

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ESTIMATIVA DE NÍVEL D'ÁGUA E DECLIVIDADE COM DADOS SWOT A JUSANTE DE ITAIPU: INFLUÊNCIA E DESEMPENHO DE DIFERENTES MODELOS GEOIDAIIS

Pablo Souza Dos Santos¹; Daniel Moreira²; Luiz H. Maldonado³; Fabrice Papa⁴

Abstract: Continuous hydrological monitoring is fundamental for the operation of the Itaipu Hydropower Plant. This study assesses the potential of data from the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission to enhance the monitoring of water surface elevation (WSE) and slope in the Paraná River, downstream of the dam. Data from the SWOT L2_HR_PIXC product were used and validated against observations from four *in situ* river gauge stations. The analysis also investigated the impact of four different geoid models on the altitude conversion. The results reveal an excellent correlation ($R^2 \approx 1.00$) between SWOT water levels and *in situ* data, with a Root Mean Square Error (RMSE) ranging from 0.16 m to 0.36 m. The choice of the geoid model proved to be a critical factor for accurate slope estimation, with the local geoid model from IBGE (hgeoHNOR2020) outperforming the global models. The methodology enabled the generation of continuous 2D surfaces and longitudinal profiles, which successfully captured water surface dynamics and local hydraulic effects, such as the backwater effect from the Iguaçu River. It is concluded that SWOT, combined with high-precision geoid models, represents a significant advancement for monitoring large rivers, providing valuable spatial data for the calibration of hydrodynamic models.

Resumo: O monitoramento hidrológico contínuo é fundamental para a operação da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Este trabalho avalia o potencial dos dados da missão *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT) para aprimorar o monitoramento do nível d'água (WSE) e da declividade no rio Paraná, a jusante da barragem. Foram utilizados dados do produto SWOT L2_HR_PIXC, os quais foram validados contra observações de quatro estações fluviométricas *in situ*. A análise investigou também o impacto de quatro diferentes modelos geoidais na conversão de altitude. Os resultados revelam uma excelente correlação ($R^2 \approx 1,00$) entre os níveis de água do SWOT e os dados de campo, com um Erro Quadrático Médio (RMSE) variando de 0,16 m a 0,36 m. A escolha do modelo geoidal mostrou-se um fator crítico para a estimativa precisa da declividade, com o modelo geoidal local do IBGE (hgeoHNOR2020) apresentando desempenho superior aos modelos globais. A metodologia permitiu a geração de superfícies 2D e perfis longitudinais contínuos, que capturaram a dinâmica da linha d'água e efeitos hidráulicos locais, como o remanso causado pelo rio Iguaçu. Conclui-se que o SWOT, combinado a modelos geoidais de alta precisão, representa um avanço significativo para o monitoramento de grandes rios, fornecendo dados espaciais valiosos para o maior entendimento da hidrodinâmica dos rios e apoio na calibração de modelos hidrodinâmicos.

¹) ITAIPU BINACIONAL Av. Tancredo Neves 6.731 85856-970 Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. pabloib@itaipu.gov.br

²) CPRM, Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro. daniel.medeiros@cprm.gov.br

³) ITAIPU BINACIONAL Av. Tancredo Neves 6.731 85856-970 Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. LHMALDO@itaipu.gov.br

⁴) IRD/LEGOS, Institut de Recherche pour le Développement, Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales, Université Toulouse, France. fabrice.papa@ird.fr

Palavras-Chave – Satélite SWOT, Itaipu Binacional, Altimetria por satélite

INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, um empreendimento binacional localizado na fronteira entre Brasil e Paraguai sobre o rio Paraná, destaca-se por sua capacidade instalada de 14.000 MW e por seu reservatório de 1.350 km², cuja gestão hídrica é de alta complexidade (GUETTER et al., 2005). A eficiência operacional e a segurança da estrutura dependem diretamente de um monitoramento hidrológico preciso e contínuo. Diante da rápida evolução tecnológica, torna-se essencial para a Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos (OPSH.DT) da ITAIPU Binacional explorar e incorporar novas ferramentas de sensoriamento remoto para aprimorar processos-chave, como a calibração e validação de seus modelos hidrodinâmicos.

Neste cenário, a missão *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), um projeto colaborativo entre NASA, CNES e as agências espaciais do Canadá e do Reino Unido, representa um avanço paradigmático. Lançada em 2022, é a primeira missão satelital projetada para o monitoramento global e de alta resolução das águas continentais. Por meio de seu altímetro interferométrico de radar em banda Ka (KaRIn), o SWOT fornece produtos tridimensionais, combinando medidas da elevação da superfície da água com sua extensão lateral. (Fu et al., 2024).

O potencial do SWOT para a hidrologia é sem precedentes. Com a capacidade de monitorar rios com largura superior a 100 metros aproximadamente duas vezes a cada ciclo de 21 dias Fu et al. (2024); Rodriguez et al. (2017), a missão inaugura novas possibilidades para a observação de extremos hidroclimáticos e para a análise detalhada de perfis longitudinais e transversais em reservatórios. Para Itaipu, essa tecnologia pode permitir um entendimento mais profundo da dinâmica dos corpos d'água, como a verificação da declividade da linha d'água nas proximidades da barragem durante eventos de cheias, impactando diretamente na melhoria dos modelos e de melhores informações hidrológicas.

Contudo, a incorporação de dados de altimetria espacial em rotinas operacionais demanda uma etapa prévia e fundamental: a validação das observações do satélite por meio de comparações com medições *in situ*. Esta análise é crucial para aferir a acurácia e a confiabilidade das novas medições antes de sua aplicação em processos de calibração e validação de modelos.

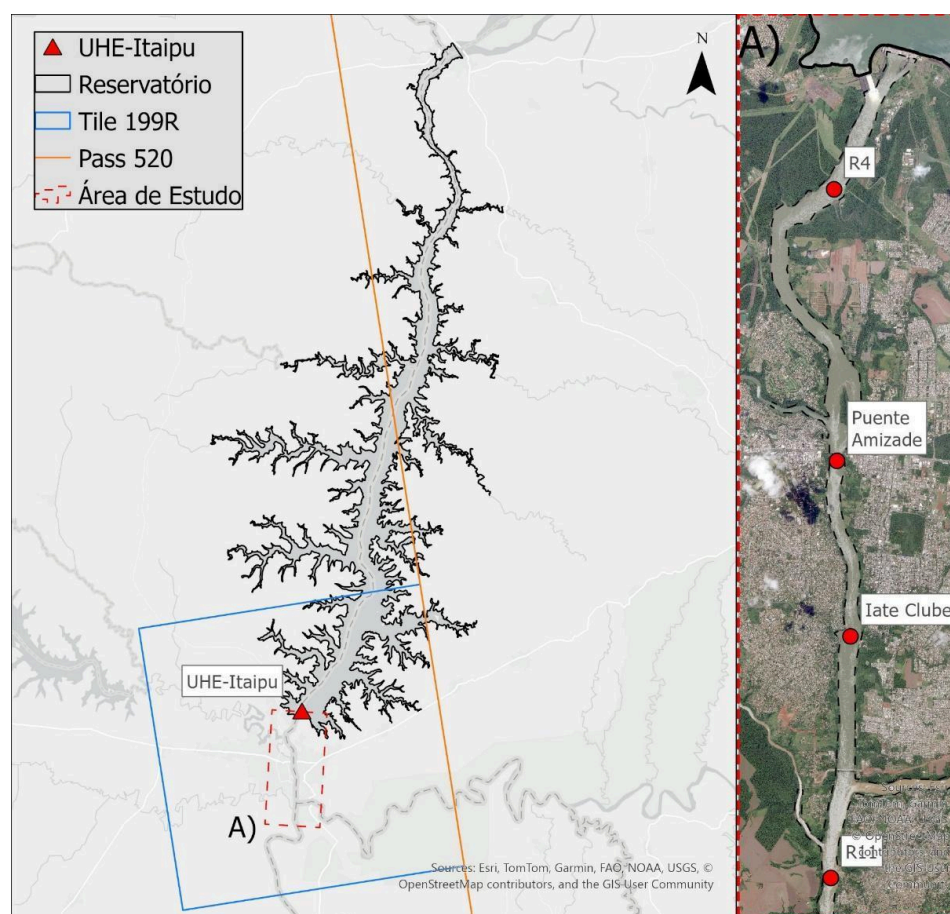
Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o potencial dos dados do satélite SWOT para auxiliar o monitoramento na área de influência da Usina de Itaipu. Especificamente, os objetivos são: a) realizar uma comparação inicial entre as séries temporais de nível d'água do SWOT e os dados de estações fluviométricas *in situ* a jusante da usina; b) avaliar a declividade da superfície da água entre trechos de estações, investigando a influência de diferentes modelos geoidais; e c) gerar e visualizar a superfície de água em formato 2D a partir da interpolação dos pontos da *Pixel Cloud* do SWOT.

METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi dividida em quatro etapas principais: (I) aquisição e preparação de dados de múltiplas fontes; (II) extração, conversão e validação dos níveis d'água; e (III) análise de declividade e interpolação espacial para gerar produtos derivados.

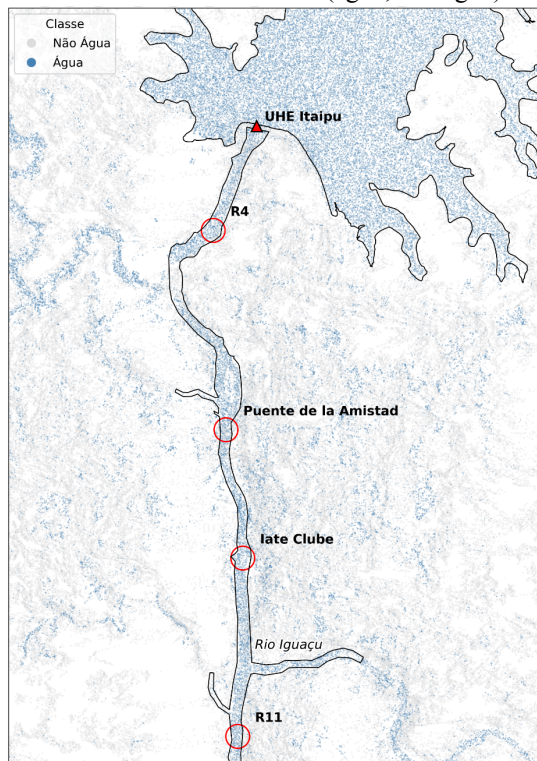
Para a análise, foram utilizados dados da missão *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), especificamente o produto L2_HR_PIXC (*High-Rate Pixel Cloud*), que consiste em uma nuvem de pontos de elevação da superfície da água JET PROPULSION LABORATORY (2023). Esses dados foram obtidos através do portal NASA Earthdata (<https://search.earthdata.nasa.gov>). Como referência terrestre, foram utilizados dados horários de nível d'água de quatro estações fluviométricas operadas pela Itaipu Binacional (R4, *Puente de la*

Figura 1 – Reservatório, Traço de passagem do Satélite SWOT A) Estações à Jusante Itaipu Binacional.



A extração do nível da superfície d'água *Water Surface Elevation* (WSE) do SWOT para cada passagem foi realizada definindo uma área de interesse circular (raio de 500 m) em torno de cada estação fluviométrica. A mediana das altitudes dos pontos classificados como "água" dentro desta área foi adotada como o WSE representativo, sendo a mediana escolhida por sua robustez estatística frente a valores atípicos (*outliers*).

Figura 2 – Pontos do PixCloud classificados (água, não água) no dia 31/10/2023.



A validação desses valores foi realizada comparando-os com os dados *in-situ* e quantificando o desempenho através do Coeficiente de Determinação (R^2) equação 1, Erro Quadrático Médio (RMSE) equação 2 e Viés (Bias).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (2)$$

Em que X_i e Y_i representam as variáveis medidas, $\bar{X}$ é a média da variável e n representa o número de amostras.

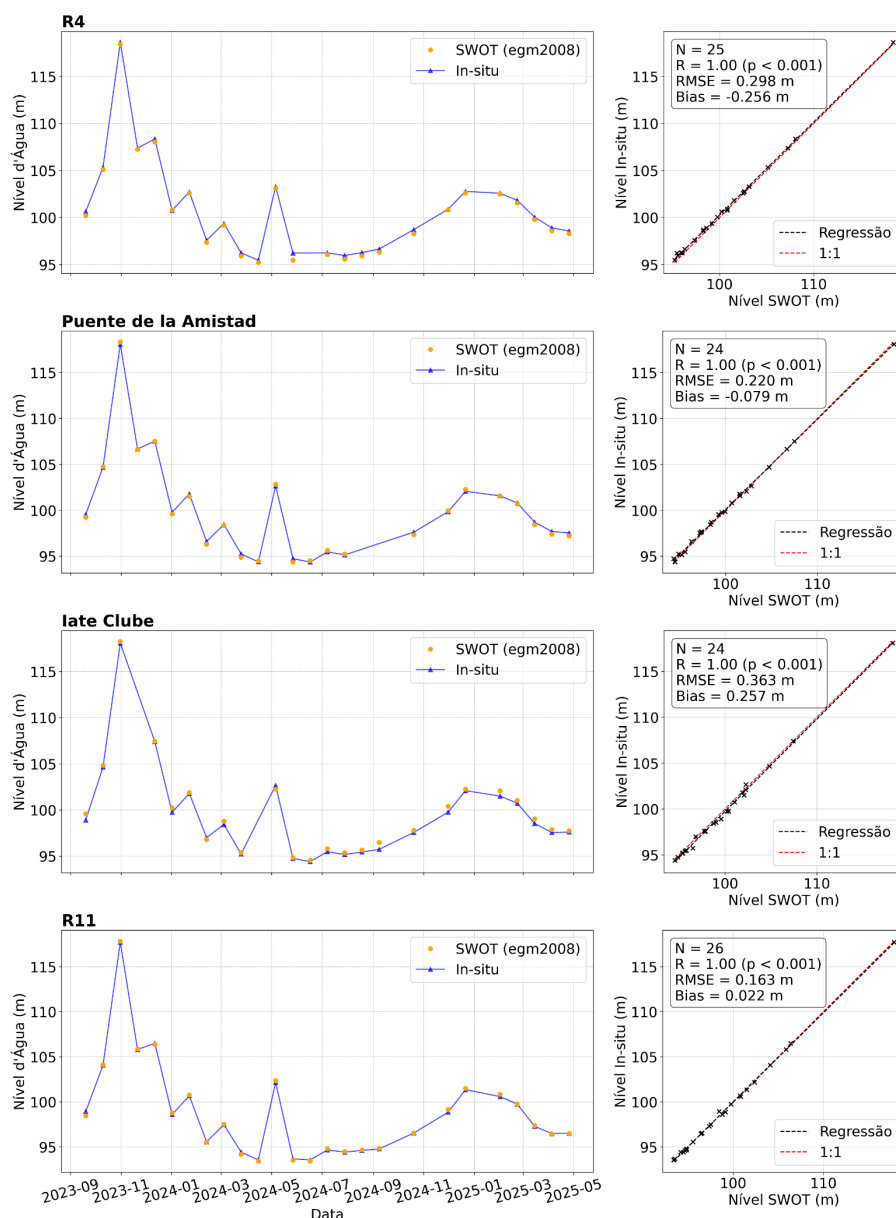
Para a análise espacial e geração de produtos contínuos, a nuvem de pontos PixC foi inicialmente filtrada para a área de estudo. Em seguida, foi aplicada uma regressão robusta do tipo Theil-Sem, THEIL (1950) ; SEN (1968), com o nível d'água (WSE) como variável dependente e a latitude como variável independente, aproveitando o fato de que o rio Paraná, a jusante da usina, segue majoritariamente paralelo ao eixo longitudinal. Apenas os pontos dentro de ± 50 cm da linha de tendência foram mantidos. A nuvem resultante foi interpolada por IDW para gerar uma superfície 2D contínua da elevação da água, da qual se extraíram os perfis longitudinais do rio.

RESULTADOS

A validação dos níveis de água (WSE) extraídos do SWOT é apresentada na Figura 3 para as estações R4 e *Puente de la Amistad*. As séries temporais mostram uma excelente concordância

visual entre os dados do satélite (convertidos com o EGM2008) e as medições *in-situ*. Os gráficos de dispersão confirmam essa forte relação, com um Coeficiente de Determinação (R^2) de 1.00 para ambas as estações. O RMSE foi de 0.298 m para R4 e 0.220 m para *Puente de la Amistad*. Notavelmente, a estação R4 apresentou um viés negativo de -0.256 m, indicando uma subestimação sistemática do SWOT, enquanto em *Puente de la Amistad* o viés foi menor, de -0.079 m.

Figura 3 – Séries temporais: SWOT e *In Situ*.

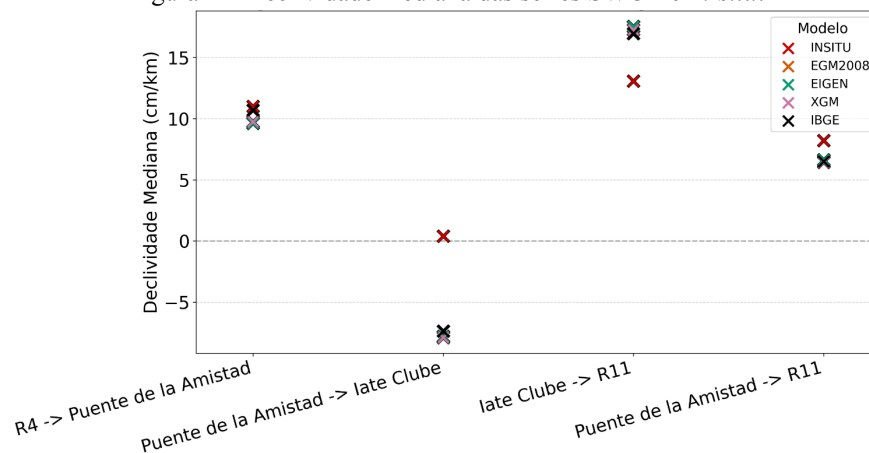


A análise se estende às estações Iate Clube e R11. Em ambas, a correlação permanece ($R^2 = 1.00$). A estação Iate Clube apresentou um RMSE de 0.363 m com um viés positivo (0.257 m), e a estação R11, a mais a jusante, demonstrou a melhor performance, com o menor RMSE (0.163 m) e um viés quase nulo (0.022 m), indicando uma precisão notável.

A Figura 4 compara a declividade mediana da linha d'água estimada com dados do SWOT, utilizando diferentes modelos geoidais, em relação às declividades medidas *in situ* para trechos entre estações. Para aumentar a robustez da análise, foi incluído o trecho adicional entre *Puente de*

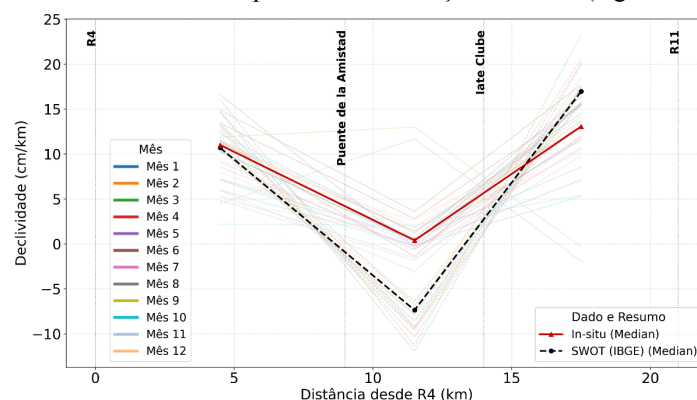
la Amistad e R11. Os resultados mostram que a escolha do modelo geoidal influencia significativamente as estimativas. No trecho entre R4 e *Puente de la Amistad*, o modelo local hgeoHNOR2020, do IBGE, apresentou os valores mais próximos dos dados de campo. Nos demais trechos, os modelos globais, como EGM2008, XGM e EIGEN, apresentaram maiores discrepâncias, enquanto o modelo do IBGE manteve a melhor aproximação da declividade real. O cálculo do RMSE entre as declividades estimadas e as observadas *in situ* permitiu avaliar o desempenho de cada modelo por trecho, resultando nas medianas: 3,99 cm/km para o IBGE, 4,29 cm/km para o XGM, 4,40 cm/km para o EGM2008 e 4,41 cm/km para o EIGEN, confirmando que o modelo do IBGE é o mais adequado para a região estudada.

Figura 4 – Declividade mediana das séries SWOT e *In-situ*.



A Figura 5 detalha a comparação dos perfis de declividade mediana entre os dados *in-situ* (linha contínua vermelha) e os dados SWOT corrigidos pelo modelo do IBGE (linha tracejada preta). As linhas coloridas mais finas representam as declividades individuais para cada passagem do satélite. Observa-se que, embora haja variabilidade entre as passagens, a mediana dos valores SWOT (linha preta) acompanha de perto a tendência da mediana *in-situ*. A figura demonstra a capacidade do SWOT em capturar a dinâmica da declividade ao longo dos trechos, embora com uma certa dispersão, principalmente em relação aos dados *in-situ*, que pode ser atribuída a incertezas residuais na medição e na precisão do modelo geoidal disponível e aplicado para região.

Figura 5 – Declividade mediana por trecho de estações: SWOT (HgeoHnor) e *In-situ*.

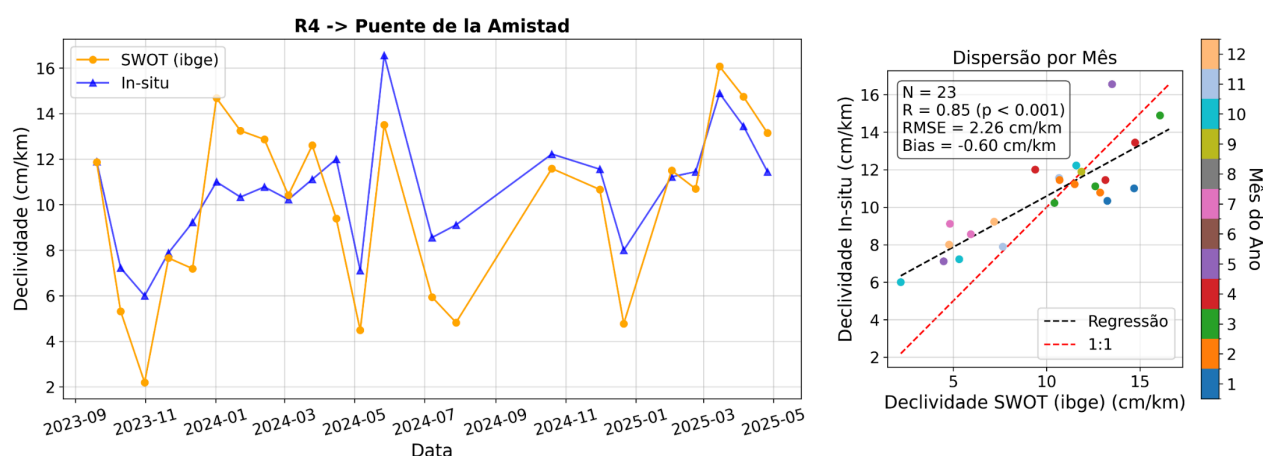


Observa-se que, no trecho entre a estação R4 e a *Puente de la Amistad* (aproximadamente 9 km), a declividade mediana estimada se aproximou dos valores obtidos *in situ*. Já no segmento entre a *Puente de la Amistad* e o Iate Clube (cerca de 5 km), a declividade apresentou maior

divergência em relação aos dados de campo, embora tenha mantido a tendência geral. Por fim, no trecho entre o Iate Clube e a estação R11 (aproximadamente 7 km), os valores voltaram a se alinhar com os dados *in situ*.

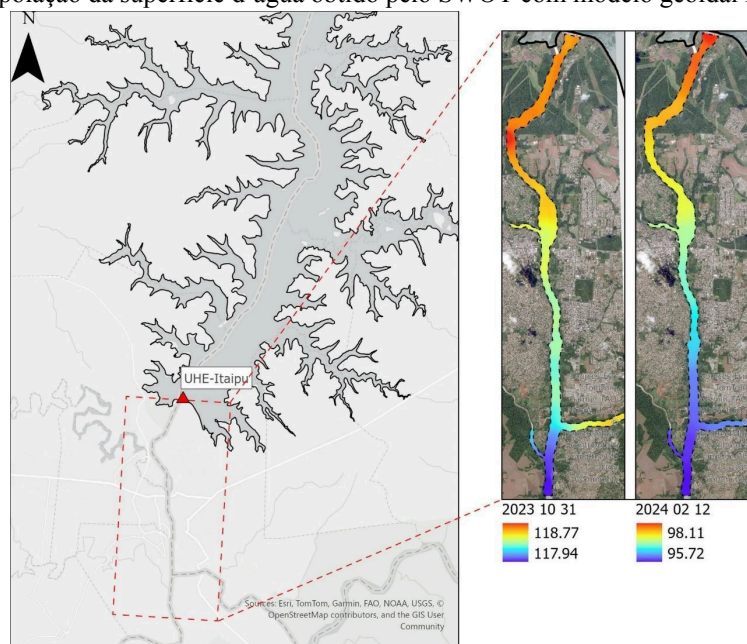
A Figura 6 foca na análise da declividade no maior trecho: R4 e *Puente de la Amistad* que é de 9 km. A série temporal mostra que o SWOT (utilizando o modelo IBGE) consegue capturar a variabilidade temporal da declividade, seguindo as tendências observadas nos dados *in-situ*. O gráfico de dispersão revela uma forte correlação ($R = 0.85$). Contudo, o RMSE de 2.26 cm/km e o viés de -0.60 cm/km indicam que ainda existem desafios para alcançar a precisão absoluta em trechos mais curtos.

Figura 6 – Declividade entre as estações R4 e Puente de la Amistad (9 km de distância entre elas): SWOT e *In-situ*.



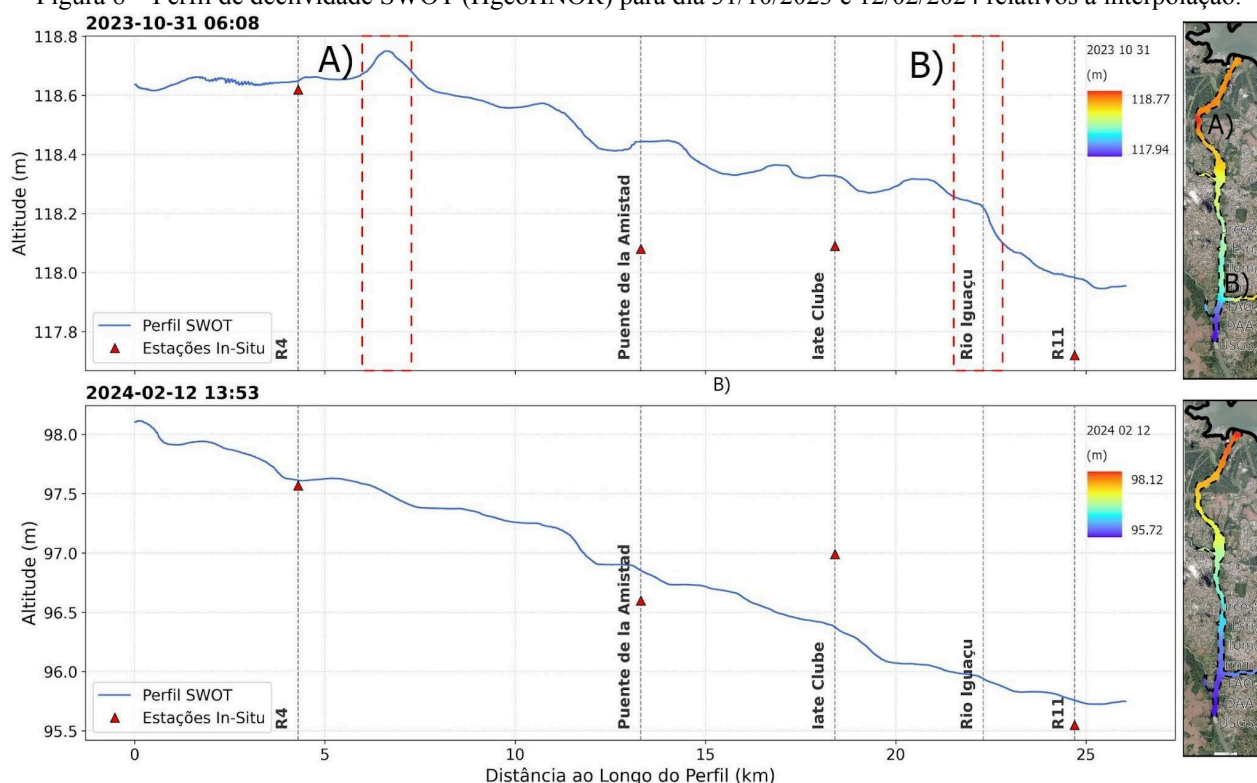
A Figura 7 ilustra o produto da metodologia de interpolação espacial: a superfície 2D da elevação da água para duas datas distintas, 31/10/2023 (WSE mais alto) e 12/02/2024 (WSE mais baixas). Esta visualização demonstra a capacidade da abordagem em gerar um mapa contínuo e detalhado do nível do rio, permitindo a identificação de gradientes de elevação ao longo do canal.

Figura 7 – Interpolação da superfície d'água obtido pelo SWOT com modelo geoidal HgeoHNOR2022.



Derivados da superfície interpolada, os perfis longitudinais da Figura 8 mostram a elevação da água ao longo do rio para as mesmas duas datas. Os perfis são suaves e contínuos, resultado da filtragem e interpolação robusta. Eles permitem uma análise detalhada da declividade da linha d'água em qualquer ponto do trecho, e não apenas entre as estações de medição. A diferença de elevação entre as duas datas é claramente visível, ilustrando o potencial do uso de dados do SWOT.

Figura 8 – Perfil de declividade SWOT (HgeoHNOR) para dia 31/10/2023 e 12/02/2024 relativos a interpolação.



Observa-se que, no dia 31/10/2023, com níveis elevados a jusante da Usina de Itaipu devido às altas vazões do rio Iguaçu, dois trechos merecem atenção. No ponto A da figura 8, verifica-se um aumento local no nível d'água, associado a uma curva acentuada do rio, sugerindo um efeito de remanso localizado. Já no ponto B, próximo à confluência com o rio Iguaçu, observa-se uma mudança abrupta na declividade do perfil longitudinal.

O fenômeno de remanso no rio Paraná é intensificado justamente quando o Iguaçu apresenta vazões elevadas, como ocorreu nessa data, provocando um represamento a montante de sua foz. Esse comportamento está relacionado ao forte efeito de remanso causado pelo rio Iguaçu, cuja foz deságua perpendicularmente no rio Paraná. A magnitude desse efeito torna-se evidente ao se analisar a declividade do trecho: em condições normais, a diferença de nível entre a estação R4 e a foz do Iguaçu é de aproximadamente 1,5 m, mas, durante a cheia, essa diferença foi reduzida para apenas 0,4 m.

Essa mudança de declividade ocorre porque, a montante da confluência, o perfil está sob efeito de remanso, enquanto a jusante o rio volta a correr livremente, apresentando uma declividade acentuada até a estação R11, similar à observada em condições normais (com uma queda de nível de aproximadamente 20 cm entre a foz do Iguaçu e R11).

CONCLUSÃO

Os resultados da validação indicaram uma forte correlação ($R^2 \approx 1,00$) entre os níveis de água observados pelo SWOT e os registrados pelas estações *in situ*, com RMSE e vieses variando entre as estações. A maior precisão observada foi de 16 cm na estação R11, apresentando resultados similares aos de Moreira *et al.* (2025) encontrados nas comparações realizadas para região Amazônica. A estimativa de declividade apresentou maiores desafios, sendo significativamente influenciada pela escolha do modelo geoidal. O modelo hgeoHNOR2020, do IBGE, apresentou desempenho superior em relação aos modelos globais, fornecendo estimativas mais consistentes com a realidade local, no entanto nenhum dos modelos aplicados atendeu satisfatoriamente as declividades esperadas para todos os trechos de estudo, fato evidenciado por declividades negativas observadas em alguns trechos. Isso reforça a importância do uso de modelos geoidais locais para aplicações que demandam alta precisão. Além disso, os resultados comparativos de declividade indicam que as incertezas associadas ao modelo geoidal, devido a sua também baixa resolução espacial, tendem a diminuir à medida que aumenta a distância entre os pontos de análise, favorecendo estimativas mais consistentes em trechos mais extensos.

Destaca-se também o projeto em andamento para unificação das referências altimétricas da ITAIPU Binacional com o RAIB (Rede Altimétrica de Alta Precisão da Itaipu Binacional), com conclusão prevista para 2027. O projeto envolve nivelamento geométrico, rastreamento GNSS e gravimetria em todas as referências de nível, abrangendo municípios dos estados do Paraná, Mato Grosso do Sul e São Paulo, além do território paraguaio. Um dos produtos gerados será um Modelo Geoidal Local (MGL) de alta precisão, que poderá ser integrado aos dados do SWOT para melhorar a acurácia das estimativas altimétricas e o desempenho na estimativa de declividades.

A metodologia adotada, que combina interpolação IDW com filtragem de *outliers*, mostrou-se eficaz no mapeamento da elevação e extensão da superfície d'água, possibilitando a construção de perfis longitudinais contínuos. Esses produtos permitem uma análise mais refinada da hidráulica fluvial, evidenciando variações significativas de declividade em trechos curvos e na confluência com o rio Iguaçu. Além disso, oferecem subsídios para o entendimento da dinâmica do corpo hídrico, bem como para a calibração e validação de modelos hidrodinâmicos.

Conclui-se que o SWOT representa um avanço significativo para o monitoramento hidrológico em rios de até 350 m, como o rio Paraná a jusante de Itaipu. Apesar das limitações associadas à resolução altimétrica e à frequência de revisita (ciclo médio de 21 dias), a capacidade de fornecer dados espaciais contínuos, principalmente em regiões não monitoradas, abre novas possibilidades para a calibração de modelos e o aprimoramento do entendimento do balanço hídrico. Estudos futuros devem ampliar a análise para um número maior de passagens, considerando diferentes condições hidrológicas, e avançar na assimilação direta desses dados em modelos de previsão.

REFERENCIAS

- FÖRSTE, C. et al. (2014). EIGEN-6C4 – The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190. Documento Técnico. GFZ Potsdam. Disponível em: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/documents/Foerste-et-al-EIGEN-6C4.pdf>.
- FU, L.-L. et al. (2024). “The Surface Water and Ocean Topography Mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water”. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL107652. <https://doi.org/10.1029/2023GL107652>.

GUETTER, A. K.; ANDRADE, F. O., GONÇALVES, R. C. (2005). “Efeito do Vento sobre o Reservatório de Itaipu: cenários de vento e impacto no balanço hídrico” In XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa/PB, Nov. 2005.

INCE, E. S. et al. (2019). “ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services and future plans”. *Earth System Science Data*, 11, pp. 647-674. <http://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2021). Modelo hgeoHNOR2020 para conversão de Altitudes Geométricas em Altitudes Normais. Rio de Janeiro: IBGE, 51 p.

JET PROPULSION LABORATORY. (2023). SWOT Algorithm Theoretical Basis Document for Level 2 High Rate Pixel Cloud Product. JPL D-105504. Pasadena, CA, USA.

JET PROPULSION LABORATORY. (2025). SWOT Product Description, Level 2 High Rate Pixel Cloud. JPL D-56411, Revision C. Pasadena, CA, USA.

MOREIRA, D., PAPA, F., FASSONI-ANDRADE, A., FLEISCHMANN, A., WONGCHUIG, S., PAIVA, R., et al. (2025). Widespread and exceptional reduction in river water levels across the Amazon Basin during the 2023 extreme drought revealed by satellite altimetry and SWOT. *Geophysical Research Letters*, 52, e2025GL116180. <https://doi.org/10.1029/2025GL116180>.

PAVLIS, N.K. et al. (2008). “An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008”. In: 2008 General Assembly of the European Geoscience Union. Vienna, Austria.

RODRIGUEZ, E.; FERNANDEZ, D. E.; PERAL, E.; CHEN, C. W.; DE BLESER, J.-W.; WILLIAMS, B. (2017). "Wide-swath altimetry: a review." in *Satellite altimetry over oceans and land surfaces*. Eds. Stammer, D. C. e Cazenave, A., Taylor and Francis Group, pp. 459–504. <https://doi.org/10.1201/9781315151779>.

SEN, P. K. (1968). “Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau”. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), pp. 1379–1389.

THEIL, H. (1950). “A-Rank invariant method of linear and polynomial regression analysis. III”. *Nederl. Akad. Wetensch. Proc., Series A*, 53, pp. 1397-1412.

ZINGERLE, P. et al. (2020). “The combined global gravity field model XGM2019e”. *Journal of Geodesy*, 94(7). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>.