

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ESTIMATIVA INDIRETA DA BATIMETRIA A PARTIR DE IMAGENS AEROESPACIAIS E DE SATÉLITE INTERPOLADAS COM DADOS REAIS.

Beatriz Silvestre Puchalski¹; Adilson Pinheiro² & Luis Hamilton Pospissil Garbossa³

Abstract: Bathymetry is a fundamental element in the development of hydrodynamic modeling in natural water bodies. Despite its importance, bathymetric data is often difficult to obtain, especially in shallow regions. Nautical charts are a reliable source of bathymetric information; however, they do not always cover the innermost areas, such as estuaries. This study aimed to estimate the bathymetry of the Babitonga Bay estuarine complex using secondary data sources and remote sensing imagery. In addition to secondary data, water color was used as an indicator of depth and was interpolated with in-situ measurements. The resulting bathymetry was tested in a hydrodynamic model operated by EPAGRI. Simulated water level results were compared with tide gauge measurements (Coefficient of determination: IP = 0.84; JI = 0.61; PS = 0.85 and Pearson correlation: IP = 0.94; JI = 0.80; PS = 0.92), showing good agreement with observed data. This correspondence indicates the quality of the bathymetric adjustment. It is important to note that the objective of this work was to fill bathymetric gaps for modeling purposes, not for navigation.

Resumo: A batimetria é o elemento fundamental ao desenvolvimento de modelagem hidrodinâmica em corpos de águas naturais. Apesar da sua importância, seus dados por vezes são de difícil obtenção, especialmente em regiões rasas. As cartas náuticas são uma fonte confiável de dados batimétricos. No entanto, nem sempre conseguem abranger as regiões mais internas como em estuários. Este trabalho visou utilizar fontes de dados secundários e imagens de sensoriamento remoto, para estimar a batimetria do complexo estuarino da Baía da Babitonga. Além dos dados secundários foi utilizada a cor do corpo hídrico como indicador de profundidade e interpolado com dados mensurados. A batimetria obtida foi testada em um modelo hidrodinâmico operado pela EPAGRI. Os resultados simulados de nível da água foram comparados com os dados medidos em marégrafos (Coeficiente de determinação IP: 0,84; JI: 0,61 e PS: 0,85 e a correlação de Pearson IP: 0,94; JI: 0,80 e PS: 0,92) e apresentaram adequada representação da realidade. Essa boa correspondência entre os dados medidos e simulados é um indicador da qualidade do ajuste batimétrico realizado. Destaca-se que este trabalho teve como objetivo preencher lacunas batimétricas na modelagem, sem propósito de navegação.

Palavras-Chave – Batimetria; Modelagem hidrodinâmica; Baía da Babitonga.

¹⁾ Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário - Trindade, Florianópolis - SC, beatriz.puchalski@posgrad.ufsc.br

²⁾ Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário - Trindade, Florianópolis - SC, adilson.pinheiro@ufsc.br

³⁾ Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Florianópolis - SC, luisgarbossa@epagri.sc.gov.br

INTRODUÇÃO

A modelagem hidrodinâmica depende diretamente da quantidade e qualidade dos dados morfológicos, meteorológicos e fluviais disponíveis. Entre esses parâmetros, a batimetria se destaca, não apenas pela sua importância na modelagem (Pathan *et al.*, 2023), mas também por sua relevância em setores como navegação, obras portuárias, prospecção e exploração de recursos marinhos (Ferreira *et al.*, 2022).

A batimetria é uma das principais contribuições na dinâmica da intrusão salina em estuários estratificados (Medeiros; Paiva; Vinzon, 2003), exercendo impacto relevante no padrão de circulação (Böck; Assad; Landau, 2010) e nos campos de velocidade em modelos bidimensionais (Moura, 2010). É uma importante forçante de entrada nos modelos hidrodinâmicos (Abreu *et al.*, 2024; Mohd Salleh *et al.*, 2025).

O Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil fornece cartas náuticas que abrangem a batimetria de todo o território nacional. Contudo, essas cartas apresentam limitações no fornecimento de dados referentes às áreas mais rasas. Para estudos em zonas costeiras, como estuários, a resolução dessa batimetria pode ser insuficiente, como no trabalho de Dalazen e Cunha (2017). Nestes casos é realizado um ajuste na batimetria durante a calibração para validar o modelo (Reis; Ramos; Silva, 2024).

A obtenção da batimetria pode ser dificultada por questões econômicas, espaciais e logísticas, especialmente em áreas de difícil acesso ou de grandes dimensões (Brêda, 2017). Em regiões rasas, a navegação para realizar sondagens batimétricas é dificultada (Souza-Vieira; Hartmann, 2008).

Uma alternativa, é o uso de imagens de satélites para mapear essas áreas, com as vantagens de baixo custo e rápido resultado (Lyu *et al.*, 2024). Outra ferramenta possível é a utilização de fotografias aéreas ao longo do tempo para analisar a evolução da distribuição de sedimentos, as mudanças nas configurações das margens e as alterações na morfologia de corpos hídricos (Souza-Vieira; Hartmann, 2008).

Com o intuito de refinar a batimetria da Baía da Babitonga, localizada na região norte do estado de Santa Catarina, foram levantados os trabalhos já realizados na região, as cartas náuticas, imagens de satélite e aerofotogrametrias. O projeto BaySqueeze realizou medições em diversos transectos (Projeto BaySqueeze, 2022), cujos dados foram comparados com as imagens de satélite e aerofotografias. Os dados fornecidos pelo transecto foram interpolados com as cores do corpo hídrico de modo a estimar batimetria para regiões ainda não mensuradas, utilizando as variações de cor como indicativo da profundidade. Em regiões hídricas rasas, a reflexão da luz pelo fundo não é desprezível, o que possibilita o uso do sensoriamento remoto passivo (baseado da luz solar), por meio da detecção das cores oceânicas para estimar a profundidade da água (Wei *et al.*, 2020).

Por fim, este trabalho teve como objetivo aprimorar a batimetria da Baía da Babitonga, visando obter resultados mais robustos para o modelo hidrodinâmico aplicado à região. A batimetria terá como indicador de qualidade o resultado da modelagem de nível da água realizada pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) comparado com dados obtidos por marégrafos presentes na região.

Destaca-se que, embora essa batimetria apresente robustez nos modelos, não deve ser utilizada para navegação, pois não foi desenvolvida com esse propósito. Assim, o objetivo é refinar a batimetria de um complexo estuarino por meio da interpolação de dados medidos e com a análise colorimétrica de imagens aeroespaciais e de satélite.

METODOLOGIA

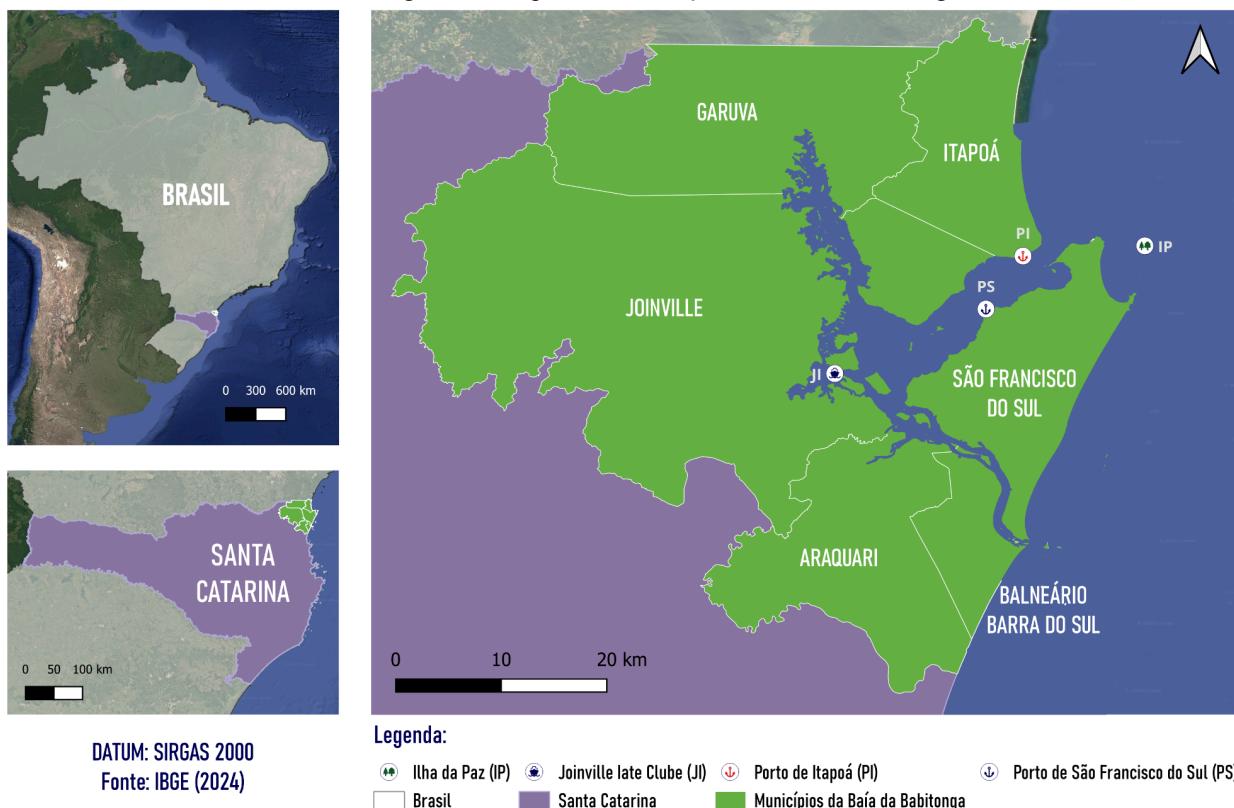
A Baía da Babitonga está localizada no litoral norte do Estado de Santa Catarina, Figura 1. A área superficial da baía é de 160 km² e abrange seis municípios: Araquari, Balneário Barra do Sul, Garuva, Itapoá, Joinville e São Francisco do Sul (Grace et al., 2008). Na entrada da Baía estão localizados o porto de São Francisco e o porto de Itapoá.

A batimetria da região é descrita pelas cartas náuticas (CN) nº 1804 e 1830 – Porto de São Francisco do Sul da DHN, as quais foram usadas como referência inicial. No entanto, essas cartas contemplam apenas a entrada da baía, e não as regiões mais internas. Para representar toda a baía tornou-se necessário a busca por dados batimétricos adicionais para a região.

Os dados adicionais foram obtidos de diversas fontes indiretas, dentre elas estão os dados de batimetria levantados pelo porto de São Francisco, disponibilizados no ano de 2020 e provenientes de levantamentos anteriores a esta data, os quais abrangem a entrada do canal, próximo a Ilha da Paz, até região a oeste dos portos; Dados de projetos como o Baías do Brasil desenvolvido pela COPPE (Fachi et al., 2018), o qual coincide com os dados das cartas náuticas; Dados do projeto BaySqueeze (Projeto BaySqueeze, 2022) o qual dispunha de diversos transectos, inclusive em áreas rasas da baía da Babitonga.

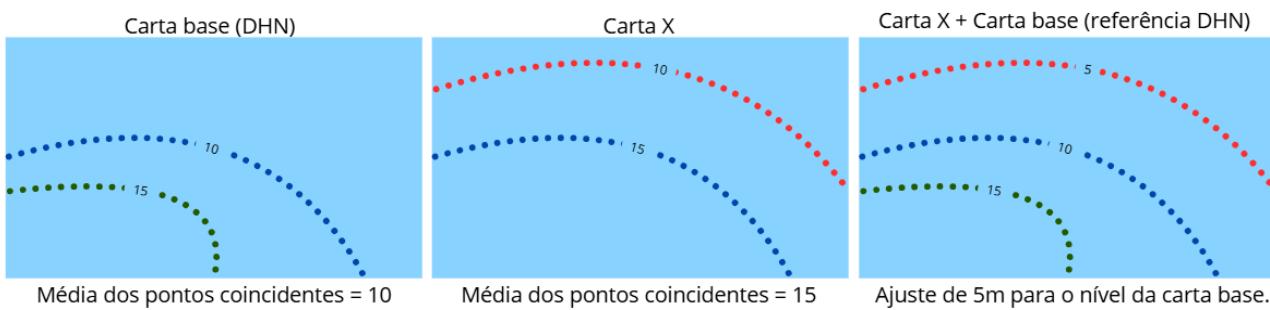
Além dos dados de batimetria, foram usados dados de levantamentos do Centro de Estudos do Mar da UFPR os quais contemplavam a delimitação dos mangues na região interna da Babitonga. Na delimitação da linha de costa também foram usados dados gerados no âmbito do projeto PLDM (Novaes et al., 2010) que foi um estudo multidisciplinar para o planejamento e gestão da aquicultura costeira com o piloto em SC. Nesse projeto uma das etapas foi a digitalização da linha de costa de SC e de cartas náuticas.

Figura 1 – Mapa de Localização da Baía da Babitonga.



A primeira etapa do processo consistiu em reunir todos os dados de batimetria no QGIS, ajustando-os para uma referência de nível comum. A referência escolhida foi a fornecida pelas cartas náuticas da DHN. Os dados provenientes de outras fontes foram ajustados com base em pontos coincidentes com as cartas náuticas. Para realizar esse ajuste, foram calculadas as médias dos valores nos pontos sobrepostos, tanto das cartas náuticas quanto dos dados adicionais. A diferença entre essas médias foi utilizada para alinhar a referência de nível dos dados adicionais. Quando a média dos dados adicionais era superior à média da DHN, o valor médio foi subtraído dos pontos do conjunto adicional. Por outro lado, quando a média dos dados adicionais era inferior, a diferença foi somada a todos os pontos do conjunto de dados adicionados. Esse procedimento garantiu a uniformidade na referência de nível em todo o conjunto de dados (Figura 2).

Figura 2 – Representação do ajuste do nível de referências das batimetrias com base na carta náutica da DHN.



A etapa seguinte foi focada nas áreas rasas, com pequenos meandros e ausência total de dados que pudessem ser usados para interpolação. Para fornecer valores para interpolação foram adotadas algumas condições de contorno dentre elas destacamos: a) regiões que têm coincidência entre a linha de costa e a presença de vegetação o valor adotados de batimetria foi igual a -1,0 m (menos um metro), ou seja, um metro acima do valor zero da carta náutica; b) regiões com vegetação no intervalo entre a linha de costa e áreas permanentemente alagadas como pequenos meandros e estuários valor igual a -1,0 m (menos um metro); c) linha de interface entre áreas de vegetação e área submersa valor igual a 0,0 m (zero); d) eixo de pequenos cursos de água ou meandros com largura inferior a 30,0 m, valor igual a 0 m (zero); e) eixo de cursos de água ou meandros com largura entre 30,0 m e 60,0 m, valor igual a 1,0 m (um metro); f) eixo de cursos de água ou meandros com largura entre 60 m e 90 m, valor igual a 1,5 m (um metro e meio); g) eixo de cursos de água ou meandros com largura entre 90,0 m e 120,0 m, valor igual a 2,0 m (dois metros).

Finalmente, para as regiões mais próximas aos canais principais onde havia alguns dados de transectos lineares ou levantamentos de malha de pontos do projeto BaySqueeze e de batimetria realizada pelos portos, as cores do corpo hídrico foram usadas como referência para interpolar valores de batimetria para regiões ainda não mensuradas. As variações de cor foram usadas como indicativo da profundidade. Para isso foram usadas imagens do aerolevantamento do Estado de SC (SDS, 2013), imagens do Google Earth e imagens do Bing Maps. Foram selecionadas as imagens com melhor resolução para cada trecho de interesse e de período com mínimo de cobertura de nuvens. A partir destas imagens foi verificada a cor do pixel relacionando com a cor coincidente com o ponto onde haviam dados de batimetria. Os valores ali identificados foram usados para preencher os valores em novos transectos lineares com intervalos de, aproximadamente, 1,0 km quando em linha reta e mais próximos em curvas acentuadas.

Após a espacialização dos dados existentes e estimados, os dados foram interpolados para uma malha com pixel de 20,0 m usando ferramenta do QGIS de ponderação pelo Inverso da Distância (idw interpolation algorithm) cobrindo toda a área de interesse da baía da Babitonga. A

imagem resultante foi usada como base de dados de batimetria para entrada no modelo hidrodinâmico MOHID Water (MOHID, 2003).

O modelo hidrodinâmico foi implementado de maneira operacional pela EPAGRI, o qual foi desenvolvido para gerar previsões de nível de água e corrente para a Baía da Babitonga.

RESULTADOS

A batimetria aprimorada foi utilizada por Abreu (2021) e pelo Grupo Pró-Babitonga (GPB) (GPB, 2024). Além de utilizada nestes trabalhos, esta batimetria faz parte de uma ferramenta de previsão de nível e corrente utilizada pela EPAGRI.

Abreu (2021) empregou o conjunto de modelos hidrodinâmicos do SisBahia para realizar a modelagem hidrodinâmica bidimensional da Baía da Babitonga. O objetivo do trabalho foi analisar diferenças na circulação hidrodinâmica nos cenários atuais e em cenários futuros.

A validação do modelo para os valores de nível de superfície livre foi feita a partir de dados de 3 estações maregráficas: Porto de Itapoá (PI), Porto de São Francisco do Sul (PS) e Joinville Iate Clube (JI). O coeficiente de determinação apresentou valores superiores a 0,90 (IT: 0,977; SF: 0,967 e IC: 0,908) e a correlação de Pearson foi maior que 0,95 (IT: 0,988; SF: 0,983 e IC: 0,953). Estes resultados indicam uma representação adequada da realidade. Os resultados do estudo de Abreu (2021) são um indicativo de que a batimetria está condizente com a realidade.

O GPB (2024) realizou estudos da hidrodinâmica do local, com o objetivo de avaliar os cenários com a reconstrução ambiental do Canal do Linguado, fechado desde 1935. A batimetria foi utilizada nas simulações. No entanto, os resultados ainda não foram divulgados. Este trabalho foi financiado a partir de um termo de Ajustamento de Conduta conduzido pelo Ministério Público Federal (MPF n° 1.33.005.000224/2014-89).

A EPAGRI opera um modelo de previsão de nível da água utilizando esta batimetria como condição de contorno do modelo. O modelo hidrodinâmico utilizado na baía da Babitonga é forçado pelo modelo hidrodinâmico da costa de Santa Catarina. A fim de conferir se o modelo de previsão representa adequadamente a realidade, foi realizada a validação do modelo para o período de 01/01/2025 à 28/02/2025, cujos dados foram coletados a cada 5 minutos. Foram utilizados os dados simulando os valores de nível de superfície livre comparados com os dados observados dos marégrafos para os pontos: Ilha da Paz (IP), Porto São Francisco do Sul (PS) e Joinville Iate Clube (JI). A Figura 3 apresenta o gráfico que compara os dados medidos com os dados simulados.

A correlação de Pearson foi a partir de 0,80 (IP: 0,94; JI: 0,80 e PS: 0,92) e o coeficiente de determinação apresentou valores superiores a 0,60 (IP: 0,84; JI: 0,61 e PS: 0,85). Esses valores apresentam uma adequada representação da realidade. O nível médio da superfície está diretamente relacionado ao padrão de circulação e o padrão de circulação tem como uma das principais forçantes a batimetria (Böck; Assad; Landau, 2010). Portanto a adequada representação da realidade implica em uma boa representação da batimetria.

O ponto Joinville Iate Clube apresentou a menor correlação com os dados observados em relação às outras duas estações analisadas. Esse resultado pode estar relacionado à sua posição mais interna na baía, o que pode ter provocado um atraso na propagação da onda ao adentrar a região. A Figura 4 ilustra o comportamento dos dados ao longo de dois dias (26/01/25 - 27/01/25), onde se torna perceptível que o perfil é similar, mas há uma diferença de fase entre os observados com os dados modelados.

Figura 3 – Valores da posição da superfície livre medidos nas estações marítimas da Ilha da Paz, Joinville late Clube e São Francisco do Sul, e os valores simulados para os mesmos pontos com o software MOHID Water para o período de 01/01/2025 à 28/02/2025.

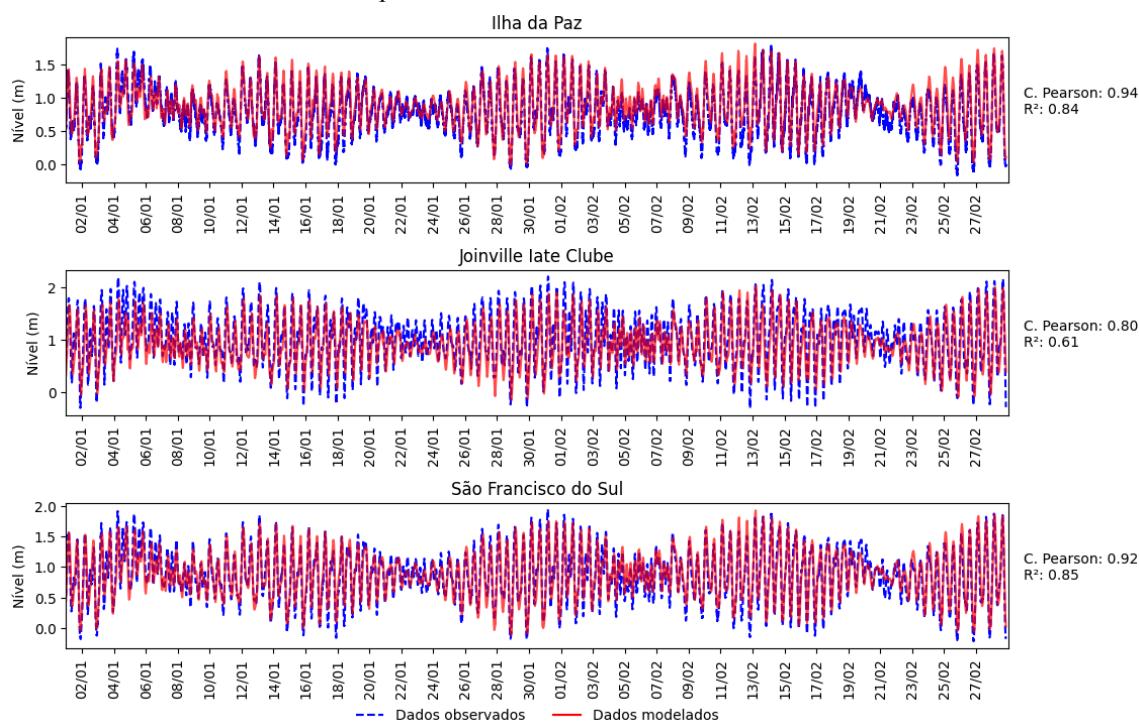
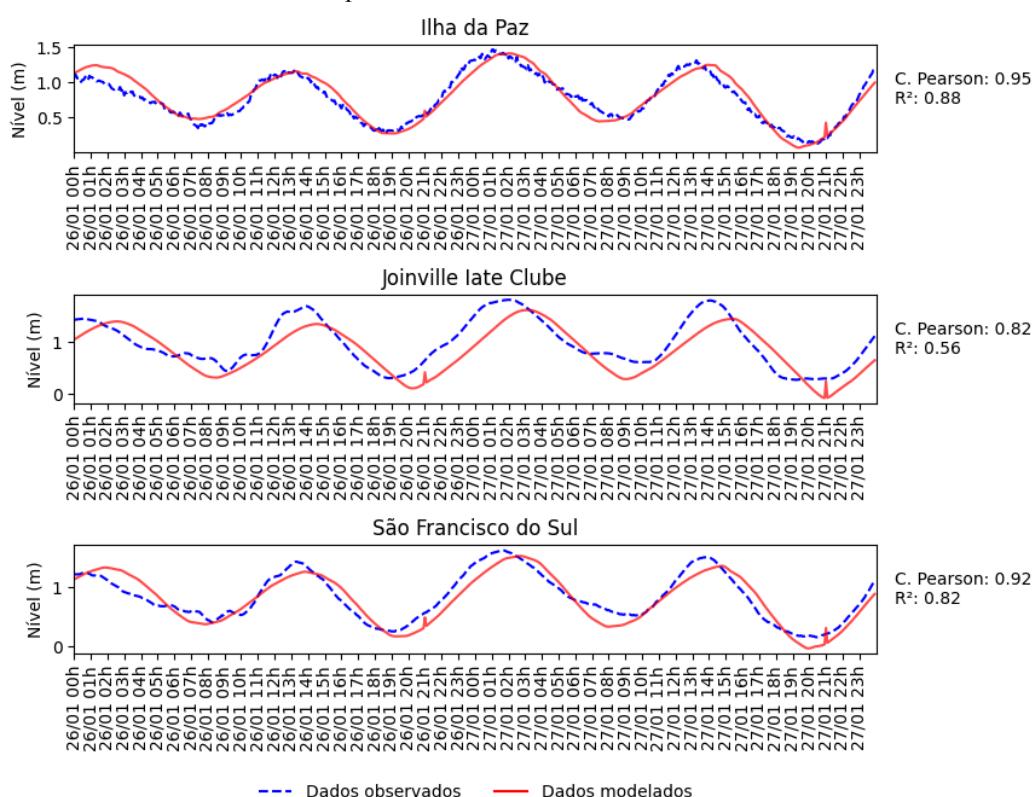


Figura 4 – Valores da posição da superfície livre medidos nas estações marítimas da Ilha da Paz, Joinville late Clube e São Francisco do Sul, e os valores simulados para os mesmos pontos com o software MOHID Water para o período de 26/01/2025 à 27/02/2025.



CONCLUSÕES

O uso de dados batimétricos de estudos anteriores, combinados com imagens aéreas, é uma alternativa econômica para viabilizar projetos em áreas onde não é possível realizar novas campanhas batimétricas. Essa abordagem permite que a batimetria de regiões específicas seja aprimorada e atualizada.

A batimetria obtida foi utilizada em diferentes modelos hidrodinâmicos, no Sisbahia e no MOHID Water, e em ambos os casos houve uma representação adequada da realidade. Este resultado indica que a batimetria utilizada estava bem ajustada, evidenciando a eficácia do processo de refinamento batimétrico.

Sistemas de sensoriamento remoto passivo, baseados em imagens, são uma alternativa para regiões rasas, onde a transmissão e a reflexão da radiação luminosa permitem estimativas de profundidade, sendo úteis em áreas remotas ou com dados limitados.

Destaca-se que essa aplicação foi desenvolvida com o objetivo de suprir a falta de dados batimétricos na modelagem hidrodinâmica, não sendo parametrizada para fins de navegação; portanto, não deve ser utilizada para esse propósito.

Para estudos futuros, recomenda-se realizar a modelagem hidrodinâmica com a batimetria original, sem os aprimoramentos, com o objetivo de quantificar, em ordem de grandeza, o impacto do refinamento da batimetria nos resultados de predição de nível da água.

AGRADECIMENTOS

A FAPESC pelo apoio através do projeto “Aprimoramento da geração e disponibilização de informações ambientais de Santa Catarina” Edital 17/2023 e ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (processo nº 304475/2020-3).

REFERÊNCIAS

ABREU, Anna Carolina Alves de. **Avaliação dos processos de mistura na Baía da Babitonga (SC) em cenários de mudanças climáticas**. 2021. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/72516>. Acesso em: 23 set. 2024.

ABREU, Carlos Henrique Medeiros de *et al.* Modelagem Hidrodinâmica-Dispersiva em Canal Natural no Estuário Amazônico. In: II FLUHIDROS - SIMPÓSIO NACIONAL DE MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA E XVI ENES - ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 2024, Curitiba. **II FLUHIDROS - Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e XVI ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Curitiba: [s. n.], 2024.

BÖCK, Carina Stefoni; ASSAD, Luiz Paulo de Freitas; LANDAU, Luiz. Implementação do Modelo Numérico Hidrodinâmico POM na Baía de Guajará (Pará, Brasil). In: XXXIII CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 2010, Águas de Lindóia. **Anais** [...]. Águas de Lindóia: [s. n.], 2010.

BRÊDA, João Paulo Lyra Fialho. **Assimilação de altimetria espacial para estimativa de batimetria e rugosidade efetivas para modelagem hidrodinâmica**. 2017. Dissertação - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2017.

FACHI, Jeane *et al.* **Projeto Baías do Brasil Baía da Babitonga, Santa Catarina**. Rio de Janeiro: 2018. Disponível em: https://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br/assets/relatorios/rel_baia_babitonga.html.

FERREIRA, Italo Oliveira *et al.* State of art of bathymetric surveys. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 28, n. 1, p. e2022002, 2022.

GPB, GRUPO PRÓ-BABITONGA. **ESTUDOS HIDRODINÂMICOS: Cenários para apoio à reconstrução ambiental do CANAL DO LINGUADO**. Joinville: 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/CFuGc>.

GRACE, Virgínia Barros *et al.* Hydrological mixing and geochemical processes characterization in an estuarine/mangrove system using environmental tracers in Babitonga Bay (Santa Catarina, Brazil). **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 4, p. 682–695, 2008.

LYU, Haoyang *et al.* Hydrological model calibration in data-deficient basins using satellite altimetry and a hydrodynamic model. **Journal of Hydrology**, v. 643, p. 132022, 2024.

MEDEIROS, Adriana D; PAIVA, A. M.; VINZON, S. B. A influência da batimetria no posicionamento da intrusão salina em estuários. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: 2003.

MOHD SALLEH, Shahirah Hayati *et al.* Performance evaluation of high discharge estuarine hydrodynamic model. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 16, n. 4, p. 10322, 2025.

MOHID. **MOHID Description: Description of the 3D water modeling system Mohid - Manual**. 2003. Disponível em: http://wiki.mohid.com/index.php?title=Mohid_Bibliography.

MOURA, José Edson de. **Influência dos modelos digitais de terreno na modelagem de circulação hidrodinâmica 2DH: um estudo de caso**. 2010. master Thesis - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15969>. Acesso em: 3 dez. 2024.

NOVAES, André Luís *et al.* Planos Locais de Desenvolvimento da Maricultura de Santa Catarina – PLDM. **Panorama da Aquicultura**, [s. l.], p. 52–58, 2010.

PATHAN, Azazkhan I. *et al.* Chapter 24 - River Bathymetry acquisition techniques and its utility for river hydrodynamic modeling. In: ESLAMIAN, Saeid; ESLAMIAN, Faezeh (org.). **Handbook of Hydroinformatics**. [S. l.]: Elsevier, 2023. p. 339–351. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128219621000258>. Acesso em: 7 mar. 2025.

PROJETO BAYSQUEEZE. **Subida do nível do mar e a Baía da Babitonga: uma abordagem eco-morfodinâmica para prever e mitigar impactos (BAYSQUEEZE)**. Joinville: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), 2022. Disponível em: <https://baysqueeze.ufsc.br/>.

REIS, Roberta Caldas Salcedo; RAMOS, Daniel Maia; SILVA, Rodrigo Amado Garcia. Calibração e Validação do Modelo Hidrodinâmico do SisBaHiA para o Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu, RJ. In: II FLUHIDROS - SIMPÓSIO NACIONAL DE MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA E XVI ENES - ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 2024, Curitiba. **II FLUHIDROS - Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e XVI ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Curitiba: [s. n.], 2024.

SOUZA-VIEIRA, Susane Rabelo de; HARTMANN, Carlos. Modificação marginal das ilhas estuarinas usando ferramentas de aerofotografia, sedimentologia e batimetria. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 60, n. 4, 2008. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44857>.

WEI, Jianwei *et al.* Shallow water bathymetry with multi-spectral satellite ocean color sensors: Leveraging temporal variation in image data. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 250, p. 112035, 2020.