INTEGRAÇÃO DE MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO E PREVISÕES DE MÉDIO PRAZO PARA APOIO À GESTÃO DE RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO

Danieli Mara Ferreira[(1)]
Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e pesquisadora em Hidrologia no SIMEPAR. Atua no desenvolvimento de sistemas de previsão de vazão, qualidade da água, inundações e alagamentos, com experiência em projetos para os setores de saneamento, energia elétrica, comitês de bacia e agências reguladoras.
José Eduardo Gonçalves
Doutor em Oceanografia, Gerente de Hidrologia e Infraestrutura no SIMEPAR.
Raul Alberto Marcon
Coordenador de Gestão de Recursos Hídricos - Gerência de Recursos Hídricos - GHID - DMA/SANEPAR.
Ester Amélia Assis Mendes
Gerente de Recursos Hídricos - GHID - Diretoria de Meio Ambiente e Ação Social DMA/SANEPAR.

Endereço[(1)]**:** Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 210 - Jardim das América - Curitiba - PR - CEP: 81530-900 - Brasil - Tel: +55 (41) 3320-2000 - e-mail: danieli.ferreira@simepar.br.

RESUMO

A gestão de reservatórios de abastecimento público demanda ferramentas capazes de antecipar a evolução dos volumes armazenados, subsidiando decisões operacionais e estratégias de segurança hídrica. Neste estudo é apresentado um sistema operacional para prognóstico mensal de volumes em reservatórios, integrando modelagem chuva-vazão, balanço hídrico simplificado, vazões operativas e cenários de precipitação. A ferramenta foi desenvolvida no âmbito da plataforma InfoHidro e aplicada aos reservatórios de Iraí, Passaúna e Piraquara I e II, que integram o sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Curitiba (PR). O componente hidrológico utiliza modelagem conceitual, enquanto o módulo de balanço hídrico incorpora informações operacionais dos reservatórios. Foram gerados cenários climatológico, seco, muito seco e úmido, permitindo avaliar diferentes trajetórias futuras de armazenamento. Os resultados demonstraram capacidade satisfatória de reprodução da dinâmica observada dos reservatórios. As projeções evidenciaram elevada sensibilidade dos sistemas às condições pluviométricas futuras, especialmente nos reservatórios de Iraí e Passaúna. A implementação da metodologia na plataforma InfoHidro amplia sua aplicação operacional, fornecendo suporte à gestão de recursos hídricos, ao planejamento de sistemas de abastecimento e à avaliação da segurança hídrica.

PALAVRAS-CHAVE: Reservatórios de abastecimento, Previsão hidrológica, Balanço hídrico, Segurança hídrica, InfoHidro.

INTRODUÇÃO

A gestão de reservatórios destinados ao abastecimento público exige avaliações contínuas da disponibilidade hídrica e dos riscos associados à redução dos volumes armazenados. Em períodos de estiagem ou de elevada demanda, a antecipação de cenários futuros torna-se fundamental para subsidiar decisões relacionadas à operação dos sistemas produtores, definição de estratégias de uso da água e mitigação de riscos de desabastecimento.

Embora os volumes observados permitam caracterizar a condição atual dos reservatórios, a tomada de decisão depende cada vez mais da capacidade de estimar sua evolução futura sob diferentes condições hidrológicas e operacionais. Nesse contexto, ferramentas de prognóstico tornam-se importantes instrumentos de apoio à gestão, permitindo avaliar tendências de recuperação ou depleção dos volumes armazenados com antecedência suficiente para adoção de medidas operacionais.

Estudos recentes têm destacado a importância da integração entre modelagem hidrológica, balanço hídrico e cenários prospectivos para aumentar a resiliência dos sistemas de abastecimento frente à variabilidade climática e eventos extremos (Beça et al., 2023; Dash et al., 2023). Tais abordagens permitem antecipar situações de escassez hídrica e subsidiar estratégias operacionais voltadas à manutenção da segurança do abastecimento.

Metodologias simplificadas baseadas em balanço hídrico e modelagem hidrológica conceitual podem fornecer estimativas consistentes da evolução do armazenamento, utilizando informações amplamente disponíveis e reduzindo significativamente a complexidade operacional.

Este trabalho apresenta uma ferramenta de prognóstico mensal de volumes armazenados integrando modelagem chuva-vazão, balanço hídrico simplificado e cenários prospectivos de precipitação. A metodologia foi aplicada aos reservatórios do Sistema Integrado de Abastecimento da Região Metropolitana de Curitiba (Paraná), com o objetivo de fornecer cenários de apoio à tomada de decisão e à gestão da segurança hídrica.

A ferramenta foi desenvolvida no âmbito do projeto “Sistema de Informações Hidrometeorológicas e Ambientais para a Gestão de Recursos Hídricos”, consolidado na plataforma InfoHidro, e desenvolvido pelo Simepar (Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná) em parceria com a Sanepar (Companhia de Saneamento do Paraná). O Simepar é uma instituição de Serviço Social Autônomo vinculada à Sedest (Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável), e conta com uma extensa rede de monitoramento hidrometeorológico no Paraná, fornecendo dados de alta resolução temporal de chuva, temperatura, nível e vazão dos rios, entre outras variáveis ambientais. As informações são analisadas e utilizadas para desenvolver ferramentas para apoiar a tomada de decisão em setores como energia, indústria, defesa civil e saneamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Plataforma InfoHidro

A Plataforma InfoHidro consiste em um ambiente computacional voltado à integração, processamento e análise de informações hidrológicas e hidrometeorológicas para suporte à gestão de recursos hídricos. A solução reúne, em uma única interface, dados observados e previsões de precipitação, vazão, qualidade da água, uso e ocupação do solo e condições de reservatórios, transformando grandes volumes de dados em informações operacionais para tomada de decisão.

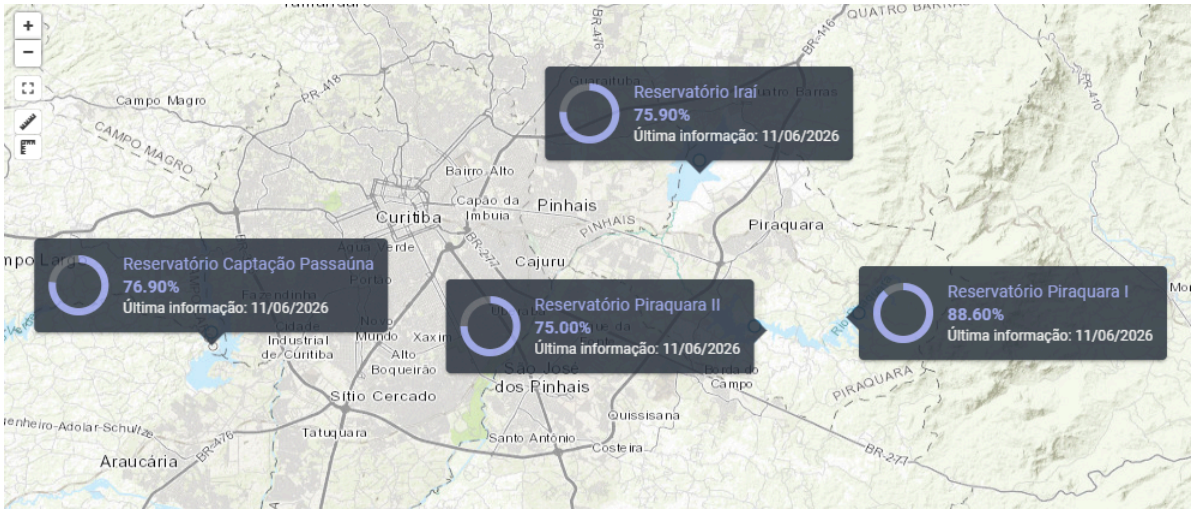
A plataforma disponibiliza monitoramento em tempo real das condições hidrológicas das bacias hidrográficas, bem como previsões hidrometeorológicas de curto prazo, atualizadas diariamente. Os resultados são apresentados por meio de mapas, gráficos, indicadores e classificações de estado hidrológico, permitindo rápida identificação de situações críticas associadas a eventos de estiagem, cheias ou alterações na disponibilidade hídrica.

Além do acompanhamento operacional, o sistema produz cenários prospectivos de precipitação e vazão em horizontes de médio prazo, subsidiando ações de planejamento, operação de sistemas de abastecimento, gestão de reservatórios, avaliação de disponibilidade hídrica e atendimento a requisitos regulatórios e ambientais.

A metodologia empregada combina modelagem hidrológica conceitual amplamente consolidada na literatura científica com técnicas avançadas de análise de dados e inteligência artificial. Essa abordagem permite ampliar a capacidade de representação hidrológica mesmo em regiões com limitada disponibilidade de dados observados, favorecendo aplicações em diferentes contextos de gestão de recursos hídricos.

A arquitetura da plataforma foi concebida para ser adaptável a distintas realidades operacionais, podendo ser aplicada em bacias hidrográficas destinadas ao abastecimento público, geração de energia, irrigação, controle de cheias, monitoramento ambiental e gestão de lançamentos de efluentes. Dessa forma, o InfoHidro constitui uma solução integrada para aumento da previsibilidade hidrológica, redução de riscos operacionais e fortalecimento da segurança hídrica.

Figura 1 - Acompanhamento do monitoramento do volume dos reservatórios pelo sistema InfoHidro



Sistema de Previsão de Volume dos Reservatórios

O Sistema de Previsão de Volume dos Reservatórios foi desenvolvido para apoiar o planejamento operacional e estratégico de sistemas de armazenamento de água, permitindo antecipar a evolução dos volumes armazenados sob diferentes condições hidrológicas futuras. A metodologia integra informações hidrológicas, climatológicas e operacionais em uma estrutura modular, possibilitando sua adaptação a diferentes reservatórios e contextos de gestão.

A) Componente climatológico e pluviométrico:

Este componente reúne as informações da caracterização das condições hidrometeorológicas atuais e futuras da bacia contribuinte.

As principais entradas incluem:

- Precipitação observada proveniente de redes pluviométricas, radar meteorológico ou sensoriamento remoto;
- Climatologia de precipitação;
- Evapotranspiração potencial estimada a partir de dados meteorológicos ou produtos de sensoriamento remoto.

B) Componente hidrológico:

O componente hidrológico é responsável pela estimativa das vazões afluentes aos reservatórios. Para essa finalidade, emprega-se a modelagem chuva-vazão em escala mensal por meio do modelo conceitual GR2M (Génie Rural à 2 paramètres Mensuel), desenvolvido por pesquisadores franceses e amplamente utilizado em estudos de planejamento e gestão de recursos hídricos (Mouelhi et al., 2006).

O GR2M integra a família de modelos GR, desenvolvida pelo *Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations* e pelo *Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture*, na França. O modelo realiza a transformação da precipitação e da evapotranspiração potencial (ETP) em vazão, representando de forma simplificada os principais processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica.

C) Componente de armazenamento e operação:

Este módulo representa o comportamento operacional dos reservatórios, incorporando informações específicas de cada sistema, tais como:

- Volume armazenado observado;
- Curvas cota-volume;
- Captações para abastecimento, indústria ou irrigação;
- Descargas operacionais;
- Vertimentos;
- Restrições físicas e operacionais de armazenamento.

A estrutura flexível permite que regras operacionais específicas sejam incorporadas conforme as características de cada empreendimento.

D) Componente de balanço hídrico:

A evolução dos volumes armazenados é calculada por meio do balanço entre entradas e saídas do sistema.

Podem ser consideradas:

- Vazões afluentes simuladas;
- Precipitação incidente sobre o reservatório;
- Evaporação;
- Captações;
- Descargas operacionais, atualizadas em planilha;
- Vertimentos.

O modelo respeita os limites físicos de armazenamento, permitindo representar situações de esgotamento ou extravasamento do reservatório.

E) Componente de prognóstico:

Com base nas projeções hidrológicas e nas condições operacionais definidas pelo usuário, são gerados diferentes cenários prospectivos de armazenamento, incluindo:

- Cenário climatológico (condições médias históricas);
- Cenário seco (-25% da climatologia);
- Cenário muito seco (-50% da climatologia);
- Cenário úmido (+25% da climatologia);
- Cenário de tendência linear;
- Cenários customizados definidos pelo operador.

A avaliação simultânea de múltiplos cenários permite quantificar incertezas e identificar antecipadamente potenciais situações críticas de disponibilidade hídrica.

RESULTADOS

A Figura 2 apresenta a evolução do armazenamento dos reservatórios de Iraí, Passaúna e Piraquara I e II, juntamente com os acumulados mensais de precipitação observados e os cenários de chuva utilizados nas

projeções. A linha tracejada vertical representa o instante de emissão da previsão, separando o período histórico do período prospectivo.

De forma geral, observa-se que o período histórico foi caracterizado por elevada variabilidade pluviométrica, com predominância de meses apresentando precipitações abaixo da climatologia. Nos três sistemas, os totais observados (barras vermelhas) foram frequentemente inferiores aos valores climatológicos (barras azuis claras), especialmente entre o segundo semestre de 2025 e o primeiro semestre de 2026. Esse déficit pluviométrico contribuiu para a redução gradual dos volumes armazenados observada ao longo do período.

O reservatório de Iraí apresentou a maior variabilidade de armazenamento entre os sistemas analisados. Após iniciar o período com volumes superiores a 100%, ocorreu uma redução progressiva até valores próximos de 65–75%, refletindo a sequência de meses com precipitações inferiores à média. Nas projeções, verifica-se elevada sensibilidade às condições futuras de chuva, com diferença superior a 40 pontos percentuais entre os cenários extremos ao final do horizonte de previsão. Enquanto o cenário úmido indica recuperação até níveis próximos da capacidade máxima, o cenário seco projeta redução para valores próximos de 60%.

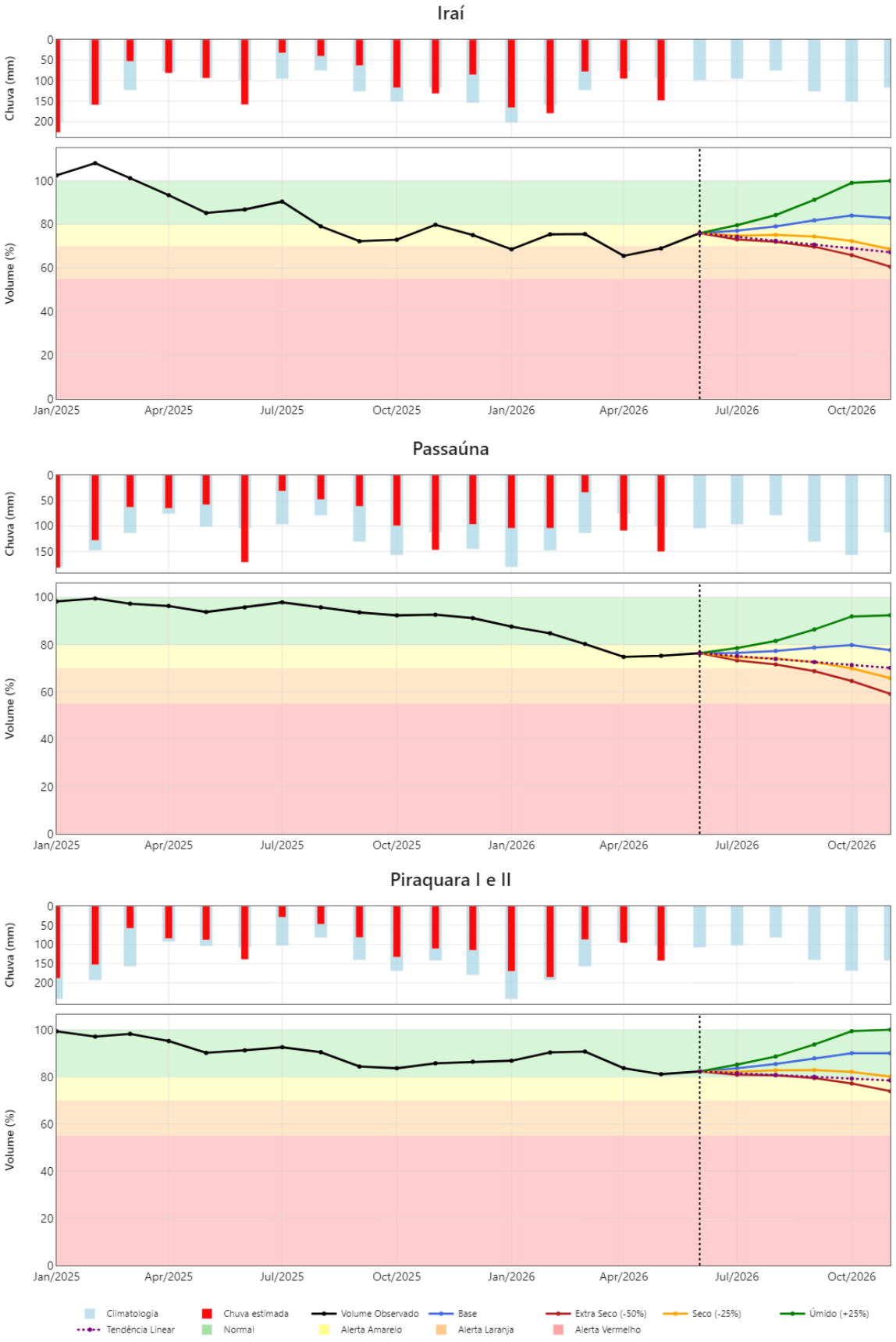
No reservatório de Passaúna, observa-se comportamento semelhante, porém com tendência de redução mais contínua ao longo do período histórico. O volume armazenado diminui gradualmente de aproximadamente 100% para cerca de 75%, acompanhando a persistência de precipitações abaixo da climatologia em diversos meses consecutivos. As projeções indicam que o sistema permanece relativamente resiliente, mas também apresenta forte dependência das condições pluviométricas futuras. No cenário mais favorável ocorre recuperação para níveis próximos de 90%, enquanto no cenário mais restritivo o armazenamento pode se aproximar de 60%.

Já o sistema Piraquara I e II apresentou comportamento mais estável ao longo da série histórica. Apesar dos déficits pluviométricos observados, os volumes permaneceram predominantemente entre 80% e 95%, indicando maior capacidade de amortecimento frente às variações hidrológicas recentes. Consequentemente, as projeções apresentam menor dispersão entre os cenários quando comparadas aos demais reservatórios. Ainda assim, observa-se tendência de recuperação no cenário úmido e redução gradual nos cenários mais secos.

A análise conjunta evidencia uma relação consistente entre os padrões de precipitação e a evolução dos volumes armazenados. Durante o período observado, a recorrência de meses com chuvas inferiores à climatologia resultou em redução gradual dos níveis dos reservatórios. Por outro lado, os cenários prospectivos demonstram que a recuperação dos volumes depende diretamente da ocorrência de precipitações acima da média nos meses subsequentes. A divergência crescente entre as trajetórias simuladas ao longo do horizonte de previsão reflete a incerteza inerente às condições meteorológicas futuras e reforça a importância do monitoramento contínuo e da atualização periódica das previsões.

Sob a ótica operacional, os resultados indicam que os reservatórios apresenta risco imediato de atingir faixas críticas de armazenamento durante o horizonte analisado, considerando as condições de operação definidas. Entretanto, os cenários secos sugerem aproximação das faixas de atenção, principalmente para Iraí e Passaúna, o que justifica o acompanhamento preventivo das condições hidrológicas e a utilização das projeções como ferramenta de suporte à tomada de decisão.

Figura 2 - Série temporal dos volumes armazenados observados e projetados para os reservatórios de Iraí, Passaúna e Piraquara I e II. As barras superiores apresentam a comparação entre a precipitação observada e a climatologia mensal, evidenciando períodos com déficits ou excedentes pluviométricos. A partir da data de emissão da previsão (linha tracejada), são apresentados diferentes cenários prospectivos de armazenamento, permitindo avaliar a sensibilidade dos reservatórios às condições hidrológicas futuras e subsidiar o planejamento operacional dos sistemas de abastecimento.


Iraí
Chuva (mm)
0
50
100
150
200
Volume (%)
100
80
60
40
20
0
Jan/2025
Apr/2025
Jul/2025
Oct/2025
Jan/2026
Apr/2026
Jul/2026
Oct/2026
Passaúna
Chuva (mm)
0
50
100
150
Volume (%)
100
80
60
40
20
0
Jan/2025
Apr/2025
Jul/2025
Oct/2025
Jan/2026
Apr/2026
Jul/2026
Oct/2026
Piraquara I e II
Chuva (mm)
0
50
100
150
200
Volume (%)
100
80
60
40
20
0
Jan/2025
Apr/2025
Jul/2025
Oct/2025
Jan/2026
Apr/2026
Jul/2026
Oct/2026
Climatologia
Chuva estimada
Volume Observado
Base
Extra Seco (-50%)
Seco (-25%)
Úmido (+25%)
Tendência Linear
Normal
Alerta Amarelo
Alerta Laranja
Alerta Vermelho

Quanto à performance do modelo, os resultados indicaram vieses médios negativos entre 2,5 e 3,3 hm³ entre fevereiro de 2025 e maio de 2026, evidenciando uma leve tendência conservadora das projeções. Considerando a escala temporal mensal adotada e o objetivo de suporte ao planejamento operacional, os desempenhos obtidos foram considerados satisfatórios para a aplicação proposta, com o sistema capaz de representar satisfatoriamente as tendências de enchimento e deplecionamento dos reservatórios.

Parte das diferenças observadas entre os volumes simulados e observados pode ser atribuída à variabilidade operacional histórica não explicitamente representada pelo modelo, e não necessariamente à capacidade de representação dos processos hidrológicos.

Diferentemente de abordagens puramente estatísticas, a metodologia proposta preserva a interpretação física dos processos que controlam a evolução do armazenamento. Dessa forma, torna-se possível identificar e quantificar separadamente os efeitos das afluências, das condições meteorológicas e das demandas operacionais sobre os volumes armazenados, fornecendo informações adicionais para análise e suporte à gestão dos sistemas de abastecimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma metodologia para projeção de volumes armazenados em reservatórios de abastecimento, integrando informações hidrológicas, meteorológicas e operacionais em uma estrutura capaz de representar a evolução futura do armazenamento sob diferentes cenários.

Os resultados obtidos para os reservatórios de Iraí, Passaúna e Piraquara I e II, localizados em Curitiba e Região Metropolitana (PR) demonstraram que a abordagem é capaz de reproduzir adequadamente a dinâmica de armazenamento observada, fornecendo estimativas consistentes para aplicações de planejamento e apoio à operação.

Mais importante do que estimar um único valor futuro, a abordagem permite responder a questões frequentemente enfrentadas por gestores de recursos hídricos e operadores de sistemas de abastecimento, tais como:

- qual o volume esperado para os próximos meses?
- qual a probabilidade de aproximação de níveis operacionais de atenção?
- qual o impacto potencial de condições climáticas mais secas ou mais úmidas (El Niño ou La Niña, por exemplo)?
- quanto tempo o sistema suporta uma sequência de meses secos?
- qual a sensibilidade do sistema a alterações nas demandas de abastecimento?

Diferentemente de abordagens estatísticas, a metodologia preserva a interpretação física dos processos envolvidos, permitindo analisar separadamente os efeitos das afluências, das condições climáticas e da operação dos reservatórios. Essa característica amplia o potencial de utilização da ferramenta em estudos prospectivos, avaliações de segurança hídrica e análises de cenários para suporte à tomada de decisão.

A implementação da ferramenta na plataforma InfoHidro amplia sua aplicabilidade operacional ao permitir a atualização automática das bases de dados utilizadas nas simulações, incluindo precipitação observada, evapotranspiração, volumes armazenados e informações operacionais dos reservatórios. Nesse contexto, a solução desenvolvida fornece aos usuários uma ferramenta prática para acompanhamento da segurança hídrica dos sistemas, permitindo a antecipação de possíveis situações de restrição, a avaliação rápida de cenários hidrológicos alternativos e o apoio ao planejamento operacional dos reservatórios. Além disso, sua estrutura modular favorece a adaptação para diferentes sistemas de abastecimento, contribuindo para a disseminação de ferramentas de apoio à gestão hídrica baseadas em dados observados e projeções hidrológicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BEÇA, P., RODRIGUES, A. C., NUNES, J. P., DIOGO, P., & MUJTABA, B. (2023). Optimizing reservoir water management in a changing climate. *Water Resources Management*, 37(9), 3423-3437.
2. DASH, S. S., SAHOO, B., & RAGHUWANSHI, N. S. (2023). An integrated reservoir operation framework for enhanced water resources planning. *Scientific Reports*, 13(1), 21720.
3. MOUELHI, S., MICHEL, C., PERRIN, C., & ANDRÉASSIAN, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of hydrology*, 318(1-4), 200-214.