AVALIAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS E RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO NO ESTADO DO PARANÁ

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 eficiente dos recursos hídricos depende da disponibilidade de informações integradas capazes de subsidiar o monitoramento, o planejamento e a operação de sistemas de abastecimento. Nesse contexto, o presente estudo apresenta estimativas de balanços hídricos climatológicos mensais em bacias hidrográficas a partir da diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial, utilizando séries históricas consistidas e espacializadas. Adicionalmente, foi realizada a análise do balanço hídrico diário dos reservatórios Iraí, Passaúna e Piraquara I e II (que abastecem Curitiba e Região Metropolitana, PR), com base na diferença entre volumes afluentes e defluentes no período de 2020 a 2025. Os resultados evidenciaram padrões sazonais consistentes com a climatologia regional, com predominância de excedentes hídricos no verão e déficits durante o inverno. Nos reservatórios, observou-se comportamento sazonal semelhante, permitindo identificar períodos de maior e menor disponibilidade hídrica. A integração dessas informações demonstrou potencial para apoiar atividades de monitoramento, planejamento operacional, gestão de mananciais e tomada de decisão no contexto da segurança hídrica.

PALAVRAS-CHAVE: Balanço hídrico, Gestão de reservatórios, Monitoramento hidrológico, Previsão hidrológica, InfoHidro.

INTRODUÇÃO

A crescente variabilidade hidrológica observada nas últimas décadas tem imposto desafios significativos à gestão dos recursos hídricos em diferentes regiões do mundo. Alterações nos padrões de precipitação, aumento da frequência de eventos extremos e mudanças nos processos de evapotranspiração têm impactado diretamente a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, exigindo abordagens cada vez mais integradas para monitoramento, planejamento e operação de sistemas de abastecimento e gestão ambiental. Estudos recentes apontam que as mudanças climáticas tendem a intensificar simultaneamente eventos de estiagem e cheias, ampliando a complexidade da gestão dos recursos hídricos e a necessidade de ferramentas capazes de antecipar condições críticas e subsidiar processos decisórios (Ciampittiello et al., 2024).

Nesse contexto, o acompanhamento contínuo das condições hidrológicas das bacias hidrográficas e reservatórios torna-se fundamental para a garantia da segurança hídrica. Além do abastecimento público, a disponibilidade de água influencia diretamente processos ambientais relacionados à manutenção de vazões ecológicas, à capacidade de diluição de efluentes e à conservação dos ecossistemas aquáticos. A integração de informações hidrológicas, meteorológicas e ambientais em plataformas digitais tem sido apontada como uma

das principais tendências para modernização da gestão de recursos hídricos, permitindo a consolidação de grandes volumes de dados e a geração de indicadores úteis para suporte à decisão.

Entre os diversos indicadores utilizados para avaliação das condições hidrológicas, o balanço hídrico destaca-se por sua simplicidade conceitual e relevância operacional. A relação entre precipitação e evapotranspiração permite identificar períodos de excedente ou déficit hídrico, fornecendo subsídios para avaliação da disponibilidade de água em bacias hidrográficas. Em reservatórios, a análise do balanço entre volumes afluentes e defluentes possibilita compreender padrões de armazenamento, operação e resposta a eventos hidrológicos extremos. A evapotranspiração potencial, componente fundamental dessas análises, é frequentemente estimada pelo método de Penman-Monteith, considerado padrão internacional por organismos e instituições de referência na área de recursos hídricos.

Para companhias de saneamento, a disponibilidade de informações integradas sobre condições hidrológicas representa uma oportunidade para aprimorar estratégias de planejamento operacional e gestão de mananciais. A antecipação de cenários de escassez hídrica, a avaliação das condições dos reservatórios e o acompanhamento das bacias contribuintes podem auxiliar na redução de riscos associados ao abastecimento público e ao atendimento de requisitos ambientais.

Diante desse cenário, o objetivo deste estudo é avaliar a variabilidade espacial e temporal do balanço hídrico em bacias hidrográficas e reservatórios de abastecimento, utilizando informações hidrometeorológicas integradas para produzir indicadores de suporte ao planejamento operacional e à gestão dos recursos hídricos.

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 é um sistema computacional desenvolvido para integrar, processar e disponibilizar informações hidrológicas e hidrometeorológicas destinadas à gestão de recursos hídricos. A plataforma centraliza diferentes fontes de dados em um ambiente único, incluindo informações observadas e prognósticos relacionados à precipitação, vazão, qualidade da água, uso e cobertura do solo e condições de reservatórios, permitindo sua análise integrada e aplicação em processos de tomada de decisão.

O sistema disponibiliza ferramentas de monitoramento contínuo das condições hidrológicas das bacias hidrográficas no Paraná, associadas a previsões hidrometeorológicas atualizadas diariamente. A estrutura metodológica do InfoHidro combina modelos consolidados na literatura com técnicas de processamento de dados, aprendizado de máquina e integração de múltiplas fontes de informação. Os resultados são apresentados por meio de mapas temáticos, séries temporais, indicadores e painéis interativos, possibilitando a avaliação rápida do estado hidrológico e a identificação de situações de interesse, como eventos de estiagem, cheias e alterações na disponibilidade hídrica. Essas informações podem subsidiar atividades de planejamento e operação de sistemas hídricos, avaliação da disponibilidade de água, gestão de reservatórios e suporte a ações de caráter regulatório e ambiental.

Balanço Hídrico nas Bacias Hidrográficas e Reservatórios

O balanço hídrico é uma ferramenta essencial na análise da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica, permitindo estimar a quantidade de água armazenada no sistema ao longo do tempo. Em sua

forma mais simplificada, o balanço pode ser expresso pela diferença entre Precipitação (P) e Evapotranspiração Potencial (ETP).

Essa abordagem fornece uma estimativa da potencial disponibilidade de água, considerando a precipitação como o principal aporte hídrico e a evapotranspiração como a principal saída. Neste estudo, optou-se por utilizar esse método com base nas médias mensais históricas (climatologia) de chuva e evapotranspiração. Ao utilizar médias climatológicas, reduz-se a influência de variações interanuais extremas, permitindo identificar tendências das condições hídricas das bacias.

Esse tipo de análise é particularmente relevante para o setor de saneamento, tanto em bacias com mananciais de abastecimento, quanto em bacias onde há lançamento de efluentes tratados. No primeiro caso, um balanço hídrico positivo indica maior disponibilidade natural de água, o que favorece a segurança hídrica. No segundo, balanços negativos podem sinalizar maior vulnerabilidade à concentração de poluentes e menor capacidade de diluição dos efluentes, com implicações para o enquadramento e a qualidade da água dos corpos receptores.

Para as estimativas de climatologia de precipitação, dados de diferentes fontes foram obtidos a partir de estações pluviométricas operadas por instituições como Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025), Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR, 2025) e Instituto Água e Terra (IAT, 2025). Os dados passaram por um processo de verificação e consistência, e então foram agregados e interpolados espacialmente, permitindo a geração de superfícies contínuas de precipitação média mensal para todo o estado do Paraná. Essas superfícies constituem a base para os cálculos do balanço hídrico em cada bacia hidrográfica. Assim, a climatologia mensal resultante permitiu representar a distribuição espacial da precipitação ao longo do tempo nas diferentes bacias de interesse.

O cálculo da evapotranspiração potencial foi realizado com base em dados meteorológicos (temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento), também submetidos a critérios de consistência e completude. O método adotado para o cálculo foi o de Penman-Monteith, amplamente reconhecido por sua robustez e recomendação internacional em estudos hidrológicos e agrícolas. As séries foram processadas para obter a ETP média mensal, e, posteriormente, espacializadas de forma análoga à precipitação, resultando em mapas climatológicos mensais de ETP. O balanço hídrico climatológico foi então obtido pela diferença entre os mapas mensais de precipitação e evapotranspiração potencial ($P - ETP$), permitindo identificar espacialmente regiões com excedente ou déficit hídrico ao longo do tempo.

Por sua vez, a estimativa do balanço hídrico nos reservatórios Iraí, Passaúna e Piraquara I e II foi realizada com base na diferença entre as vazões afluentes e defluentes, convertidas para volumes diários. As séries utilizadas contemplaram o período entre 2020 e 2025, organizadas em séries temporais diárias, permitindo avaliar a sazonalidade e identificar períodos de maior armazenamento ou déficit nos sistemas.

O balanço hídrico diário foi calculado com base na diferença entre os volumes afluentes e defluentes estimados, conforme a diferença entre o volume diário afluente, obtido a partir das vazões simuladas pelos modelos hidrológicos, e o volume diário defluente, estimado com base na variação diária do volume armazenado em cada reservatório.

As vazões afluentes foram estimadas por meio de modelos hidrológicos previamente calibrados ou regionalizados para a bacia de contribuição de cada reservatório (Kuana et al., 2024). As simulações consideram a geração de escoamento a partir de dados meteorológicos (precipitação, temperatura, entre outros), além de características fisiográficas da bacia como uso do solo, topografia e tipo de solo. Os volumes de água armazenados, por sua vez, foram estimados com base em dados observacionais de nível d'água obtidos por sensores instalados nos reservatórios. A conversão dos níveis diários em volumes foi realizada por meio da aplicação de curvas cota-volume específicas de cada reservatório, previamente geradas a partir de levantamentos batimétricos.

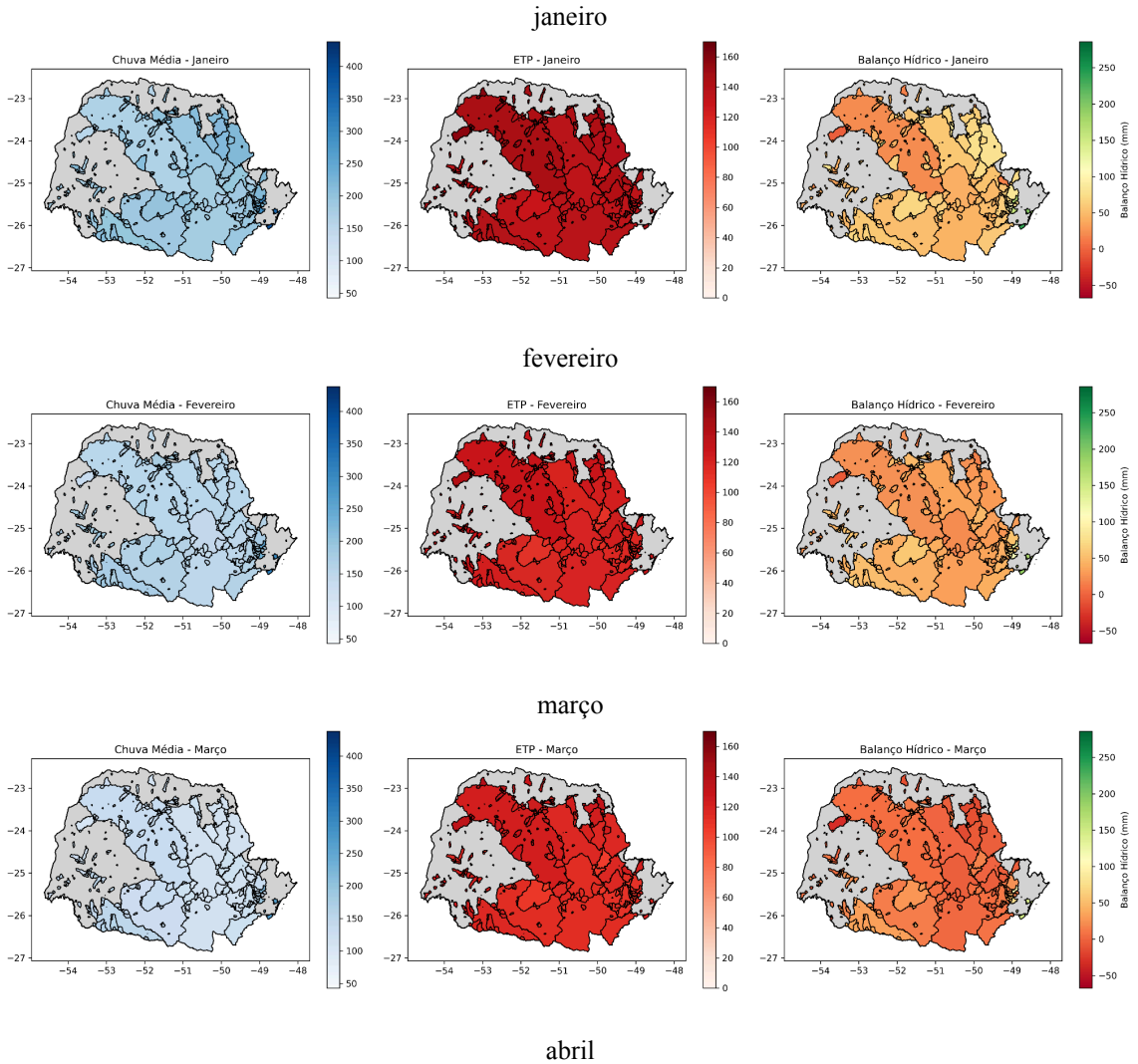
RESULTADOS

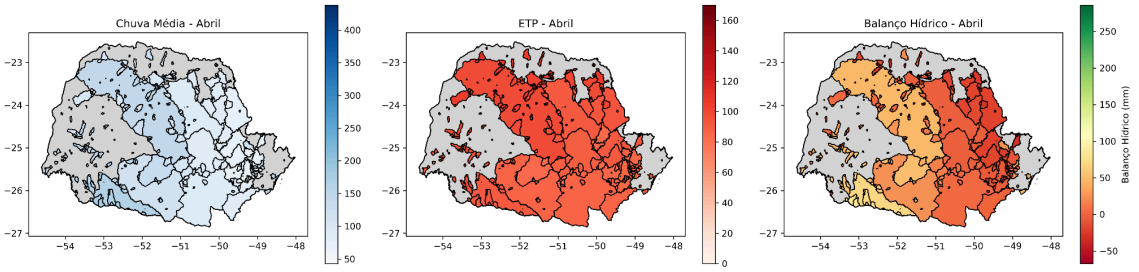
As Figuras 1 e 2 apresentam as estimativas de climatologia de chuva e evapotranspiração potencial, acompanhadas do resultante balanço hídrico. Valores positivos indicam excedente de água (chuvas > evapotranspiração), enquanto valores negativos indicam déficit hídrico (chuvas < evapotranspiração).

A análise dos mapas mensais de balanço hídrico climatológico permite identificar a dinâmica hídrica ao longo do ano e avaliar períodos de excedente e déficit de água na região do Paraná. Entre os meses de fevereiro e março, observa-se predomínio de excedente hídrico, reflexo do período chuvoso característico do verão. Fevereiro apresenta os maiores valores positivos, indicando disponibilidade hídrica favorável para recarga de aquíferos e manutenção dos níveis dos mananciais. A partir de abril, inicia-se uma tendência de redução da umidade no solo, com déficits localizados que se intensificam nos meses subsequentes. Entre maio e julho, há um predomínio do déficit hídrico em quase toda a região analisada, atingindo seu ponto mais crítico em julho, quando praticamente não se observa áreas com saldo positivo. Em setembro e outubro, nota-se uma ligeira recuperação em algumas áreas, o que indica o fim do período seco e a transição para o início da estação chuvosa.

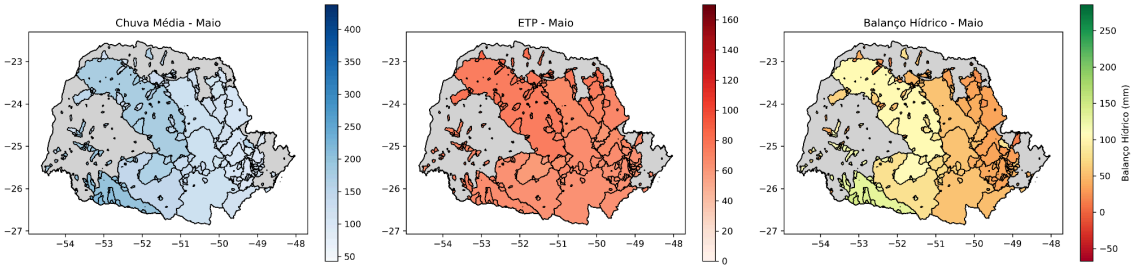
Essa variação sazonal é consistente com o clima Paranaense, apresentando forte influência do regime de chuvas e da sazonalidade da evapotranspiração. Assim, tem-se a identificação de áreas com déficit acentuado, essencial para o planejamento de uso da água e gestão de recursos hídricos para o setor de saneamento.

Figura 3 - Mapas mensais de climatologia e estimativa de balanço hídrico em bacias hidrográficas no Paraná.

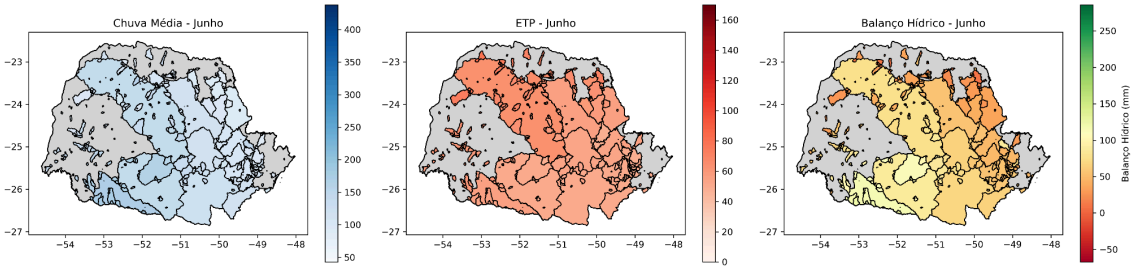




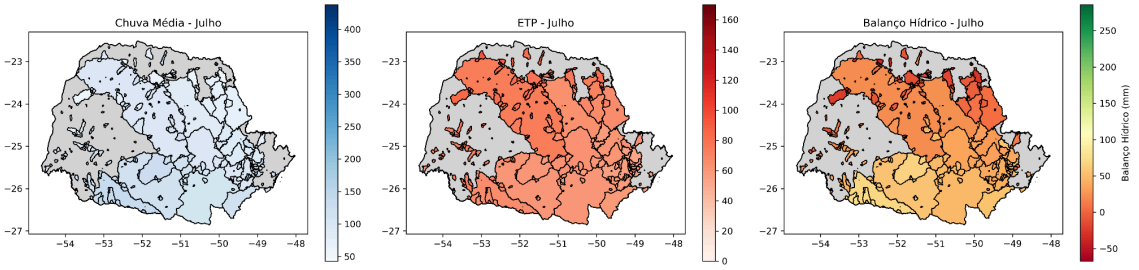
maio



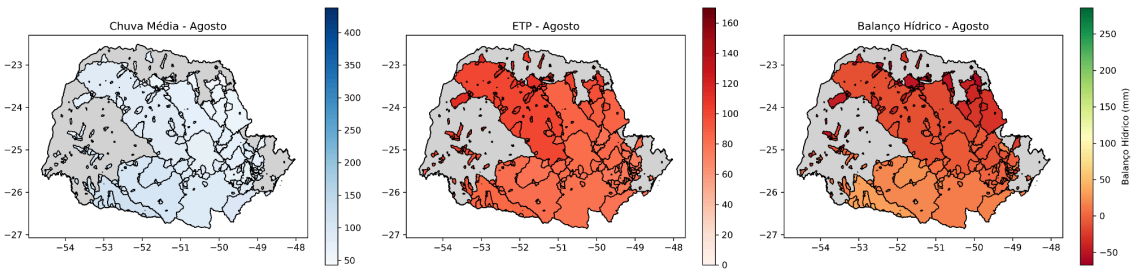
junho



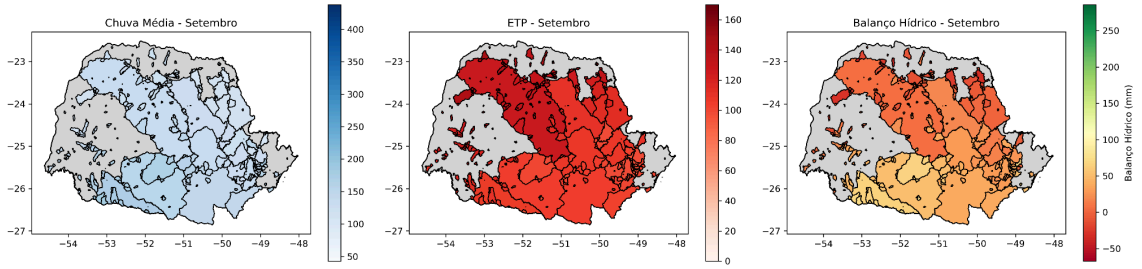
julho



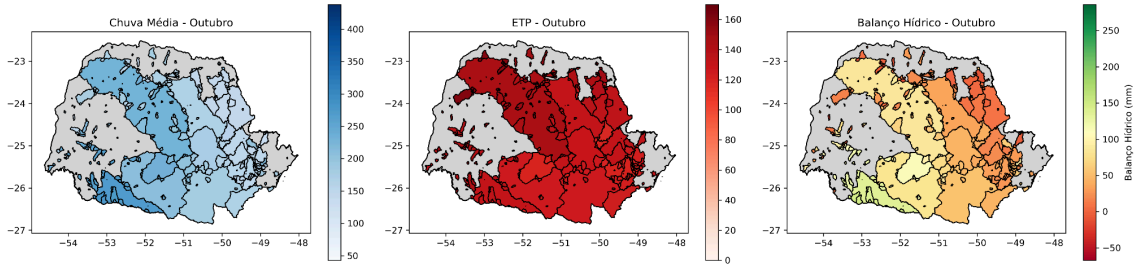
agosto



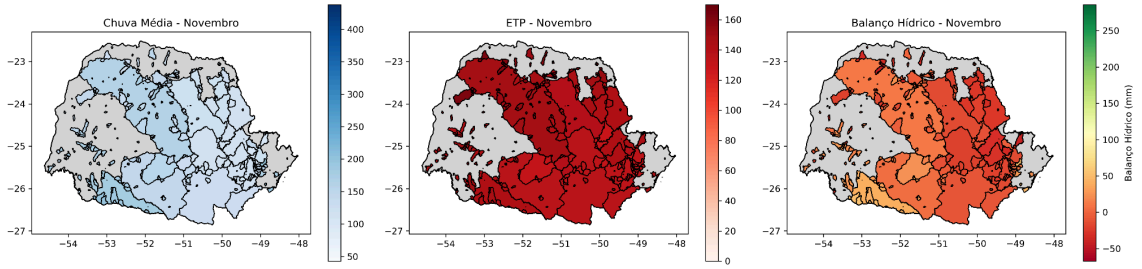
setembro



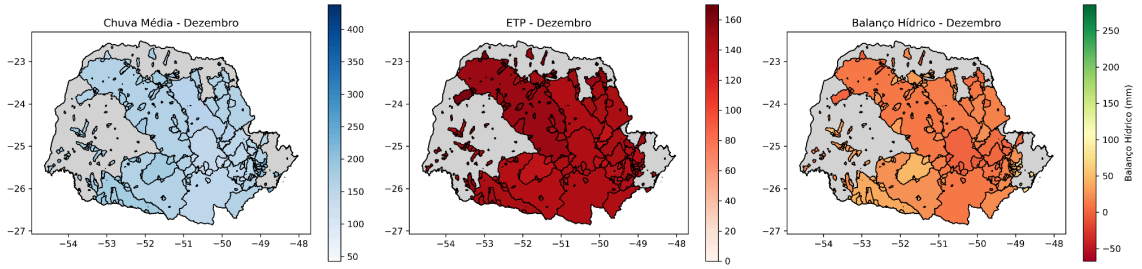
outubro



novembro



dezembro



A Figura 2 apresenta a distribuição mensal do balanço hídrico diário estimado para cada reservatório, expressa em hectômetros cúbicos por dia (hm³/dia). Destaca-se que foi realizado o cálculo do balanço hídrico médio para os reservatórios Piraquara I e II, abrangendo ambos os sistemas. Valores positivos indicam balanço hídrico positivo, ou seja, maior entrada de água no reservatório do que saída. Já valores negativos caracterizam maior defluência do que aporte de água.

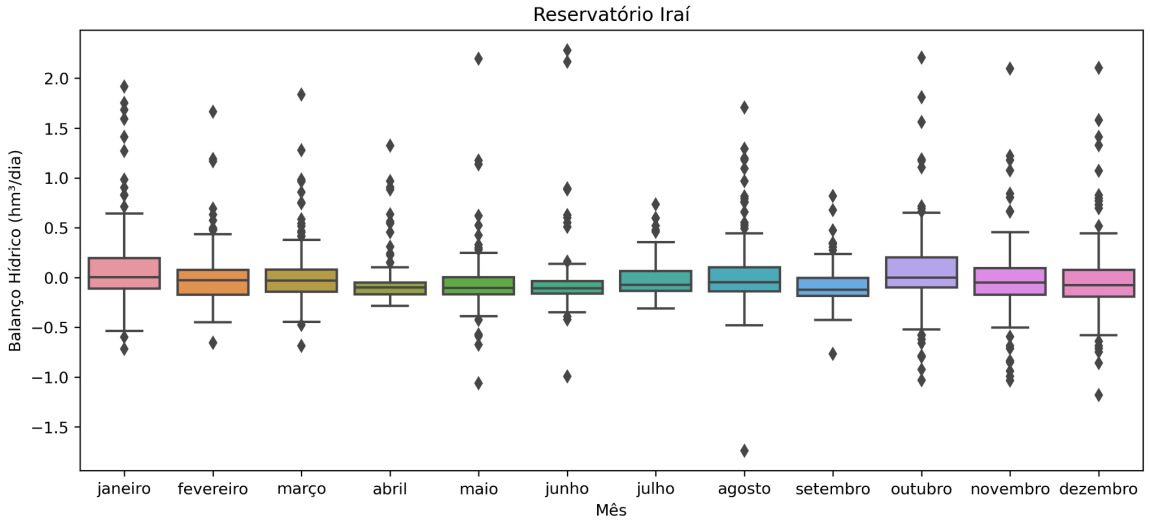
Cada boxplot resume, para um determinado mês, a variação estatística dos valores diários ao longo dos anos entre 2020 e 2025. A linha central da caixa representa a mediana mensal, enquanto os limites inferior e superior da caixa correspondem ao primeiro e ao terceiro quartis. Os segmentos ("bigodes") estendem-se até 1,5 vezes o intervalo interquartil, e os pontos além desses limites são considerados outliers, os quais indicam eventos extremos.

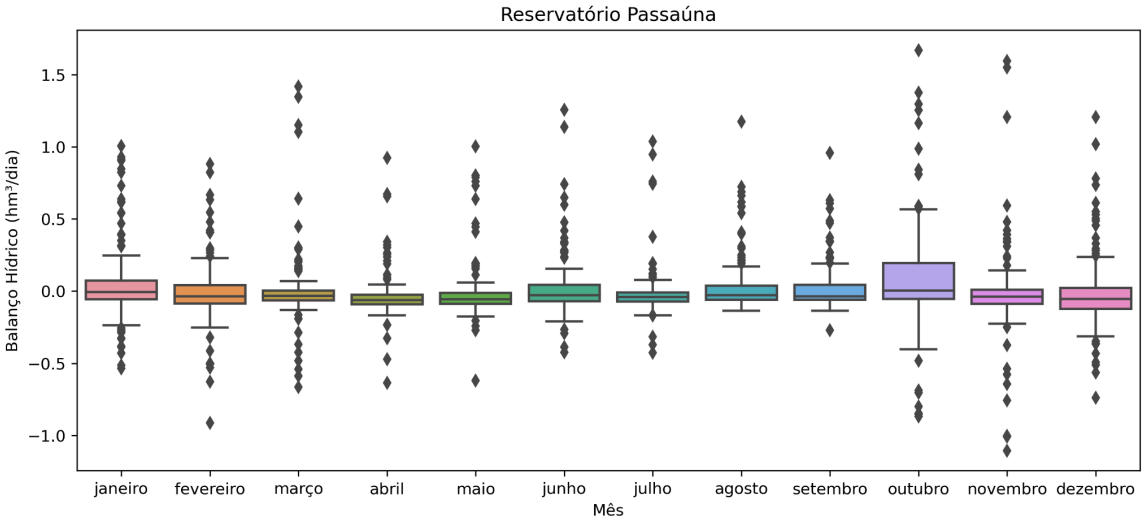
Observa-se uma sazonalidade nos dados, com o mês de janeiro apresentando maior variabilidade e predomínio de valores positivos, o que pode estar associado à estação chuvosa, com maior aporte hídrico e/ou menor defluência. Os meses de abril a setembro tendem a apresentar balanços negativos, com medianas abaixo de zero, caracterizando o período seco, quando a entrada de água no reservatório é inferior à saída. Em outubro, nota-se um aumento no balanço hídrico, com maior ocorrência de valores positivos, possivelmente indicando o início do período chuvoso. Já nos meses de novembro e dezembro, a mediana aproxima-se de zero, embora com distribuição mais dispersa, o que é compatível com a transição entre as estações seca e chuvosa.

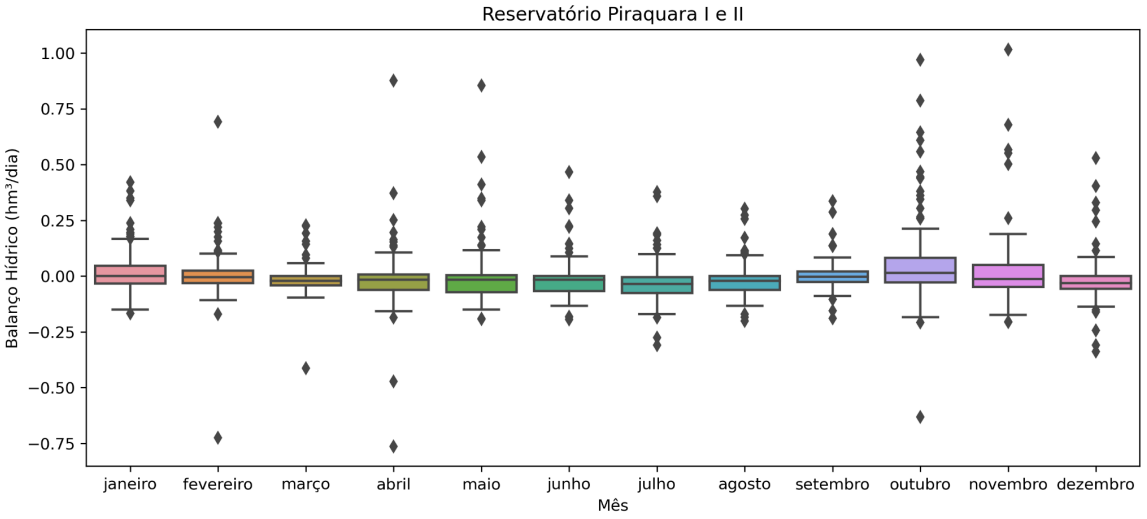
Outliers positivos e negativos ocorrem em todos os meses, sendo mais frequentes em janeiro, maio, outubro e dezembro. Tais valores podem estar relacionados a eventos extremos de precipitação, como enchentes, ou a secas severas que afetam significativamente o regime hidrológico. Também é importante considerar a incerteza nos dados brutos, especialmente nas datas com valores extremamente elevados ou baixos, sujeitos a erros de estimativa e medição.

O comportamento geral do balanço hídrico ao longo dos meses reflete a dinâmica sazonal do clima regional, com maior disponibilidade hídrica no verão e escassez relativa no inverno. Este padrão tem implicações importantes para o gerenciamento do reservatório, principalmente no que se refere ao planejamento da operação em períodos críticos.

Figura 2 - Boxplots do balanço hídrico por mês nos reservatórios.







CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação simplificada do balanço hídrico evidenciou a sazonalidade climática, com maior aporte nos meses úmidos e déficits no período seco, como observado nos reservatórios Piraquara I e II. Essa informação é essencial para a gestão da reserva operacional e o enfrentamento de eventos extremos. A identificação de outliers ao longo das séries demonstra a necessidade de atenção especial a eventos críticos, que podem afetar a operação dos sistemas.

Para as bacias hidrográficas, o balanço hídrico foi estimado com base na diferença entre precipitação média mensal e evapotranspiração potencial (ETP), ambos provenientes de climatologias históricas. Os meses de verão, especialmente fevereiro e março, apresentaram excedentes significativos, favoráveis à recarga hídrica e sustentação dos mananciais. Por outro lado, o período entre maio e julho foi marcado por déficits acentuados, indicando maior demanda evaporativa com baixa reposição hídrica, o que reforça a necessidade de gestão proativa da oferta de água nesse intervalo.

Portanto, os resultados aqui consolidados evidenciam o potencial de uso da plataforma como apoio à gestão adaptativa de recursos hídricos, contribuindo para a resiliência dos sistemas de abastecimento em face das variabilidades climáticas e da demanda de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Hidroweb: Sistema de Informações Hidrológicas*. Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb/. Acesso em: 5 fev. 2025.
2. CIAMPITTIELLO, M.; MARCHETTO, A.; BOGGERO, A. *Water Resources Management under Climate Change: A Review*. Sustainability, v. 16, n. 9, p. 3590, 2024.
3. INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). *Sistema de Informações Hidrológicas*. Curitiba: IAT, 2025. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Sistema-de-Informacoes-Hidrologicas. Acesso em: 20 jan. 2025.
4. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)*. Brasília, DF: INMET, 2025. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 10 mar. 2025.
5. KUANA, L. A.; ALMEIDA, A. S.; MERCURI, E. G. F.; NOE, S. M. Regionalization of GR4J model parameters for river flow prediction in Paraná, Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 28, n. 14, p. 3367–3390, 2024.
6. SISTEMA DE TECNOLOGIA E MONITORAMENTO AMBIENTAL DO PARANÁ (SIMEPAR). *Rede de monitoramento hidrometeorológico*. Curitiba: Simepar, 2025.
7. CIAMPITTIELLO, M.; MARCHETTO, A.; BOGGERO, A. Water Resources Management under Climate Change: A Review. *Sustainability*, v. 16, n. 9, p. 3590, 2024.