

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

SISTEMA DE PREVISÃO HIDROMETEOROLÓGICA NAS BACIAS PCJ

*Maria Fernanda Dames dos Santos Lima¹; Danieli Mara Ferreira²; José Eduardo Gonçalves³;
Rafael Toshio Inouye⁴; Jorge Antonio Mercanti⁵; Patrícia Gobet de Aguiar Barufaldi⁶; Eduardo
Cuoco Léo⁷; Ana Oliveira⁸& Débora Lavoura⁹*

Abstract: Water resources management in the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí River Basins (PCJ Basins) requires tools to support decision-making in a context of high demand and limited water availability. The Cantareira System, essential for supplying the São Paulo Metropolitan Region, directly influences these basins. To support the definition of reservoir release flows, the Hydrometeorological Forecast System for the PCJ Basins (SPHM-PCJ) was developed through a joint effort involving the PCJ River Basin Committees, the PCJ Basin Water Agency, and the Environmental Monitoring and Technology System of Paraná (Simepar). SPHM-PCJ provides operational streamflow forecasts based on observed data and weather forecasts, with a seven-day lead time. Forecasts are made for three control stations, considering incremental basins downstream of the Cantareira System reservoirs located in the PCJ Basins. SPHM-PCJ uses regression models to estimate streamflow based on historical time series, discharge schedules, and precipitation forecasts. Streamflow at the points of interest is estimated using an ensemble of different models, including the conceptual Sacramento rainfall-runoff model, as well as regression models and artificial neural networks trained with deep learning techniques. The models are calibrated and updated annually, ensuring greater accuracy in hydrological simulation. This study presents the structure and functioning of SPHM-PCJ, with emphasis on the adaptations made for local application.

Resumo: A gestão dos recursos hídricos nas Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Bacias PCJ) exige ferramentas para apoiar decisões em um contexto de alta demanda e disponibilidade hídrica limitada. O Sistema Cantareira, essencial para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, influencia diretamente essas bacias. Para apoiar a definição das vazões liberadas pelos reservatórios do sistema, foi desenvolvido o Sistema de Previsão Hidrometeorológica das Bacias PCJ (SPHM-PCJ), por meio de trabalho conjunto envolvendo os Comitês das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Comitês PCJ), a Fundação Agência das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Agência das Bacias PCJ) e o Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (Simepar). O SPHM-PCJ fornece previsões operacionais de vazão, com base em dados observados e previsões meteorológicas, com horizonte

¹ Simepar: maria.dames@simepar.br

² Simepar: danieli.ferreira@simepar.br

³ Simepar: jose.eduardo@simepar.br

⁴ Simepar: rafael.toshio@simepar.br

⁵ Comitês PCJ: jorgemercanti@gmail.com

⁶ Agência das Bacias PCJ: patricia.barufaldi@agencia.baciaspcj.org.br

⁷ Agência das Bacias PCJ: eduardo.leo@agencia.baciaspcj.org.br

⁸ Agência das Bacias PCJ: ana.oliveira@agencia.baciaspcj.org.br

⁹ Agência das Bacias PCJ: debora.lavoura@agencia.baciaspcj.org.br

de sete dias. As previsões de vazão são realizadas para três postos de controle, considerando bacias incrementais a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira localizados nas Bacias PCJ. O SPHM-PCJ utiliza modelos regressivos para estimar a vazão, com base em séries históricas, programação de descarga e previsões de precipitação. A vazão nos pontos de interesse é estimada a partir do ensemble de diferentes modelos, incluindo o modelo conceitual de chuva-vazão Sacramento, além de modelos regressivos e redes neurais artificiais treinadas com técnicas de aprendizado profundo. Os modelos são calibrados e atualizados anualmente, garantindo maior precisão na simulação hidrológica. Este estudo apresenta a estrutura e o funcionamento do SPHM-PCJ, com ênfase nas adaptações realizadas para aplicação local.

Palavras-Chave – Previsão hidrometeorológica; Sistema Cantareira

INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos em regiões com alta demanda e limitada disponibilidade hídrica requer estratégias integradas e o uso de ferramentas técnico-científicas que apoiem a tomada de decisão. As bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ) se destacam por sua importância socioeconômica e pelos desafios associados ao uso múltiplo da água.

A operação do Sistema Cantareira, que é realizada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e é um dos principais sistemas de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, tem influência direta sobre essas bacias, exigindo articulação entre diferentes instituições e o uso de previsões hidrometeorológicas para garantir a segurança hídrica e o equilíbrio entre os usos. Atualmente, as decisões relativas às vazões de descarga dos reservatórios para as Bacias PCJ são tomadas pelos Comitês PCJ ou pela SP-Águas.

Durante o período úmido da região (dezembro a maio), a definição das vazões a serem descarregadas dos reservatórios Jaguari, Jacareí, Cachoeira e Atibainha é feita pelos órgãos gestores, que informam à SABESP os valores a serem liberados. Nos meses considerados secos (junho a novembro), essa responsabilidade é transferida aos Comitês PCJ, que operacionaliza as decisões por meio de sua Câmara Técnica de Monitoramento Hidrológico (CT-MH).

Com o objetivo de subsidiar esse processo decisório, os Comitês PCJ, a Agência das Bacias PCJ e o Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (Simepar) desenvolveram, em esforço conjunto, o Sistema de Previsão Hidrometeorológica das Bacias PCJ (SPHM-PCJ). Esse sistema fornece previsões hidrometeorológicas operacionais que vêm contribuindo de forma significativa para a definição das vazões a serem liberadas do Sistema Cantareira às Bacias PCJ, conforme demonstrado por Almeida et al. (2019), Pedrozo et al. (2020) e Almeida et al. (2021).

Desde sua implementação, em janeiro de 2019, o SPHM-PCJ vem sendo continuamente aprimorado, com base na experiência adquirida ao longo dos anos de operação. O presente trabalho tem como objetivo detalhar o funcionamento do sistema de previsão e as adaptações realizadas para o local de interesse, como estudo de caso utilizando apenas a previsão meteorológica com o modelo numérico de tempo Weather Research Forecasting que é rodado no Simepar (WRF-Simepar).

METODOLOGIA

Área de estudo e dados utilizados

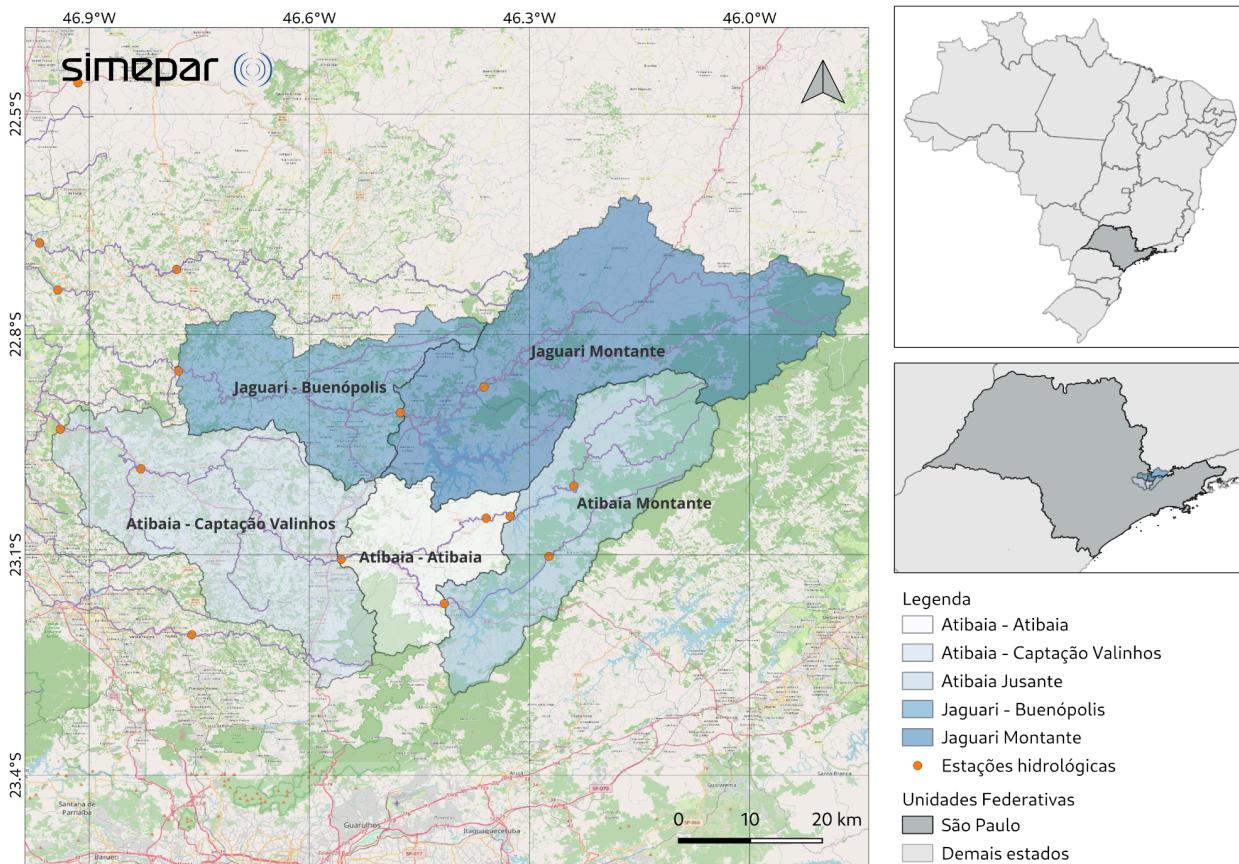
O SPHM-PCJ realiza previsões meteorológicas para os 76 municípios inseridos nas Bacias PCJ, bem como previsões de vazões para três postos fluviométricos, denominados postos de

controle. Esses postos são identificados, conforme o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), pelos seguintes nomes e códigos:

- Rio Atibaia em Atibaia - 62669900, 3E-063T;
- Rio Atibaia Captação de Valinhos - 62678150, 3D-007T;
- Rio Jaguari em Buenópolis - 62605000, 3D-009T.

Esses postos estão situados nos rios Atibaia e Jaguari, a jusante de quatro reservatórios que compõem o Sistema Cantareira: Jaguari, Jacareí, Cachoeira e Atibainha. Para fins de modelagem hidrológica, consideram-se três bacias incrementais, cujos exutórios coincidem com os postos de controle, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Localização das bacias de contribuição e dos postos de controle considerados pelo SPHM-PCJ.



Na bacia Jaguari - Montante estão localizados os reservatórios Jaguari e Jacareí, enquanto na bacia Atibaia - Montante encontram-se os reservatórios Cachoeira e Atibainha. A jusante desses reservatórios, existem estações de monitoramento que possibilitam o controle da vazão afluente às bacias incrementais, ou seja, aquelas que recebem contribuições adicionais de água após os reservatórios.

Essas bacias incrementais correspondem às áreas hidrológicas onde são realizadas as previsões de vazão pelo SPHM-PCJ. Conforme ilustrado na Figura 1, o posto Rio Jaguari - Buenópolis está localizado na bacia incremental a jusante da bacia Jaguari - Montante, enquanto os

postos Rio Atibaia - Captação Valinhos e Rio Atibaia - Atibaia estão situados em bacias incrementais a jusante da bacia Atibaia - Montante.

Os postos de controle, bem como as demais estações hidrológicas distribuídas pelas Bacias PCJ, realizam o monitoramento da precipitação e do nível hidrométrico em intervalos de 10 minutos. As estações e respectivas coordenadas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estações hidrológicas utilizadas.

Estação	Código	Latitude	Longitude
Rio Jaguari em Guaripocaba	D3-047T/3D-015T	-22.90639	-46.47611
Rio Jaguari em Buenópolis	D3-040T/3D-009T	-22.84972	-46.77833
Rio Cachoeira Captação Piracaia	E3-110T/3E-116T	-23.0475	-46.32639
Rio Atibainha - Mascate	3E-089T/E3-121T	-23.16638	-46.41611
Rio Atibaia em Atibaia	E3-111T/3E-063T	-23.1061	-46.55665
Rio Atibaia Captação Valinhos	D3-051/3D-007T	-22.92878	-46.93953

Sistema de Previsão de Precipitação

Para este artigo foram utilizados dados de previsão do Weather Research and Forecasting (WRF) versão 4.5 (Skamarok et al. 2019). O modelo meteorológico é executado pelo Simepar com resolução espacial de 5 km com saídas horárias, suas parametrizações incluem a de Morrison como microfísica, New Tiedke como de cumulus, esquema da camada limite planetária da universidade de Yonsei (YSU) e radiação RRTMG. Foi obtida a média espacial dos dados para a bacia em escala de tempo diária.

Sistema de Previsão Hidrológica

O Sistema de Previsão Hidrometeorológica das Bacias PCJ encontra-se em operação, com atualizações realizadas duas vezes ao dia, uma no período da manhã e outra à noite. As previsões são geradas em escala diária, com horizonte de até 7 dias. A Figura 2 apresenta o fluxograma do funcionamento do sistema de previsão hidrológica desenvolvido para as Bacias PCJ.

De forma geral, o processo tem início com a organização dos dados de entrada do modelo, os quais incluem tanto os dados observados, como precipitação e vazão, provenientes das estações indicadas na Figura 1 e na Tabela 1, quanto os dados de previsão de precipitação. A partir desses dados organizados, o sistema realiza a simulação da vazão nas bacias a montante e nas bacias de interesse.

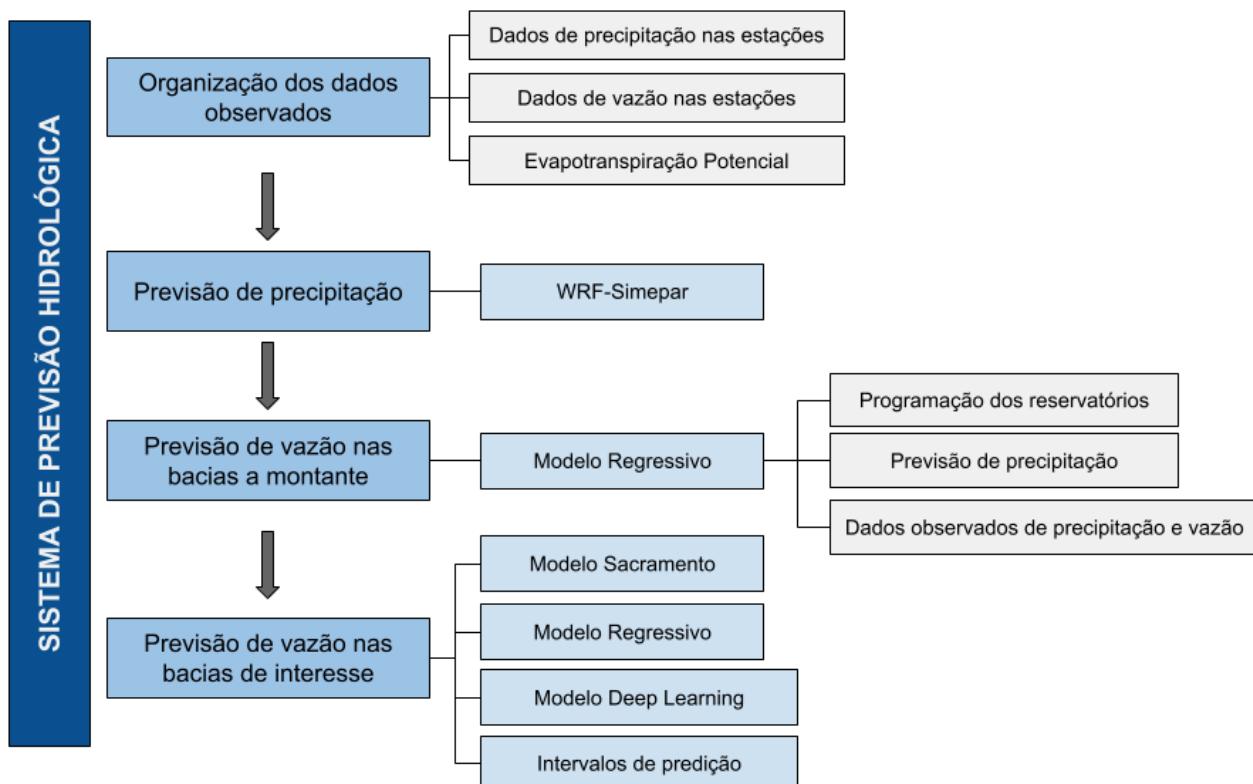
Para as bacias a montante, Jaguari - Montante e Atibaia - Montante, onde estão localizados os reservatórios Jaguari, Jacareí, Cachoeira e Atibainha, a estimativa da vazão é realizada por meio de modelos regressivos. A vazão nestes pontos sofrem influência da vazão vertida dos reservatórios, sendo assim, como forma de estimar a vazão destas bacias foi calibrado um modelo regressivo que considera como dados de entrada os dados observados nos últimos 3 dias, a programação destes reservatórios para os próximos 7 dias e a previsão de precipitação para os próximos 7 dias.

O modelo foi estruturado desta maneira, pois foi observado que dependendo da previsão de chuva a programação da vazão liberada nos reservatórios é alterada. E como a vazão é uma variável com alta dependência serial, o histórico de vazão impacta nos valores de vazão para os próximos dias. Com esta estimativa de vazão a montante das bacias Atibaia - Atibaia e Jaguari - Buenopolis,

é possível realizar a previsão de vazão considerando como dado de entrada a vazão a montante propagada e a estimativa de vazão proveniente da precipitação na área incremental.

Com os dados de entrada organizados, e as previsões de precipitação e de vazão nas bacias a montante, torna-se possível estimar a vazão nos pontos de interesse do sistema. Para essa etapa, são empregados diferentes modelos de previsão, incluindo o modelo conceitual Sacramento, além de modelos baseados em regressão e técnicas de aprendizado profundo (*Deep Learning*).

Figura 2 – Fluxograma do Sistema de Previsão Hidrológica para as Bacias PCJ.



O modelo conceitual chuva-vazão Sacramento Soil Moisture Accounting (Singh e Woolhiser, 2002) foi acoplado ao Hidrograma Unitário de Nash (Nash, 1957), responsável por propagar o escoamento superficial gerado na zona superior do modelo Sacramento até o exutório da bacia (Khakbaz et al., 2012). Além disso, incorporou-se o método de Muskingum, utilizado para a propagação das vazões provenientes das bacias a montante.

Além do modelo Sacramento, também são utilizados modelos estatísticos e de inteligência artificial para a previsão de vazão. O modelo estatístico adotado é do tipo ARIMAX (Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables), que incorpora variáveis exógenas como entrada, permitindo capturar a influência de fatores externos sobre a série temporal de vazão. Já o modelo baseado em inteligência artificial corresponde a uma rede neural artificial multicamadas do tipo *feedforward*, treinada por meio do algoritmo de gradiente descendente estocástico com *backpropagation*. Esse modelo foi implementado utilizando a plataforma de *machine learning* H2O.ai (Candel et al., 2019).

Os modelos são calibrados e atualizados periodicamente, de modo que tanto os parâmetros do modelo Sacramento quanto os modelos estatísticos e de inteligência artificial são ajustados com base nos dados mais recentes, incorporando os eventos hidrológicos ocorridos ao longo do ano.

O SPHM-PCJ também disponibiliza previsões hidrológicas probabilísticas. A partir da mediana dos resultados dos modelos de previsão, estima-se a probabilidade de ocorrência com base na série histórica, possibilitando a construção de quantis que delimitam intervalos contendo 50%, 75%, 90% e 95% das amostras. Esses intervalos são denominados “intervalos de predição” e representam a incerteza associada às previsões. A Figura 3, extraída da plataforma Web do SPHM-PCJ, ilustra a visualização proposta para essas previsões probabilísticas para a bacia Jaguari - Buenópolis, apresentadas aos usuários na forma de “faixas de probabilidade”.

Dessa forma, torna-se possível estimar a probabilidade de a vazão prevista ser inferior aos limites mínimos estabelecidos pelas Resoluções Conjuntas ANA/DAEE nº 925 e 926/2017 (ANA e DAEE, 2017). Esses resultados são apresentados na tabela que acompanha o gráfico extraído da plataforma Web do SPHM-PCJ, conforme ilustrado na Figura 3 para a bacia Jaguari - Buenópolis no dia 13 de junho de 2025.

Figura 3 – Plataforma Web do SPHM-PCJ. Vazões observadas (em preto) e IPs das vazões previstas para o posto de controle Rio Jaguari em Buenópolis, período de 13/06/2025 a 19/06/2025.

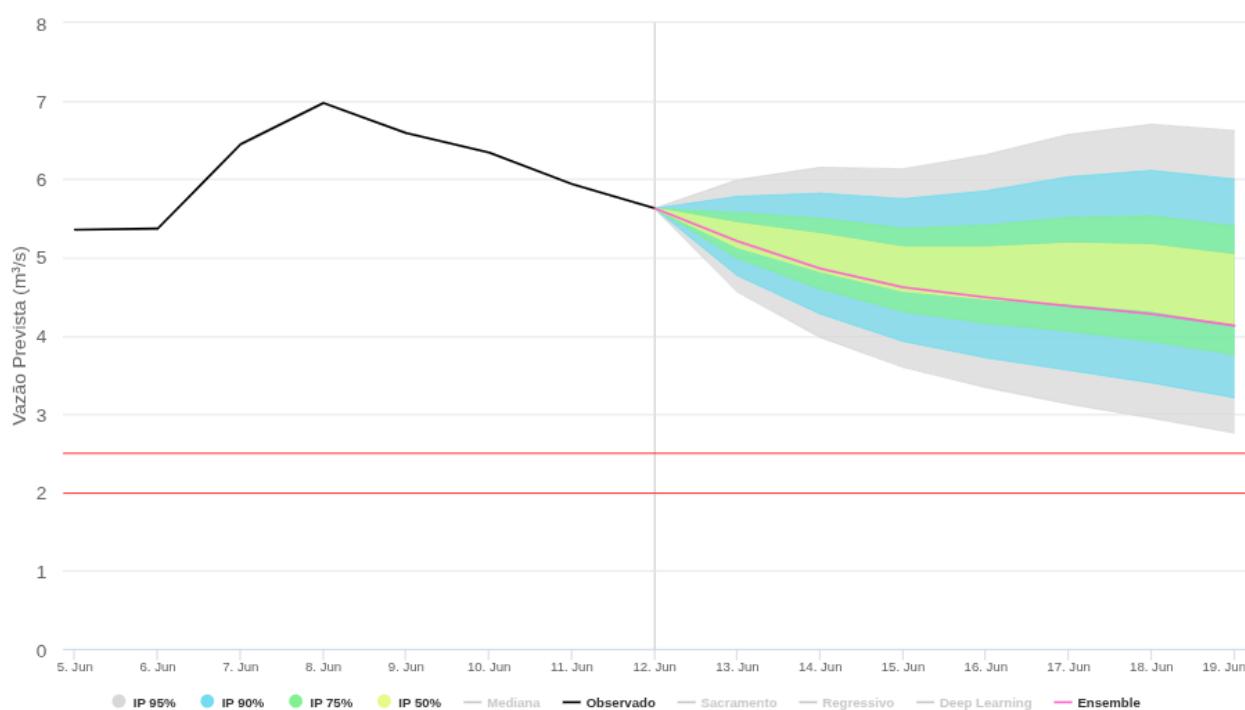


Tabela de vazão (m^3/s) prevista em Jaguari - Buenópolis para os dias 13/06/2025 a 19/06/2025

Referência	13/06	14/06	15/06	16/06	17/06	18/06	19/06
Valor previsto	5.21	4.86	4.62	4.49	4.38	4.28	4.13
$2.5\ m^3/s$	0%	0.2%	0.4%	0.7%	1.1%	1.5%	2%
$2\ m^3/s$	0%	0.1%	0.2%	0.3%	0.5%	0.7%	0.9%

Q (m^3/s) - Vazão do modelo.

P($Q \leq q_{ref}$) - Probabilidade da vazão ficar abaixo da referência até o horizonte de previsão.

— Limite de referência de acordo com Resoluções ANA/DAEE nº 925 e 926/2017.

DESEMPENHO

O SPHM-PCJ opera de forma contínua, e, por isso, seu desempenho é avaliado mensalmente, além disso, periodicamente melhorias são implementadas no sistema. Uma das principais formas de avaliar o desempenho do modelo é por meio de métricas que comparam os valores observados e previstos de vazão em cada bacia.

Algumas das principais métricas utilizadas para avaliar o desempenho do sistema são o Erro Percentual Médio (MPE) e o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). O MPE mede a porcentagem média do erro entre as vazões previstas e observadas, indicando se o modelo tende a superestimar ou subestimar os valores, valores de erro até $\pm 10\%$ são considerados excelentes. Já o NSE é um parâmetro amplamente utilizado na avaliação de modelos hidrológicos, que compara a variabilidade dos erros com a variabilidade dos dados observados. Valores de NSE próximos de 1 indicam que o modelo possui excelente capacidade preditiva, enquanto valores próximos ou inferiores a 0 refletem desempenho insatisfatório, sugerindo que a média das observações pode ser uma previsão tão boa quanto o modelo.

A Tabela 2 apresenta o desempenho do modelo para o período de 2022 a 2024, considerando as métricas NSE e MPE, o *ensemble* de previsões (mediana dos modelos Sacramento, modelo regressivo e *deep learning*) e todos os horizontes de previsão. O SPHM-PCJ apresenta desempenho positivo para todas as bacias analisadas.

Tabela 2 – Desempenho do *ensemble* do SPHM-PCJ, considerando 2022 a 2024.

Período	Métrica	Jaguari - Buenópolis	Atibaia - Atibaia	Captação Valinhos
Período completo (2022–2024)	NSE	0,63	0,55	0,65
	MPE	-5,1%	-0,8%	-7,1%
Período úmido (primavera-verão)	NSE	0,58	0,48	0,60
	MPE	-12,2%	-1,8%	-8,0%
Período seco (outono-inverno)	NSE	0,69	0,62	0,69
	MPE	2,1%	0,2%	-6,1%

Foram avaliados de forma abrangente o período completo de 2022 a 2024, além de uma análise para o período úmido (primavera-verão) e para o período seco (outono-inverno), que são bem marcados na região. Observa-se que o desempenho do sistema é inferior no período úmido, quando comparado ao período seco, principalmente devido aos erros acumulados decorrentes das previsões de precipitação, que tendem a ser mais desafiadoras nesse intervalo.

Especificamente, o NSE apresenta valores entre 0,48 e 0,69, indicando boa capacidade preditiva do modelo, especialmente no período seco, quando o NSE alcança os maiores valores em todas as bacias (até 0,69). Já o MPE, que mede o erro percentual médio, mantém-se dentro de limites aceitáveis, com valores entre -12,2% e 2,1%. Destaca-se que, apesar de o modelo apresentar uma tendência a uma leve subestimação no período úmido (MPE negativo), no período seco essa tendência é menor ou até mesmo uma leve superestimação (MPE positivo).

Vale lembrar que as métricas foram estimadas considerando o *ensemble* dos modelos, sendo que o desempenho individual de cada modelo pode variar. Além disso, a análise dos percentis das

previsões complementa a avaliação do desempenho do sistema, permitindo entender melhor a variabilidade e a confiabilidade das previsões.

CONCLUSÃO

O Sistema de Previsão Hidrometeorológica das Bacias PCJ (SPHM-PCJ) demonstrou desempenho consistente e positivo no período de 2022 a 2024, com capacidade satisfatória para prever vazões nas bacias analisadas, especialmente durante o período seco. As métricas NSE e MPE indicam que o ensemble dos modelos utilizados oferece previsões confiáveis, embora haja uma maior dificuldade durante o período úmido, quando os erros associados às previsões de precipitação se refletem em uma redução da acurácia das vazões previstas.

Esses resultados reforçam a importância do aprimoramento contínuo do sistema, especialmente no refinamento das previsões de precipitação, para reduzir os erros no período úmido. A utilização do ensemble se mostra eficaz para melhorar a robustez das previsões, e a avaliação regular do desempenho com métricas claras possibilita identificar pontos de melhoria e sustentar a evolução do SPHM-PCJ como ferramenta estratégica para a gestão dos recursos hídricos na região.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.; et al. (2019). Sistema de previsão hidrometeorológica para subsidiar a operação do Sistema Cantareira na gestão das Bacias PCJ in Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/xxivsbrh/>. Acesso em: 4 de julho de 2025.
- ALMEIDA, A.; et al. (2021). Previsão hidrometeorológica na operação do Sistema Cantareira nas Bacias PCJ in Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2021. ISSN 2318-0358. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/xxivsbrh/>. Acesso em: 4 de julho de 2025.
- ANA E DAEE – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. (2017). Resolução Conjunta ANA/DAEE Nº 925 de 29/05/2017.
- CANDEL, A.; PARMAR, V.; LeDELL, E.; ARORA, A. (2019). “Deep Learning with H2O”. H2O.ai, Inc, 6^a ed. 58 p.
- KHAKBAZ, B. et al. (2012). From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. Journal of Hydrology, v. 418, p. 61-77.
- NASH, J. E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. International Association of Scientific Hydrology, Publ, v. 3, p. 114-121.
- PEDROZO, D.B. et al. (2020). “Informações integradas para o gerenciamento dos recursos hídricos no Sistema Cantareira e nas Bacias PCJ” in Anais do II Encontro Nacional de Desastres, dez. 2020. 4 p. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/iiend/>. Acesso em: 4 de julho de 2025.
- SINGH, V.; WOOLHISER, D. (2002) Mathematical modeling of watershed hydrology. Journal of hydrologic engineering, v. 7, n. 4, p. 270-292.
- SKAMAROCK, W.; KLEMP, J.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; LIU, Z.; BERNER, J.; WANG, W.; POWERS, J. G.; DUDA, M. G.; BARKER, D.; HUANG, X.-Y. (2019). “A Description of the

Advanced Research WRF Model Version 4.1". NCAR Technical Note, NCAR/TN-556+STR, 145 pp, 145. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) pelo apoio e agradecem os Comitês PCJ e a Agência das Bacias PCJ pela oportunidade de realização deste estudo.