

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

TRADE-OFF EM RIOS TRANSFRONTEIRIÇOS: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL E DO SISTEMA CANTAREIRA

*Felipe Augusto Arguello Souza¹; Ana Carolina Sarmiento Buarque²; João Vitor Kochinski
Trevisan³; Thalita Raquel Pereira de Oliveira⁴; Eduardo Mario Mendiondo⁵*

RESUMO

Os usos múltiplos dos recursos hídricos têm pautado discussões recorrentes em virtude da disponibilidade de água. Em rios transfronteiriços, os usos destes recursos confrontam os interesses dos usuários à montante e à jusante. A literatura sócio-hidroológica tem mostrado que tais interesses não são estáticos, mas sim dinâmicos, pelo fato de as comunidades terem suas preferências alteradas ao longo do tempo em virtude do atendimento e do surgimento de novas demandas. Este trabalho tem como objetivo analisar, através de uma simulação de dinâmica de sistemas, como a evolução das regras de operação de reservatórios traduzem as preferências pelo uso da água, e como podem impactar as demandas dos usuários das Bacias do Rio Paraíba do Sul, do Alto Tietê e dos Rios Piracicaba-Capivari-Jundiáí. O sistema apresentado compreende os quatro reservatórios que compõem o Sistema Integrado do Paraíba do Sul, Jaguari, Paraíbauna, Santa Branca e Funil, e o Sistema Cantareira. Os resultados da modelagem proposta para os meses entre 2008 e 2018, mostram que as regras operacionais propostas divergem ao atenderem as demandas por geração de energia, abastecimento público e conservação ambiental. Com isso, o modelo permitiu elucidar feedbacks e características da dinâmica interação entre sociedade e abastecimento de água e ressaltar a necessidade da avaliação dinâmica da operação de reservatórios.

Palavras-Chave – Socio-hidrologia, rios transfronteiriços, Bacia Paraíba do Sul, Sistema Cantareira

ABSTRACT

The multiple uses of water resources have raised discussions because of water availability. In transboundary rivers, the uses of these resources confront the concerns of upstream and downstream users. However, the socio-hydrological literature has demonstrated that such interests are not static, but dynamics, as communities have their preferences changed over time due to the demand meeting and the arise of new demands. In this context, the objective of this work is to analyze, through system dynamics simulation, how the evolution of reservoir operation rules translates the preferences for water use, and how they can impact on the demands of users of the Paraíba do Sul River Basins, of the Alto Tietê and the Piracicaba-Capivari-Jundiáí Rivers. The system presented comprises the four reservoirs that make up the Integrated System of the Paraíba do Sul River, Jaguari, Paraíbauna, Santa

1) Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Av. Trabalhador São Carlense, 400, CP 359, São Carlos-SP, CEP 13566-590, Brasil. E-mail: felipeaas@usp.br

2) Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Av. Trabalhador São Carlense, 400, CP 359, São Carlos-SP, CEP 13566-590, Brasil. E-mail: acsbuarque@gmail.com

3) Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Av. Trabalhador São Carlense, 400, CP 359, São Carlos-SP, CEP 13566-590, Brasil. E-mail: joao.trevisan@usp.br

4) Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Av. Trabalhador São Carlense, 400, CP 359, São Carlos-SP, CEP 13566-590, Brasil. E-mail: thalitaraque196@gmail.com

5) Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Av. Trabalhador São Carlense, 400, CP 359, São Carlos-SP, CEP 13566-590, Brasil. E-mail: emm@sc.usp.br

Branca and Funil, and the Cantareira System. The modeling results, for the months between 2008 and 2018, reveals that the proposed operating rules diverge when meeting the demands for energy generation, public supply and environmental conservation. Therefore, the model shed light to the feedbacks and mechanisms of the dynamic interactions between society and water supply and highlighted the need for a dynamic assessment of the reservoir's operation.

Keywords– Socio-hydrology, transboundary rivers, Bacia Paraíba do Sul, Sistema Cantareira

1. INTRODUÇÃO

O uso e importância dos recursos hídricos diferem entre os diversos usuários. Mesmo comunidades situadas as margens de um mesmo rio podem ter demandas e finalidades específicas para suas águas. Rios transfronteiriços são candidatos que representam as divergentes demandas pela disponibilidade hídrica, que frequentemente são alvos de disputas e até mesmo acordos de cooperação (McCracken & Wolf, 2019). Em âmbito brasileiro, a Bacia do Rio Amazonas e a Bacia do Rio da Prata são representantes do conjunto de rios que cruzam fronteiras internacionais. Contudo, as dimensões continentais e as especificidades socioculturais de cada estado e região do país poderiam expandir esta classificação para rios que cruzam fronteiras internas, como é o caso do rio São Francisco, popularmente denominado “Rio da Integração Nacional” justamente por unir fronteiras nacionais (Brasil, 2013).

A literatura sobre rios internacionais abarcou a recente vertente sócio-hidrológica, que tem por objetivo entender, reconstruir e imaginar as dinâmicas resultantes das interações entre o sistema hidrológico e o sistema social (Montanari et al, 2013; Sivapalan et al, 2012). A metodologia inicialmente proposta, e recorrentemente testada, tem empregado a abordagem de dinâmicas de sistemas para descrever essas interações e reproduzir possíveis cenários, a fim de explicar diferentes fenômenos (Sivapalan & Blöschl, 2015). Assim, estudos de caso têm abordado os elementos que baseiam as dinâmicas de conflito/cooperação entre nações conectadas por um mesmo rio (Lu et al, 2021; Wei et al, 2020; Cherry et al, 2020).

Neste contexto, o presente trabalho analisa as dinâmicas que estão por trás das operações dos reservatórios da Bacia do Rio Paraíba do Sul e do Sistema Cantareira. Inicialmente é delimitado o sistema e suas condições a serem representadas por equacionamento. Após verificado, cenários de operações são simulados, utilizando a abordagem de dinâmicas de sistema, a fim de identificar as demandas que são satisfeitas e os usuários que poderiam ser beneficiados em cenários hipotéticos.

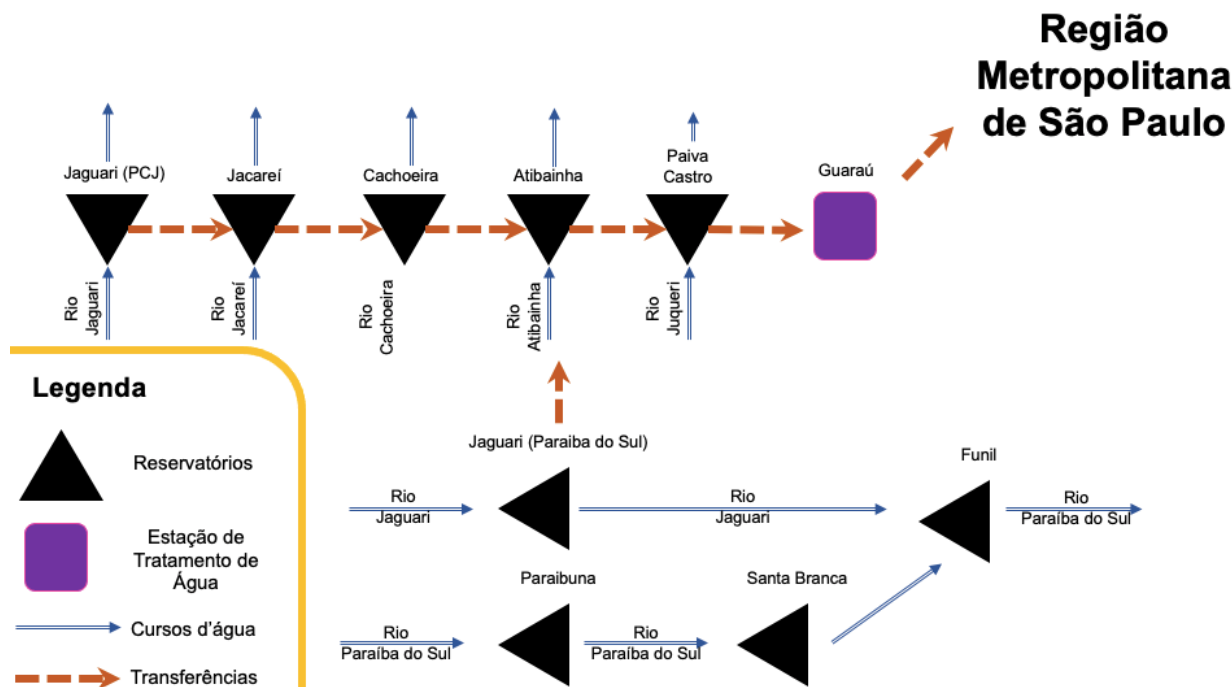
2. MÉTODOS

2.1. Estudo de caso

O sistema representado neste artigo compreende três bacias hidrográficas, as bacias do Rio Paraíba do Sul, do Alto-Tietê e dos Rios Piracicaba-Capivari-Jundiaí. Estas duas últimas são representadas pelos reservatórios que compreendem o Sistema Cantareira e sua população consumidora, que está majoritariamente localizada no Alto-Tietê. Já a Bacia do Rio Paraíba do Sul possui sua cabeceira situada nos estados de Minas Gerais e São Paulo, com sua foz situada no estado do Rio de Janeiro. Com extrema importância para a região, esta bacia atende importantes municípios paulistas e possui parte de sua vazão transferida para o Rio Guandu, que abastece a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Formiga-Johnsson & Britto, 2020). Além disto, ao longo do século XX foram construídas diversas centrais produtoras de energia hidrelétrica. Por fim, soma-se a este complexo sistema a conexão entre o Reservatório Jaguari e o Reservatório Atibainha, que permite transferência média de até $5,13\text{m}^3/\text{s}$ para contribuir com o volume armazenado no Sistema Cantareira

e, conseqüentemente, do abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (Carmo & Anazawa, 2018).

Figura 1 – Representação gráfica do modelo



2.2. Modelagem

O modelo proposto para simular o impacto das transferências de água nos reservatórios da bacia do Rio Paraíba do Sul consistiu nas Equações 1 a 4, que reproduzem o balanço hídrico e de geração de energia hidrelétrica individualmente para cada reservatório, onde $\frac{dS}{dt}$ é a variação do volume armazenado no reservatório (m^3/s), Q_{in} é a vazão afluyente do reservatório (m^3/s), Q_{out} é a vazão total de saída do reservatório (m^3/s), Q_{transf} é a vazão transferida entre os reservatórios (m^3/s), Q_{trib} é a vazão estimada dos cursos de água tributários entre dois reservatórios (m^3/s), $Q_{out_{mont}}$ é a vazão de saída do reservatório a montante (m^3/s), $Q_{in_{jus}}$ é a vazão afluyente do reservatório a jusante (m^3/s), Q_{turb} é a vazão que passa pelas turbinas da barragem com a finalidade de gerar energia elétrica (m^3/s), Q_{vert} é a vazão que é liberada através do vertedouro ou das comportas (m^3/s), HP é a energia elétrica gerada e um período de Δt horas (Watts-horas), η é o coeficiente de rendimento de geração de energia elétrica do conjunto de turbinas (adimensional), ρ é a densidade da água (kg/m^3), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), Δh é a diferença de carga hidráulica entre a montante e a jusante do barramento (m), e Δh é o número de horas analisado (h) (Loucks & Van Beek, 2005).

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \pm Q_{transf} \quad (1)$$

$$Q_{trib} = Q_{out_{mont}} - Q_{in_{jus}} \quad (2)$$

$$Q_{out} = Q_{turb} + Q_{vert} \quad (3)$$

$$HP = \eta \cdot \rho \cdot Q_{turb} \cdot g \cdot \Delta h \quad (4)$$

$$HP = \alpha \cdot Q_{turb} \cdot h \quad (5)$$

Contudo, a equação (4) foi simplificada na equação (5) a fim de reduzir as incertezas referentes às variáveis η , ρ e g e simplificar a variável Δh , dado que não foram encontrados registros de medição de carga hidráulica a jusante do barramento. Logo, ajustou-se, para os quatro reservatórios da Bacia do Rio Paraíba do Sul, o coeficiente α , que sintetiza as variáveis η , ρ , g e h , onde esta última representa a carga hidráulica a montante do barramento (m). O ajuste foi feito através da regressão linear, tendo a série histórica entre 2010 e 2020 da produção de energia como variável dependente e, como variável independente, o produto entre a vazão turbinada pela carga hidráulica a montante dos barramentos. Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram 0.98 para o reservatório Santa Branca, 0.99 para o reservatório Paraibuna, 0.99 para o reservatório Funil e 0.99 para o reservatório Jaguari.

2.3. Simulação de novas regras de operação

Após estabelecer as configurações do sistema e validar se as variáveis de estado, volume de água armazenado e a produção mensal de energia elétrica, se aproximam dos valores registrados pelas séries históricas, foram testados os impactos de novas regras de operação, como a transferência da Bacia do Rio Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira. Segundo a Resolução ANA No 1.931/2017, esta operação é possível através do sistema elevatório implantado em 2018 no reservatório Jaguari (Bacia do Rio Paraíba do Sul), que permite bombear até 5.13 m³/s de água para o reservatório Atibainha, pertencente ao Sistema Cantareira.

Ainda, foram simuladas, simultaneamente, as novas regras de operação dos reservatórios da Bacia do Rio Paraíba do Sul, que foram estabelecidas pela Resolução Conjunta ANA/DAEE/INEA/IGAM N° 1.382/2015, como resposta ao enfrentamento da crise hídrica de 2014/2015. As principais regras que afetam as operações dos reservatórios do Sistema Equivalente da Bacia do Rio Paraíba do Sul são apresentadas na .

Tabela 1. Portanto, caso a equação 6 apresenta a condição para execução, ou não de transferência entre o Reservatório Jaguari (Paraíba do Sul) e o Reservatório Atibainha (Sistema Cantareira), onde S_{jag} é o volume de armazenado, segundo a simulação, no reservatório Jaguari (Paraíba do Sul), $S_{min_{jag}}$ é o volume de armazenamento mínimo do Reservatório Jaguari, segundo a Resolução Conjunta ANA/DAEE/INEA/IGAM No 1.382/2015, S_{cant} é o volume de armazenado, segundo a simulação, nos reservatórios do Sistema Cantareira e, por fim, $S_{sup_{cant}}$ é o limite superior de armazenamento do Sistema Cantareira, que representa o limite máximo para continuar recebendo transferências, caso S_{cant} seja superior, representa que não haverá transferências.

Tabela 1 – Postos pluviométricos utilizados

	Armazenamento mínimo (%)	Vazão a jusante mínima (m ³ /s)
Funil	30	70
Santa Branca	10	30
Paraibuna	5	10
Jaguari	20	4

Além de estabelecer as condições para as transferências ocorrerem, estabeleceu-se as regras para definir as vazões de jusante, vazões turbinadas e vazões vertidas, apresentadas na equação 7. De maneira resumida, as condições visam respeitar sempre as condições mínimas apresentadas na .

Tabela 1 de forma a priorizar as duas condições e, quando não possível, priorizar a vazão jusante mínima. Além das condições mínimas, as vazões de jusante simuladas visam priorizar as vazões turbinadas (Q_{turb}) em detrimento das vazões vertidas (Q_{vert}) a fim de otimizar a geração de energia elétrica.

$$\begin{cases} Q_{transf} = 0 \text{ para } S_{jag} \leq S_{minjag} \\ Q_{transf} > 0 \text{ para } S_{jag} > S_{minjag} \end{cases} \quad (6)$$

$$(7) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{se } Q_{transf} = 0 \\ \text{se } Q_{transf} > 0 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{se } Q_{turbjagobs} \leq Q_{minjag} \text{ e } Q_{vertjag} \geq (Q_{turbjagobs} - Q_{minjag}) \begin{cases} Q_{turbjag} = Q_{turbjagobs} \\ Q_{vertjag} = Q_{vertjagobs} \end{cases} \\ \text{se } Q_{turbjagobs} \leq Q_{minjag} \text{ e } Q_{vertjag} < (Q_{turbjagobs} - Q_{minjag}) \begin{cases} Q_{turbjag} = Q_{minjag} \\ Q_{vertjag} = 0 \end{cases} \\ \text{se } Q_{vertjagobs} \geq Q_{transf} \begin{cases} Q_{turbjag} = Q_{turbjagobs} \\ Q_{vertjag} = Q_{vertjagobs} - Q_{transf} \end{cases} \\ \text{se } 0 < Q_{vertjagobs} \leq Q_{transf} \text{ e } (Q_{turbjagobs} + Q_{vertjagobs}) \geq (Q_{transf} + Q_{minjag}) \begin{cases} Q_{turbjag} = Q_{turbjagobs} - (Q_{transf} - Q_{vertjagobs}) \\ Q_{vertjag} = 0 \end{cases} \\ \text{se } 0 < Q_{vertjagobs} \leq Q_{transf} \text{ e } (Q_{turbjagobs} + Q_{vertjagobs}) < (Q_{transf} + Q_{minjag}) \begin{cases} Q_{turbjag} = Q_{minjag} \\ Q_{vertjag} = 0 \end{cases} \\ \text{se } Q_{vertjagobs} = 0 \text{ e } Q_{turbjagobs} \geq (Q_{transf} + Q_{minjag}) \begin{cases} Q_{turbjag} = Q_{turbjagobs} - Q_{transf} \\ Q_{vertjag} = 0 \end{cases} \\ \text{se } Q_{vertjagobs} = 0 \text{ e } Q_{turbjagobs} < (Q_{transf} + Q_{minjag}) \begin{cases} Q_{turbjag} = Q_{minjag} \\ Q_{vertjag} = 0 \end{cases} \end{array} \right.$$

$$(8) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{se } Q_{transf} = 0 \\ \text{se } Q_{transf} > 0 \text{ e } S_{fun} > S_{minfun} \\ \text{se } Q_{transf} > 0 \text{ e } S_{fun} \leq S_{minfun} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{se } S_{fun} > S_{minfun} \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{turbfunobs} \\ Q_{vertfun} = Q_{vertfunobs} \end{cases} \\ \text{se } S_{fun} \leq S_{minfun} \text{ e } Q_{turbfunobs} + Q_{vertfunobs} > Q_{minjag} \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{minjag} \\ Q_{vertfun} = 0 \end{cases} \\ \text{se } S_{fun} \leq S_{minfun} \text{ e } Q_{turbfunobs} + Q_{vertfunobs} \leq Q_{minjag} \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{minjag} \\ Q_{vertfun} = 0 \end{cases} \\ \text{se } Q_{vertfunobs} \geq Q_{transf} \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{turbfunobs} \\ Q_{vertfun} = Q_{vertfunobs} - Q_{transf} \end{cases} \\ \text{se } Q_{vertfunobs} > 0 \text{ e } Q_{vertfunobs} < Q_{transf} \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{turbfunobs} - (Q_{transf} - Q_{vertfunobs}) \\ Q_{vertfun} = 0 \end{cases} \\ \text{se } Q_{vertfunobs} = 0 \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{turbfunobs} - Q_{transf} \\ Q_{vertfun} = 0 \end{cases} \\ \text{se } Q_{vertfunobs} > 0 \text{ e } (Q_{vertfunobs} - Q_{transf}) \geq Q_{minfun} \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{turbfunobs} \\ Q_{vertfun} = Q_{vertfunobs} - Q_{transf} \end{cases} \\ \text{se } Q_{vertfunobs} > 0 \text{ e } (Q_{vertfunobs} - Q_{transf}) < Q_{minfun} \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{turbfunobs} + Q_{vertfunobs} - Q_{transf} \\ Q_{vertfun} = 0 \end{cases} \\ \text{se } Q_{vertfunobs} = 0 \begin{cases} \text{se } (Q_{turbfunobs} - Q_{transf}) \geq Q_{minfun} \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{turbfunobs} - Q_{transf} \\ Q_{vertfun} = 0 \end{cases} \\ \text{se } (Q_{turbfunobs} - Q_{transf}) < Q_{minfun} \begin{cases} Q_{turbfun} = Q_{minfun} \\ Q_{vertfun} = 0 \end{cases} \end{cases} \end{array} \right.$$

3. RESULTADOS

3.1. Performance do modelo

Antes de testar as simulações, avaliou-se a performance do modelo em relação ao volume de água armazenado nos quatro reservatórios que compõem o Sistema Equivalente da Bacia do Rio

Paraíba do Sul e nos reservatórios do Sistema Cantareira. Além disto, também avaliou a performance do modelo em relação à determinação da energia produzida pelas centrais hidrelétricas dos quatro reservatórios da Bacia do Rio Paraíba do Sul. Os resultados são apresentados na

Figura 3 e na Tabela 2, que apresenta a síntese de duas métricas de performance de bondade de ajuste dos modelos, o Nash–Sutcliffe model Efficiency coeficiente (NSE) e o Kling-Gupta Efficiency (KGE) (Gupta et al, 2009). Ambas as métricas são reconhecidas por avaliar a performance do modelo através de diferentes métodos estatísticos. Quando há uma perfeita representação da realidade por parte do modelo, os coeficientes tendem ao valor 1, enquanto valores próximos de zero são interpretados como baixa representatividade do modelo.

Tabela 2 – Métricas da performance do modelo

	Armazenamento		Geração energia	
	NSE	KGE	NSE	KGE
Jaguari	0,99	0,98	0,96	0,94
Paraibuna	0,99	1,00	0,96	0,88
Santa Branca	0,98	0,96	0,91	0,87
Funil	0,89	0,92	0,93	0,93
Cantareira	0,99	1,00	-	-

Figura 2 – Simulação do cenário base referente ao armazenamento

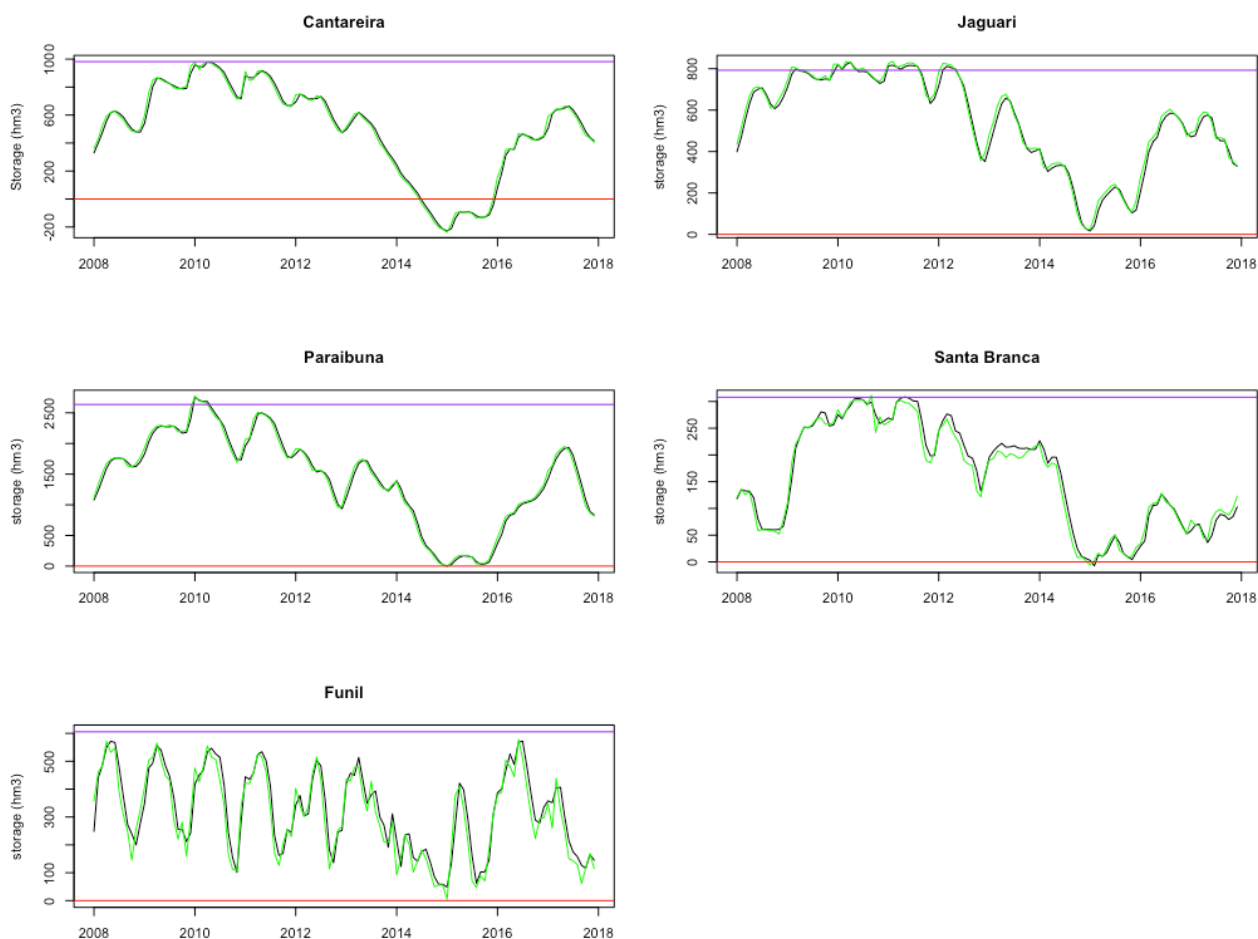
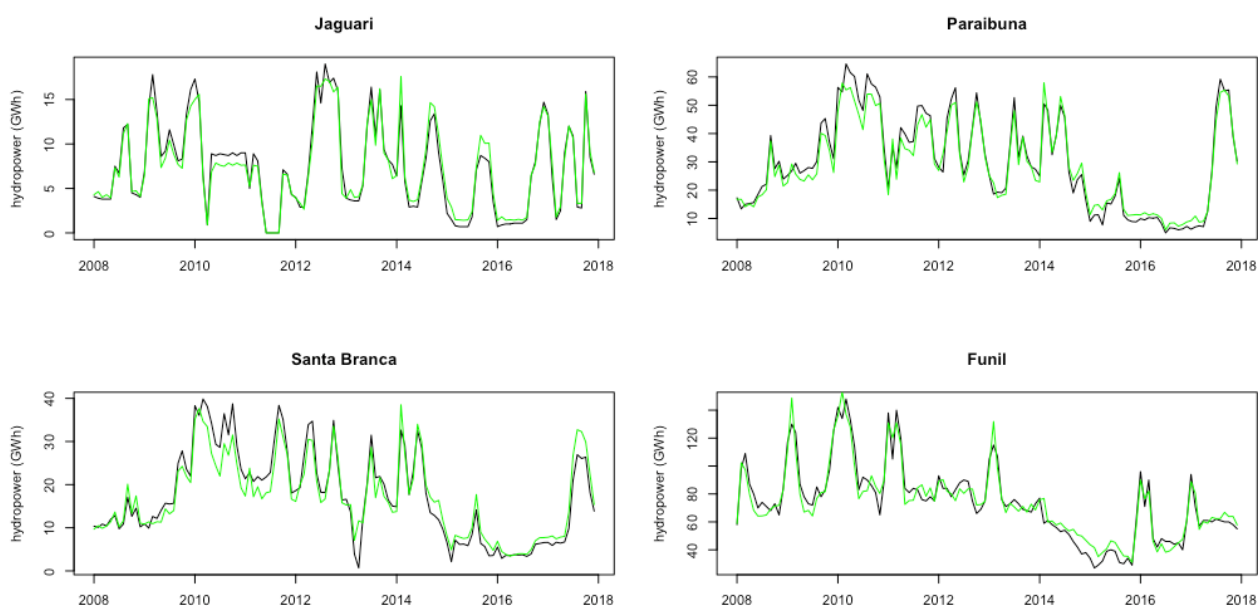


Figura 3 – Simulação do cenário base referente à geração de energia hidrelétrica



3.2. Resultado da simulação

Após verificado que o modelo é capaz de reproduzir as variáveis de estado do sistema, testou-se três cenários. O primeiro simula o cenário base sob transferência média mensal de $5,13\text{m}^3/\text{s}$ entre o reservatório Jaguari e o Sistema Cantareira. O segundo cenário como uma simulação do do cenário base sob os limites mínimos de armazenamento e vazões dos reservatórios Jaguari e Funil. Ou seja, quando um destes reservatórios atingir o volume mínimo, a barragem liberaria apenas as vazões mínimas e, nunca inferiores a elas. Por fim o cenário 3, que simula o cenário base sob as condições dos cenários 1 e 2 simultaneamente. Os resultados das principais variáveis de estado do modelo são apresentados na Tabela 3, bem como as condições de contorno de cada cenário.

Os resultados do Cenário 1 demonstram que o Sistema Cantareira não chegaria ao volume morto, porém causaria uma redução de 20% na produção de energia nas turbinas de Jaguari e 4% nas turbinas de Funil, além de causar redução em torno de $5\text{m}^3/\text{s}$ a jusante de ambos os reservatórios. Já o Cenário 2 evitaria as reduções próximas ao volume morto dos reservatórios Jaguari e Funil, mas não evitaria que o Sistema Cantareira atingisse o volume morto. Por fim, o Cenário 3 mostra-se uma alternativa intermediária entre os dois cenários anteriores, onde o Sistema Cantareira não teria chegado ao volume morto, os reservatórios da Bacia do Rio Paraíba do Sul teriam seus volumes mínimos acima do cenário base, mas com vazão de deflúvio ainda superior a redução média de $4\text{m}^3/\text{s}$.

4. DISCUSSÃO

O estudo de caso da Bacia do Paraíba do Sul e dos reservatórios do Sistema Canteira ilustram *trade-off* comuns que ocorrem em bacias transfronteiriças. Apesar de se tratar de estados do mesmo país, os reservatórios e suas finalidades podem ser divididos entre usuários/demandas a montante e usuários/demandas a jusante.

Tabela 3 – Resultados das simulações testadas

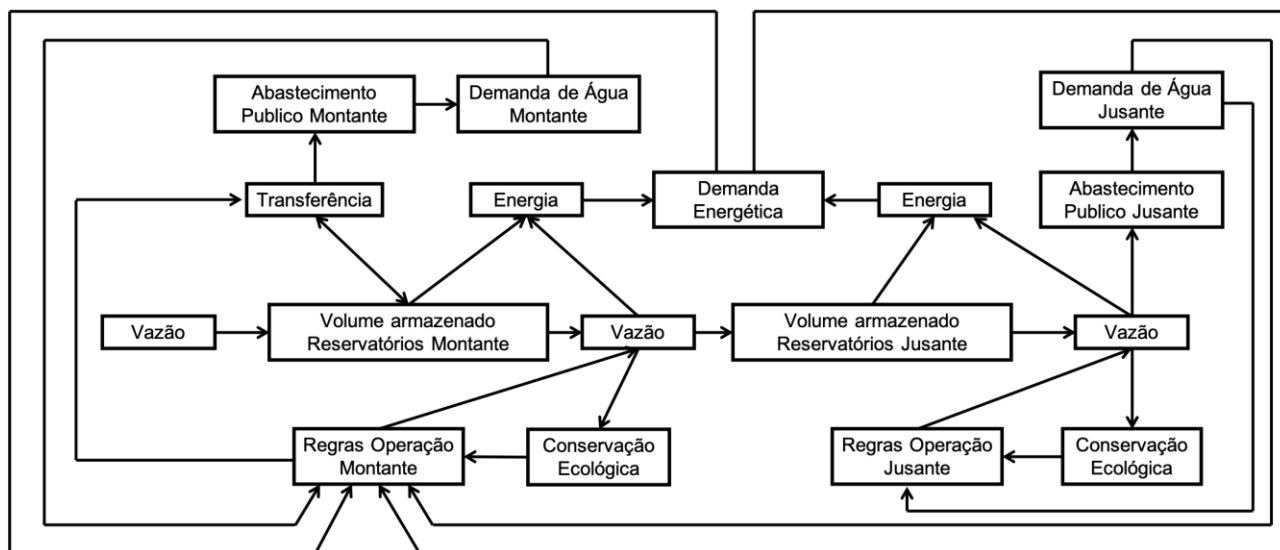
	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Σ HP – Jaguari (GWh/mês)	884,82	712,54	880,26	725,12
Σ HP – Funil (GWh/mês)	8945,01	8753,34	8831,58	8731,09
$\overline{\text{Armaz}}$ – Jaguari ($\text{hm}^3/\text{mês}$)	554,48	545,61	566,85	554,46
$\overline{\text{Armaz}}$ – Funil ($\text{hm}^3/\text{mês}$)	308,83	328,21	433,59	359,53
$\overline{\text{Deflúvio}}$ – Jaguari (m^3/s)	24,42	19,46	24,31	19,74
$\overline{\text{Deflúvio}}$ – Funil (m^3/s)	203,39	198,33	202,26	198,50
$\overline{\text{Armaz}}$ – Cantareira ($\text{hm}^3/\text{mês}$)	498,71	829,22	498,71	823,00
CONDIÇÕES DE CONTORNO				
$Q_{\min_{\text{jaguari}}}$ (m^3/s)	0	0	4	4
$S_{\min_{\text{jaguari}}}$ (hm^3)	$0 \cdot S_{\text{util}_{\text{jag}}}$	$0 \cdot S_{\text{util}_{\text{jag}}}$	$0.2 \cdot S_{\text{util}_{\text{jag}}}$	$0.2 \cdot S_{\text{util}_{\text{jag}}}$
Transf (m^3/s)	0	5,13	0	5,13
$Q_{\min_{\text{funil}}}$ (m^3/s)	0	0	70	70
$S_{\min_{\text{funil}}}$ (hm^3)	$0 \cdot S_{\text{util}_{\text{funil}}}$	$0 \cdot S_{\text{util}_{\text{funil}}}$	$0.3 \cdot S_{\text{util}_{\text{funil}}}$	$0.3 \cdot S_{\text{util}_{\text{funil}}}$

Os cenários testados mostraram as diferentes demandas que são satisfeitas conforme as regras de operação que os reservatórios seguem. O cenário base mostrou-se favorecer a geração de energia hidrelétrica nos reservatórios do Paraíba do Sul. Já o cenário 1 mostrou-se favorecer os usuários a montante, que se beneficiariam por diminuir o risco de colapso do sistema de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. Já o cenário 2 favoreceria as comunidades em torno dos reservatórios do Paraíba do Sul e melhoraria a qualidade do ecossistema aquático por evitar que atingisse volumes muito baixos. Enfim, o cenário 3 deveria ser um cenário intermediário por satisfazer todas as condições de contorno, mas mostrou-se mais próximo dos cenários base e 1.

A Figura 4 mostra o diagrama de circuito causal, onde as variáveis e as direções de causalidade do estudo de caso são apresentadas. Apesar de tratar-se de um sistema de reservatórios, as variáveis de estado relacionadas aos processos hidrológicos são diretas ou indiretamente influenciadas por preferências dos usos da água. Neste caso, as demandas energéticas, de água para abastecimento e de conservação ecológica competem entre si, de maneira a influenciarem as regras de operação, que influenciarão o volume armazenado e os deflúvios, de forma a satisfazerem ou não as mesmas demandas, fechando assim o loop. Este fenômeno tem sido explorado e denominado como *Pendulum Swing* (Elshafei et al., 2014, 2016)

Portanto, é plausível assumir que sistemas transfronteiriços não são estáticos, mas possuem seus estados inter-relacionados com as preferências dos usuários a montante e a jusante, bem como a diplomacia entre eles para estabelecer o conjunto de operações. Desta maneira, tratar estes rios como um caso de otimização pode se revelar impraticável em virtude da variável humana.

Figura 4 – Diagrama de circuito causal



5. CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou, através de simulações de dinâmicas de sistemas, possíveis cenários para o período crítico, entre 2008 e 2018, quando a região sudeste do Brasil observou anos com precipitações muito acima da média e a seca mais intensa já registrada. Os cenários representaram possíveis regras de operação, que entraram em vigor após este período e que, portanto, os impactos só poderiam ser observados através de simulações.

Dentre as demandas mais favorecidas, destacam-se a demanda pelo abastecimento do Sistema Cantareira e pela manutenção dos reservatórios do Rio Paraíba do Sul acima dos mínimos observados nos períodos de seca. Em contrapartida, a série histórica de operações demonstra um maior favorecimento pela geração de energia hidrelétrica.

Por fim, destaca-se que abordagem de dinâmicas de sistema permite transcender a simulação dos processos hidrológicos, de maneira a reproduzir o efeito que as preferências impactam nas operações dos reservatórios, e, em contrapartida, como as operações dos reservatórios atendem e satisfazem as demandas.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. (2013). Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República Federativa do Brasil. *Água e Desenvolvimento Sustentável - Recursos Hídricos Fronteiriços e Transfronteiriços do Brasil*. Brasília, DF, 2013. [acesso em 10 maio 2021]. Disponível em: < http://estatico.cnpq.br/portal/premios/2013/pjc/imagens/noticias/publicacao_agua_sae.pdf >
- CARMO, R.L.; ANAZAWA, T. M. (2017). Hidromegalópole São Paulo-Rio de Janeiro: escassez hídrica, sobreposição de espacialidades e conflitos. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA)*, v. 17, pp. 61-68.
- CHERRY, C., SOUZA, F. A. A., PARK, S., SHRESTHA, A., YANG, L., BARENDRECHT, M., GARCIA, M., YU, D., WEI, J., and TIAN, F. (2020). *Scenario Analysis of Cooperation Dynamics*

- on the Columbia River under Changing Conditions using Socio-Hydrological Modelling*, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-12073.
- ELSHAFEI, Y., SIVAPALAN, M., TONTS, M., HIPSEY, M. R. (2014). A prototype framework for models of sociohydrology: Identification of key feedback loops with application to two Australian case studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(6), pp. 2141–2166.
- ELSHAFEI, Y., TONTS, M., SIVAPALAN, M., HIPSEY, M. R. (2016). Sensitivity of emergent sociohydrologic dynamics to internal system properties and external sociopolitical factors: Implications for water management. *Water Resources Research*, 52, pp. 4944–4966.
- FORMIGA-JOHNSON, R. M.; BRITTO, A. L. (2020). *Water security, metropolitan supply and climate change: some considerations concerning the Rio de Janeiro case*. *Ambiente & Sociedade*. São Paulo, v. 23, pp. 1-22.
- 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* 377, pp. 80-91.
- LOUCKS, D.P., VAN BEEK, E. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Unesco Publishing. Pp. 502-503
- LU, Y., TIAN, F., GUO, L., BORZÌ, I., PATIL, R., WEI, J., LIU, D., WEI, Y., YU, D. J., and SIVAPALAN, M. (2021). *Socio-hydrologic modeling of the dynamics of cooperation in the transboundary Lancang–Mekong River*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, pp. 1883–1903.
- MCCRACKEN, M. and WOLF, A. T. (2019). *Updating the Register of International River Basins of the world*, *Int. J. Water Resour. Dev.*, 35, pp. 732–782.
- MONTANARI, A., et al. (2013). “*Panta Rhei—Everything Flows*”: *Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022*. *Hydrological Sciences Journal*, 58:6, pp. 1256-1275.
- SADOFF, C. W.; GREY, D. (2002). *Beyond the river: the benefits of cooperation on international rivers*. *Water Policy*, 4, pp. 389-403.
- SIVAPALAN, M., & BLÖSCHL, G. (2015). *Time scale interactions and the coevolution of humans and water*. *Water Resources Research*, 51(9), pp. 6988–7022.
- SIVAPALAN, M., SAVENIJE, H. H., BLÖSCHL, G. (2012). *Socio-hydrology: A new science of people and water*. *Hydrol. Process*, 26(8), pp. 1270-1276.
- WEI, J., GHOREISHI, M., SOUZA, F., LU, Y., TIAN, F. (2020). *Socio-hydrological approach to understand conflict and cooperation dynamics in transboundary rivers*, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7148.

AGRADECIMENTOS – Este trabalho foi financiado pelo processo [141697/2019-9] do CNPq e desenvolvido no âmbito da década científica 2013-2022 “*Panta Rhei*”, da Associação Internacional de Ciências Hidrológicas.