

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

IMPACTO DE RESERVATÓRIOS EM VAZÕES SIMULADAS POR MODELO HIDROLÓGICO DA AMÉRICA DO SUL

Otávio Augusto Passaia¹; Vinícius Alencar Siqueira²; João Paulo Lyra Fialho Brêda³; Ayan Santos
Fleischmann⁴ & Rodrigo C. D. Paiva⁵

RESUMO – É importante avaliar o impacto e dinâmica dos reservatórios no ciclo hidrológico. Isto pode ser feito por meio de um modelo hidrológico, como, por exemplo, o Modelo de Grandes Bacias (MGB), modelo conceitual e semi-distribuído, já aplicado para toda a América do Sul. Neste modelo, acrescentaram-se 109 reservatórios de usinas de geração de energia hidrelétrica que fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN) - controlados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) - representados no modelo através de substituição das vazões calculadas pelas observadas nos pontos onde existem os reservatórios. A simulação com vazões substituídas apresentou um Índice de Melhoria no Desempenho (IMD) para a Eficiência de Kling-Gupta (KGE) de 21%, em relação ao modelo com vazões naturalizadas. Quanto ao impacto dos reservatórios no regime de vazões, a diferença média percentual em termos absolutos entre as vazões anuais naturais e substituídas, para toda a América do Sul, é de 1,8%. Para as quatro principais bacias sul-americanas (Amazônica, Tocantins, São Francisco e Bacia do Prata) a diferença é de 0,1%, 16,3%, 18,0% e 6,0 %, respectivamente. Três dos principais rios brasileiros (Tocantins, Paraná e São Francisco) possuem diferenças no RMSE das vazões ao longo do rio de pelo menos 20%.

ABSTRACT– It is important to study and evaluate the impact and dynamics of reservoirs in the hydrological cycle. This can be done through a hydrological model, such as the Large Scale Hydrological Model (MGB, in the Portuguese acronym), a conceptual and semi-distributed hydrological model already applied to the whole South America domain. We added the simulation of 109 reservoirs from the National Interconnected System (SIN) - controlled by the National System Operator (ONS) - represented in the model by replacing the discharge calculated by those observed at the points where the reservoirs exist. The substituted flow simulation presented a mean improvement for Kling-Gupta Efficiency (KGE) of 21%, when compared to the naturalized flow model. Regarding the impact of the reservoirs on the hydrological regime, the average absolute percentage difference between the natural and substituted annual flows for all of South America is 1.8%. For the four main South American basins (Amazon, Tocantins, São Francisco and Prata) the difference is 0.1, 16.3, 18.0 and 6.0%, respectively. Three of the main Brazilian rivers (Tocantins, Paraná and São Francisco) have differences in the RMSE of flows along the river of at least 20%.

Palavras-Chave – Hidrologia, Modelo Hidrológico, Reservatórios.

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Avenida Bento Gonçalves, 9500 - Prédio 44302, +55 51 3308 6686, otavio.passaia@ufrgs.br

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Avenida Bento Gonçalves, 9500 - Prédio 44302, +55 51 3308 6686, vinisiquera@gmail.com

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Avenida Bento Gonçalves, 9500 - Prédio 44302, +55 51 3308 6686, joaopaulolfb@gmail.com

4) Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Avenida Bento Gonçalves, 9500 - Prédio 44302, +55 51 3308 6686, ayan.fleischmann@gmail.com

5) Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Avenida Bento Gonçalves, 9500 - Prédio 44302, +55 51 3308 6686, rodrigo.paiva@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

Compreender e representar da melhor maneira possível os processos de geração e escoamento de água em rios tem sido continuamente objeto de estudo em áreas como a hidráulica e a hidrologia. Nos anos 90, surgiu a primeira geração de modelos hidrológicos em grande escala (LHMs, na sigla em inglês), os quais resolvem o balanço hídrico local de forma consistente em grandes escalas e calculam a descarga do rio propagando o escoamento sobre uma rede fluvial construída a partir de informações topográficas (BIERKENS, 2015). Recentemente os LHMs incorporaram melhor os processos hidrológicos, com melhor base física e melhor representação dos processos.

Apesar de muitos LHMs terem incorporado os impactos humanos no ciclo hidrológico, muitas incertezas ainda persistem nas simulações (DÖLL *et al.*, 2016). Além disso, os modelos de grande escala atuais não levam em conta, apesar de serem relevantes, os conflitos de usos d'água como abastecimento para irrigação, controle de cheias e produção hidrelétrica, e entre usuários a montante e jusante. Esses conflitos têm origens sociais, culturais e econômicas. As decisões que levam a eles são quanto à localização, expansão da capacidade, cultura à plantar, onde e quando etc. E essas decisões estão fora do alcance da modelagem hidrológica.

Um exemplo de ferramenta utilizada para operar reservatórios são as curvas-guia. Elas definem as vazões defluentes em função do volume (ou nível d'água) do reservatório, para cada época do ano. Outra maneira é utilizar modelos desenvolvidos com a técnica da programação dinâmica dual estocástica (PDDE) (CEPEL, 2013), como o Operador Nacional do Sistema (ONS) faz com seus reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN). Entretanto, na modelagem hidrológica de processos os reservatórios são representados de forma diferente.

Somente no final dos anos 90 começou-se a incluir lagos e reservatórios em modelos hidrológicos regionais e globais. Meigh *et al.* (1999) usaram como regra que a vazão de saída seria o armazenamento elevado a potência 1,5. No ano seguinte, Coe (2000) desenvolveu um algoritmo hidrológico global de escoamento (HYDRA) para operação de reservatórios no rio Paraná. Ao desenvolver o WaterGAP, Döll *et al.* (2003) apenas modificaram ligeiramente a abordagem de Meigh *et al.* (1999), fazendo a vazão de saída dos reservatórios ser função também de uma constante (k_r , fixada em 0,01/dia). Posteriormente, foram desenvolvidos algoritmos mais complexos, como o de Haddeland *et al.* (2006) e o de Hanasaki *et al.* (2006). Os últimos desenvolveram um algoritmo para regra de operação para cada reservatório que utilizava os dados globais disponíveis à época, como capacidade do reservatório, o seu propósito, vazão afluente simulada, e demanda de água a jusante.

Os algoritmos de Hanasaki *et al.* (2006) e de Haddeland *et al.* (2006) foram combinados nas simulações feitas com o LPJmL (Rost *et al.*, 2008; Biemans *et al.*, 2011). Wada *et al.* (2014) também utilizam o algoritmo de Hanasaki *et al.* (2006), o que mostra que esse foi um “padrão” até o

surgimento de novas estimativas de regras de operação nos anos seguintes. Zhao *et al.* (2016) integraram um módulo de reservatórios com múltiplos propósitos ao Modelo distribuído de Vegetação, Solo e Hidrologia (DSHVM, na sigla em inglês).

Zajac *et al.* (2017) desenvolveram um algoritmo para calcular a vazão de saída, tentando mimetizar a operação de reservatórios com uso exclusivo de controle de cheias, com base em quatro equações, conforme o nível atual do reservatório. Coerver, Rutten e Van de Giesen (2018) usaram lógica fuzzy e redes neurais artificiais para descrever como os reservatórios são operados. O que há de mais novo e completo no assunto é o artigo de Shin *et al.* (2018). Seu esquema de saída é similar aos esquemas de Hanasaki *et al.* (2006) e Biemans *et al.* (2011), aos quais foram adicionadas novas parametrizações que melhoraram as simulações.

O Modelo de Grandes Bacias (MGB, COLLISCHONN *et al.*, 2007; PONTES *et al.*, 2017) é um modelo hidrológico conceitual e semi-distribuído, desenvolvido para grandes bacias tropicais, já aplicado para todas as principais bacias da América do Sul, e com bons resultados na maior parte delas. Alguns trabalhos exploraram a simulação direta de reservatórios no MGB (COLLISCHONN *et al.*, 2011; FLEISCHMANN *et al.*, 2018), entretanto, sendo estudos pontuais, a modelagem de reservatórios no MGB ainda não está consolidada. O objetivo desse trabalho é avaliar o efeito da substituição de vazões defluentes de reservatórios em uma versão continental do modelo MGB, utilizando como estudo de caso os reservatórios do SIN.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizada a versão continental do MGB para a América do Sul desenvolvida por Siqueira *et al.* (2018). O modelo utiliza a equação inercial de propagação em rios descrita em Pontes *et al.*, (2017), ou seja, com base física suficiente para representar a hidrodinâmica dos rios. Esta versão possui 33.749 minibacias com trechos de rio discretizados a cada 15 km e adota como dado de entrada o *Multi-Source Weighted Ensemble Precipitation* (MSWEP), um produto que combina estimativas de chuva por satélite, reanálise e precipitação observada (Beck *et al.*, 2017). A versão continental do MGB foi manualmente calibrada/validada no período entre 1990 a 2010 com > 600 postos fluviométricos e múltiplas bases de sensoriamento remoto, apresentando eficiências de Kling-Gupta e Nash-Sutcliffe > 0.6, respectivamente, em 70% e 55% dos postos (Siqueira *et al.*, 2018).

O SIN possui cerca de 155 reservatórios, dos quais 150 estão no Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR). Entretanto, já visando uma futura representação destes reservatórios de forma explícita no modelo, não foi considerado aquele que atende a um ou mais dos seguintes critérios: a) construído próximo à data final da simulação; b) que está na mesma minibacia e a montante de outro reservatório, já que só é possível um reservatório por minibacia; c) fora dos limites

físicos do domínio do modelo; e d) com dados insuficientes de defluência observada. A Figura 1 mostra o nome e localização dos reservatórios simulados no modelo.

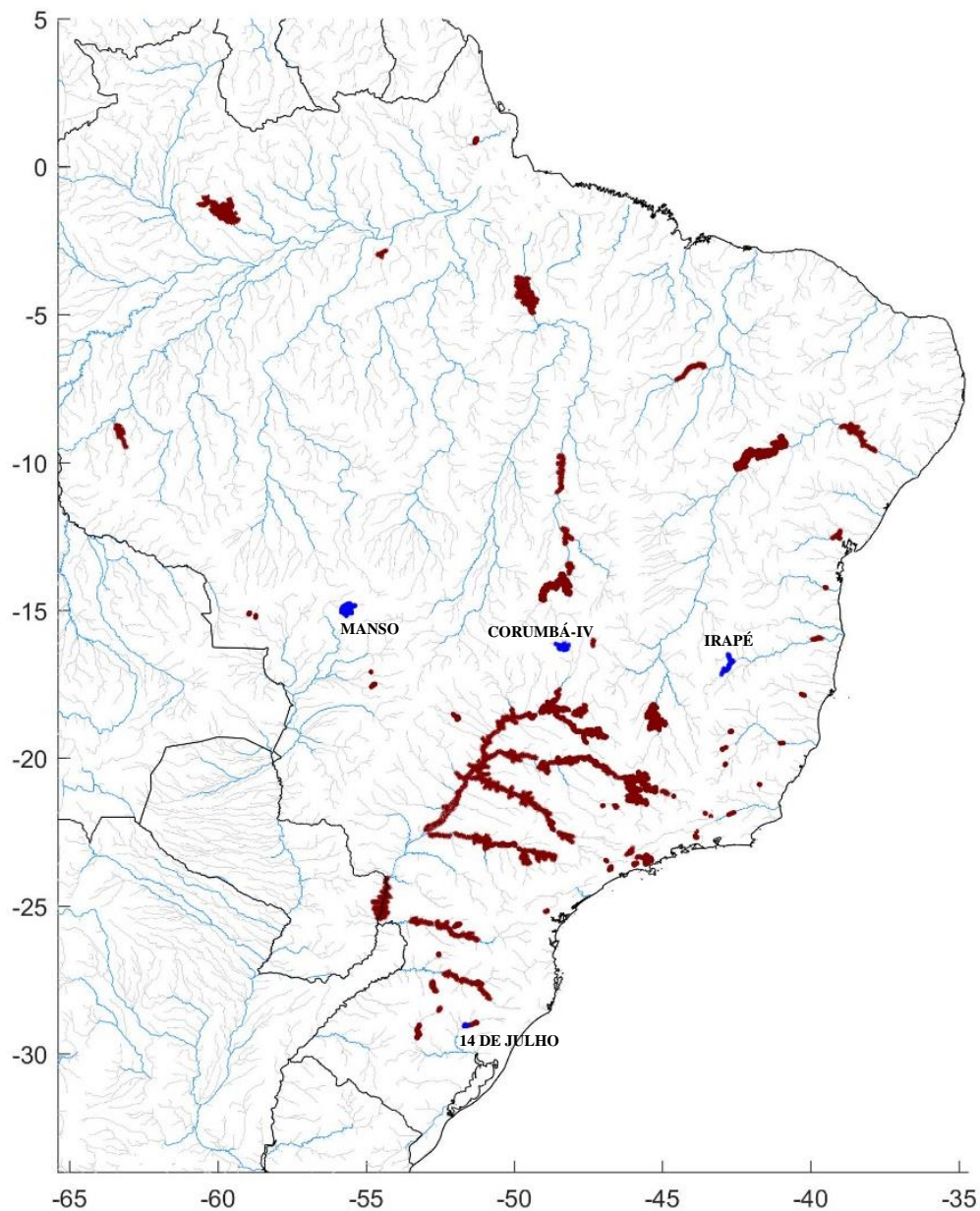


Figura 1 – A área inundada, fora de escala, dos 109 reservatórios simulados. Em azul, os quatro reservatórios cujos resultados serão apresentados.

Uma das maneiras para considerar reservatórios num modelo hidrológico é substituir a vazão defluente observada diretamente no modelo. Para tal, foram utilizados os dados de defluência dos 109 reservatórios disponíveis no SAR. Essa simulação foi chamada de simulação S. Já a simulação com vazões naturais, isto é, com nenhuma alteração no modelo, foi denominada de simulação N.

Foi comparada a simulação S com dados de vazão observada. Para tal, utilizaram-se vazões medidas *in situ* da rede de monitoramento da Agência Nacional de Águas (ANA). Foram geradas séries temporais de vazões, comparando o cenário natural e o com reservatórios e também mapas de impacto nas vazões da rede de drenagem.

Utilizaram-se os índices de eficiência de Nash-Suttcliffe (NSE) e de Kling-Gupta (KGE, GUPTA *et al.*, 2009), correlação (r) e também o erro de volume. Outra métrica interessante utilizada por Zajac *et al.* (2017) é o que eles chamaram de skill score, traduzido aqui como “índice de melhoria de desempenho (IMD)”. Um IMD positivo significa que a performance do modelo com reservatórios melhorou, enquanto que um valor negativo indica piora. É apresentado na equação 2 o exemplo para o KGE, mas pode ser aplicada também para qualquer outro índice de desempenho. O KGE ótimo é igual a 1.

$$IMD_{KGE} = \frac{KGE_{res} - KGE_{nat}}{KGE_{ótimo} - KGE_{nat}} \quad (2)$$

O IMD para o KGE (IMD_{KGE}) é dado pelo KGE da simulação de reservatórios (KGE_{res}) menos o KGE da simulação com vazões naturalizadas (KGE_{nat}), dividido pelo KGE ótimo ($KGE_{ótimo} = 1$) menos o KGE_{nat} .

Foi calculada a média da diferença percentual absoluta entre as vazões anuais da simulação com vazões naturalizadas (N) e a simulação com vazões substituídas (S) para as principais bacias da América do Sul (Amazônica, Tocantins, São Francisco e Paraná). Outra maneira para analisar a mudança nas vazões é através de diversas métricas, como a raiz do erro médio quadrático percentual absoluto (RMSE), a correlação (r), o desvio padrão, e as diferenças absolutas na Q_{10} , Q_{90} e $Q_{média}$, entre a simulação S e a N. Os dois primeiros anos não foram contabilizados no cálculo de estatísticas e resultados, por serem considerados o aquecimento do modelo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Simulação com vazões substituídas

A Figura 2 apresenta uma avaliação espacial do IMD para ambas eficiências de KGE e NSE. Para a maioria das estações fluviométricas, o desempenho melhorou. Os lugares onde houve piora dos índices são o litoral sudeste e extremo oeste do Brasil (Paraíba do Sul e Alto Paraguai). Isso pode ser causado por uma imprecisão nos dados de entrada, ou também na localização do reservatório, sempre posicionado no exutório de uma célula do modelo. Além disso, como o modelo MGB da América do Sul foi calibrado para a situação sem reservatórios e, por mais que se tenha tomado o cuidado de utilizar vazões naturalizadas e postos sem influência de reservatórios, os parâmetros calibrados podem ter sido ajustados no cenário natural com o efeito dos reservatórios no escoamento. Ou seja, possivelmente o efeito dos reservatórios na simulação foi compensado nos parâmetros do modelo. Ao inserir o reservatório, seria necessário recalibrar o modelo, para retirar essa compensação. Esse é o principal provável motivo para termos resultados inferiores com vazões substituídas.

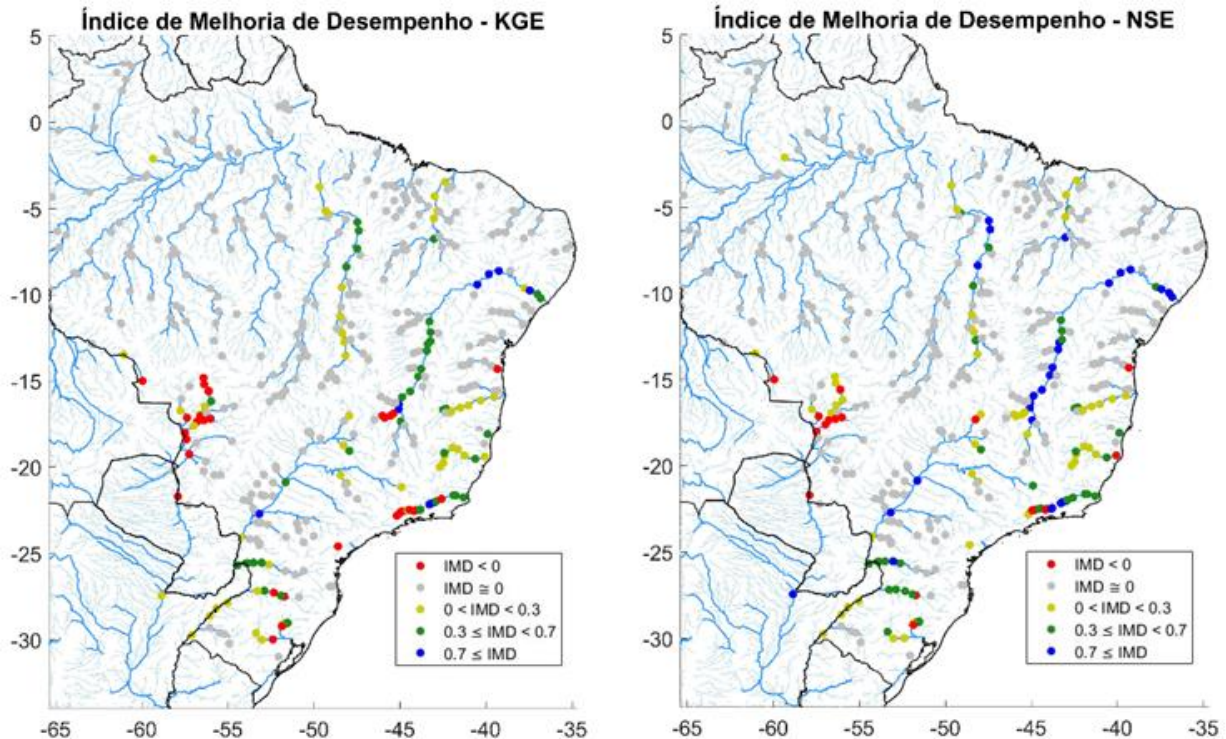


Figura 2 - Índice de Melhoria de Desempenho para o KGE, na simulação com vazões substituídas (S). Linhas pretas são as fronteiras dos países. Rede de drenagem mais espessa com área > 30 000 km². Rede de drenagem menos espessa com área > 8000 km².

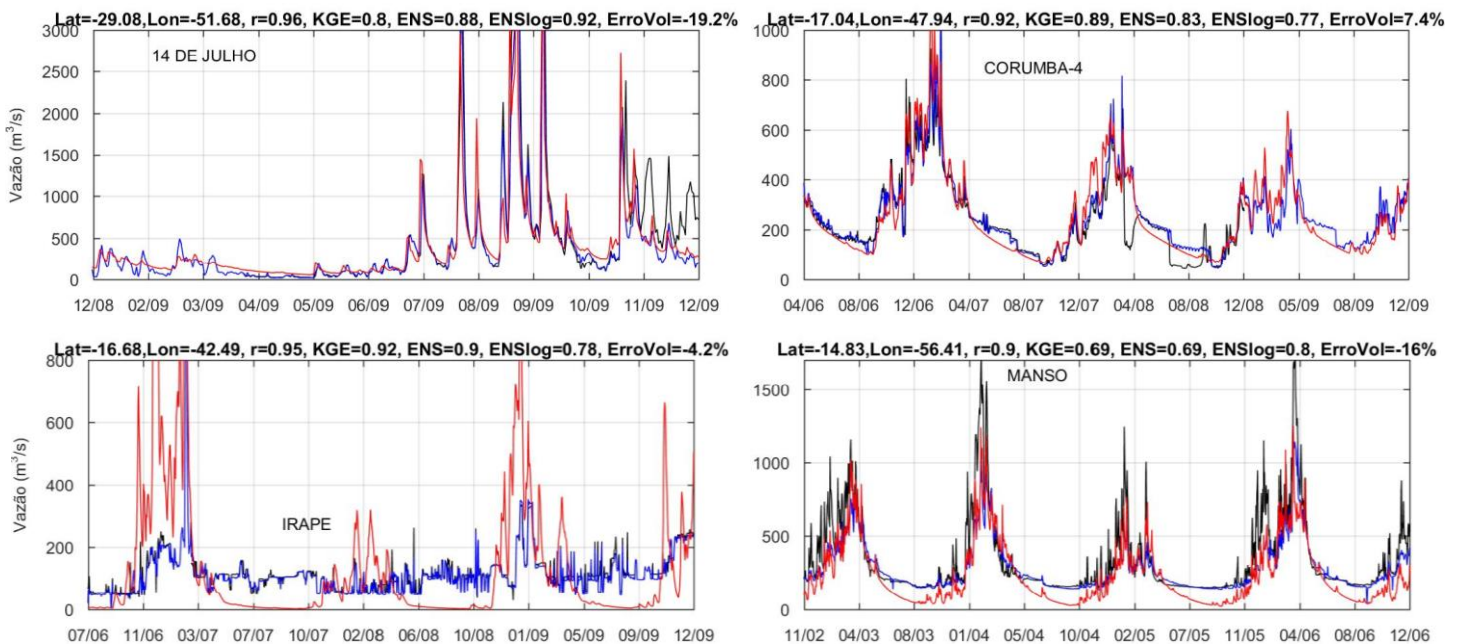


Figura 3 - Hidrogramas das simulações com vazões substituídas (S, em azul) e vazões naturalizadas (N, em vermelho) do modelo hidrológico original da América do Sul. Em preto a vazão observada, das estações da ANA. As estatísticas no título de cada imagem correspondem à simulação com vazões substituídas, para ao período no qual o reservatório foi simulado.

Quatro reservatórios foram escolhidos para apresentar os resultados em mais detalhes (Figura 1). Para tal, hidrogramas de saída a jusante (Figura 3) foram comparados com a simulação original, de vazões naturalizadas. O reservatório de Irapé apresentou melhora significativa no hidrograma, enquanto, para os outros reservatórios apresentados, o modelo com vazões naturalizadas já

representava de maneira satisfatória as vazões. A UHE 14 de Julho é operada a fio d'água, o que pouco altera o regime de vazões à jusante. Percebe-se a grande melhoria principalmente na vazão de base a jusante do reservatório de Manso, a qual era subestimada no modelo com vazões naturalizadas.

3.2 Análise da diferença no regime de vazões entre a simulação naturalizada e com reservatórios

Para esta avaliação, foi calculada a média da diferença percentual absoluta entre as vazões médias anuais da simulação com vazões naturalizadas (N) e a simulação com vazões substituídas (S) para as principais bacias da América do Sul (Tabela 1). A bacia Amazônica é pouco impactada pela substituição dos reservatórios, com uma diferença média de 0,1 %. As bacias do Tocantins e do São Francisco são bastante impactadas pela substituição, com diferenças de 16,3 e 18%, respectivamente. A bacia do Paraná possui 6% de diferença, também sofrendo bastante influência com a substituição de reservatórios no modelo. É notável que a simulação N sempre gera resultados de vazões maiores do que a S.

Tabela 1 - Média da diferença na vazão anual no exutório das principais bacias brasileiras

Bacia	América do Sul	Amazonas	Tocantins	São Francisco	Paraná
Média da diferença na vazão anual	1.8 %	0.1 %	16.3 %	18.0 %	6.0 %

Avaliou-se a mudança nas vazões através de diversas métricas, como o RMSE, e as diferenças absolutas na Q_{10} , Q_{90} e $Q_{média}$, entre a simulação S e a N (Figura 4 a, b, c, e d, respectivamente). O RMSE ultrapassou 80% na parte final do São Francisco, e ficou entre 20 e 40% sua na metade a montante. O rio Paraná apresenta RMSE superior à 60 % na sua porção de montante, RMSE entre 20 e 40% até atravessar a fronteira brasileira, e então menor de 20% até chegar à sua foz. A bacia amazônica é pouco afetada pela substituição. Em geral, a diferença na Q_{10} e na vazão média foi, sua maioria, menor do que 20%, enquanto a diferença na Q_{90} foi maior para o rio Paraná e seus tributários (de 20 a 40%).

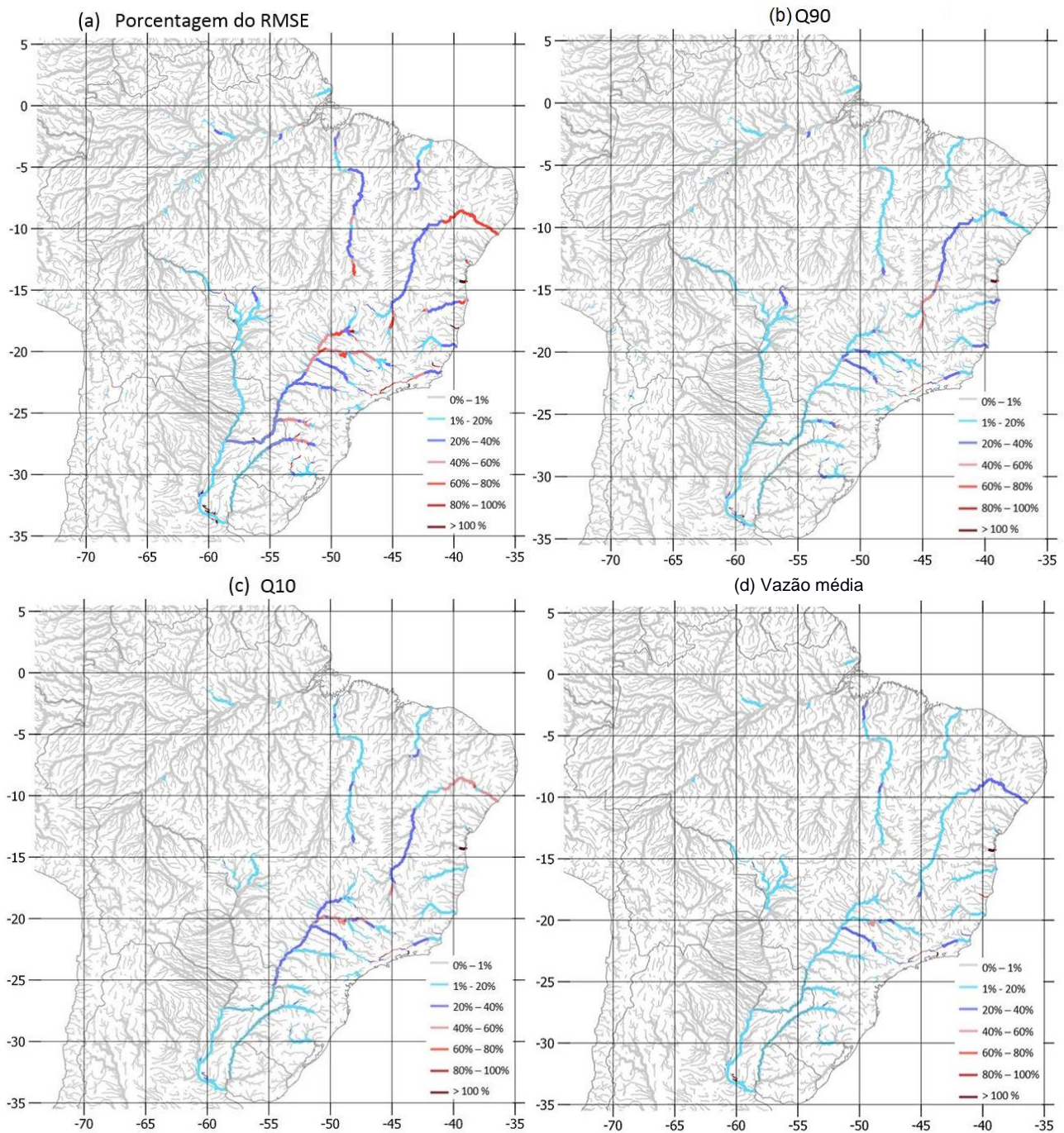


Figura 4 - Mapas mostrando a alteração no regime de vazões nos trechos de rios devido à presença de reservatórios. (Entre as vazões das simulações S e N foram calculados o RMSE; para a Q10, Qmédia e Q90 foi calculada a diferença entre as vazões; em cinza claro a fronteira entre os países)

4 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da substituição de vazões de reservatórios em um modelo hidrológico de escala continental. Para tal, foi utilizado o Modelo Hidrológico da América do Sul (SIQUEIRA *et al.*, 2018) para simular 109 reservatórios do SIN através de vazões substituídas.

A simulação com vazões substituídas (simulação S) mostrou, em geral, uma melhora em relação ao modelo original da América do Sul com vazões naturalizadas (simulação N), apresentando

uma melhora de 21% no KGE. Ambas possuem capacidade para representar vazões de maneira satisfatória (Mediana do KGE = 0.68).

O impacto no regime de vazões foi demonstrado através de mapas, e também medido diretamente. A diferença média percentual em termos absolutos entre as vazões anuais naturais e substituídas, para toda a América do Sul, é de 1,8%. Para as quatro principais bacias sul-americanas (Amazônica, Tocantins, São Francisco e Bacia do Prata) a diferença é de 0,1%, 16,3%, 18,0% e 6,0 %, respectivamente. Três dos principais rios brasileiros (Tocantins, Paraná e São Francisco) possuem diferenças no RMSE das vazões ao longo do rio de pelo menos 20%. Os resultados demonstram a necessidade de desenvolvimento de modelo capaz de representar ações antrópicas sobre o regime de vazões, como a operação de reservatórios ou mesmo a retirada de águas para diversos usos. Além disso, a base de dados desenvolvida que integra vazões simuladas naturais e vazões substituídas pode ser bastante útil para gestores na área de recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS – O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil. Os autores também agradecem ao IPH, UFRGS e CAPES pelos auxílios em dinheiro, estrutura física, equipamentos, passagens e diárias.

REFERÊNCIAS

- BECK, H. E. *et al.* (2017) “*MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 1, pp. 589-615.
- BIEMANS, H. *et al.* (2011) “*Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century*”. *Water Resources Research*, v. 47, n. 3.
- BIERKENS, M. F. P. (2015) “*Global hydrology 2015: State, trends, and directions*”. *Water Resources Research*, v. 51, n. 7, p. 4923-4947.
- COE, M. T. (2000) “*Modeling terrestrial hydrological systems at the continental scale: Testing the accuracy of an atmospheric GCM*”. *Journal of Climate*, v. 13, n. 4, p. 686-704.
- COERVER, H. M.; RUTTEN, M. M.; VAN DE GIESEN, N. C. (2018) “*Deduction of reservoir operating rules for application in global hydrological models*”. *Hydrology & Earth System Sciences*, v. 22, n. 1.
- CEPEL (2013) “*Projeto Newave: Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes – Manual do Usuário – Versão 17.5.3*”, Rio de Janeiro.
- COLLISCHONN, W. *et al.* (2007) “*The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling*”. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, p. 878-895.
- COLLISCHONN, B. *et al.* (2011) “*Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: Caso do Rio Quaraí-RS*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 4, p. 119-134.

- DÖLL, P.; KASPAR, F.; LEHNER, B. (2003) “*A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation*”. *Journal of Hydrology*, v. 270, n. 1-2, p. 105-134.
- DÖLL, P. *et al.* (2016) “*Modelling freshwater resources at the global scale: Challenges and prospects*”. *Surveys in Geophysics*, v. 37, n. 2, p. 195-221.
- FLEISCHMANN, A. S. *et al.* (2018) “*Integrando reservatórios e planícies de inundação para a simulação de cheias em grandes bacias: aplicação na bacia do rio Itajaí-açu*”. *Anais do I Encontro Nacional de Desastres (END)*.
- GUPTA, Hoshin V. *et al.* (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.
- HADDELAND, I.; SKAUGEN, T.; LETTENMAIER, D. P. (2006) “*Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes*”. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 8.
- HANASAKI, N.; KANAE, S.; OKI, T. (2006) “*A reservoir operation scheme for global river routing models*”. *Journal of Hydrology*, v. 327, n. 1-2, p. 22-41.
- MEIGH, J. R.; MCKENZIE, A. A.; SENE, K. J. (1999) “*A grid-based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa*”. *Water Resources Management*, v. 13, n. 2, p. 85-115.
- O'LOUGHLIN, F. E. *et al.* (2016) “*A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product*”. *Remote Sensing of Environment*, v. 182, p. 49-59.
- PONTES, P. R. M. *et al.* (2017) “*MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS*”. *Environmental Modelling & Software*, v. 94, p. 1-20.
- ROST, S. *et al.* (2008) “*Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system*”. *Water Resources Research*, v. 44, n. 9.
- SHIN, S.; POKHREL, Y.; e MIGUEZ-MACHO, G. (2018) “*High Resolution Modeling of Reservoir Release and Storage Dynamics at the Continental Scale*”. *Water Resources Research*.
- SIQUEIRA, V. A. *et al.* (2018) “*Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. Hydrology and Earth System Sciences*”. *Göttingen: Copernicus*. Vol. 22, n. 9, p. 4815-4842.
- WADA, Y.; WISSER, D.; BIERKENS, M. F. P. (2014) “*Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources*”. *Earth System Dynamics*, v. 5, n. 1, p. 15.
- ZAJAC, Z. *et al.* (2017) “*The impact of lake and reservoir parameterization on global streamflow simulation*”. *Journal of hydrology*, v. 548, p. 552-568.
- ZHAO, G. *et al.* (2016) “*Integrating a reservoir regulation scheme into a spatially distributed hydrological model*”. *Advances in water resources*, v. 98, p. 16-31.