CALIBRAÇÃO LOCAL E REGIONAL DE UM MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO EM ESCALA NACIONAL: APLICAÇÃO ÀS BACIAS DO CAMELS-BR

Felipe M. Pineroli [1]; Vinicius B. P. Chagas[2]; Ralf Merz [3]; Pedro L. B. Chaffe [4]

Palavras-Chave –- modelagem hidrológica distribuída; regionalização de parâmetros; SALTO

INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos distribuídos são amplamente utilizados para simular variáveis hidrológicas em grandes domínios, apoiando aplicações como previsão de vazões, avaliação de recursos hídricos e estudos de mudanças climáticas. Nessas aplicações, estimativa de parâmetros em regiões não monitoradas depende de técnicas de regionalização, que transferem informações de bacias calibradas para o restante do domínio. O desempenho dessa transferência depende da capacidade do modelo e da regionalização em representar a diversidade hidroclimática da região. Modelos desenvolvidos e avaliados em contextos hidroclimáticos específicos podem apresentar limitações quando aplicados ao território brasileiro, particularmente na representação de regimes hidrológicos locais (e.g., rios intermitentes do semiárido; grandes bacias tropicais), além de reduzir a eficácia da regionalização quando baseada em descritores fisiográficos ajustados a outras paisagens.

Neste trabalho, aplicamos o modelo SALTO (Merz *et al*., 2020) às 897 bacias do conjunto CAMELS-BR (Chagas *et al*., 2020) para avaliar o desempenho da estrutura do modelo e da regionalização de parâmetros em escala nacional. Adicionalmente, avaliamos a estabilidade numérica do esquema de integração, verificando a ocorrência de artefatos numéricos que possam comprometer a interpretação das simulações.

METODOLOGIA

O SALTO (*Same Like The Others*; Merz *et al*., 2020; 2022) é um modelo conceitual distribuído do tipo *bucket*, com estrutura semelhante à de outros modelos de larga-escala como o HBV. A dinâmica da umidade do solo é representada por relações não lineares entre armazenamento, geração de escoamento e recarga, e a propagação da água por um encadeamento de reservatórios (escoamento superficial rápido, zona vadosa, fluxo lateral, aquífero e rio). Cada bacia é calibrada individualmente contra a vazão observada com o algoritmo DDS (*Dynamically Dimensioned Search*; Tolson & Shoemaker, 2007), usando o KGE (*Kling-Gupta efficiency*) como função-objetivo. Os parâmetros são regionalizados pelo método PASS (*PArameter Set Shuffling,* Merz *et al*., 2020), que infere relações entre parâmetros e descritores fisiográficos das bacias por aprendizado de máquina, a partir dos conjuntos de parâmetros calibrados localmente, estimando parâmetros regionalmente consistentes para o modelo distribuído. As simulações cobrem as 897 bacias do CAMELS-BR (Chagas *et al*.,

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, felipe.pineroli55@gmail.com
2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina,
3) Department Catchment Hydrology, UFZ Helmholtz Centre for Environmental Research, ralf.merz@ufz.de
4) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, pedro.chaffe@ufsc.br

2020) com forçantes diárias de precipitação, evapotranspiração potencial e temperatura entre 2000 e 2018; a calibração local usa 2005–2010 e a validação, a janela comum 2011–2013 (810 bacias com pelo menos 90% de observações).

Como controle de qualidade da regionalização, verifica-se a estabilidade numérica dos reservatórios de propagação (descarga Q = S^β/K), integrados por Euler explícito com passo diário. Em modelos conceituais, esquemas explícitos de passo fixo podem gerar erros numéricos que superam os erros da própria estrutura do modelo, sobretudo sob precipitação intensa (Kavetski & Clark, 2010; La Follette *et al*., 2021). A análise linear desse esquema indica que a solução oscila entre passos consecutivos quando $\Delta t \cdot |dQ/dS| > 1$; para a descarga $Q = S^{\beta}/K$, isso corresponde ao número adimensional $C = \beta \cdot Q/S^*$, em que S^* é o armazenamento após a entrada do dia. Para $C > 1$ a solução tende a oscilar, embora a limitação $Q \leq S^*$ preserve o balanço de massa. Aqui, o índice é calculado para todos os reservatórios, células e passos das simulações nacionais.

RESULTADOS

Calibrado localmente, o SALTO representa adequadamente a hidrologia das bacias brasileiras: na validação (2011–2013), o KGE tem mediana 0,69 e terceiro quartil 0,79, com bom desempenho distribuído por praticamente todo o território e pelos diferentes regimes hidroclimáticos do país (Figura 1a). Esse resultado indica que a estrutura do modelo é adequada ao domínio e estabelece o teto de desempenho alcançável pela regionalização.

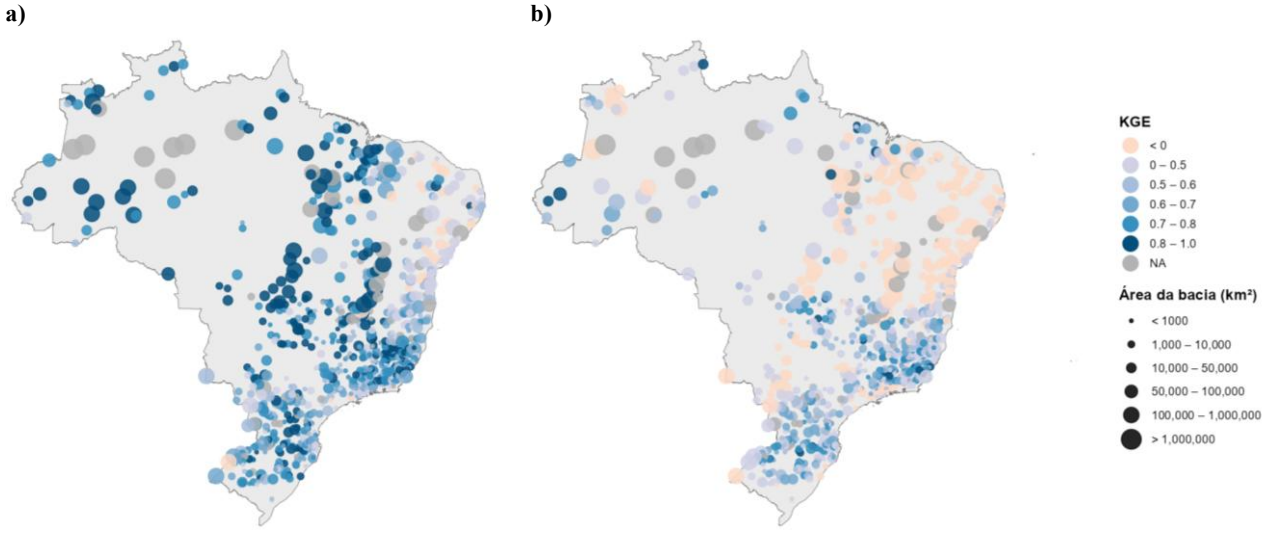


Figura 1. *Desempenho do modelo SALTO nas 897 bacias do CAMELS-BR, medido pelo KGE na validação (2011–2013):* ***(a)*** *calibração local e* ***(b)*** *regionalização pelo método PASS. A cor do ponto indica a classe de KGE e o tamanho a área da bacia.*

A regionalização pelo PASS preserva desempenho satisfatório em parcela expressiva do domínio, com mediana de 0,43 e KGE ≥ 0,5 na validação em 353 das 810 bacias. A diferença em relação à calibração local é sistemática (aproximadamente 0,25 na mediana do KGE) e o desempenho da regionalização particularmente baixo no semiárido nordestino e em porções da Amazônia (Figura 1b). A perda de desempenho entre a calibração local e a regionalização indica que parte da informação obtida na calibração individual não é reproduzida a partir dos descritores fisiográficos das bacias.

A Figura 2 ilustra, para uma bacia representativa (Santana de Patos, MG; 2.783 km²), a proximidade entre vazão observada e simulada nos períodos de calibração e validação, tanto na calibração local quanto na regionalizada (KGE ≥ 0,80 em ambas).

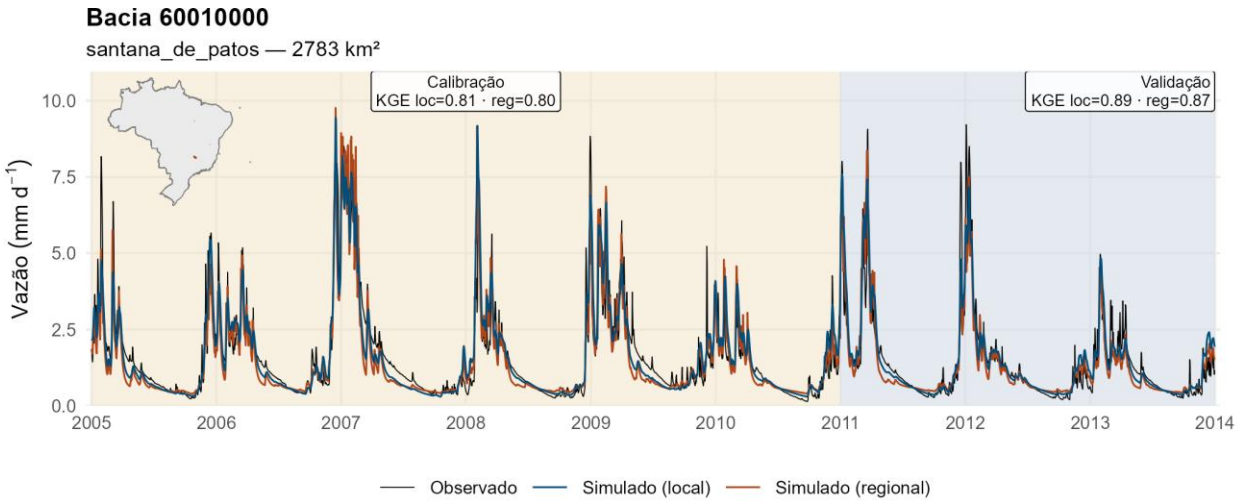


Figura 2. *Hidrogramas observado e simulado para a bacia de Santana de Patos (código 60010000; 2.783 km²), nos períodos de calibração (2005–2010) e validação (2011–2013), para as simulações com calibração local e regionalizada.*

A verificação de estabilidade numérica complementa a avaliação de desempenho. No domínio nacional (13.629 células), 10,0% das células apresentam C > 1 no reservatório de rio em mais de 10% dos dias simulados, concentradas em regiões coerentes: o semiárido nordestino, corredor do rio Doce e trechos do São Francisco e do baixo Amazonas (Figura 3a). A condição é exclusiva ao reservatório que representa a propagação no rio, e a limitação de vazão do modelo preserva o balanço de massa nesses casos. A análise temporal em 483 bacias mostra que o C médio das células sensíveis cruza o limiar imediatamente após eventos de precipitação intensa (percentil 95), com pico cerca de dois dias após o evento (Figura 3b), em consonância com o mecanismo descrito por La Follette *et al*. (2021). O diagnóstico permite identificar as regiões e condições em que as simulações requerem cautela e orienta refinamentos na regionalização e no esquema de integração.

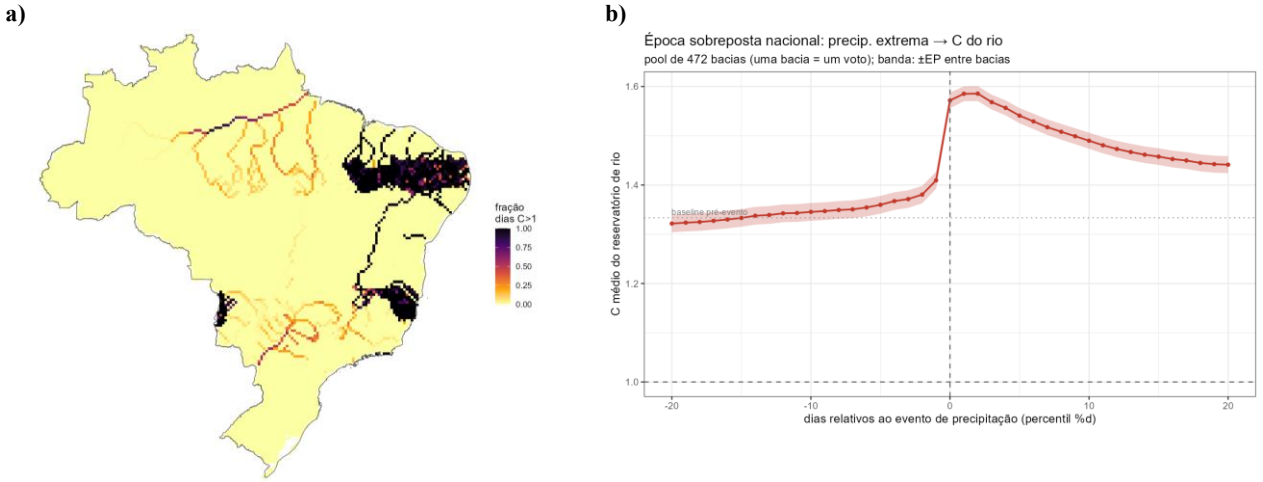


Figura 3. *Verificação de estabilidade numérica:* ***(a)*** *fração de dias com número de estabilidade C > 1 no reservatório de rio, por célula, no domínio nacional (13.629 células);* ***(b)*** *evolução média do C nas células sensíveis ao redor de eventos de precipitação intensa (percentil 95), considerando eventos de chuva em 483 bacias e o dia 0 correspondendo ao evento.*

CONCLUSÕES

O modelo SALTO apresenta bom desempenho quando calibrado localmente nas bacias do CAMELS-BR, indicando que sua estrutura é adequada para representar a diversidade hidrológica do território brasileiro. A regionalização de parâmetros mantém desempenho satisfatório em grande parte das bacias, embora a diferença em relação à calibração local evidencie potencial para aprimorar a transferência de parâmetros. A análise de estabilidade numérica identifica regiões suscetíveis à ocorrência de oscilações do esquema de integração, fornecendo um diagnóstico que pode orientar futuros aperfeiçoamentos do modelo. Os resultados demonstram o potencial do SALTO para aplicações hidrológicas em escala nacional e orientam o desenvolvimento das próximas versões do modelo.

REFERÊNCIAS

Chagas, V. B. P., Chaffe, P. L. B., Addor, N., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., & Siqueira, V. A. (2020). *"CAMELS-BR: hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil". Earth System Science Data*, 12(3), 2075–2096. https://doi.org/10.5194/essd-12-2075-2020

Kavetski, D., & Clark, M. P. (2010). *"Ancient numerical daemons of conceptual hydrological modeling: 2. Impact of time stepping schemes on model analysis and prediction". Water Resources Research*, 46(10), W10511. https://doi.org/10.1029/2009WR008896

La Follette, P. T., Teuling, A. J., Addor, N., Clark, M., Jansen, K., & Melsen, L. A. (2021). *"Numerical daemons of hydrological models are summoned by extreme precipitation." Hydrology and Earth System Sciences*, 25(10), 5425–5446. https://doi.org/10.5194/hess-25-5425-2021

Merz, R., Tarasova, L., & Basso, S. (2020). "*Parameter's controls of distributed catchment models—How much information is in conventional catchment descriptors?" Water Resources Research*, 56(2), e2019WR026008. https://doi.org/10.1029/2019WR026008

Merz, R., Miniussi, A., Basso, S., Petersen, K.-J., & Tarasova, L. (2022). "*More complex is not necessarily better in large-scale hydrological modeling: A model complexity experiment across the contiguous United States". Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(8), E1947–E1967. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0284.1

Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2007). *"Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration." Water Resources Research*, 43(1), W01413. https://doi.org/10.1029/2005WR004723

AGRADECIMENTOS

O trabalho contou com o apoio financeiro da CAPES, do CNPq e do Serviço Geológico do Brasil.