

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

OPERACIONALIZAÇÃO DO MODELO HEC-RAS 2D PARA PREVISÃO DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO: APLICAÇÃO EM UNIÃO DA VITÓRIA - PR

Danieli Mara Ferreira¹; Maria Fernanda Dames de Lima²; José Eduardo Gonçalves³; Ana Paula Rocha⁴; Daniel Alexandre Cordeiro⁵; Cassia Silmara Aver Paranhos⁶; Camila Freitas⁷; Rafael Schinoff Mercio Pereira⁸ & Mônica Irion Almeida⁹

Abstract: The anticipation of flood events through hydrometeorological forecasting systems is a key strategy for reducing social and economic impacts in vulnerable areas. In the state of Paraná, southern Brazil, the city of União da Vitória is frequently affected by floods from the Iguaçu River, such as the one recorded in October 2023, when streamflow exceeded 3,500 m³/s. In this context, an automated operational system for flood extent forecasting was implemented, integrating hydrological and hydrodynamic modeling with web-based visualization. The hydrological component is based on the Sacramento model, operated daily within the Paraná Hydrological Simulation and Forecasting System (SISPSHI), which provides streamflow forecasts based on ECMWF meteorological ensembles. Using these forecasts, the HEC-RAS 2D hydrodynamic model simulates flood propagation with a variable-resolution mesh, bathymetric data, and high-resolution topography. The system is fully automated in Python, encompassing all steps from data ingestion to the generation of gridded outputs of water depth and flow velocity. Results are made available as geospatial tiles in a web environment. The integration of modeling and automation allows for continuous updates and forecasts every six hours for the subsequent five-day period. This solution represents an important advance in urban flood monitoring, offering dynamic support for decision-making during extreme events.

Resumo: A antecipação de eventos de inundação por meio de sistemas de previsão hidrometeorológica é uma estratégia fundamental para reduzir impactos sociais e econômicos em áreas vulneráveis. No estado do Paraná, a cidade de União da Vitória é recorrentemente afetada por cheias do rio Iguaçu, como a registrada em outubro de 2023, quando a vazão superou 3.500 m³/s. Neste contexto, foi implementado um sistema operacional automatizado de previsão de manchas de inundação, integrando modelagem hidrológica e hidrodinâmica com visualização web. A componente hidrológica é baseada no modelo Sacramento, operado diariamente no Sistema de Simulação e Previsão Hidrológica do Paraná (SISPSHI), que fornece previsões de vazão com base em forçantes meteorológicas do modelo ECMWF. A partir dessas previsões, o modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D simula a propagação da inundação, utilizando malha com resolução

¹) Simepar: danieli.ferreira@simepar.br

²) Simepar: maria.dames@simepar.br

³) Simepar: jose.eduardo@simepar.br

⁴) Simepar: ana.rocha@simepar.br

⁵) Simepar: daniel.cordeiro@simepar.br

⁶) Copel: cassia.aver@copel.com

⁷) Copel: camila.freitas@copel.com

⁸) Copel: rafael.pereira@copel.com

⁹) Copel: monica.irion@copel.com

variável, dados batimétricos e topografia de alta precisão. O sistema foi automatizado em linguagem Python, abrangendo desde a coleta de dados até a geração de arquivos de profundidade e velocidade em grade regular. Os resultados são disponibilizados por meio de *tiles* geoespaciais em ambiente web. A integração entre modelagem e automação permite atualizações contínuas e previsões a cada seis horas para cinco dias subsequentes. A solução representa um avanço no monitoramento de inundações urbanas, oferecendo suporte dinâmico à tomada de decisão em eventos extremos.

Palavras-Chave – Modelagem hidrológica-hidrodinâmica, Sistema operacional, União da Vitória - PR

INTRODUÇÃO

O Sistema de Simulação e Previsão Hidrológica do Paraná, desenvolvido pelo Simepar, além de subsidiar a tomada de decisão nas operações das usinas hidrelétricas da Copel, é uma ferramenta estratégica no apoio à Defesa Civil e demais instituições responsáveis pela gestão de riscos e desastres naturais. Em eventos críticos, como as cheias históricas registradas na bacia do Iguaçu em junho de 2014 e outubro de 2023 em União da Vitória - PR, o sistema demonstrou potencial para contribuir de forma significativa no planejamento antecipado e na implementação de medidas preventivas (Lima et al., 2024).

A antecipação de eventos de inundaçao por meio de sistemas de previsão pode reduzir significativamente os impactos socioeconômicos, contribuindo para ações de mitigação mais eficazes. União da Vitória, localizada no sul do Paraná, é uma cidade historicamente afetada por enchentes, causadas principalmente pela elevação do nível do rio Iguaçu.

A modelagem hidrodinâmica tem sido amplamente utilizada para simulação de manchas de inundaçao, porém geralmente em contextos estáticos, com a identificação de áreas vulneráveis. O presente estudo apresenta um sistema operacional automatizado usando linguagem Python para previsão de manchas de inundaçao, integrando o modelo hidrológico Sacramento com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, de forma contínua e com atualização diária, com visualização em ambiente web.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudos

A área de estudo compreende a cidade de União da Vitória, no estado do Paraná, situada às margens do rio Iguaçu. Trata-se de uma região com topografia complexa, presença de várzeas urbanizadas e histórico recorrente de eventos extremos.

Em outubro de 2023, o rio Iguaçu enfrentou uma cheia histórica que provocou alagamentos na cidade de União da Vitória. Na estação localizada no município, foram registrados 616,20 mm de precipitação acumulada, valor superior aos 491,8 mm registrados durante a última grande cheia em

junho de 2014. Uma diferença marcante entre os dois eventos foi a distribuição da chuva ao longo do tempo, enquanto em 2014 a maior parte do volume mensal ocorreu em poucos dias, em 2023 o acumulado foi distribuído ao longo de vários dias, prolongando os efeitos da cheia.

A vazão média do rio no mês de outubro de 2023 foi de 2.416 m³/s, atingindo um pico de cerca de 3.500 m³/s. Esses números superam tanto a média histórica de outubro, de 835,6 m³/s, quanto a maior vazão máxima registrada anteriormente no mês, que era de 2.152 m³/s.

Sistema de Previsão Hidrológica

O Sistema de Simulação e Previsão Hidrológica do Iguaçu (SISPSHI), foi desenvolvido e é operado pelo Simepar com o objetivo de apoiar o planejamento e a operação das usinas hidrelétricas da Companhia Paranaense de Energia (COPEL). É baseado no modelo hidrológico Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA), conforme proposto por Singh e Woolhiser (2002). O sistema utiliza previsões meteorológicas do modelo europeu ECMWF, em abordagem ensemble, com horizonte de até 15 dias. As previsões de vazão são geradas na escala temporal de 6 horas, e o sistema é atualizado três vezes ao dia, incorporando continuamente dados observados e previstos.

A modelagem é aplicada em 21 pontos estratégicos ao longo do rio Iguaçu, abrangendo uma área de drenagem de aproximadamente 70.000 km², desde as nascentes até a foz. A entrada do modelo é composta por uma série integrada de precipitação, que combina dados observados e previstos, evapotranspiração potencial estimada a partir de climatologia e vazões observadas nas exutórias das sub-bacias. Estas vazões são utilizadas no pós-processamento, por meio de técnicas de ancoragem, a fim de ajustar e corrigir possíveis discrepâncias nas previsões iniciais. O sistema foi calibrado com base em séries históricas das estações hidrológicas distribuídas pela bacia.

Modelagem Hidrodinâmica 2D

O modelo hidrodinâmico foi desenvolvido com base na formulação bidimensional das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, implementadas por meio do software HEC-RAS. Dentre os dados de entrada, destacam-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) e o Modelo Digital de Terreno (MDT), fundamentais para a representação da superfície sobre a qual ocorre a propagação do escoamento no rio principal.

Para a área urbana, foi utilizado o MDE fornecido pela Copel, obtido a partir de levantamento aerofotogramétrico com tecnologia LiDAR, com resolução espacial de 1 metro. As edificações presentes na região de estudo foram identificadas a partir da camada *Open Buildings* (Google Research, 2023), sendo suas elevações atribuídas com base no MDE. Nas áreas não cobertas pelo levantamento LiDAR, adotou-se o MDT do SRTM com resolução de 30 metros.

A calha do rio Iguaçu foi representada com base em medições batimétricas e interpolações entre seções transversais. As medições foram realizadas em quatro seções do rio, entre as estações fluviométricas de União da Vitória (Ponto 1) e Porto Vitória, conforme ilustrado na Figura 1. As coletas ocorreram em setembro de 2024, utilizando perfilador acústico de corrente (ADCP) embarcado.

Figura 1 – Pontos de medição de perfis batimétricos ao longo do rio Iguaçu



A simulação do evento de inundação ocorrido em outubro de 2023 foi conduzida para o período de 1º de setembro a 25 de novembro de 2023, com intervalo temporal de 2 minutos. O modelo bidimensional utilizou uma malha com resolução espacial variável entre 2 e 40 metros, com maior detalhamento nas áreas urbanas e planícies de inundação.

Operacionalização

A operacionalização do HEC-RAS foi estruturada em uma cadeia automatizada de 12 passos principais usando linguagem Python, descritos a seguir:

1. **Geração de data de disparo** do processo;
2. **Consulta automática via API** às previsões futuras de vazão para União da Vitória, provenientes do SIPSXI;
3. **Coleta de dados observados** de vazão (últimos 30 dias) na estação de União da Vitória via banco de dados interno (SIMEPAR) para aquecimento do modelo;
4. **Junção da série observada com a série prevista**, criando a condição de contorno contínua;
5. **Atualização do intervalo de simulação** no HEC-RAS;
6. **Alteração da condição de contorno**, inserindo a série unificada de vazões com passo de 6 horas;
7. **Execução do HEC-RAS** via automação;
8. **Leitura da profundidade hidráulica** simulada para cada célula da malha;
9. **Salvamento de arquivos** contendo profundidade, coordenadas (x, y) das células e data;
10. **Salvamento de arquivos** com componentes de velocidade (u, v) para cada célula computacional;
11. **Interpolação das profundidades** em grid regular e exportação de arquivos por data;
12. **Envio para banco de dados** para atualização do ambiente web.

Este sistema opera de forma contínua e totalmente automatizada, com uma rotina diária e geração de resultados em intervalos de 6 horas para 5 dias subsequentes.

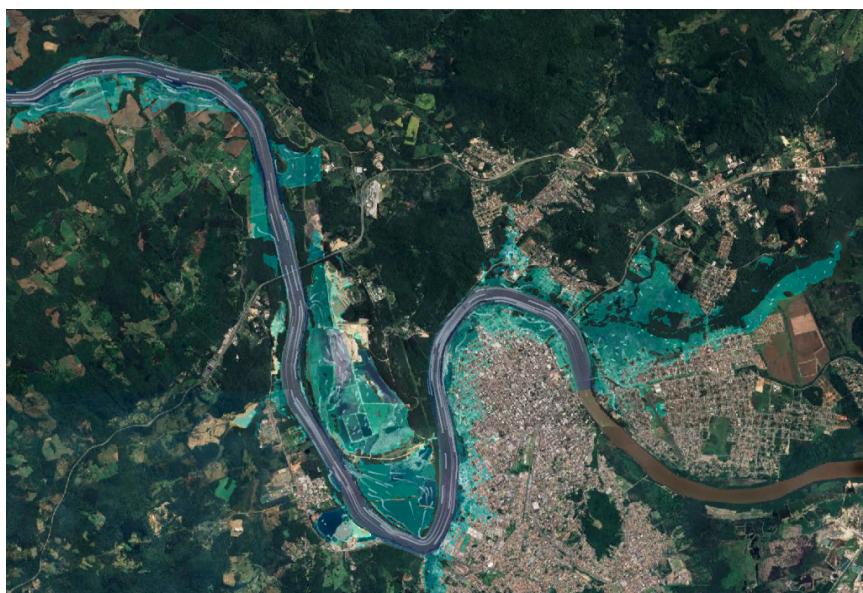
RESULTADOS

Simulação Hidrodinâmica

No dia 20 de outubro de 2023, a estação fluviométrica de União da Vitória registrou uma vazão máxima de 3.549,1 m³/s, em resposta a um evento extremo de precipitação ocorrido na bacia hidrográfica do rio Iguaçu. A representação da propagação da cheia na área urbana de União da Vitória desse evento é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Mancha de inundação obtida por modelo hidrodinâmico em outubro de 2023 (a) e foto aérea do evento (b)

(a) Mancha de inundação gerada pelo modelo hidrodinâmico em outubro de 2023



(b) Foto área do mesmo evento (O Município, 2023)



Ambiente WEB

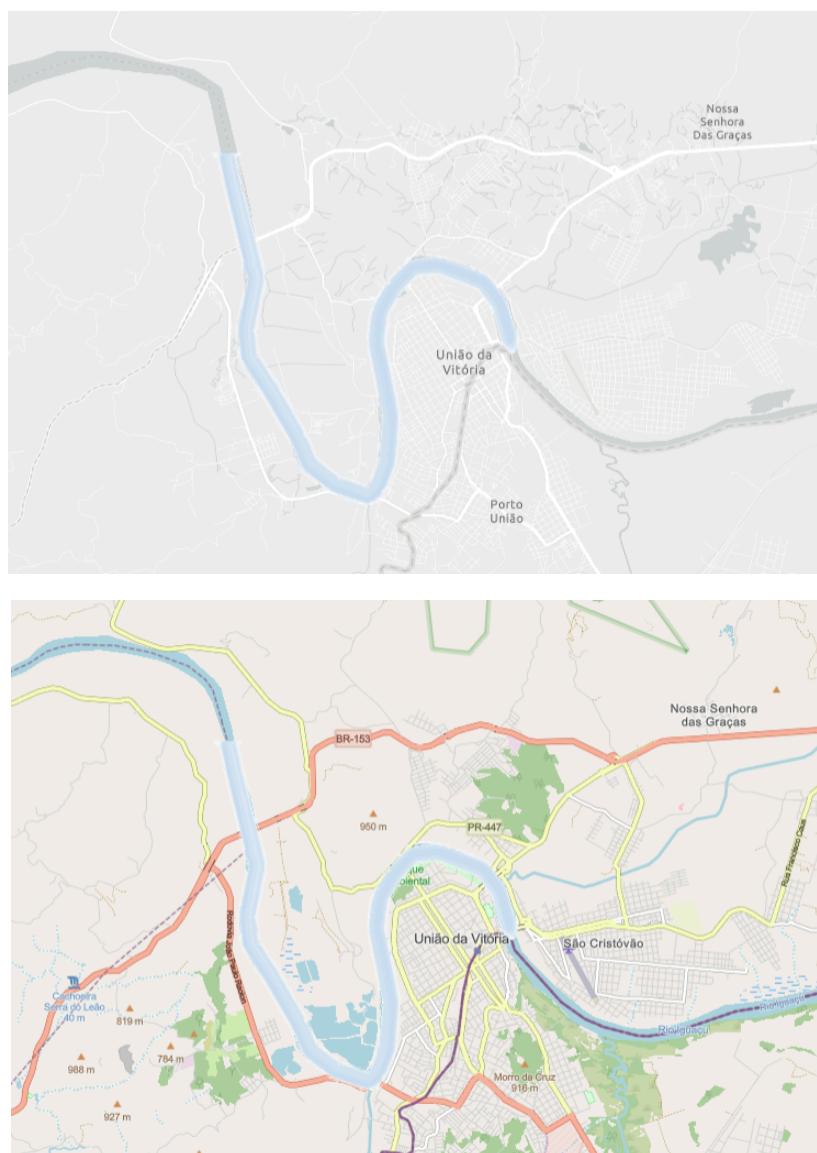
Para a operacionalização das manchas de inundação previstas, foi desenvolvida uma rotina automatizada baseada em *shell script* integrando ferramentas como GDAL e CDO, visando a conversão dos dados brutos de previsão em *tiles* geoespaciais. Esses *tiles* foram armazenados no formato MBTiles e disponibilizados por meio de um servidor leve e eficiente, utilizando MBTilesserver em conjunto com o servidor web Nginx. A visualização interativa das manchas em ambiente web foi implementada em um projeto baseado no framework Vue 3, utilizando a

biblioteca MapLibre, o que permitiu a integração dinâmica dos dados geográficos com a interface do usuário.

Os resultados gerados permitem a visualização antecipada da evolução da mancha de inundação na malha urbana. A Figura 3 exemplifica mapas gerados em junho de 2025, em que a vazão era de cerca de 350 m³/s, indicando o escoamento confinado na calha principal do rio.

O sistema permite acompanhar a progressão da profundidade de inundação ao longo do tempo, oferecendo uma vantagem significativa frente às abordagens manuais e estáticas, e permitindo a antecipação de cenários críticos e o suporte a decisões emergenciais da Defesa Civil, por exemplo.

Figura 4 – Exemplos de visualização de profundidade de escoamento em 18/06/2025 no ambiente web



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração operacional entre o modelo Sacramento e o HEC-RAS representa um avanço significativo no monitoramento e previsão de inundações urbanas em União da Vitória. A rotina automatizada desenvolvida permite a execução contínua das simulações, dispensando intervenções manuais frequentes e assegurando previsões atualizadas com base em dados meteorológicos e hidrológicos diários.

A modelagem contou com dados topográficos de alta resolução, além de informações geométricas de seções transversais do rio, obtidas por meio de medições batimétricas. Esses dados forneceram uma caracterização precisa do leito e das margens fluviais, contribuindo para a confiabilidade da simulação do escoamento durante o evento de cheia.

Como produto final, o sistema gera mapas e arquivos de profundidade para diferentes horizontes de previsão, viabilizando o acompanhamento dinâmico da evolução da inundaçao e fornecendo suporte direto à tomada de decisão em situações críticas. Dentre as melhorias do sistema, está prevista a integração da visualização de dos vetores de velocidade do escoamento.

A operacionalização em ambiente web em tempo real impõe desafios computacionais e operacionais relevantes. A necessidade de processar diferentes modelos e grandes volumes de dados de entrada e saída exige infraestrutura robusta, bem como estratégias eficientes de automação, controle de qualidade e verificação de consistência. Assim, este trabalho representa um passo relevante na direção de sistemas preditivos integrados, voltados ao fortalecimento da resiliência urbana frente a eventos extremos.

REFERÊNCIAS

LIMA, M.F.D.S.; FERREIRA, D.M.; GONCALVES, J.E.; PARANHOS, C.S.A.; PEREIRA, R.S.M. (2024). “Sistema de previsão hidrológica para o rio Iguaçu, União da Vitória-PR” in Anais do IV Encontro Nacional de Desastres da ABRHidro, Curitiba, 08–11 out. 2024. ISSN 2764-9040. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/ivend/>. Acesso em: 4 de julho de 2025.

Google Research. (2023). *Open Buildings Dataset*. Acesso de 20 abril de 2025. Dospinível em <<https://sites.research.google/open-buildings/>>

O MUNICÍPIO. Moradora de Brusque arrecada donativos para vítimas da enchente em União da Vitória e Porto União. Disponível em: <https://omunicipio.com.br/moradora-de-brusque-arrecada-donativos-para-vitimas-da-enchente-em-uniao-da-vitoria-e-porto-uniao/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SINGH, V.; WOOLHISER, D. (2002). “*Mathematical modeling of watershed hydrology.*” Journal of hydrologic engineering, v. 7, n. 4, pp. 270-292.

AGRADECIMENTOS

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