

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

SSP-CABra: um novo conjunto de projeções de vazão para o Brasil

André Almagro¹; Paulo Tarso S. de Oliveira¹ & André Simões Ballarin²

Abstract: In this study we present the Streamflow Scenarios Projections for Brazilian Catchments (SSP-CABra), a comprehensive dataset that provides daily, annual, and long-term historical and future streamflow simulations for 735 Brazilian catchments. These simulations were generated using five hydrological models of varying complexity and temporal resolution, forced by ten bias-corrected climate projections from the Climate Change Dataset for Brazil (CLIMBra). All simulations cover both the historical (1980–2013) and future (2015–2100) periods, forced by two different CMIP6 pathways: SSP2-4.5 and SSP5-8.5, representing intermediate and pessimistic future scenarios, respectively. We believe SSP-CABra fills a critical gap in large-scale hydrological modeling in Brazil, advancing the understanding of streamflow dynamics and supporting water resource and climate adaptation strategies in the context of global warming.

Resumo: Neste estudo, apresentamos o *Streamflow Scenarios Projections for Brazilian Catchments* (SSP-CABra), um conjunto de dados que fornece simulações histórica e futura de vazão diária, anual e de longo prazo para 735 bacias hidrográficas brasileiras. As simulações foram geradas através da utilização de cinco modelos hidrológicos de complexidade e resolução temporal variadas, forçados por dez projeções climáticas com correção de viés do *Climate Change Dataset for Brazil* (CLIMBra). As simulações abrangem os períodos histórico (1980–2013) e futuro (2015–2100), forçados por duas diferentes trajetórias futuras do CMIP6: SSP2-4.5 e SSP5-8.5, que representam cenários futuros intermediário e pessimista, respectivamente. Espera-se que essa base de dados preencha uma lacuna crítica na modelagem hidrológica em larga escala no Brasil, contribuindo para uma melhor compreensão das dinâmicas hidrológicas bem como subsidiando estratégias de gestão de recursos hídricos e adaptação às mudanças climáticas no contexto do aquecimento global.

Palavras-Chave – modelagem hidrológica, aprendizado de máquina, CMIP6.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm intensificado eventos hidrológicos extremos — como secas e inundações —, trazendo impactos significativos para a gestão dos recursos hídricos em escala global (Ficklin *et al.*, 2022). No Brasil, o cenário não é diferente. Estudos recentes indicam aumento tanto na frequência quanto na intensidade de eventos extremos, como chuvas intensas e secas meteorológicas (Ballarin *et al.*, 2024a, 2024b), que, somados à crescente demanda por água (ANA, 2019), tendem a intensificar os desafios para a gestão integrada dos recursos hídricos nacionais (Ballarin *et al.*, 2023a). Exemplos

¹⁾ Afiliação: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande, MS, Brasil; andre.almagro@ufms.br, paulo.t.oliveira@ufms.br

²⁾ Afiliação: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, CxP. 359, São Carlos-SP, 13566-590. Email: andre.ballarin@usp.br

recentes ilustram essa realidade: as inundações no Rio Grande do Sul em 2024 e a seca recorde na Amazônia em 2023 afetaram milhões de pessoas, causando prejuízos sociais e econômicos substanciais (Collischonn *et al.*, 2024; Espinoza *et al.*, 2024). Diante desse contexto, compreender os impactos potenciais das mudanças climáticas sobre as dinâmicas hidrológicas torna-se fundamental para aprimorar estratégias de gestão e desenvolver medidas de adaptação mais eficazes.

Uma das abordagens mais utilizadas para estimar a resposta dos sistemas hidrológicos às mudanças climáticas é o uso de modelos hidrológicos forçados por projeções climáticas. Os resultados dessa abordagem, no entanto, podem variar consideravelmente de acordo com a complexidade do modelo adotado, a escala espacial e temporal da análise e a qualidade e representatividade das projeções climáticas utilizadas (Siqueira *et al.*, 2021; Sone *et al.*, 2022). Dada a diversidade de formulações e pressupostos entre modelos, torna-se essencial uma análise comparativa e abrangente que permita identificar incertezas e avaliar a validade e precisão das simulações hidrológicas. No entanto, até o momento, não há um conjunto de dados que integre múltiplos modelos hidrológicos aplicados a cenários climáticos diversos no Brasil — um país caracterizado por grande variabilidade climática, geomorfológica e hidrológica (Almagro *et al.*, 2024).

Para preencher essa lacuna, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o *Streamflow Scenarios Projections for Brazilian Catchments* (SSP-CABra), um novo conjunto de dados que fornece projeções de vazão em diferentes escalas temporais (diária, anual e de longo-termo) para 735 bacias hidrográficas brasileiras presentes na base de dados CABra (*Catchments Attributes for Brazil*; Almagro *et al.*, 2021). Utilizando cinco modelos hidrológicos de complexidades variadas e projeções com correção de viés de dez modelos climáticos do CLIMBra (*Climate Change Dataset for Brazil*; Ballarin *et al.*, 2023b), o SSP-CABra oferece simulações históricas (1980-2013) e futuras (2015-2100) de vazão forçadas por dois cenários climáticos do CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project – Phase 6*). Os cenários utilizados são o SSP2-4.5, que representa uma trajetória intermediária de desenvolvimento com mitigação moderada de emissões de gases de efeito estufa, e o SSP5-8.5, que reflete um cenário de altas emissões associado a um futuro intensivo em combustíveis fósseis. Espera-se que esta base de dados contribua para a formulação de estratégias robustas de gestão e adaptação, apoiando pesquisadores, tomadores de decisão e gestores no enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos no Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

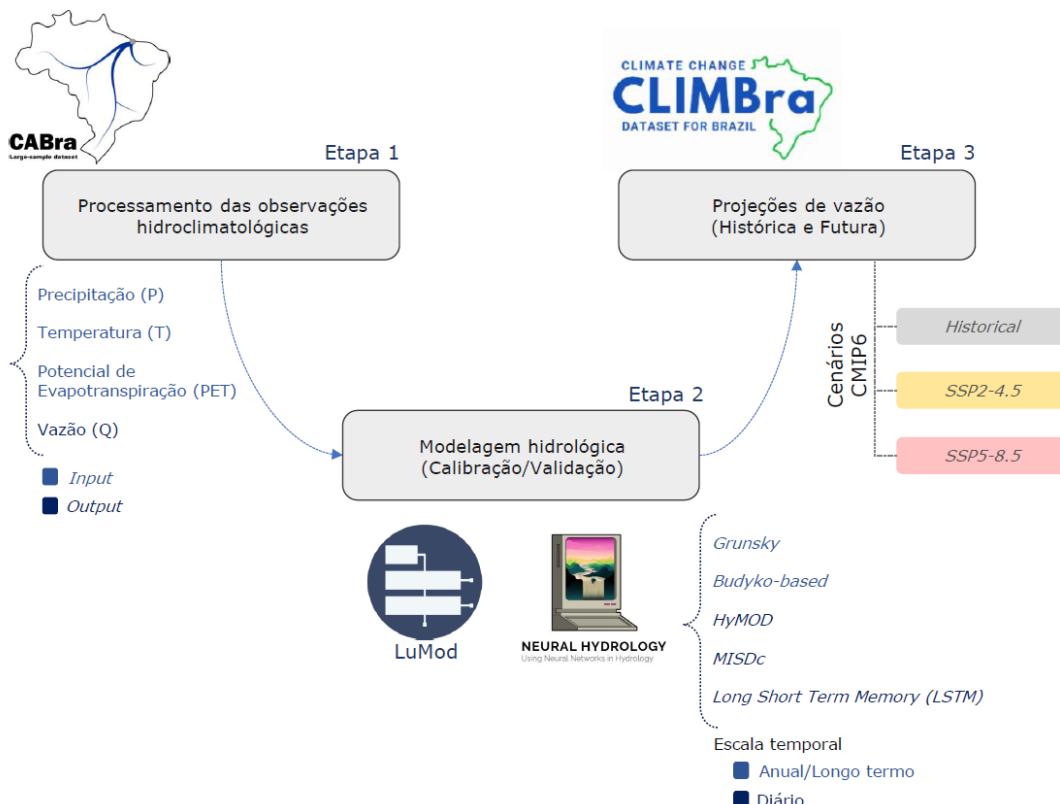
2.1. Dados de entrada e fluxo de trabalho

Para simular séries temporais diárias de vazão ao longo do século XXI, foram utilizadas duas bases de dados desenvolvidas recentemente: CABra e CLIMBra. A base de dados CABra disponibiliza informações diversas, como atributos relacionados à topografia, uso e ocupação do solo e ao clima, para 735 bacias hidrográficas do território nacional. A base inclui, adicionalmente, dados diários de variáveis climáticas e hidrológicas que foram utilizados para calibrar e validar os modelos hidrológicos adotados neste estudo. Uma breve descrição do fluxo de trabalho adotado para o desenvolvimento da base de dados SSP-CABra pode ser encontrada na Figura 1.

Após obtenção dos dados para cada uma das bacias avaliadas e calibração dos modelos hidrológicos considerando os dados observados, foram geradas simulações de vazão de diferentes escalas temporais (diária a longo-termo, a depender da complexidade do modelo hidrológico) para os períodos histórico (1980-2013) e futuro (2015-2100, cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5) com base nos dados presentes no CLIMBra. Essa base de dados oferece projeções climáticas diárias com correção de viés para todo território brasileiro em escala de malha e de bacia, considerando simulações

realizadas por dez modelos climáticos presentes no contexto do CMIP6. As variáveis climáticas disponibilizadas e utilizadas no presente estudo são: precipitação, temperatura e potencial de evapotranspiração, calculado utilizando o método de Penman Monteith.

Figura 1 – Etapas principais para o desenvolvimento das simulações de vazão históricas e futuras nas bacias brasileiras: (1) aquisição e pré-processamento dos dados climáticos e hidrológicos, (2) calibração e validação dos modelos hidrológicos com base em observações, e (3) projeções de vazão forçadas por simulações climáticas com correção de viés.



2.2. Modelos hidrológicos

Para gerar as projeções de vazão em cada uma das 735 bacias, foram utilizados cinco modelos hidrológicos com diferentes níveis de complexidade — desde formulações conceituais simples até abordagens baseadas em aprendizado de máquina — forçados pelas simulações climáticas presentes na base CLIMBra e descritas acima. A seguir, é apresentado um breve resumo dos modelos utilizados.

Budyko-based. Este modelo se baseia na estrutura teórica delineada por Budyko (1974) e L'vovich (1979), que descreve o balanço hídrico de longo termo como uma função da razão entre demanda atmosférica e oferta de água, expressa em termos do índice de aridez (ϕ). A versão utilizada neste estudo emprega formas funcionais originalmente propostas por Meira Neto *et al.* (2020) e calibradas para o contexto nacional utilizando os dados do CABra (Ballarin *et al.*, 2022). Dada a simplicidade da abordagem, as simulações de vazão geradas por esse método só estão disponíveis na escala de longo termo, para os períodos histórico (1980-2013) e futuro próximo (2015-2040), intermediário (2040-2070) e distante (2070-2100).

Grunsky. Originalmente proposto no início do século XX, o método de Grunsky foi adaptado por Santos e Hawkins (2011) e, mais recentemente, por Marchezepe *et al.* (2025). Nessa nova versão,



o método de Grunsky descreve a vazão média anual como função da precipitação e temperatura (médias anuais), ajustadas por um coeficiente calibrado considerando os dados climáticos presentes na base do CABra. Trata-se, portanto, de uma abordagem empírica, que permite determinar a vazão em uma escala anual através das equações calibradas para cada uma das 735 bacias avaliadas nesse estudo.

HyMOD. O HyMOD (*Hydrologic Model*), originalmente apresentado por Wagener *et al.* (2001) é um modelo conceitual concentrado que simula a resposta hidrológica de uma bacia considerando um esquema de reservatório não linear para representar a componente de armazenamento do solo (e consequentemente o excesso de precipitação) e um esquema de dois reservatórios lineares em paralelo representando as respostas lentas e rápidas da bacia. Trata-se de um modelo hidrológico computacionalmente eficiente, visto que são necessários somente três dados de entrada (precipitação, vazão e evapotranspiração potencial) para calibração de seis parâmetros do modelo. No presente trabalho, a versão mais atual do modelo HyMOD, desenvolvida por Roy *et al.* (2017), foi calibrada para cada uma das bacias avaliadas e então utilizada para gerar simulações de vazão diária. Essa versão do HyMOD está disponível no pacote *Python LuMod*.

MISDc. O MISDc (*Modello Idrologico SemiDistribuito in continuo*) é um modelo hidrológico semi-distribuído desenvolvido para simulação de vazão, sensível à umidade do solo antecedente na simulação dos processos chuva-vazão (Brocca *et al.*, 2011). Para levar em consideração a variabilidade espacial das variáveis climáticas e das condições da bacia, o modelo permite a divisão da bacia hidrográfica em subunidades com características homogêneas (e.g., tipo de solo e topografia). Devido à ausência de dados espacializados para as bacias avaliadas, nesse estudo foi empregada uma versão simplificada (concentrada) do MISDc, também disponível no pacote *Python LuMod*, calibrada para cada uma das bacias separadamente, assim como feito para o HyMOD.

Long Short-Term Memory – LSTM. Modelos de memória de longo e curto prazo (LSTM), pertencentes à classe das redes neurais recorrentes, têm se mostrado eficazes na simulação hidrológica por capturar dependências temporais de longo prazo por meio de um estado interno e mecanismos de controle de informação (Kratzert *et al.*, 2018). Neste estudo, utilizou-se a biblioteca *Python NeuralHydrology* (Kratzert *et al.*, 2022), que implementa modelos baseados em LSTM para simulação e previsão de variáveis hidrológicas, como vazão. Adotou-se uma abordagem regional, em que o modelo foi treinado com dados de todas as bacias simultaneamente. Essa estratégia tem se mostrado superior ao treinamento local — ou seja, um modelo individual por bacia —, tanto em termos de generalização quanto de acurácia na estimativa de vazões (Kratzert *et al.*, 2024; Nearing *et al.*, 2021). Isso porque o treinamento conjunto permite que o modelo aprenda padrões hidrológicos universais, que podem ser transferidos e aplicados com sucesso a bacias específicas, mesmo na presença de escassez de dados locais.

2.3. Calibração e validação dos modelos

Os modelos hidrológicos conceituais HyMOD e MISDc foram calibrados individualmente para cada uma das 735 bacias, caracterizando uma abordagem local. Essa calibração utilizou séries diárias de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão para o período de 1980 a 2000, com validação entre 2000 e 2010. Os parâmetros — seis no HyMOD e nove no MISDc — foram ajustados por meio de uma rotina de simulação Monte Carlo, totalizando 800 execuções por bacia, e selecionou-se o conjunto de parâmetros que otimizava o desempenho segundo o coeficiente de eficiência de Kling-Gupta (KGE). Como resultado, cada bacia possui um conjunto único de parâmetros calibrados, refletindo as especificidades locais dos processos hidrológicos.

Em contraste, a modelagem com rede neural LSTM adotou uma abordagem regional, em que uma única rede foi treinada simultaneamente com dados de todas as bacias. Essa estratégia permitiu

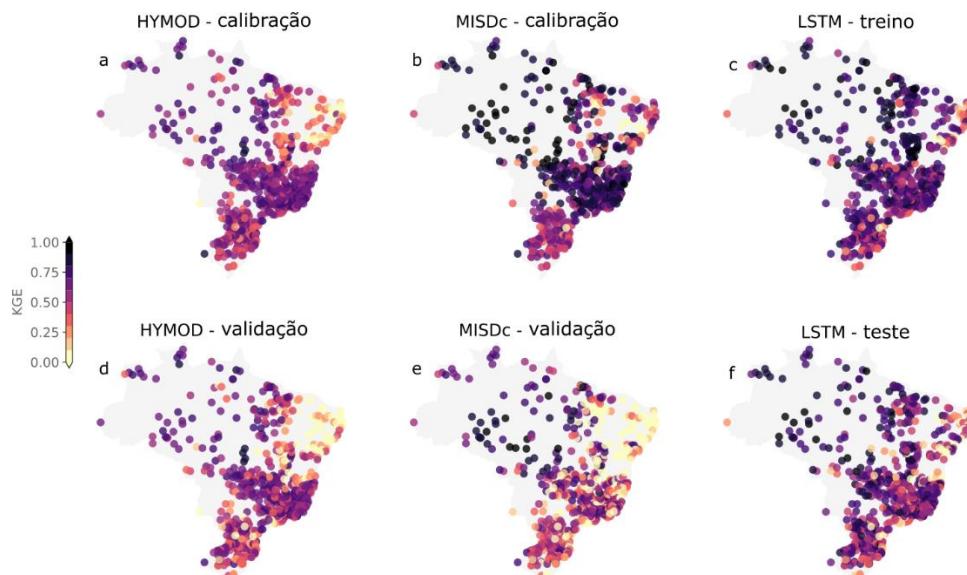
que o modelo aprendesse padrões hidrológicos generalizáveis a partir de uma base diversa, transferindo esse conhecimento para simular a vazão diária em diferentes bacias brasileiras. Foram utilizadas variáveis meteorológicas dinâmicas como entrada, além de características físicas e climáticas das bacias como variáveis estáticas, tais como área e declividade da bacia, índice de aridez e fração de areia. O treinamento ocorreu entre 1981 e 2005, e o teste entre 2005 e 2010. Diferentemente dos modelos convencionais, que exigem calibração específica por bacia, o modelo LSTM regional apresenta a vantagem de dispensar ajustes locais, mantendo bom desempenho preditivo mesmo em bacias com dados escassos ou heterogêneos.

3. RESULTADOS

3.1. Desempenho dos modelos hidrológicos

O desempenho dos modelos hidrológicos foi avaliado com base na métrica KGE, tanto nos períodos de calibração/treinamento quanto de validação/teste. Os resultados desta seção foram descritos em termos da mediana do KGE (mKGE) obtido para as 735 bacias (Figura 1), considerando somente os modelos hidrológicos com resolução diária. Os modelos conceituais HyMOD e MISDc, calibrados localmente para cada bacia, apresentaram desempenho distinto: o MISDc teve melhor resultado na calibração ($mKGE = 0,73$) em comparação ao HyMOD ($mKGE = 0,61$), enquanto o HyMOD superou o MISDc na validação ($mKGE = 0,56$ contra $0,49$). Já o modelo LSTM, treinado com dados de todas as bacias em uma abordagem regional, apresentou desempenho consistente nos dois períodos, com $mKGE = 0,72$ no treinamento e $0,66$ no teste, destacando sua capacidade de generalização para diferentes contextos hidrológicos. Como esperado, os três modelos apresentaram uma redução do desempenho no período de validação/teste, refletindo uma certa limitação dos modelos na captura de processos hidrológicos complexos e na caracterização de eventos extremos, devido a inerente baixa amostragem nos períodos de calibração/treinamento.

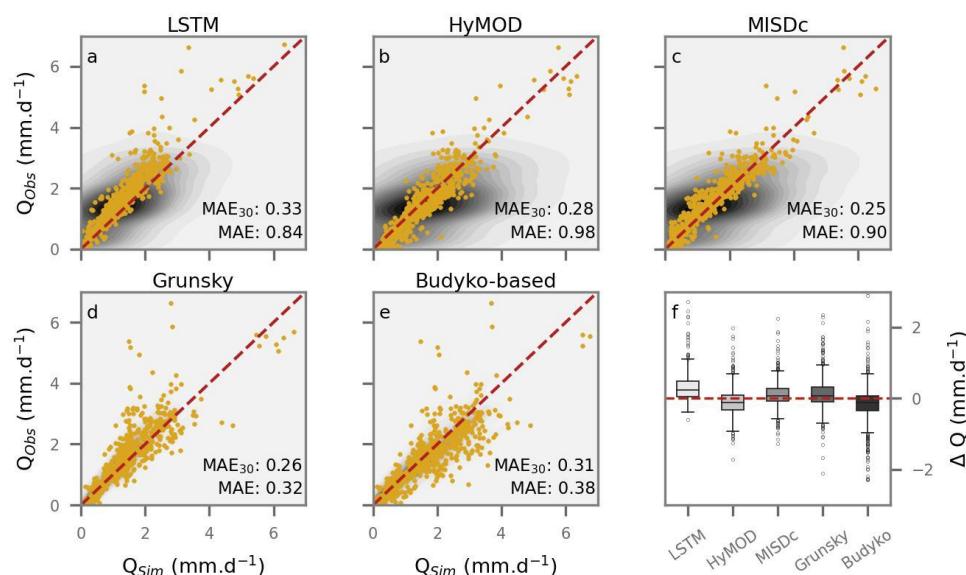
Figura 2 – Avaliação do desempenho dos modelos hidrológicos nos períodos de calibração/treinamento e validação/teste. (a-c) HyMOD, MISDc, LSTM na calibração/treinamento, (d-f) HyMOD, MISDc, LSTM na validação/teste.



Assim como observado por Almagro *et al.*, (2021) o desempenho dos modelos varia substancialmente ao longo do território brasileiro. Em geral, melhores resultados foram encontrados nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, onde há maior densidade de dados e regimes hidrológicos mais estáveis. Nas regiões nordeste, o desempenho foi mais limitado, refletindo a escassez de dados, a maior variabilidade climática e a presença de reservatórios. Em alguns casos, especialmente na região do semiárido brasileiro, valores de KGE próximos ou inferiores a zero foram encontrados, indicando limitações na representação dos processos hidrológicos dessa região, como por exemplo, regimes intermitentes, influência antropogênica (e.g., reservatórios) ou processos hidrológicos mal representados pelos modelos.

Com o intuito de avaliar a capacidade dos modelos hidrológicos calibrados em simular vazões a partir de dados climáticos simulados, foi realizada uma comparação entre as vazões de longo-termo observadas e as simulações geradas pelos modelos hidrológicos forçados pelas séries com correção de viés do CLIMBra. No geral, todos os modelos avaliados apresentaram desempenho satisfatório (*mean absolute error*, erro absoluto médio – MAE < 1), com destaque para os métodos Grunsky e Budyko (MAE = 0,32 e 0,38, respectivamente devido ao fato de serem calibrados especificamente para reproduzir a média de longo prazo da vazão. Já os demais modelos, projetados para trabalhar em escala temporal diária, mostraram maior sensibilidade em algumas bacias. Entretanto, a exclusão das 30 bacias com maior discrepância entre vazões simuladas e observadas resultou em um desempenho bastante semelhante entre todos os cinco modelos avaliados (MAE \cong 0,3), indicando que erros localizados (i.e., em bacias específicas) foram os principais responsáveis pelos desvios. Entre os modelos de escala diária, o LSTM se destacou, apresentando menor dispersão nas simulações ao ser forçado por diferentes modelos do CMIP6, seguido pelo MISDc e, por fim, pelo HyMOD.

Figura 3 – Desempenho dos modelos hidrológicos forçados por simulações CMIP6 na representação das vazões observadas. (a) LSTM, (b) HyMOD, (c) MISDc, (d) Grunsky, (e) Budyko. Um gráfico de densidade bivariada representa os pares de observação e simulação considerando separadamente os 10 modelos CMIP6. As regiões mais escuras indicam maior densidade. Os pontos em amarelo escuro representam os pares obtidos com o *ensemble* multi-modelo. O erro absoluto médio (MAE) foi calculado para o *ensemble*. (f) Boxplot das diferenças entre as vazões simuladas (média do conjunto multi-modelo) e observadas para todos os modelos hidrológicos avaliados.

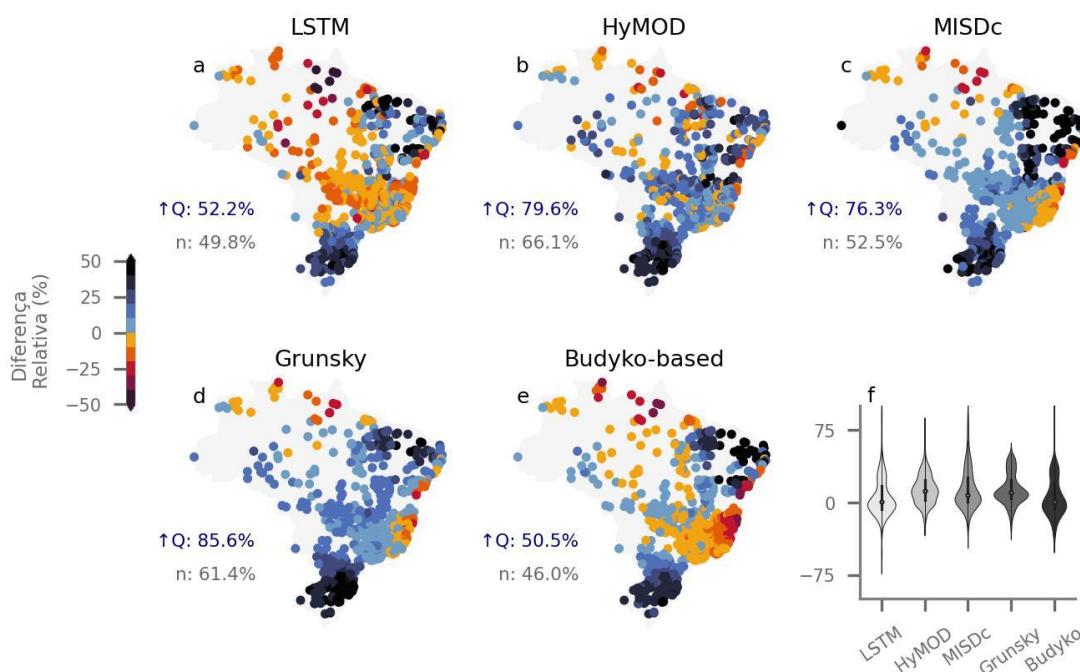


3.2. Projeções futuras

Para ilustrar a aplicação do SSP-CABra, foram avaliadas as mudanças projetadas na vazão de longo termo das bacias hidrográficas brasileiras entre os períodos histórico (1980–2013) e futuro (2070–2100), considerando o cenário climático SSP5-8.5 (Figura 4). Os resultados indicaram padrões espaciais distintos entre os modelos hidrológicos utilizados. De forma geral, observa-se uma tendência consistente de aumento das vazões nas regiões Sul e Nordeste, redução na região Norte, e maior incerteza nas projeções para as regiões Sudeste e Centro-Oeste. Esses resultados destacam o papel relevante dos modelos na definição tanto da magnitude quanto da direção das tendências futuras. Em alguns casos, diferentes modelos hidrológicos resultaram em projeções opostas para uma mesma região, com a proporção de bacias apresentando aumento na vazão variando de 50,5% a 85,6%, dependendo do modelo aplicado. Além disso, os modelos climáticos também impactaram significativamente os resultados: a concordância entre os modelos do CMIP6 — definida como significativa quando pelo menos 8 modelos concordam em termos de sinal de mudança— oscilou entre 46% e 66,1%, conforme a combinação de modelo hidrológico e conjunto de dados climáticos utilizados. Esses resultados reforçam a tese de que as projeções hidrológicas futuras podem divergir substancialmente em função da escolha do modelo hidrológico e dos dados climáticos de entrada, mesmo após aplicação da correção de viés.

Figura 4 – Mudanças projetadas na média de longo prazo da vazão entre o período histórico e o futuro distante.

(a) LSTM, (b) HyMOD, (c) MISDc, (d) Método de Grunsky, (e) Formas funcionais baseadas em Budyko. O texto em azul escuro no canto inferior esquerdo de cada painel indica a porcentagem de bacias com projeções positivas de mudança (média do conjunto de modelos), enquanto o texto em cinza indica a porcentagem de bacias com pelo menos 70% de concordância entre os modelos do CMIP6 quanto ao sinal da mudança. (f) Gráfico de violino representando a distribuição das mudanças projetadas mostradas nos painéis a–e para cada modelo hidrológico.



4. CONCLUSÃO

Este estudo apresenta o Streamflow Scenarios Projections for Brazilian Catchments (SSP-CABra), um novo conjunto de dados que disponibiliza simulações diárias de vazão para 735 bacias hidrográficas brasileiras. As simulações foram obtidas a partir de cinco modelos hidrológicos com diferentes níveis de complexidade, forçados por dez simulações climáticas CMIP6 corrigidas do conjunto CLIMBra. O SSP-CABra abrange o período histórico (1980–2013) e projeções futuras (2015–2100) em dois cenários do CMIP6: SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

As vazões são disponibilizadas em diferentes escalas temporais, conforme o modelo hidrológico: valores médios anuais para os modelos baseados em Budyko, resoluções intra-anuais para o método de Grunsky, e séries diárias para os modelos HyMOD, MISDc e LSTM. Ao integrar múltiplos modelos hidrológicos e diferentes cenários climáticos, o SSP-CABra contribui com uma base robusta para entender os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos no Brasil. Os resultados preliminares evidenciam que há variações relevantes entre os modelos na resposta hidrológica às mudanças climáticas. Por exemplo, observa-se uma tendência consistente de aumento das vazões nas regiões Sul e Nordeste e redução na região Norte, enquanto as regiões Sudeste e Centro-Oeste apresentam maior incerteza nas projeções, refletindo as discrepâncias entre os modelos hidrológicos utilizados.

Apesar do bom desempenho geral dos modelos na representação das vazões simuladas, é importante reconhecer algumas limitações. As simulações históricas foram geradas com base em dados climáticos do CLIMBra, que utiliza correção por quantis (*delta quantile mapping*) para reduzir viés sistemático. No entanto, essa técnica garante a preservação das propriedades estatísticas, mas não necessariamente a sincronização temporal com eventos observados, como secas ou enchentes. Além disso, por mais que as simulações corrigidas superem as simulações brutas em desempenho, ainda podem apresentar deficiências – como valores fisicamente incoerentes ou erros sistemáticos herdados dos modelos climáticos, principalmente em eventos extremos. Por isso, recomenda-se uma análise adicional de desempenho antes de aplicar os dados em estudos específicos sobre eventos hidrológicos extremos.

Ainda assim, espera-se que o SSP-CABra preencha uma lacuna importante em modelagem hidrológica em larga escala para o Brasil, fornecendo subsídios para pesquisadores e tomadores de decisão. Ao integrar múltiplos modelos hidrológicos e cenários climáticos, o conjunto de dados aprimora a compreensão dos processos hidrológicos nas bacias do país, apoiando decisões e estratégias para mitigar os impactos das mudanças climáticas sobre a segurança hídrica.

REFERÊNCIAS

- ALMAGRO, André *et al.* CABra: a novel large-sample dataset for Brazilian catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, p. 1–40, 2021.
- ALMAGRO, André *et al.* The Drivers of Hydrologic Behavior in Brazil: Insights From a Catchment Classification. *Water Resources Research*, v. 60, n. 8, p. e2024WR037212, ago. 2024.
- ALMAGRO, André; OLIVEIRA, Paulo Tarso Sanches; BROCCA, Luca. Assessment of bottom-up satellite rainfall products on estimating river discharge and hydrologic signatures in Brazilian catchments. *Journal of Hydrology*, v. 603, p. 126897, 1 dez. 2021.
- ANA. Manual of Consumptive Water Use in Brazil. Brasilia, Brazil: [S.n.].

BALLARIN, André S. *et al.* The Impact of an Open Water Balance Assumption on the Understanding of the Factors Controlling the Long-term Streamflow Components. *Water Resources Research*, v. 58, n. e2022WR032413, 2022.

BALLARIN, André S. *et al.* Brazilian Water Security Threatened by Climate Change and Human Behavior. *Water Resources Research*, v. 59, p. e2023WR034914, 2023a.

BALLARIN, André S. *et al.* CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. *Scientific Data*, p. 1–31, 2023b.

BALLARIN, André S. *et al.* Frequency Rather Than Intensity Drives Projected Changes of Rainfall Events in Brazil. *Earth's Future*, v. 12, n. 1, p. e2023EF004053, jan. 2024a.

BALLARIN, André S. *et al.* Drought intensification in Brazilian catchments: implications for water and land management. *Environmental Research Letters*, v. 19, n. 5, p. 054030, 1 maio 2024b.

BROCCA, L.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting. *Hydrological Processes*, v. 25, n. 18, p. 2801–2813, 30 ago. 2011.

BUDYKO, M. I. *Climate and Life*. New York: Academic Press, 1974.

COLLISCHONN, Walter *et al.* Unprecedented April-May 2024 rainfall in South Brazil sets new record. *RBRH*, v. 29, p. e50, 20 dez. 2024.

ESPINOZA, Jhan-Carlos *et al.* The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 8107, 6 abr. 2024.

FICKLIN, Darren L. *et al.* Hydrological Intensification Will Increase the Complexity of Water Resource Management. *Earth's Future*, v. 10, n. 3, p. e2021EF002487, mar. 2022.

KRATZERT, Frederik *et al.* Rainfall–runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 22, n. 11, p. 6005–6022, 22 nov. 2018.

KRATZERT, Frederik *et al.* NeuralHydrology — A Python library for Deep Learning research in hydrology. *Journal of Open Source Software*, v. 7, n. 71, p. 4050, 4 mar. 2022.

KRATZERT, Frederik *et al.* HESS Opinions: Never train a Long Short-Term Memory (LSTM) network on a single basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 28, n. 17, p. 4187–4201, 12 set. 2024.

L'VOVICH, M. I. *World Water Resources and their Future*. [S.l.: S.n.].

MARCHEZEPE, Bruno K. *et al.* Improved Grunsky method for streamflow prediction in ungauged catchments. *Hydrological Sciences Journal*, p. 1–11, 30 jan. 2025.

MEIRA NETO, Antonio Alves *et al.* An Aridity Index-Based Formulation of Streamflow Components. *Water Resources Research*, v. 56, n. 9, p. 1–14, 2020.

NEARING, Grey S. *et al.* What Role Does Hydrological Science Play in the Age of Machine Learning? *Water Resources Research*, v. 57, n. 3, p. e2020WR028091, mar. 2021.

ROY, Tirthankar *et al.* Using satellite-based evapotranspiration estimates to improve the structure of a simple conceptual rainfall–runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 2, p. 879–896, 14 fev. 2017.

SANTOS, Francisco L.; HAWKINS, Richard H. Generalized Mediterranean Annual Water Yield Model: Grunsky's Equation and Long-Term Average Temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 16, n. 11, p. 874–879, nov. 2011.

SIQUEIRA, Paula Prado *et al.* Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 37, n. September, p. 100931, 2021.

SONE, Julian S. *et al.* Water Security in an Uncertain Future: Contrasting Realities from an Availability-Demand Perspective. *Water Resources Management*, 2022.

WAGENER, T. *et al.* A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 5, n. 1, p. 13–26, 31 mar. 2001.