

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **PREVISÃO SAZONAL E MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO APLICADOS AO PLANEJAMENTO HÍDRICO NO ESTADO DO PARANÁ**

*Karollyn Larissa de Quadros<sup>1</sup>; Danieli Mara Ferreira<sup>2</sup>; Maria Fernanda Dames de Lima<sup>3</sup>; Maria Clara Pontello<sup>4</sup>; Arlan Scortegagna<sup>5</sup>; José Eduardo Gonçalves<sup>6</sup>; Ester Amélia Assis Mendes<sup>7</sup> & Raul Alberto Marcon<sup>8</sup>.*

**Abstract:** This study presents an integrated approach for monitoring and forecasting hydro-meteorological conditions in the state of Paraná, Brazil, with a focus on assessing risks related to water scarcity and excess. The methodology combines observed precipitation and streamflow data from hydrometeorological stations with radar, satellite, and reanalysis datasets. To estimate streamflows in ungauged basins, machine learning techniques are applied to calibrate parameters of the GR2M hydrological model. Seasonal forecasts are generated using precipitation data from the SEAS5/ECMWF model for lead times of up to seven months. The analysis also includes the estimation of monthly anomalies and the Standardized Precipitation Index (SPI) for 3-, 6-, and 12-month periods. Results are illustrated using the current scenario in Paraná, showing that the forecast issued in January 2025 correctly anticipated drought conditions in the Central, Southwestern, and Western regions of the state, which led to an official state emergency declaration in May 2025. Observed data confirmed these trends, demonstrating the system's effectiveness. Thus, the proposed framework proves to be a valuable tool for supporting water resource management and proactive measures in response to critical events.

**Resumo:** O estudo apresenta uma abordagem integrada para o monitoramento e previsão das condições hidrometeorológicas no estado do Paraná, com foco na avaliação de riscos relacionados à escassez ou excesso hídrico. São utilizados dados de precipitação e vazão observada provenientes de estações hidrometeorológicas, dados de radares, satélites ou reanálise. Para estimar vazões em bacias não monitoradas, aplica-se técnicas de aprendizado de máquina para estimativa de parâmetros do modelo hidrológico GR2M. As previsões sazonais são geradas a partir da precipitação do modelo SEAS5/ECMWF para até sete meses. A análise inclui também a estimativa de anomalias mensais e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) nos períodos de 3, 6 e 12 meses. Os resultados são exemplificados para o cenário atual do Estado do Paraná, indicando que a previsão emitida em janeiro de 2025 antecipou corretamente a ocorrência de seca nas regiões Centro-Sul e Oeste do estado, que culminou em decreto estadual de emergência hídrica em maio de 2025. Os dados observados confirmaram essas tendências, comprovando a eficácia do sistema. Assim, o sistema apresentado mostra-se eficiente para apoiar a gestão dos recursos hídricos e ações preventivas diante de eventos críticos.

**Palavras-Chave** – Modelagem hidrológica mensal, Previsão operacional, Eventos extremos

<sup>1)</sup> Simepar - karollyn.quadros@simepar.br

<sup>2)</sup> Simepar - danieli.ferreira@simepar.br

<sup>3)</sup> Simepar - maria.dames@simepar.br

<sup>4)</sup> Simepar - maria.pontello@simepar.br

<sup>5)</sup> Simepar - arlanscort@gmail.com

<sup>6)</sup> Simepar - jose.eduardo@simepar.br

<sup>7)</sup> Sanepar - esteram@sanepar.com.br

<sup>8)</sup> Sanepar - ramarcon@sanepar.com.br

## INTRODUÇÃO

Diante da crise hídrica registrada nos anos de 2020 e 2021 no Sul do Brasil, o Simepar e a Sanepar uniram esforços para implementar um sistema operacional de previsão hidrológica sazonal no Estado do Paraná. Inicialmente voltada a subsidiar a tomada de decisão relacionada às vazões liberadas pelos reservatórios que atendem o Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba (SAIC), a iniciativa foi ampliada para contemplar todas as principais bacias hidrográficas do estado.

A precipitação média histórica de uma região é fundamental para avaliar a variabilidade e os padrões espaciais e temporais das chuvas ao longo do ano. A climatologia, obtida a partir dessa média de dados de diversas estações de monitoramento, e posteriormente espacializada para toda a região, é uma ferramenta essencial nesse processo. Já as anomalias de precipitação têm grande importância no monitoramento e no gerenciamento de recursos hídricos, pois indicam períodos de déficit ou excesso hídrico, usados para a avaliação de eventos extremos, como secas ou inundações. Além dessas análises, a partir de dados históricos, os sistemas de previsão hidrometeorológicos sazonais surgem como subsídios para o gerenciamento de reservatórios e a antecipação de impactos relacionados à disponibilidade hídrica.

Neste estudo, apresenta-se o sistema de previsão sazonal implementado para a plataforma InfoHidro-Sanepar, desenvolvida pelo Simepar em parceria com a Sanepar, para apoio ao gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas onde há mananciais e corpos receptores de lançamentos de efluentes no Paraná. São utilizados dados monitorados de precipitação e vazão, além de outras variáveis meteorológicas, para análise das condições hidrológicas no Estado. Para estimativa das vazões, aplica-se modelagem hidrológica operacional com o modelo GR2M. As técnicas aplicadas incluem aprendizado de máquina para estimar os parâmetros do modelo hidrológico em locais com disponibilidade de dados limitada (KUANA et al., 2023). As previsões *ensemble* de precipitação são provenientes do modelo SEAS5 do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), ajustadas pelo Simepar por meio de pós-processamento estatístico, e permitem previsões com até sete meses de antecedência. A partir disso, são geradas estimativas mensais e probabilísticas de vazão. Além disso, o sistema permite cálculos de anomalias e do SPI (Índice Padronizado de Precipitação) em diferentes escalas temporais.

Com isso, o estudo fornece uma base técnica para o monitoramento da disponibilidade hídrica e a gestão de riscos associados ao abastecimento público ou à qualidade de água, especialmente em cenários extremos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

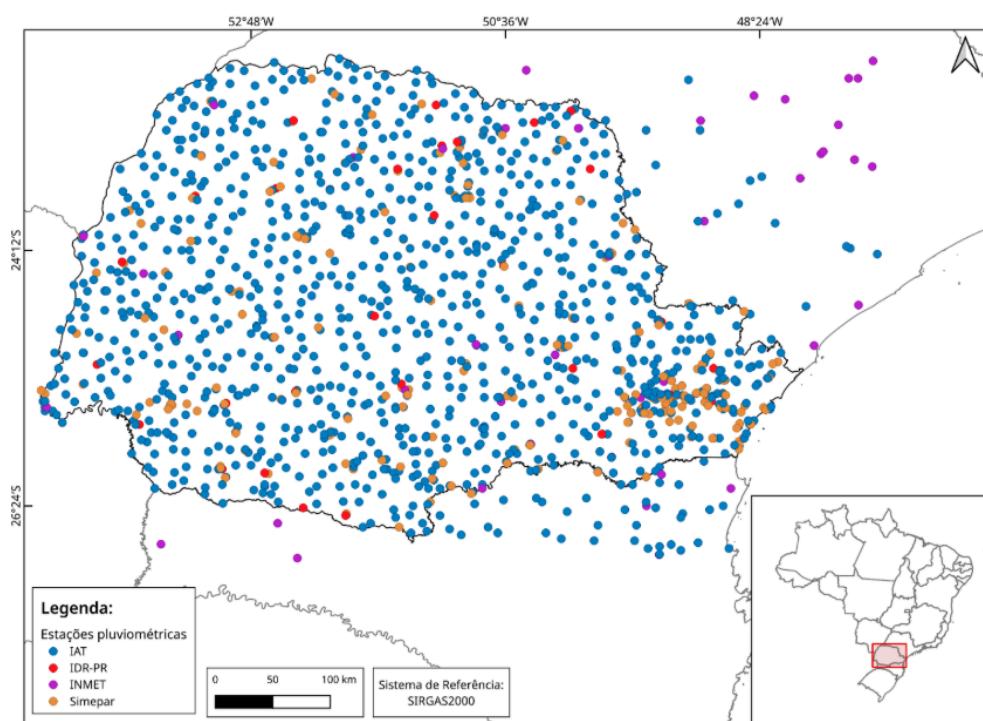
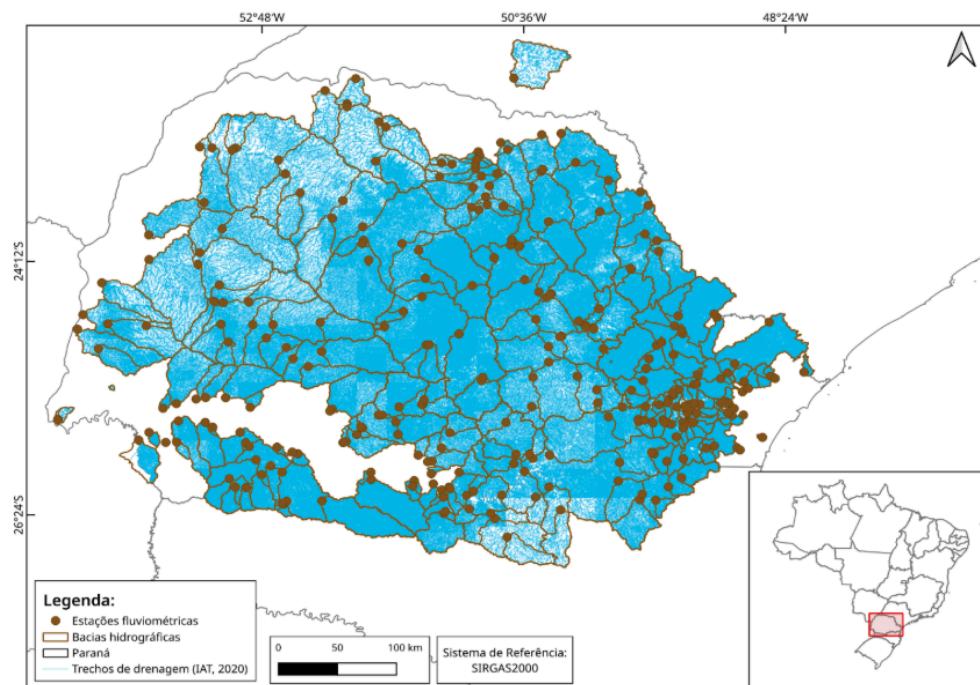
### Área de estudo e dados utilizados

A área de estudo foi delimitada de modo a abranger as bacias hidrográficas do Estado do Paraná, englobando também parte dos estados limítrofes de Santa Catarina e São Paulo, conforme apresentado na Figura 1.

Os dados de precipitação são provenientes de diversas instituições, como ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, Simepar - Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná e IAT - Instituto Água e Terra), bem como de estimativas do sistema operacional SIPREC (CALVETTI et al., 2017), mantido pelo Simepar, e do Climate Prediction Center (CPC).

Os dados fluviométricos, por sua vez, são provenientes, principalmente, de estações convencionais e automáticas em bacia não regularizadas, disponíveis no banco de dados do IAT e do Simepar, contemplando ainda os geradores privados de energia hidrelétrica

Figura 1 – Área de estudo - estações fluviométricas (superior) e pluviométricas (inferior).



Além dos dados de precipitação e vazão, são necessárias séries históricas de Evapotranspiração Potencial (ETP) para a modelagem hidrológica, as quais foram estimadas pelo método FAO Penman-Monteith (Allen et. al., 1998), com base em diversas variáveis meteorológicas monitoradas pelo Simepar (temperatura, radiação solar, etc.).

Destaca-se que diversas bacias de interesse, sobretudo mananciais de abastecimento, não dispõem de medições de vazão para um período de tempo contínuo suficiente para calibração. Por essa razão, foram aplicadas técnicas de modelagem e regionalização de parâmetros dos respectivos modelos hidrológicos, utilizando técnicas de aprendizado de máquina. Essas simulações foram realizadas com modelos ajustados em bacias nas quais há dados históricos de vazão (denominadas “bacias doadoras”). Esse procedimento tem como objetivo produzir estimativas de vazão para bacias não monitoradas (denominadas “bacias alvo”), baseando-se em informações de bacias doadoras que compartilham características fisiográficas, de uso e cobertura da terra, entre outras, semelhantes (KUANA et al., 2023).

### Sistema de Previsão Hidrológica

As previsões de precipitação, necessárias como forçantes nos modelos hidrológicos, são obtidas a partir das saídas do modelo atmosférico desenvolvido e operado pelo ECMWF, mais especificamente o IFS (Sistema Integrado de Previs). Esse centro opera modelos de previsão do tempo em alta resolução, como o SEAS5, que fornece previsões sazonais com horizonte de até sete meses, utilizando um conjunto de 51 membros (*ensembles*). A resolução espacial das previsões probabilísticas globais é de aproximadamente 25 km, o que permite capturar os fenômenos atmosféricos relevantes, conforme descrito em Johnson et al. (2019).

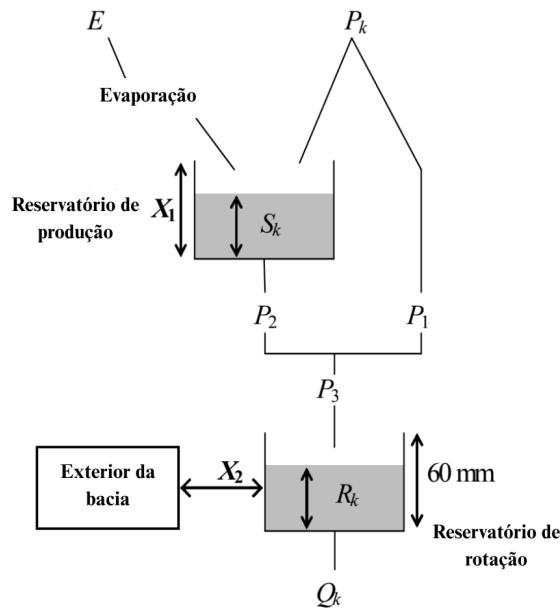
Para atender às necessidades dos modelos hidrológicos adotados, que são do tipo chuva-vazão concentrados, calcula-se a chuva média sobre cada bacia, tomando a média dos valores nos pontos de grade do ECMWF localizados dentro dos limites da bacia. Para garantir maior aderência das previsões às condições locais do Paraná e região, o Simepar realiza um pós-processamento estatístico das previsões, tornando-as mais representativas da realidade local. A partir dessas previsões de precipitação, são então realizadas as previsões hidrológicas, utilizando a abordagem de *ensemble*, integrando os diferentes cenários para estimar a vazão futura nas bacias de interesse. No âmbito do projeto InfoHidro, são geradas mensalmente as previsões de precipitação e, consequentemente, de vazão para os próximos sete meses nas bacias de interesse.

Os resultados do sistema ECMWF/Simepar (previsão do SEAS5 com pós-processamento do Simepar) contém o prognóstico quantitativo de precipitação acumulada para o período desejado. Uma vez que essas previsões de precipitação são realizadas por conjunto (*ensemble*), a forma adotada para apresentação é o mapa de probabilidade de ocorrência do tercil mais provável em cada município. Os tercils são valores associados à ocorrência histórica mensal das precipitações: valores inferiores ao primeiro tercil, entre o primeiro e o segundo, e acima do segundo possuem a mesma probabilidade de ocorrência no longo prazo (1/3). Deve-se atentar, sobretudo em previsões de longo prazo, que conforme se avança no horizonte futuro, os índices associados à assertividade das previsões tendem a reduzir. Assim, o esperado é que as previsões para os primeiros meses reproduzam melhor o comportamento a ser observado.

A partir das previsões de precipitação do sistema ECMWF/Simepar, são forçados os modelos hidrológicos de vazão média mensal. Para as estimativas de previsão de vazão mensal, é utilizado o modelo GR2M (*Modèle Génie Rural à 2 paramètres Mensuel*), uma ferramenta de base conceitual desenvolvida pelo grupo de pesquisa francês Cemagref (atualmente INRAE). Ele opera em escala mensal e tem como principal objetivo a simulação da vazão a partir de dados de

precipitação e evapotranspiração potencial. Sua estrutura simplificada, composta por dois reservatórios (um de produção e outro de routing) (Figura 2), é controlada por apenas dois parâmetros calibráveis, o que o torna especialmente útil em regiões com disponibilidade limitada de dados. Segundo Perrin, Michel e Andréassian (2007), o modelo tem sido amplamente aplicado em diversas regiões do mundo, demonstrando bom desempenho tanto em condições climáticas distintas quanto em estudos de impacto e gestão de recursos hídricos. Dessa forma são produzidas as previsões de vazão nas bacias de interesse, posteriormente, esses resultados são agrupados por município. Adicionalmente, a partir dos *ensembles* de chuva e de variações estatísticas dos parâmetros do modelo, o sistema é rodado 100.000 vezes, permitindo avaliar os resultados em termos probabilísticos de terços secos e úmidos.

Figura 2 – Esquema da estrutura do modelo GR2M.



### Avaliação hidrometeorológica mensal

Para acompanhamento do sistema de previsão, são avaliados mensalmente o comportamento das chuvas e vazões na região de interesse. Para a análise das condições de precipitação observadas, são calculados os acumulados de chuva por município, considerando um período de um ano. Esses totais são então comparados com os valores climatológicos de longo prazo, calculados a partir da série histórica de 42 anos (1979 a 2020). Com base nessa comparação, os valores anuais de precipitação são classificados em cinco categorias, de acordo com sua relação com o comportamento esperado: (1) muito acima do esperado, (2) acima do esperado, (3) dentro do intervalo de normalidade, (4) abaixo do esperado, e (5) muito abaixo do esperado. Essa classificação permite acompanhar o comportamento das chuvas ao longo do tempo e espaço.

Além disso, também são analisadas as anomalias de precipitação. Para a análise mensal, subtrai-se a média histórica previamente calculada do valor de precipitação registrado no mês em análise. Este valor é obtido por meio do SIPREC, um produto do Simepar que utiliza estimativas e correção de viés de precipitação com base em dados de satélites, radares e estações meteorológicas, fornecendo informações em tempo real (CALVETTI et al., 2017). O SIPREC gera valores de precipitação para pontos em uma grade que cobre o estado do Paraná, com resolução espacial de 1 km x 1 km. Como os dados fornecidos são horários, realiza-se o acumulado mensal desses valores.

A partir disso, calcula-se a anomalia de precipitação em cada ponto da grade, expressa em porcentagem.

Com base nos mesmos dados do SIPREC, também são calculados os índices SPI (Standardized Precipitation Index) nos períodos de 3, 6 e 12 meses. O SPI é um indicador estatístico que mede o desvio de precipitação em relação à climatologia de longo prazo, permitindo a identificação de eventos extremos de seca ou excesso de chuva. Valores negativos indicam condições mais secas que o normal, enquanto valores positivos apontam para condições mais úmidas. Os diferentes intervalos de tempo do SPI ajudam a caracterizar os impactos da precipitação anômala em diferentes escalas, como déficit hídrico de curto prazo, recarga de aquíferos ou disponibilidade hídrica acumulada ao longo do ano.

Para as vazões, são estimados os totais médios mensais dos mananciais superficiais, agrupados por município, considerando, em cada localidade, o manancial em situação operacional mais crítica. As vazões mensais estimadas são também comparadas com os valores de referência calculados a partir da série histórica de longo prazo, composta por 40 anos de dados (1981 a 2020). Com base nessa comparação, as vazões foram classificadas em cinco categorias, conforme sua relação com o comportamento esperado: (1) muito acima da vazão esperada no longo prazo (situação de cheia), (2) acima da vazão esperada (situação de rio alto), (3) dentro do intervalo de normalidade, (4) abaixo da vazão esperada (situação de rio baixo) e (5) muito abaixo da vazão esperada (situação de estiagem).

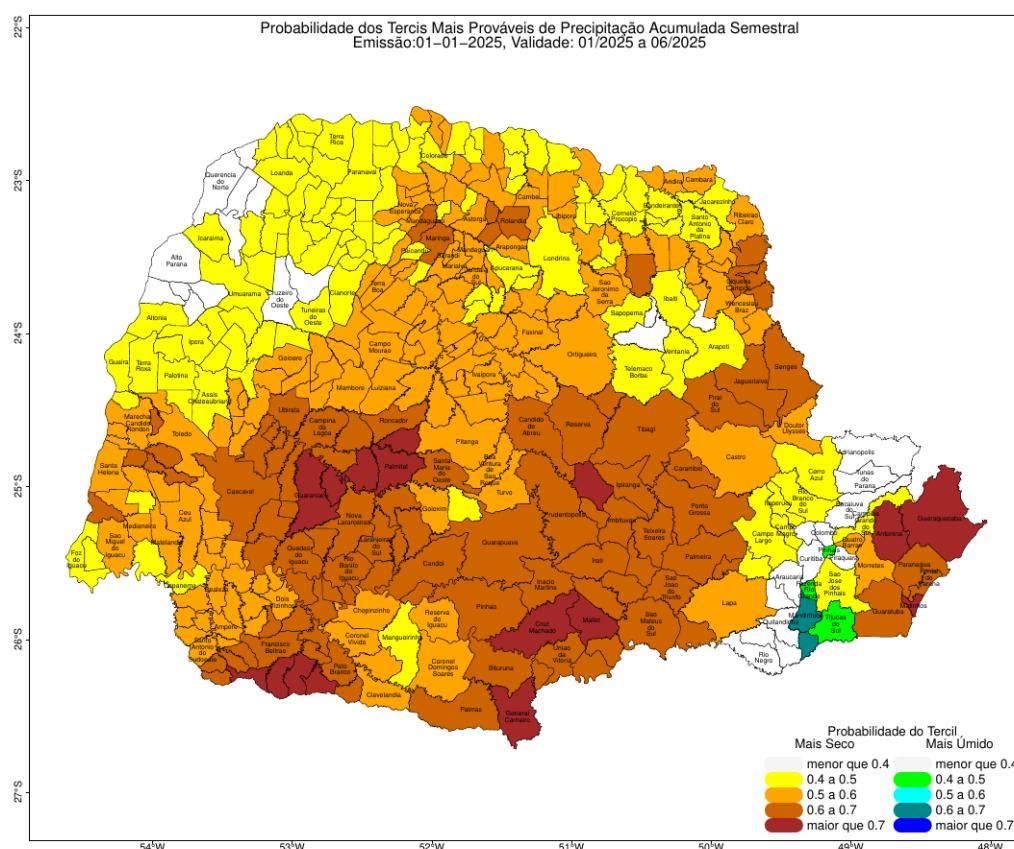
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 ilustra os resultados da previsão sazonal por meio do mapa precipitação acumulada para seis meses à frente, gerada no contexto da plataforma InfoHidro-Sanepar (modelo SEAS5 com pós-processamento pelo Simepar), emitida em janeiro de 2025 e com horizonte até junho do mesmo ano. As cores representam o tercil mais provável (classificado como “seco”, “normal” ou “úmido”) para cada um dos 399 municípios paranaenses, com base na climatologia histórica. A probabilidade associada reflete a confiança do modelo na categoria prevista. Por se tratar de uma previsão por conjunto (*ensemble*), os resultados expressam a frequência com que cada tercil foi o mais provável entre os membros.

Observa-se que o referido mapa já indicava, em janeiro deste ano, uma maior probabilidade de ocorrência de condições secas nas regiões Centro-Sul e Sudoeste do Paraná, o que se concretizou nos meses seguintes. Esse cenário levou o Governo Estadual a publicar o decreto de situação de emergência no Paraná, em 22 de maio de 2025, com impactos no abastecimento de água e na produção agrícola (Agência Estadual de Notícias, 22/05/2025). Municípios como Pato Branco, Foz do Iguaçu e Francisco Beltrão, destacados na publicação oficial como os mais afetados, também aparecem no mapa da Figura 3 com alta probabilidade de tercil seco.

As condições previstas foram confirmadas pelos dados observados. A anomalia de precipitação para o semestre de dezembro de 2024 a maio de 2025, calculada com base nos dados do SIPREC, mostrou valores abaixo da média histórica, especialmente nas regiões Oeste, Centro-Norte e Norte Pioneiro do estado (Figura 4, esquerda). O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) para o mesmo período reforça essa avaliação, com indicações de seca no Oeste e seca moderada no Centro-Oeste (Figura 4, direita), validando o desempenho do sistema de previsão sazonal ora apresentado.

Figura 3 – Previsão ECMWF/Simepar de probabilidades do tercil mais provável de precipitação acumulada semestral para maio/2025, emitida no início de janeiro/2025.



A Figura 5 apresenta as probabilidades de ocorrência de extremos secos nas vazões dos mananciais, com base nas previsões do sistema ECMWF/Simepar emitidas em janeiro de 2025, com validade para o semestre seguinte. Os valores representam a chance de que, em pelo menos um mês do período, a vazão em determinado município fique abaixo do percentil 5% da climatologia histórica (vazão de 95% de permanência, Q95). Os resultados indicam destaque para municípios como Francisco Beltrão e Pato Branco, que já apresentavam, desde o início do ano, probabilidade superior a 60% de ocorrência de extremos secos, ambos posteriormente citados no decreto estadual de emergência de 22/05/2025 (Agência Estadual de Notícias, 2025).

A Figura 6 apresenta o mapa com a análise dos totais anuais de precipitação observada por município no período de junho de 2024 a maio de 2025, comparados à climatologia de referência (1979–2020). Os valores foram classificados em cinco categorias, o que permite identificar áreas com anomalias hídricas relevantes. Esses desvios em relação ao comportamento esperado podem afetar diretamente a recarga hídrica nos sistemas superficiais e subterrâneos, influenciando a disponibilidade de água nos mananciais de abastecimento.

A Figura 7 mostra a situação das vazões médias anuais observadas no mesmo período (junho de 2024 a maio de 2025), em comparação com a climatologia histórica. A classificação segue os mesmos critérios da análise de precipitação, permitindo avaliar o comportamento das vazões em relação ao padrão esperado. Em particular, a vazão média observada no mês de maio de 2025 não superou a média histórica em nenhum município, situando-se entre os intervalos de normalidade e valores muito abaixo do esperado.

Figura 4 – Anomalia de precipitação semestral (esquerda) e SPI de 6 meses (direita).

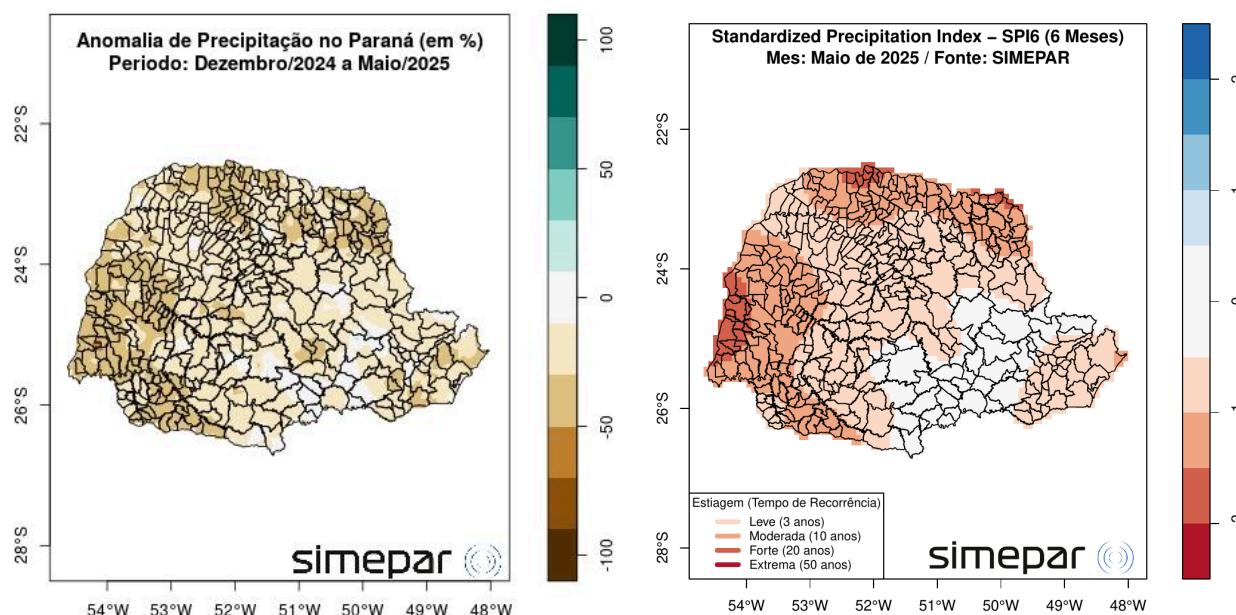


Figura 5 – Previsão ECMWF/Simepar de probabilidades do tercil de extremos secos de vazão nos mananciais. Média semestral para maio/2025, emitida no início de janeiro/2025.

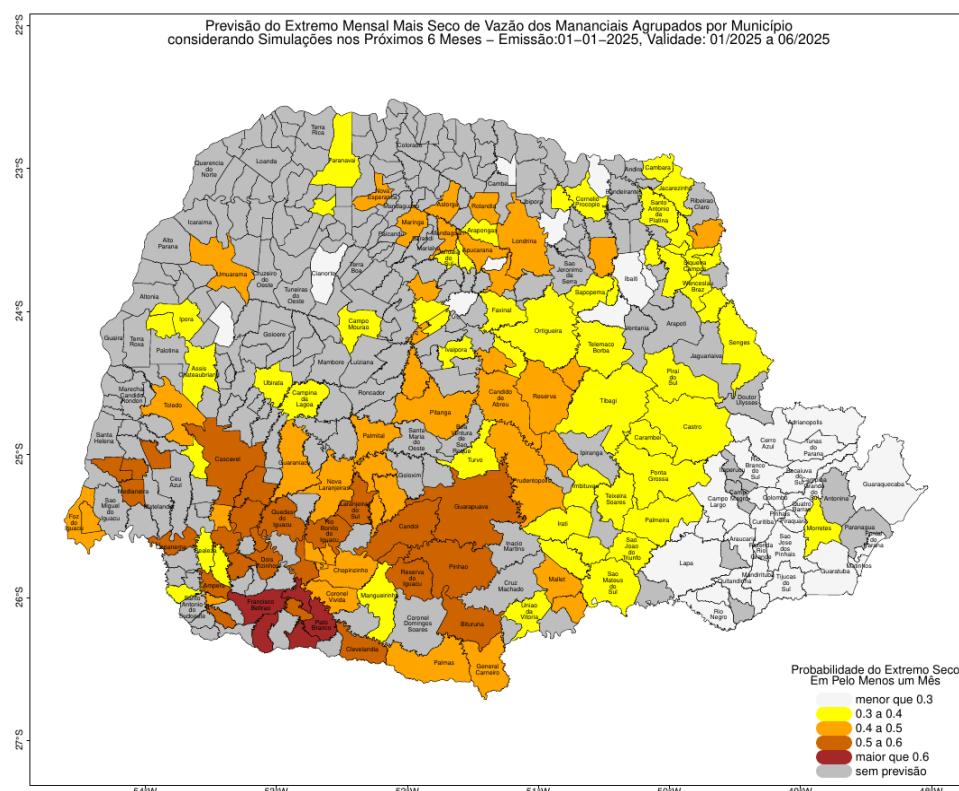


Figura 6 – Situação das precipitações municipais acumuladas em 12 meses.

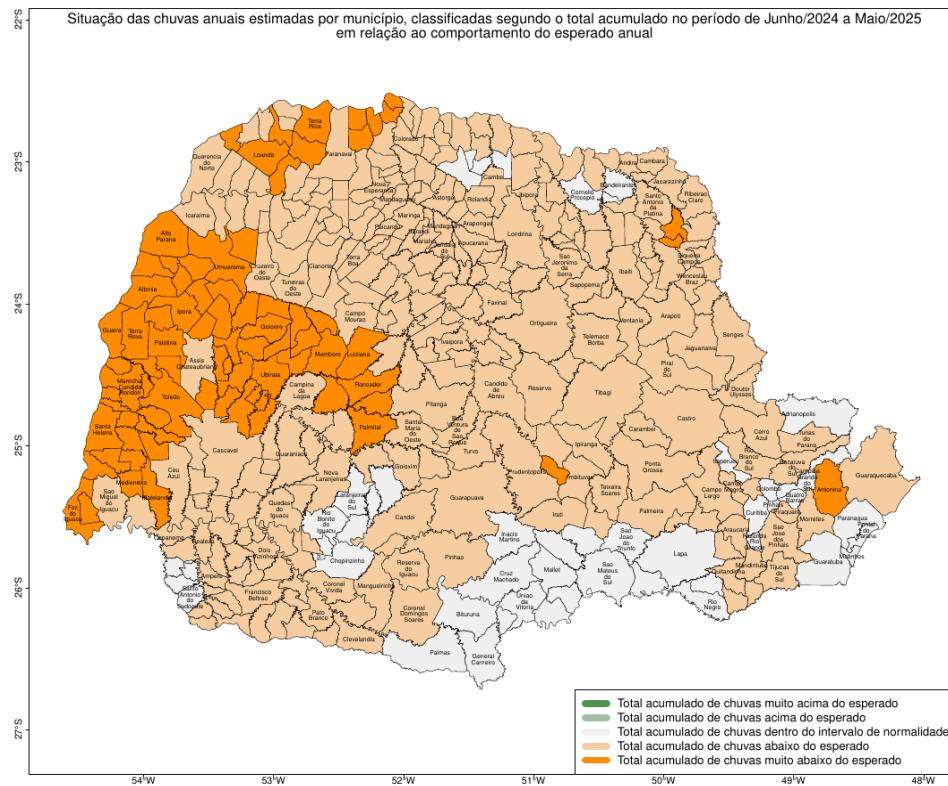
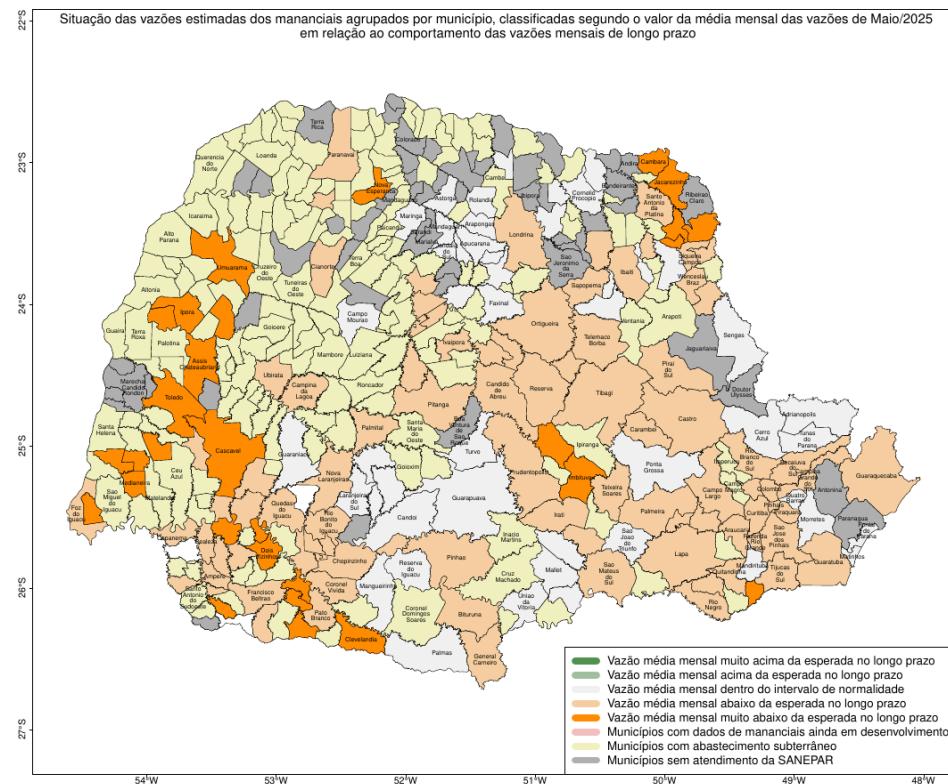


Figura 7 – Situação média das vazões de mananciais por município em 12 meses.



## CONCLUSÃO

Este estudo apresentou um sistema de integração de dados observacionais e previsões mensais para analisar a disponibilidade hídrica no Paraná. São utilizados registros de precipitação e vazão, além de modelagem hidrológica com aplicação de aprendizado de máquina para avaliação de bacias não monitoradas. As previsões do modelo SEAS5/ECMWF, ajustadas pelo Simepar, alimentam o modelo GR2M para previsão das vazões futuras. Também são calculadas anomalias de precipitação e o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) nos períodos de 3, 6 e 12 meses. Os resultados destacam a capacidade do sistema na antecipação de eventos críticos. A previsão sazonal emitida em janeiro de 2025 indicava seca nas regiões Central, Sudoeste e Oeste, o que se confirmou nos meses seguintes. A combinação entre previsão e monitoramento observacional demonstrou eficácia na identificação e validação de cenários de risco hídrico, contribuindo para a gestão preventiva dos recursos hídricos e suporte à tomada de decisão no âmbito do saneamento.

## REFERÊNCIAS

- AEN - Agência Estadual de Notícias (2025). Decreto declara situação de emergência em função da estiagem em todo o Paraná. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Decreto-declara-situacao-de-emergencia-em-funcao-da-estiagem-em-todo-o-Parana>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56. Rome: FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN: 92-5-104219-5.
- CALVETTI, L.; BENETI, C.A.; NEUNDORF, R.L.A.; INOUYE, R.T.; SANTOS, T.N.; GOMES, A.M.; HERDIES, D.; GONÇALVES, L.G.G. (2017). “Quantitative precipitation estimation integrated by Poisson’s equation using radar mosaic, satellite and rain gauge network”. *Journal of Hydrologic Engineering* 22 (5).
- CPC (2025). Climate forecasts. Disponível em: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- JOHNSON, Stephanie J. et al. SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system. *Geoscientific Model Development*, v. 12, n. 3, p. 1087-1117, 2019.
- KUANA, L. A.; ALMEIDA, A. S.; MERCURI, E. G. F.; NOE, S. M. (2023). Regionalization of GR4J model parameters for river flow prediction in Paraná, Brazil. *EGUSphere*, 1–28.
- PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDREASSIN, V. (2007). Modèles hydrologiques du génie rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, v. 16.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) pelo apoio e agradecem a Companhia de Saneamento do Estado do Paraná (SANEPAR) pela oportunidade de realização deste estudo.