte; Q_{RM} = fluxos dos rios contribuintes a montante da UHE Sobradinho; Q_{AS} = vazão afluente de entrada no reservatório de UHE Sobradinho; Q_{DEL} = vazão defluente da UHE Luiz Gonzaga; Q_{DES} = Vazão defluente da UHE Sobradinho; Q_{RMG} = fluxos dos rios contribuintes a montante da UHE Luiz Gonzaga).

Efeitos cumulativos no regime de vazões

Para quantificar os efeitos cumulativos causados por grandes reservatórios em cascata na bacia do rio São Francisco, foi utilizada a metodologia IHA (Indicadores de Alteração Hidrológica), com foco em 10 parâmetros relacionados à magnitude e duração das vazões mínimas e máximas em janelas móveis de 1 a 90 dias, comparando períodos pré e pós-impacto. Além disso, foram empregadas curvas de permanência para avaliar alterações nas vazões extremas, por meio das métricas Q_5 (vazões altas) e Q_{95} (vazões baixas), importantes para a gestão de cheias e secas.

A alteração hidrológica relativa (%) foi calculada para os parâmetros do IHA e classificada em baixo ($\leq 33\%$), médio (34-67%) e alto ($> 67\%$) grau de impacto, conforme Richter et al. (1998). A alteração hidrológica relativa foi calculada pela equação 1.

$$R_C = \frac{(P_{OS} - P_{RE})}{P_{RE}} * 100 \quad (1)$$

Onde: R_C = alteração Hidrológica Relativa (%); P_{RE} = período pré-impacto ($hm^3 dia^{-1}$); P_{OS} = período pós-impacto ($hm^3 dia^{-1}$).

Valores positivos de alteração hidrológica relativa indicam aumento no regime de vazões do período pré para o pós-impacto, enquanto valores negativos apontam redução no regime de vazões.

Cenários para avaliar e mitigar os efeitos cumulativos, com suporte à gestão integrada dos usos múltiplos da água

Foram elaborados dois cenários hipotéticos para alcançar os objetivos estabelecidos nesta pesquisa.

Cenário 1: Avalia os efeitos hidrológicos e operacionais da operação coordenada dos reservatórios. A simulação compara dois períodos: pré-impacto (1931-1987), quando nem todos os reservatórios estavam em operação, e pós-impacto (1988-2023), quando todos os reservatórios da cascata já estão operando. O objetivo é analisar os impactos cumulativos da operação coordenada dos reservatórios sobre o regime de vazões.

Cenário 2: Este cenário tem como objetivo mitigar os efeitos cumulativos para otimizar o atendimento aos usos múltiplos da água por meio da adoção da operação hedging. Foi simulado o período de 1988 a 2023, comparando a operação convencional (pré-impacto) e a operação hedging (pós-impacto).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do Cenário 1 evidenciam alterações significativas no regime hidrológico do rio São Francisco, resultantes da operação coordenada dos reservatórios em cascata, com destaque para a atenuação de extremos de vazão e a maior regularização do escoamento ao longo do ano (Figura 2).

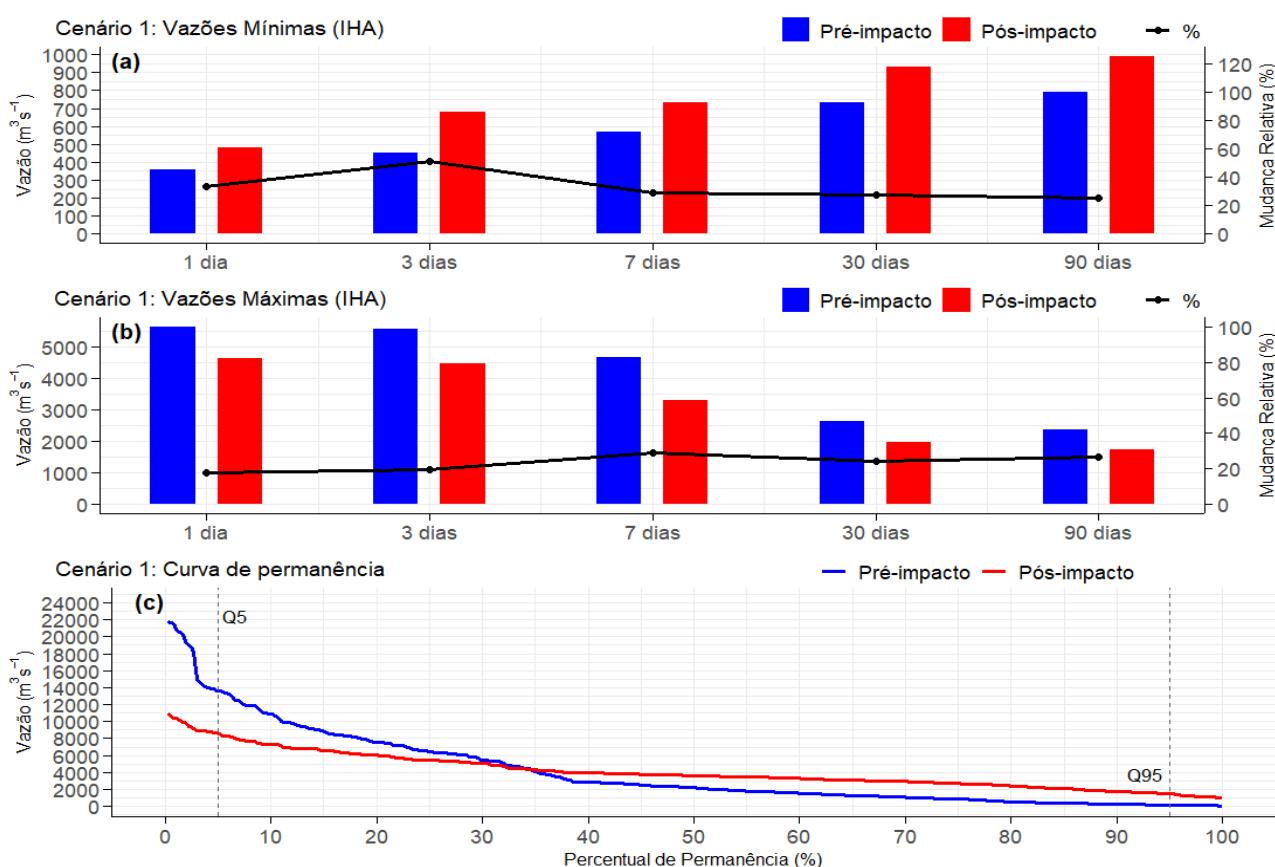


Figura 2. Alterações nas vazões mínimas, máximas e na curva de permanência do rio São Francisco após a operação coordenada dos reservatórios em cascata.

As vazões mínimas apresentaram aumentos em todas as janelas móveis analisadas, indicando uma maior regularização da vazão após operação coordenada dos reservatórios. Na janela de 1 dia, a vazão mínima passou de 363 para 487 $m^3 s^{-1}$, representando um acréscimo de 33,3%. Para as janelas de 3, 7, 30 e 90 dias, os aumentos foram de 51,1% (de 452 para 681 $m^3 s^{-1}$), 28,9% (de 577 para 733 $m^3 s^{-1}$), 27,4% (de 729 para 934 $m^3 s^{-1}$) e 25,3% (de 792 para 995 $m^3 s^{-1}$), respectivamente (Figura 2a). No entanto, as vazões máximas sofreram reduções significativas em todas as janelas, o que demonstra efeitos no amortecimento de inundação. Na janela de 1 dia, a redução foi de 17,8% (de 5649 para 4647 $m^3 s^{-1}$); nas janelas de 3, 7, 30 e 90 dias, as reduções foram de 19,7% (de 5583 para 4481 $m^3 s^{-1}$), 29,2% (de 4677 para 3305 $m^3 s^{-1}$), 24,5% (de 2635 para 1986 $m^3 s^{-1}$) e 26,5% (de 2391 para 1756 $m^3 s^{-1}$), respectivamente (Figura 2b). Observa-se, pela curva de permanência, que a vazão Q₉₅ foi elevada de 567 $m^3 s^{-1}$ para 987 $m^3 s^{-1}$, evidenciando um aumento expressivo nas vazões de base. Por outro lado, a vazão Q₅ foi reduzida de 15.700 $m^3 s^{-1}$ para 9.688 $m^3 s^{-1}$, indicando uma atenuação das cheias extremas (Figura 2c).

A alteração no regime hidrológico decorre da capacidade de regularização dos grandes reservatórios da bacia do rio São Francisco, que permite reter vazões elevadas no período chuvoso e

distribuí-las ao longo do tempo. Esse efeito explica o aumento das vazões mínimas, como a Q₉₅, e a maior disponibilidade hídrica durante os períodos de estiagem (Collischonn e Dornelles, 2015).

No Cenário 2, para o período de 1988 a 2023, a operação com a estratégia de hedging apresentou melhorias significativas na regularização das vazões do rio São Francisco (Figura 3).

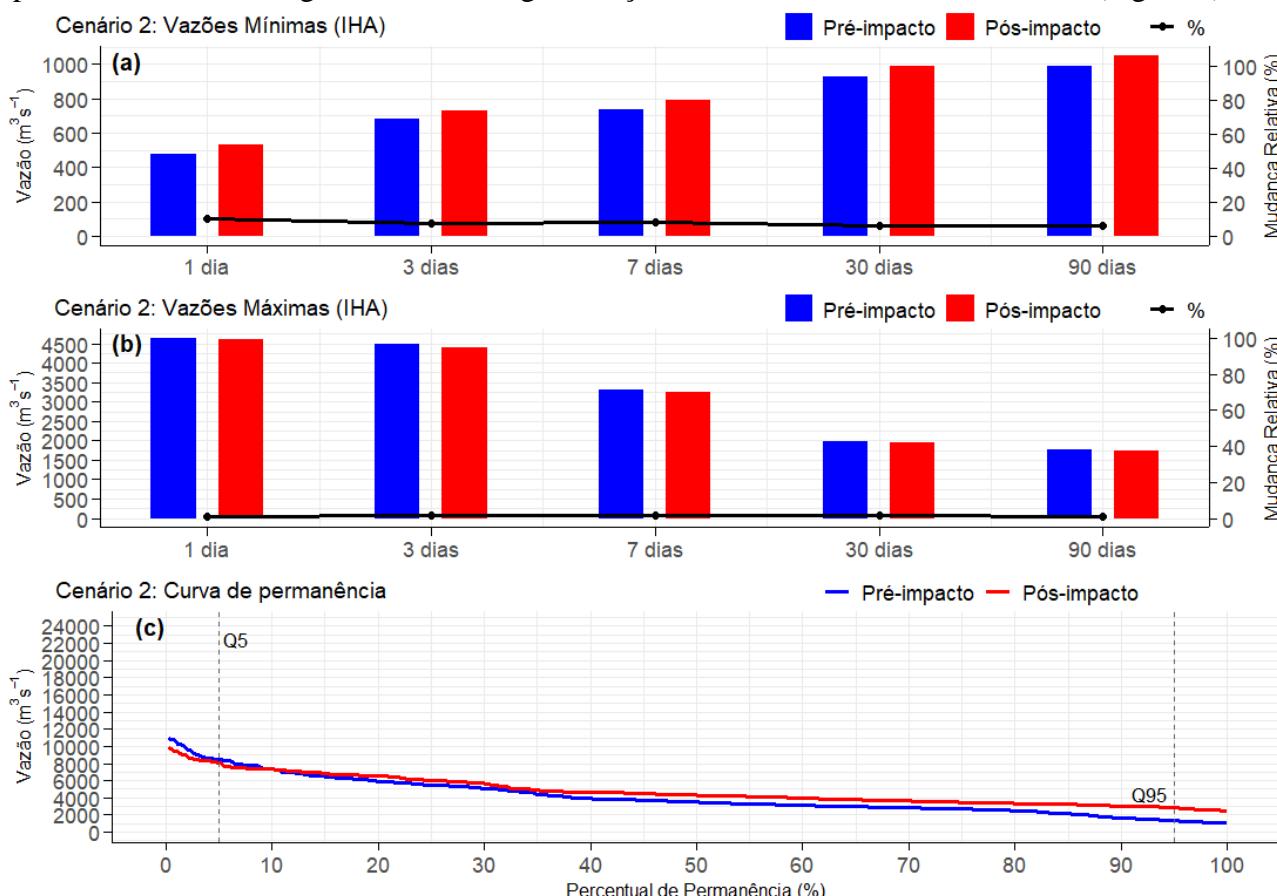


Figura 3. Comparação das vazões mínimas e máximas antes e após a operação hedging no rio São Francisco (1988-2023).

Observou-se que as vazões mínimas aumentaram em todas as janelas móveis analisadas, indicando uma maior regularização do fluxo após a adoção da operação hedging, que foi acionada por gatilhos e cortes específicos para a UHE Três Marias, UHE Sobradinho e UHE Luiz Gonzaga. De acordo com IHA, na janela de 1 dia, a vazão mínima passou de 487 m³ s⁻¹ para 531 m³ s⁻¹, representando um aumento de 10,4%. Nas janelas de 3, 7, 30 e 90 dias, os acréscimos foram de 7,4% (de 681 para 730 m³ s⁻¹), 8,2% (de 733 para 798 m³ s⁻¹), 6,5% (de 934 para 995 m³ s⁻¹) e 6,1% (de 995 para 1152 m³ s⁻¹), respectivamente (Figura 3a). Por outro lado, as vazões máximas apresentaram pequenas variações, com reduções discretas que indicam um leve maior controle sobre os eventos extremos. Na janela de 1 dia, a vazão máxima caiu 1,2% (de 4647 para 4589 m³ s⁻¹), enquanto nas janelas de 3, 7, 30 e 90 dias, as diminuições foram de 1,5% (de 4481 para 4413 m³ s⁻¹), 1,7% (de 3305 para 3250 m³ s⁻¹), 2,2% (de 1986 para 1946 m³ s⁻¹) e 1,1% (de 1756 para 1736 m³ s⁻¹), respectivamente.

(Figura 3b). Observa-se, pela curva de permanência, que a vazão Q_{95} foi elevada de $987 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para $1785 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, evidenciando um aumento expressivo da vazão mínima em 80,9% para o atendimento dos usos múltiplos da água. Por outro lado, a vazão Q_5 foi reduzida de $9.688 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para $9.596 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, indicando uma pequena atenuação das cheias extremas após a operação hedging (Figura 3c).

A operação hedging pode, de fato, reduzir os valores das janelas móveis de vazão máxima em períodos de cheias e, ao mesmo tempo, aumentar o valor da Q_{95} em períodos de estiagem. Isso ocorre porque essa estratégia promove uma alocação mais equilibrada dos recursos hídricos ao longo do tempo, com o objetivo de assegurar o atendimento dos usos múltiplos da água mesmo em situações de estiagens prolongadas (Chong et al., 2021).

CONCLUSÃO

A operação coordenada dos reservatórios na bacia do rio São Francisco resultou em uma regularização significativa do regime hidrológico, com aumento das vazões mínimas e redução das máximas. A adoção da estratégia de operação hedging elevou expressivamente a vazão Q_{95} , aumentando a disponibilidade hídrica nos períodos de estiagem, o que favorece o atendimento aos usos múltiplos da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa (UFV). Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) - Número de concessão 155594/2023-0.

REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (2023). *Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)*. Ministério do Meio Ambiente. <http://www.ana.gov.br>.
- BETTENCOURT, P., DE OLIVEIRA, R. P., FULGÊNCIO, C., CANAS, Â., WASSERMAN, J. C. (2022). *Prospective Water Balance Scenarios (2015-2035) for the Management of São Francisco River Basin, Eastern Brazil*. Water 14(15), 2283.
- CHONG, K. L., LAI, S. H., AHMED, A. N., JAAFAR, W. Z. W., EL-SHAFIE, A. (2021). *Optimization of hydropower reservoir operation based on hedging policy using Jaya algorithm*. Applied Soft Computing, v. 106, p. 107325.
- COLLISCHONN, W., DORNELLES, F. (2015). *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. 336 p. Porto Alegre.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. (2023). *Dados meteorológicos*. <http://www.inmet.gov.br/portal>.

- JUMANI, S., DEITCH, MJ, KAPLAN, D., ANDERSON, EP, KRISHNASWAMY, J., LECOURS, V., WHILES, MR. (2020). *River fragmentation and flow alteration metrics: a review of methods and directions for future research*. Environmental Research Letters, v. 15, n. 12, p. 123009.
- LUO, Z., ZHANG, S., LIU, H., WANG, L., WANG, S., WANG, L. (2023). *Assessment of multiple dam-and sluice-induced alterations in hydrologic regime and ecological flow*. Journal of Hydrology, v. 617, p. 128960.
- MEZGER, G., DEL TÁNAGO, M. G., DE STEFANO, L. (2021). *Environmental flows and the mitigation of hydrological alteration downstream from dams: The Spanish case*. Journal of Hydrology, v. 598, p. 125732, 2021.
- OLIVEIRA, N. C. C. D. (2018). *A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil*. Varia História, v. 34, n. 65, p. 315-346.
- RICHTER, B. D., BAUMGARTNER, J. V., BRAUN, D. P., POWELL, J. (1998). *A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network*. Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management, v. 14, n. 4, p. 329-340.
- RODRIGUES, A. L., RODRIGUES, L. N., MARQUES, G. F., VILLA, P. M. (2023). *Simulation model to assess the water dynamics in small reservoirs*. Water Resources Management, v. 37, n. 5, p. 2019-2038.
- STOJKOVIC, M., SIMONOVIC, S. P. (2019). *System dynamics approach for assessing the behaviour of the Lim Reservoir system (Serbia) under changing climate conditions*. Water, v. 11, n. 8, p. 1620.
- TEEGAVARAPU, R. S., SIMONOVIC, S. P. (2014). *Simulation of multiple hydropower reservoir operations using system dynamics approach*. Water resources management, v. 28, p. 1937-1958.
- VENTANA SYSTEMS (2024) Vensim User's Guide Version 6. Harvard, MA, USA: VENTANA Systems Inc. <https://vensim.com/>.
- VERONEZ, F. A., LIMA, F. R. D., TSHIBANGU, G. M. (2022). *Environmental impacts of hydropower plants in Brazil: Identification guide*. Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate, 13(1).
- WANG, W., ZHANG, Y., GENG, X., TANG, Q. (2021). *Impact classification of future land use and climate changes on flow regimes in the Yellow River Source Region, China*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 126, n. 13, p.e2020JD034064.
- WEN, X., LIU, Z., LEI, X., LIN, R., FANG, G., TAN, Q., WANG, C., TIAN, YU., QUAN, J. (2018). Future changes in Yuan River ecohydrology: Individual and cumulative impacts of climates change and cascade hydropower development on runoff and aquatic habitat quality. Science of the Total Environment, v. 633, p. 1403-1417.
- ZHANG, K., YUAN, X., LU, Y., GUO, Z., WANG, J., LUO, H. (2023). Quantifying the impact of cascade reservoirs on streamflow, drought, and flood in the Jinsha River Basin. Sustainability, v. 15, n. 6, p. 4989.