



INFLUÊNCIA DA REABERTURA DO CANAL DO LINGUADO A PARTIR DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA

João Luiz da Rocha Borin¹
Leonardo Romero Monteiro²

Resumo: Desde o fechamento do Canal do Linguado em 1935 por meio de um aterro, diversos setores da sociedade levantaram discussões sobre a sua reabertura, pois o interrompimento do seu fluxo trouxe diversos problemas ambientais e sociais ao seu entorno. O presente trabalho efetuou simulações hidrodinâmicas para prever o comportamento da água na Baía da Babitonga, com a reabertura parcial ou total do Canal do Linguado. Através do uso do software HEC-RAS, foi possível produzir simulações hidrodinâmicas satisfatórias, obtendo resultados da hidrodinâmica da baía que demonstraram que na região do atual aterro e na foz do Canal do Linguado, pode-se observar uma alteração na hidrodinâmica que gerará um potencial alto de modificação da batimetria, impactando as estruturas existentes no leito do canal.

Palavras-chave: Canal de Maré. Diferença de nível. Estabilidade de canal. Simulação.

INFLUENCE OF THE REOPENING OF THE LINGUADO CHANNEL BASED ON HYDRODYNAMIC MODELING

Abstract: Since the closure of the Linguado Channel in 1935, using an embankment, several sectors of society have discussed the reopening, because the stream interruption has been causing many social and environmental problems in the surrounding areas. The present work designs a hydrodynamic model to predict the behavior of Babitonga Bay, with a partial or a total reopening. The software HEC-RAS allowed the production of a satisfactory model, acquiring results of water level and hydrodynamics of the bay, who demonstrate that in the current embankment location and the mouth of the Linguado Channel, can observe an alteration in the hydrodynamic which will generate a high potential of modification on the channel bed, directly impacting the bank structures existing in the river channel.

Keywords: Tidal channel. Water level difference. Channel stability. Simulation.

INFLUENCIA DE LA REAPERTURA DEL CANAL LINGUADO A PARTIR DE LA MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

Resumen: Desde el cierre del Canal Linguado en 1935, mediante un dique, varios sectores de la sociedad han discutido la reapertura, dado que la interrupción del flujo ha estado causando numerosos problemas sociales y ambientales en las áreas circundantes. El presente trabajo realizó simulaciones hidrodinámicas para predecir el comportamiento del agua en la Bahía de Babitonga, ante una reapertura parcial o total. El software HEC-RAS permitió la elaboración de un modelo satisfactorio, obteniendo resultados de hidrodinámica de la bahía, que demuestran que en la ubicación actual del dique y en la desembocadura del Canal Linguado, se puede observar una alteración en la hidrodinámica que generará un alto potencial de

¹ Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, Brasil, joaoluiz.borin@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5877-5639>

² Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Joinville, Brasil, leonardo.monteiro@udesc.br, <https://orcid.org/0000-0002-1460-2577>

modificación en el lecho del canal, impactando las estructuras existentes en el cauce del río.

Palabras clave: Canal de marea. Diferencia de nivel. Estabilidad del canal. Simulación.

Introdução

Localizado no nordeste catarinense, o Canal do Linguado, sendo um canal de maré, era uma ligação da Baía da Babitonga com o mar, e cruza os municípios de Balneário Barra do Sul e São Francisco do Sul (Vieira *et al.*, 2008). Em 1907, para possibilitar a transposição do canal com uma linha férrea, optou-se pelo fechamento parcial do canal com um aterro combinado a uma ponte pivotante, porém em 1934 devido a problemas estruturais na ponte, foi efetuado o aterro completo do canal impedindo o transporte da água, terminando as obras em 1935 (Silva, 2011). Oliveira *et al.* (2006) citam que o fechamento do canal trouxe diversos problemas ambientais, como degradação de manguezais, assoreamento do canal e aumento da concentração de poluentes, assim como problemas antrópicos, como ocupações irregulares em locais com risco de inundação, depreciação de áreas de lazer e turismo, e empobrecimento das economias locais baseadas nos recursos naturais do canal, como a comunidade ribeirinha.

A Baía da Babitonga é o maior complexo estuarino do norte do estado de Santa Catarina, possuindo uma superfície hídrica de aproximadamente 160 km², e, apesar de possuir apenas um canal que a liga ao mar, uma ampla rede de canais a compõe (Mazzer; Gonçalves, 2012). Hoitink e Jay (2016) descrevem que os canais que compõem os estuários são chamados de canais de maré, e podem ser definidos como o trecho de um canal compreendido entre o limite de influência da maré nos processos hidrodinâmicos e o limite da intrusão salina. O estudo dos canais de maré são de grande complexidade devido ao seu comportamento hidrodinâmico ser produto da interação entre a vazão do rio, das correntes de maré e da morfodinâmica do canal (Costa *et al.*, 2017). Devido a essa complexidade existem poucos estudos que procuram compreender completamente as dinâmicas que ocorrem nos canais de maré, sendo necessário aplicar conhecimentos de hidrologia e oceanografia combinados (Hoitink; Jay, 2016).

Em canais naturais é possível observar o fenômeno do transporte de sedimentos, que resultam nas mudanças morfológicas ao longo do tempo, e apesar das fortes alterações antrópicas na Baía da Babitonga, ainda é possível observar este fenômeno (Silva, 2011). Yalin (1977) explica que, caso seja aplicada força o

suficiente, sedimentos podem se desprender do leito do canal e entrar em movimento no sentido do fluxo que aplicou esta força. O autor comenta que, o sedimento permanecerá em movimento enquanto o fluxo de água manter energia o suficiente para tanto, logo caso entre em uma zona com menor intensidade de energia (como curvas ou barragens no canal) o sedimento tende a se depositar no local. Devido ao aterro impedir a troca hídrica entre o interior da baía e o Canal do Linguado, criou-se uma zona favorável para deposição de sedimentos, que após anos de acúmulo, somam alguns metros de deposição (Cristofolini; Fogliatto; Moreira, 2011).

Vieira *et al.* (2008) analisaram as características texturais dos sedimentos de fundo da Baía da Babitonga, e encontraram que 24% de seus sedimentos são lamosos, e a região do aterro do Canal do Linguado contém altas taxas deste tipo de sedimento. Os autores comentam que os sedimentos lamosos, por serem finos, possuem alto potencial de transporte. Modelos hidrodinâmicos podem ser utilizados para simular a hidrodinâmica (e consequentemente o transporte de sedimentos), sendo amplamente utilizados na atualidade para estudar eventos costeiros (Costa *et al.*, 2017). O recente documentário “O Preço do Progresso: Canal do Linguado”, evidenciou a urgência social de estudos hidrodinâmicos para compreensão das dinâmicas geradas por possíveis cenários de reabertura do canal, como o transporte de sedimentos (Aloncio, 2024).

Para auxiliar na compreensão dos processos hidrodinâmicos gerados pela retirada do aterro que divide o canal e a baía, o presente trabalho tem como objetivo analisar as consequências hidrodinâmicas da reabertura do Canal do Linguado em relação ao aumento de nível do espelho d’água da Baía da Babitonga, à mudanças no período e velocidade de entrada e saída da maré na baía e à mobilização de sedimentos na coluna d’água. Para atingir este objetivo foi utilizado o software HEC-RAS para implementar um modelo hidrodinâmico que representa cenários de reabertura do canal.

Área de estudo

O presente trabalho tem como área de estudo a Baía da Babitonga (BB), sendo considerada a mais importante formação marinha de águas interiores do norte catarinense, possuindo 1.400 km² de área total (Silva, 2011). A nordeste da BB encontra-se a Serra do Mar, e a sudeste tem-se a Ilha de São Francisco do Sul, e devido a estas formações a baía adquire um formato que pode ser dividido em três

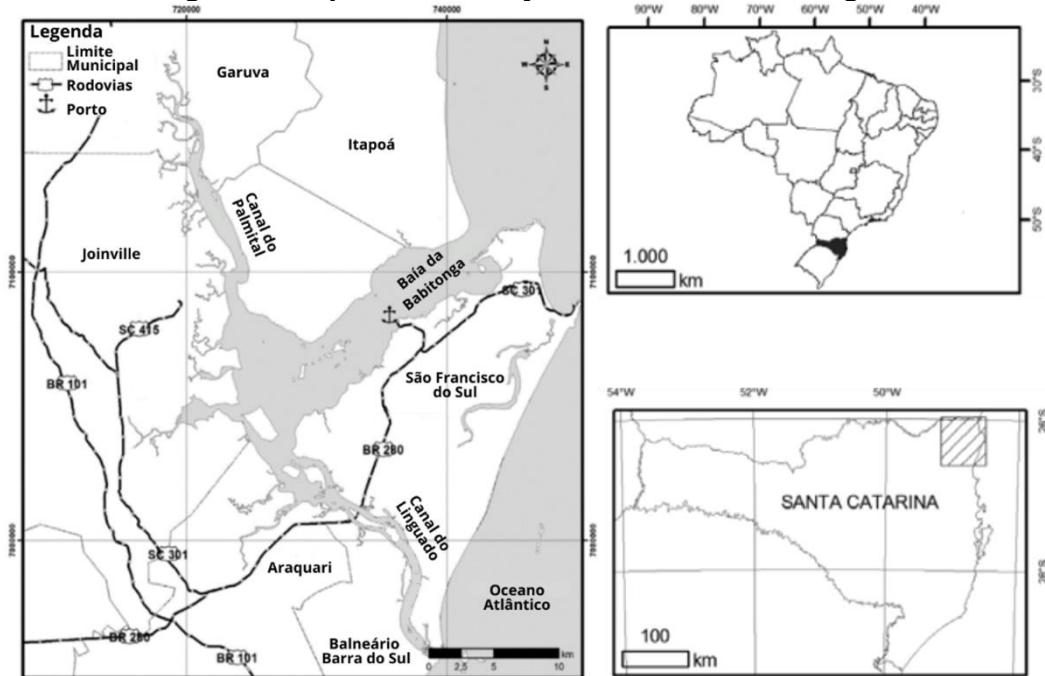
partes (Figura 1), sendo elas: a região do Canal do Palmital ao norte; a região do Canal do Linguado ao sudeste; e a região do canal principal localizada ao centro a qual possui maior área e forma a maior saída para o mar aberto (Cremer, 2006).

Segundo Koehntopp *et al.* (2021), o clima da região da Baía da Babitonga na classificação *Köppen* é subtropical e mesotérmico, já na classificação de *Thornthwaite* a região tem clima que varia de úmido (nas regiões altas e urbanizadas) e superúmido (na planície costeira). Os autores também copilaram dados de estudos sobre chuva na região da baía, e encontraram uma média anual de precipitação variando de 1700 a 2900 mm. De mesma forma, os autores apresentaram dados de estudos sobre o vento na região, e foi constatado ventos médios anuais entre 5,11 e 11,5 km/h, sendo as médias mais fortes encontradas na região de Itapoá. O regime de maré da baía é de micromaré com predominância de maré de enchente (Truccolo; Schettini, 1999).

Vieira *et al.* (2008) descrevem que o canal central da BB sofreu com o fechamento do Canal do Linguado devido ao aumento da deposição de sedimentos em seu interior. Já o próprio Canal do Linguado, segundo os autores, teve alteração de seu regime hidrodinâmico, e em conjunto as suas características morfológicas, acarretando mudanças na relação das comunidades locais com o canal.

Cristofolini, Fogliatto e Moreira (2011) desenvolveram um estudo sobre impactos socio-ambientais do fechamento do Canal do Linguado. Os autores relatam que o município mais afetado pelo aterro foi Balneário Barra do Sul, e seus moradores sofrem com problemas provenientes do fechamento até hoje. Eles descrevem que, após anos de fechamento, a ocupação antrópica já se encontra bem estabelecida nas margens do Canal do Linguado, o que ocasiona problemas como inundações em maré alta, danos estruturais com eventos de ressaca, e exposição ao lodo. O lodo presente no Canal do Linguado apresenta traços de metais pesados por causa dos efluentes industriais lançados nos recursos hídricos da região, principalmente antes de existirem legislações ambientais proibindo tal lançamento (Oliveira *et al.*, 2006).

Figura 1. Mapa de localização da Baía da Babitonga.

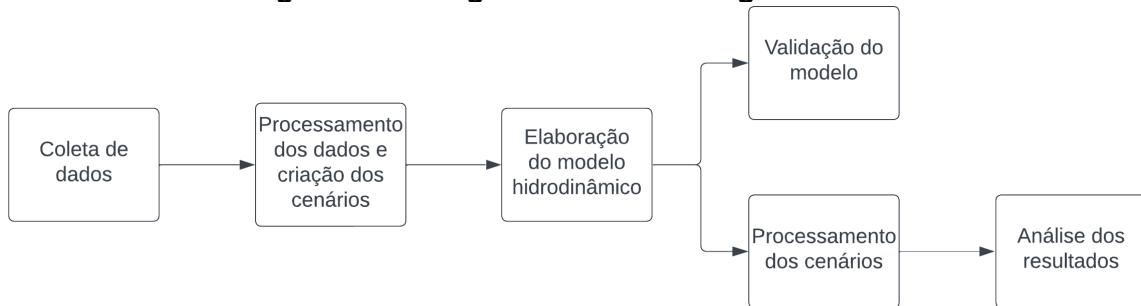


Fonte: Vieira *et al.*, 2008, editado pelos autores.

Materiais e Métodos

Para atingir o objetivo deste trabalho com resultados validados, alguns passos foram necessários. Os métodos utilizados no presente trabalho podem ser observados resumidamente na Figura 2, sendo melhor detalhados nos subitens deste item. Inicialmente foram reunidos os dados referentes as características físicas do terreno e sinais de maré a partir de uma série histórica. Os dados foram processados de forma a gerarem os cenários de reabertura (parcial e total) e não reabertura. Os dados tratados puderam ser inseridos no software HEC-RAS na elaboração do modelo hidrodinâmico 2D. O modelo primeiramente foi validado a partir da comparação com um evento real e, após confirmada a validade, foram processados os eventos de maré registrados nos modelos hidrodinâmicos, gerando resultados que passaram por análise.

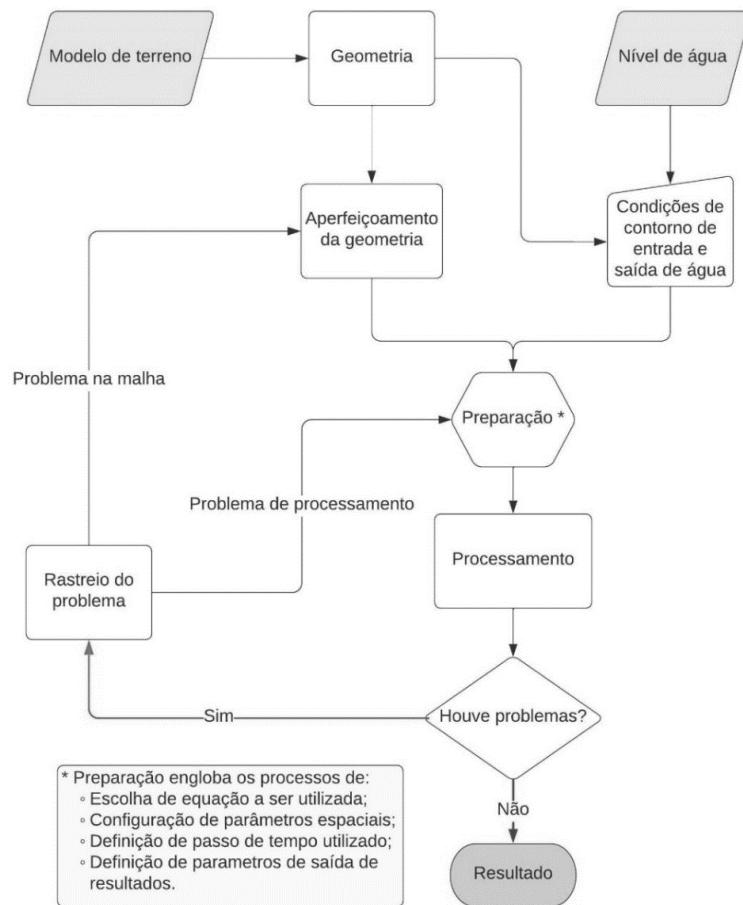
Figura 2 . Fluxograma da metodologia adotada.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

No *software* HEC-RAS são inseridos inicialmente dados de elevação de terreno com batimetria, e a partir deles é delimitado e discretizado o domínio da simulação. Dentro do próprio *software* é possível fazer alterações no modelo do terreno, possibilitando aplicar os cenários de reabertura. Após a delimitação do domínio é necessário estabelecer as zonas onde serão inseridas as condições de contorno, e com isso determinar se elas se comportarão como entrada e/ou saída de água no modelo. No *software* podem ser inseridas outras variáveis como vento, precipitação, variação das propriedades físico-químicas da água, mas neste trabalho não foram consideradas. A rugosidade do fundo foi considerada pelo número de Manning com valor constante e pré-definido pelo HEC-RAS de 0,06. Com isso, o *software* calcula através das equações de águas rasas o comportamento hidrodinâmico do fluido dentro do domínio. A Figura 3 apresenta o fluxo de processos adotado para utilização do HEC-RAS para criação de um modelo hidrodinâmico 2D.

Figura 3. Fluxograma de processos de criação de modelo de simulação de cenários no HEC-RAS.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Coleta e tratamento de dados

Os dados obtidos para presente trabalho são Modelos Digitais de Terreno (MDT), batimetria da Baía da Babitonga, e séries temporais de nível de água (sinal de maré) provenientes de marégrafos localizados nos pontos de contorno e controle do modelo. Os dados de elevação do terreno foram obtidos através de MDTs fornecidos pelo Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC) (Sistema de Informações Geográficas, 2010). Em área de corpos d'água o MDT apresenta a posição da superfície livre na água, necessitando de um tratamento para que a batimetria seja representada. O modelo de superfície referente a batimetria da Baía da Babitonga foi desenvolvido a partir dos dados de Silva (2011), que analisou a morfodinâmica com a reabertura do Canal do Linguado. Os pontos encontrados pela batimetria foram interpolados utilizando o método de malha de triângulos irregulares (*Triangulated Irregular Network – TIN*), no software QGIS versão 3.22.12, gerando o modelo de superfície que foi incorporado ao MDT.

Previamente a representação de cenários, a fim de realizar simulações de validação do modelo, foram coletados dados de maré de dois pontos da Baía da Babitonga, sendo os do Porto de Itapoá como dados de entrada ao sistema, e os dados do Joinville Iate Clube como comparativo de validação. Esses dados foram registrados pelos marégrafos instalados nos pontos citados entre os dias 5 e 7 de maio de 2023. Para completar os dados das condições de contorno referentes à Baia da Babitonga foi determinado um ponto no Canal do Palmital a 11 km a montante de sua foz, atribuindo um nível igual a cota 0 m (nível do mar). Como se quer representar uma situação real a validação foi feita com o aterro completo, eliminando a influência da maré vinda do Canal do Linguado.

Os dados de níveis de maré, utilizados como condição de contorno para a simulação dos cenários propostos, também foram os apresentados por Silva (2011), sendo um registro de dois marégrafos, um próximo a ilha dos remédios e outro no Porto de Itapoá, datados entre 20 de maio e 7 de julho de 2005. Mesmo para os cenários, foi mantida a simplificação do nível no Canal do Palmital como constante no tempo e na cota 0 m. A Figura 4 apresenta a região delimitada para a simulação bem como destaca os pontos de contorno onde foram inseridos os dados de maré. Para melhor entendimento a

Tabela 1 apresenta a origem e tratamento dos dados utilizados neste trabalho.

Figura 4- Mapa da área delimitada e condições de contorno da simulação.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Tabela 1- Quadro da origem e tratamento dos dados.

Dado	Tipo do dado	Origem de obtenção	Tratamento aplicado
MDT	Raster georeferenciado com dados de cota do terreno	SIGSC (Sistema de Informações Geográficas, 2010)	Recorte da área de estudo; Mesclagem com os dados de batimetria.
Batimetria ao norte do aterro	Malha de pontos georreferenciados com informação de profundidade do fundo da baía.	Silva (2011)	Interpolação dos pontos para criar uma superfície; Mesclagem com o MDT e a outra batimetria.
Batimetria ao sul do aterro	Pontos dispersos em linhas georreferenciados com informações de profundidade do fundo do canal.	Silva (2011)	Complementação de dados faltantes próximo ao aterro; Interpolação dos pontos para obter uma superfície; Mesclagem com o MDT e a outra batimetria.
Maré do Porto de Itapoá - Validação	Registro de nível de água através de marégrafo.	EPAGRI (2023) - Estação 2903	-
Maré do JIC - Validação	Registro de nível de água através de marégrafo.	EPAGRI (2023) - Estação 2913	-
Maré do Canal do	Valor de nível de	Elaborado pelo	-

Palmital - Validação	água arbitrado	autor (2024)	
Maré do Porto de Itapoá - Cenários	Registro de nível de água através de marégrafo.	Silva (2011)	-
Maré do Canal do Palmital - Cenários	Valor de nível de água arbitrado	Elaborado pelo autor (2024)	-
Maré da Ilha dos Remédios - Cenários	Registro de nível de água através de marégrafo.	Silva (2011)	-

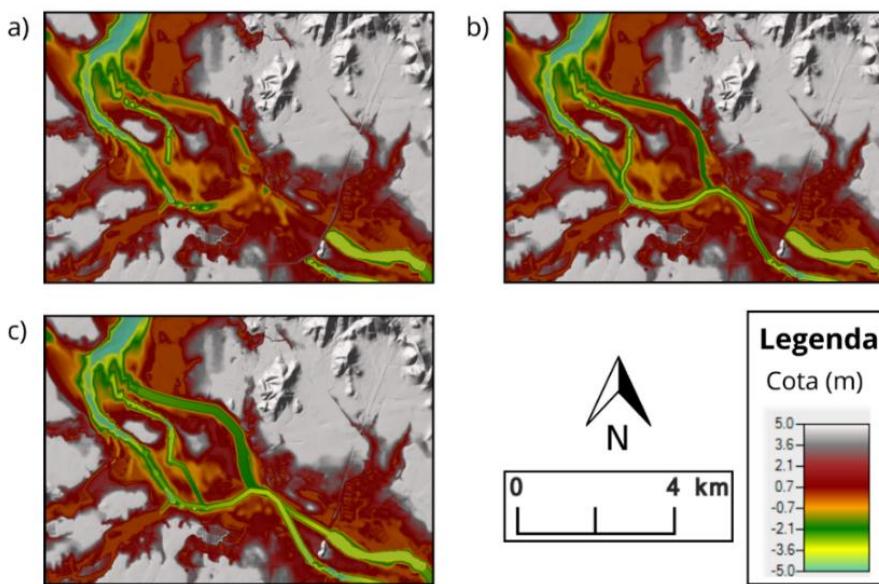
Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Criação dos cenários

Na área onde se encontra o aterro existe a Ilha do Linguado, dividindo o Canal do Linguado em dois, o canal norte e o sul. Para simular a reabertura do canal foram propostos 2 cenários, a retirada do aterro apenas no canal sul (cenário 1), e a retirada completa do aterro (cenário 2), sendo simulado também a não alteração de terreno (cenário 0) para fins de comparação com o cenário real. O cenário 1 representa a situação inicialmente proposta em 1907, onde para a passagem da ferrovia, o canal norte foi totalmente aterrado e o canal sul foi deixado aberto, e o cenário 2 representa a situação original, sem o fechamento de nenhum dos lados.

Para tal, o MDT foi manipulado retirando as porções de terra referentes ao aterro. De forma a equalizar as profundidades encontradas a jusante e a montante do canal, também foi prevista a dragagem de uma porção do canal a montante para facilitar o escoamento visto a presença de acúmulo de lodo. Foram retirados $3,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ de solo/lodo para criação do cenário 1, e $5,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ de solo/ lodo para a criação do cenário 2 (Figura 5).

Figura 5- Alteração do MDT para adequação aos cenários 0 (a), 1 (b) e 2 (c).



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

As condições de contorno foram inseridas em segmentos do perímetro da malha conforme as especificações do programa utilizado para a simulação hidrodinâmica. No Canal do Palmital e no Porto de Itapoá, as condições de entrada e saída de água são aplicadas em uma seção transversal de seus canais na altura do ponto medido (no caso do Porto de Itapoá) ou adotado (no caso do Cana do Palmital). Os dados da ilha dos remédios foram inseridos numa linha no limite da malha próximo à costa na proximidade da foz do Canal do Linguado, e sendo respeitada a mesma leitura do ponto medido devido a linha estar próxima a ele (Figura 4).

Modelagem hidrodinâmica e metodologia de análise

Neste item serão expostas as metodologias utilizadas para gerar o modelo hidrodinâmico 2D, e como se desenvolveu a análise dos resultados. Para melhor compreensão foi dividido em dois subitens, sendo eles: Equacionamento e Configuração do Modelo, e Metodologia de Análise da Validação e dos Cenários.

Equacionamento e Configuração do Modelo

Foi utilizado o software HEC-RAS para a modelagem e simulação hidrodinâmica, sendo optado pelo modelo 2D devido à importância das direções horizontais para representar o escoamento. Foi optado pelo uso do modelo baseado nas Equações de Águas Rasas com aproximação Eulariana como método para calcular as previsões de movimento em duas direções, visto que dentre as opções oferecidas pelo software esta é a que melhor representa o momento do fluxo. Como fatores simplificadores, desconsiderou-se as forças do vento e alterações das propriedades físicas do fluido e da rugosidade do fundo da baía.

Para representar a evolução temporal do escoamento foi adotado o método adaptativo de tempo baseado no número de Courant, sendo os limites entre 0,3 e 0,8, e os limites de intervalo de tempo entre 0,31 e 40 segundos, iniciando em 10 segundos. Para mais detalhes do funcionamento da metodologia de tempo adaptativo consultar o manual do usuário do programa (Usace, 2021).

O domínio da simulação foi definido como o espelho d'água e regiões próximas a este. A malha base de todo domínio da simulação em volumes finitos tem a dimensão de 50×50 m, sendo determinada através de testes de sensibilidade de malha. Optou-se por realizar o detalhamento da malha no entorno dos maiores

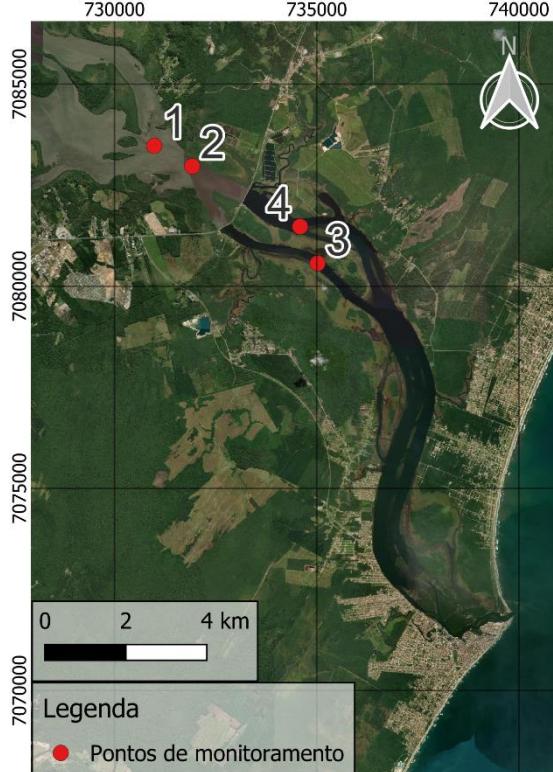
canais da baía, podendo chegar a 20 m de lado nas células, que podem adquirir formatos de até 6 lados.

Para condição inicial do escoamento considerou-se a baía cheia de água. Para tanto foi executado um aquecimento do modelo simulando os 7 primeiros dias do banco de dados. O resultado deste aquecimento foi utilizado como condições iniciais do procedimento de validação e dos cenários considerados.

Metodologia de Análise da Validação e dos Cenários

A validação do modelo foi conferida através do método de inspeção de gráfico aliado ao método de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE), que, conforme apresentado por Duc e Sawada (2023), é efetivo para análise de sinais de ondas, como o caso do presente trabalho. Diversos autores têm utilizado o método NSE para validação dos modelos hidrodinâmicos (Costa *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2019; Silva, 2011; Siqueira *et al.*, 2018), os limites de aceitabilidade do modelo adotados foram os propostos por Moriasi *et al.* (2007), sendo: entre 1.00 e 0.75 considerado muito bom; entre 0.65 e 0.75 considerado bom; entre 0.50 e 0.65 considerado satisfatório; e abaixo de 0.50 considerado insatisfatório.

Para interpretar as alterações do nível ao longo do tempo, foi avaliada a oscilação da cota de água ao longo do tempo da simulação em pontos específicos dos diferentes cenários, comparando-os através de representação gráfica. Foram definidos 4 pontos, sendo eles: Ponto 1 - confluência de canais antes da barragem; Ponto 2 - meio do canal antes da bifurcação antes da barragem; Ponto 3 - canal sul após a barragem; Ponto 4 - canal norte após a barragem (Figura 6). Os dois primeiros pontos foram selecionados para observar a diferença de comportamento a montante do canal, conforme a proximidade do aterro. Os pontos 3 e 4 tem como objetivo avaliar a diferença de comportamento entre os ramos norte e sul do canal a jusante do aterro.

Figura 6- Mapa de localização dos pontos de monitoramento de nível.

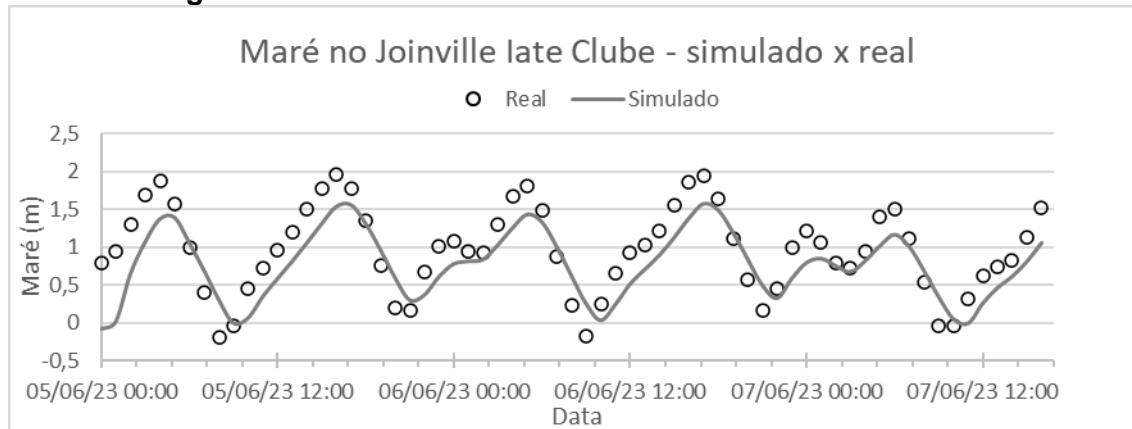
Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Resultados e discussão

Os resultados relevantes obtidos das simulações foram filtrados e tratados para melhor visualização e análise. A seguir são apresentados os resultados de validação, os cenários e a comparação entre os diferentes cenários.

Validação

A simulação de validação apresentou resultados com comportamento próximo ao registrado pela realidade (Figura 7). O valor do índice NSE foi de 0,66, o que representa é classificado como bom. Devido a análise do presente trabalho se referir a comparação cenários simulados, a diferença entre a fase dos níveis observados e dos simulados na validação não é relevante. Ao fazer uma correção de fase com o registro observado, transladando os resultados simulados 1 h a frente, obteve-se um índice NSE igual a 0,79, que é considerado muito bom.

Figura 7- Gráfico de níveis de maré simulado transladado x real.

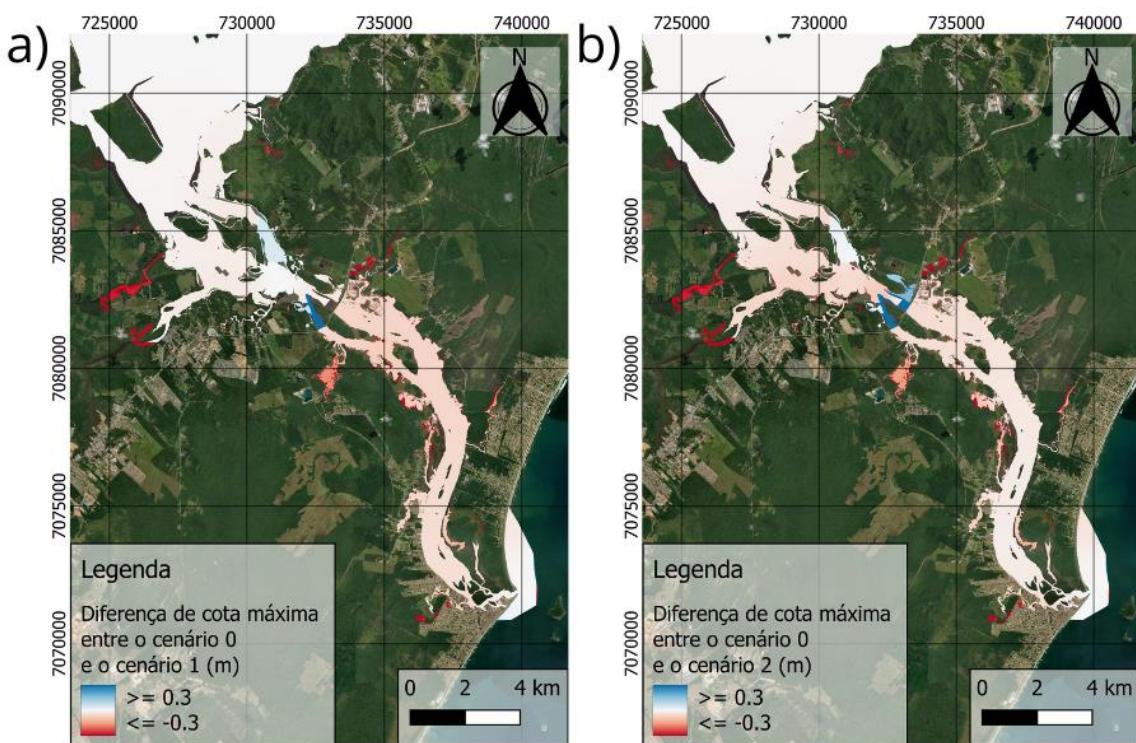
Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

O período médio houve pouca alteração, sendo de 12 h e 20 min para o real, enquanto o simulado foi igual a 12 h. As diferenças do modelo para a realidade podem ser atribuídas as simplificações adotadas, como a não variação da rugosidade do fundo, não consideração dos efeitos do vento, e a constância de nível atribuída ao Canal do Palmital.

Níveis dos corpos d'água

Os resultados de níveis foram analisados pelos valores máximos encontrados em cada cenário. Para a melhor compreensão dos impactos da reabertura parcial e total do Canal do Linguado, foram produzidos mapas das diferenças de níveis máximos entre o caso base, isto é, o cenário 0, e cada cenário de reabertura. Logo, os mapas gerados foram elaborados tomando o cenário 0 e subtraído os valores encontrados nos cenários 1 ou 2 (Figura 8). Nos dois cenários de reabertura é possível observar que as mudanças de nível se concentraram na área no entorno do aterro. O cenário 1 (Figura 8a) apresenta redução no nível da água na porção do Canal do Linguado mais a jusante do aterro. O cenário 2 (Figura 8b) resultou em diminuição do nível tanto a montante quanto a jusante, apesar de a jusante ser menos intensa que a registrada pelo cenário 1.

Figura 8- Diferença de níveis máximos após reabertura parcial (a) e total (b) do canal



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Nota-se que bem próximo a barragem, há um aumento de nível drástico em um trecho, esse aumento é virtual decorrente do corte do terreno para simular uma dragagem do canal para reabertura. Logo, nos mapas de diferença de nível, ocorre um falso apontamento de mudança de nível, devido a inexistência da região reaberta no cenário 0.

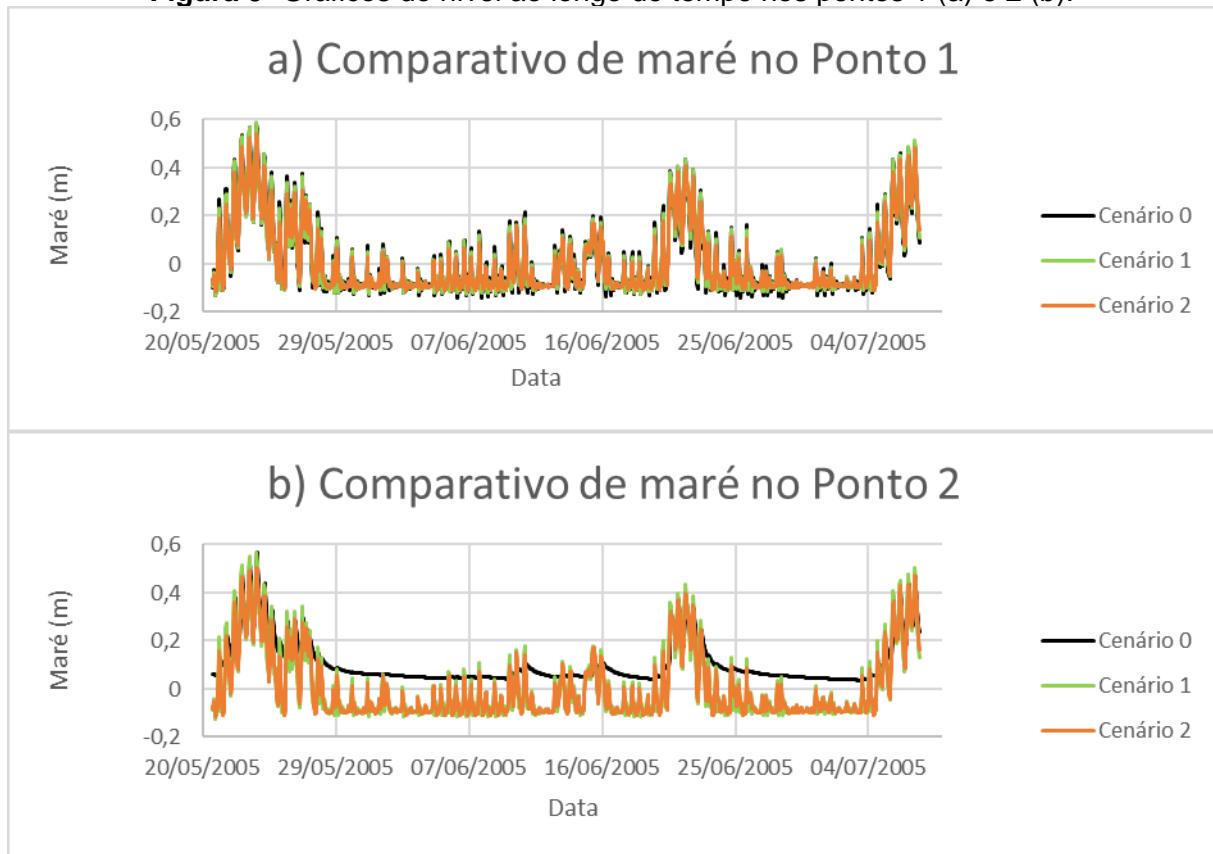
Analizando as proximidades da foz do Canal do Linguado, onde Balneário Barra do Sul possui um centro urbano estabelecido, podemos notar pequenas diferenças de níveis em ambos os cenários. A diferença registrada pelos cenários encontrou-se entorno de 5 cm, tendendo a zero próximo a foz. Sendo assim, essa diferença é benéfica para o gerenciamento de riscos de inundações, mas possui baixo impacto devido à pequena diferença.

Nas demais regiões da Baía da Babitonga, pode-se notar que quase não houve mudança nos níveis máximos. Tanto no cenário 1, quanto no cenário 2, a diferença de nível ficou abaixo dos 2 cm, sendo em sua grande maioria tendendo a zero. Estes valores podem ser interpretados como inexpressivos, não alterando de forma relevante o nível da região e trazendo nenhum impacto para a gestão de riscos de inundações do município.

Na avaliação da diferença de cota de água ao longo do tempo, pode-se notar que, a montante do aterro (Figura 9a), o ponto 1 não sofre interferência significante pelos cenários de reabertura do canal. Já no ponto 2, conforme apresentado pela

Figura 9b, o único cenário que teve mudanças significativas comparado ao ponto 1 foi o 0 (não reabertura). Esse comportamento se deve aos cenários 1 e 2 terem corte de terreno pela remoção do aterro, enquanto o cenário 0 ainda mantém o terreno original com acúmulo de sedimentos no fundo. Sendo assim, somente ondas de maior energia produzem mudança no sistema do cenário 0, ondas de menor nível e energia não representam comportamento oscilatório, levando apenas ao espalhamento da água que chega neste ponto.

Figura 9- Gráficos do nível ao longo do tempo nos pontos 1 (a) e 2 (b).

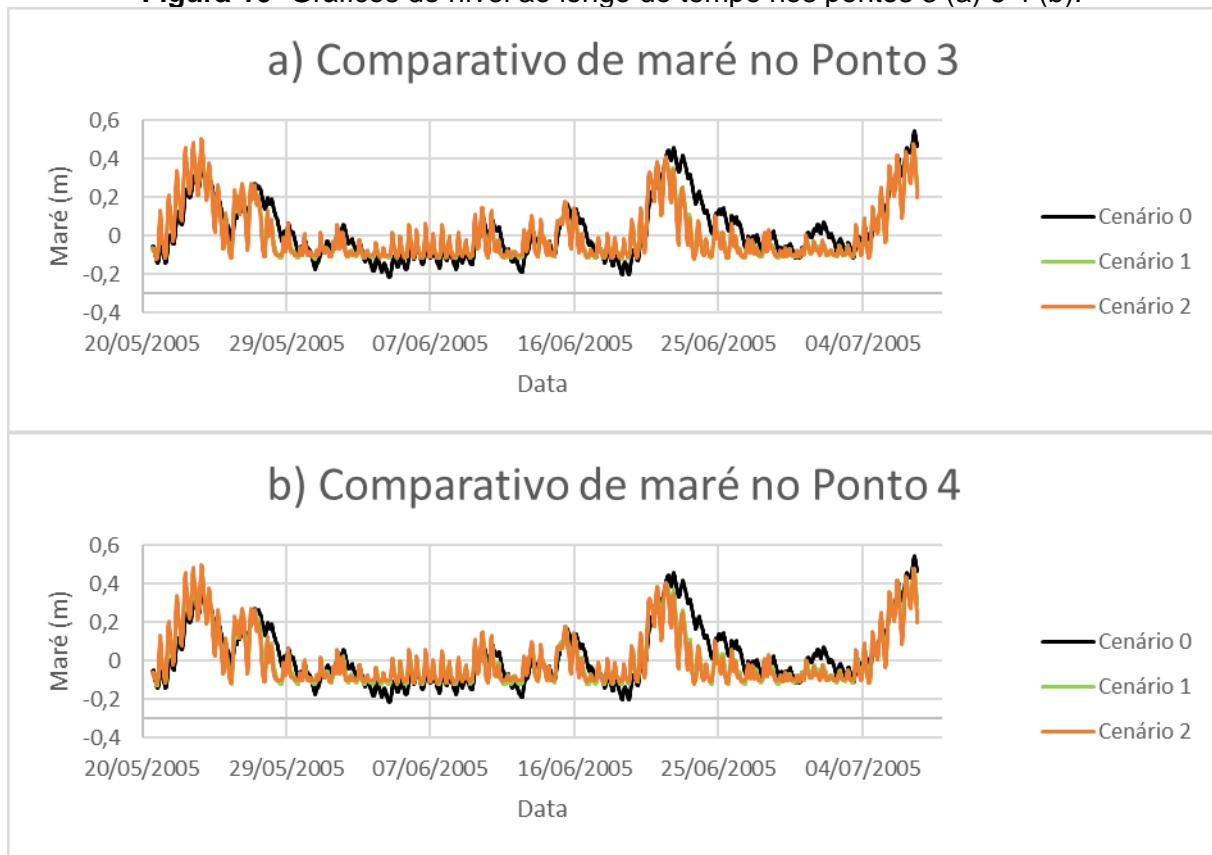


Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

A análise dos pontos a jusante do aterro (Figura 10) explicitaram a mudança do comportamento hidrodinâmico do canal por conta da reabertura. O cenário 0 apresentou deslocamento e mudança de intensidade de eventos ao longo do tempo, o que implica que a reabertura do canal pode interferir no regime hidrodinâmico de toda área. Os pontos 3 e 4 apresentaram comportamentos muito próximos, mesmo no cenário 1 onde apenas o ramo sul estava aberto, o que ressalta a interdependência no nível entre eles. A interdependência pode ser explicada pela proximidade dos pontos 3 e 4 da confluência dos ramos. A condição de saída forçada pela maré tem influência majoritária sobre eles, implicando que, mesmo com a alteração da reabertura parcial, não possa ser observada mudança de cota de

água entre os pontos. A configuração morfológica dos ramos, sendo uma ramificação de curto comprimento e pouco afastamento, não possibilita a distribuição de vazão forçar alterações expressivas na cota de água.

Figura 10- Gráficos do nível ao longo do tempo nos pontos 3 (a) e 4 (b).

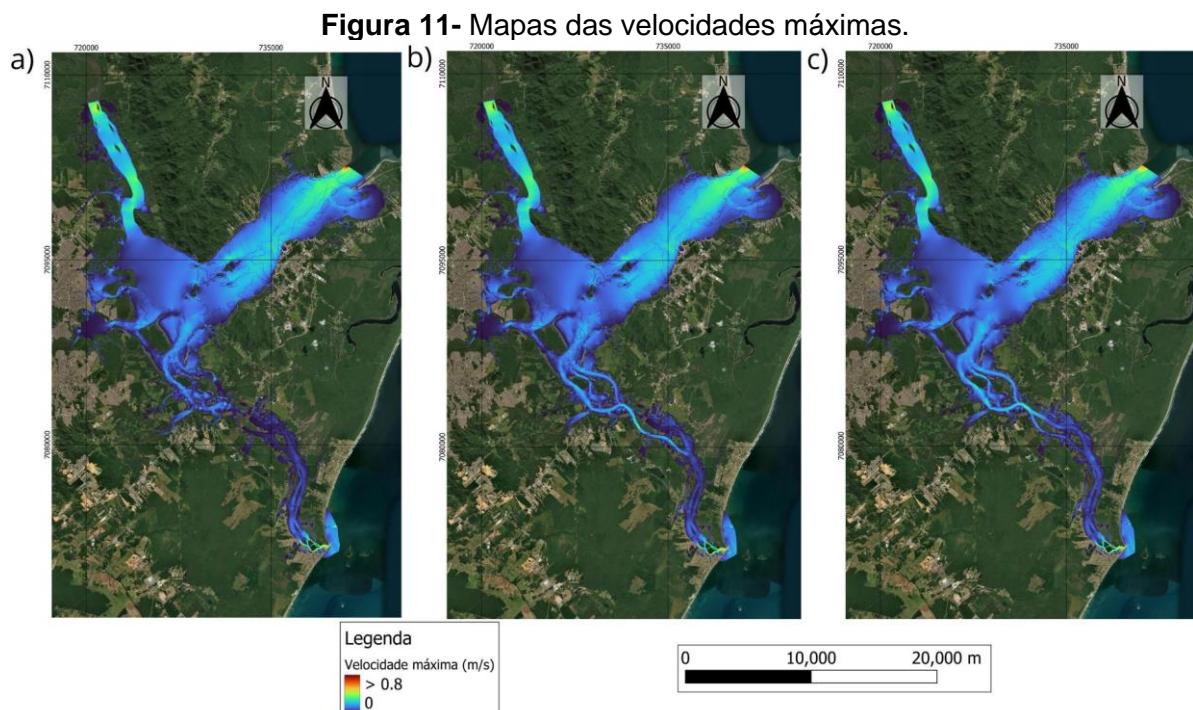


Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Velocidade

Através da análise de mapas de velocidade máxima do escoamento nos cenários, foi possível analisar os efeitos da reabertura no fluxo da baía (Figura 10). Comparando os cenários, é evidente o aumento da velocidade no Canal do Linguado e da Baía da Babitonga na região próxima do aterro quando ocorre a reabertura. Isso se deve a reabertura permitir uma maior troca de águas entre o canal e a baía, como ocorria antes de seu fechamento. No cenário 1, nota-se uma maior extensão deste aumento de velocidade no canal para jusante do aterro. O cenário 2 apresentou valores maiores próximos ao aterro, porém com menor área de influência no canal, se comparado ao cenário 1. Isso se deve a bifurcação gerada pela Ilha do Linguado, que no cenário de abertura total força o fluxo a se dividir e depois confluir novamente, o que gera maiores picos de velocidade a montante do aterro, mas também reduz a velocidade do escoamento por conta da energia perdida na confluência a jusante do aterro. O cenário 1 por apresentar uma abertura

parcial mantém a influência da abertura no fluxo até mais a jusante pelo fluxo ter apenas um caminho a seguir, mantendo a energia por mais tempo.

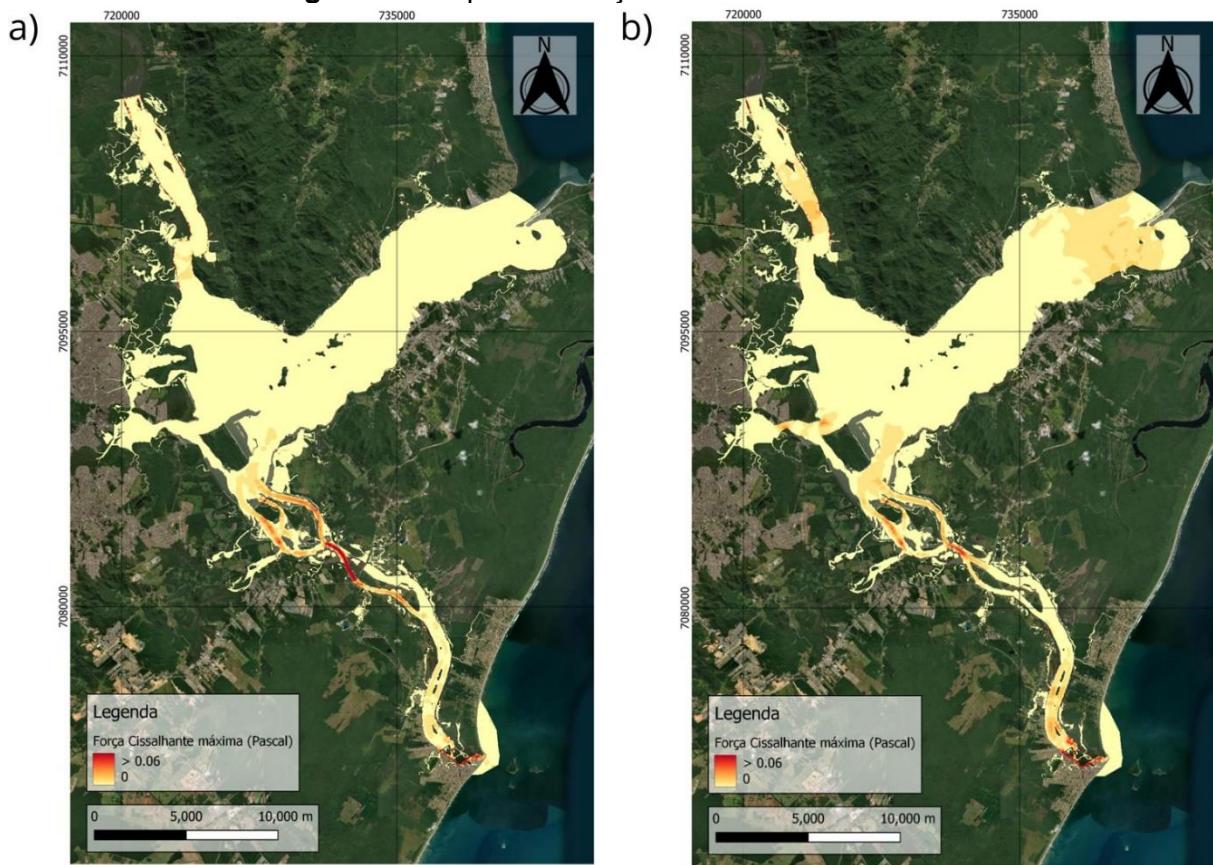


Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

A partir destes resultados de velocidade é possível prever que ocorrerá mudanças morfológicas no entorno do aterro para além das estipuladas para a construção dos cenários. Por conta do cenário 0 apresentar velocidades baixas nessa região, tem-se a presença de uma alta taxa de sedimentação. Com a reabertura e o aumento da troca hídrica entre Baía da Babitonga e Canal do Linguado, espera-se que o material sedimentado que é atualmente catalogado como lodo, entre em suspensão e seja depositado em outras regiões que apresentem condições mais favoráveis a deposição no canal ou encaminhado para o oceano.

Força cisalhante

Em complemento a velocidade máxima, foram analisadas as forças cisalhantes máximas atuantes nos cenários de reabertura. Assim, como na variação máxima de nível, foram desenvolvidos mapas de diferença da força cisalhante máxima entre o cenário 0 (não reabertura) e os cenários de reabertura (Figura 12). Como observado pela análise das velocidades máximas, a estabilidade do leito do canal nas regiões do aterro pode ser comprometida pela reabertura.

Figura 12- Mapas das forças cisalhantes máximas.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Nota-se que, como esperado a partir da análise de velocidades, a região do aterro apresentou picos de força cisalhante, evidenciando que a depender dos sedimentos depositados no local, poderá ocorrer intenso transporte deles, e novos sedimentos terão dificuldades de sedimentarem nesta região. No cenário 1, nota-se notar forças de menores magnitudes se comparadas ao cenário 2, porém com um caminho bem definido que se estende a jusante do aterro. O cenário 2 apresentou forças maiores, principalmente a montante e logo após o aterro, demonstrando uma maior capacidade de remoção de sedimentos da área com registros de deposição de lodo. Entretanto, essa remoção promovida pela reabertura total não se prolonga pelo Canal do Linguado, parando logo a jusante do aterro, sendo provável a deposição desse lodo ao longo do canal em direção a Balneário Barra do Sul.

Pode-se observar que no cenário 2 desenvolveu-se zonas de aumento de força cisalhante no Canal do Palmital e próxima ao Porto de Itapoá, diferente do cenário 1 que não apresentou alteração nessas regiões. O aumento representa que a reabertura total irá forçar as regiões de entrada e saída de água da baía. Tratando-se de uma análise comparativa das forças cisalhantes máximas, é possível concluir que o cenário 2 trará eventos de maiores forças cisalhantes a baía, porém não é

possível avaliar se nos outros cenários estes picos não estariam amortecidos, apresentando o mesmo somatório geral e forças, porém e uma janela maior de tempo.

Apesar da esperada retirada de sedimentos do interior da Baía da Babitonga, e deposição deles no Canal do Linguado, a região mais urbanizada de Balneário Barra do Sul não sofrerá com sedimentação. Nos dois cenários é possível verificar um aumento nas forças cisalhantes na foz do Canal do Linguado, logo uma taxa maior de transporte do que deposição de sedimentos.

Devido a densa ocupação antrópica nos leitos do canal, obras de estabilização de leito foram feitas nas últimas décadas. Essas obras permitem que a população possa se estabelecer nas margens do canal, entretanto limita as transformações morfodinâmicas naturais. Em um projeto de reabertura do Canal do Linguado deve-se avaliar se as estruturas existentes seriam suficientes para as forças cisalhantes geradas pelo canal após a reabertura, visto que muitas dessas obras foram feitas de forma informal pelos moradores do município.

Considerações finais

O presente trabalho se propôs a criar um modelo de previsão hidrodinâmica, para analisar os impactos físicos dos efeitos de marés nos municípios que margeiam o Canal do Linguado que sua reabertura pode causar. Aplicando os dados obtidos no software HEC-RAS, foi efetuada a modelagem para previsão do comportamento hidrodinâmico da Baía da Babitonga e Canal do Linguado, em cenários de reabertura total e parcial do aterro que os separa. O modelo elaborado, apesar de conter simplificações, representou adequadamente a realidade, como comprovado na etapa de validação.

No âmbito das mudanças de níveis máximos, foi observado que a reabertura do Canal do Linguado traz redução, apesar de pequena, no nível geral da baía. A região mais afetada em todos os cenários foi a do entorno do aterro, a qual pode-se observar queda de nível de aproximadamente 5 cm ao longo do Canal do Linguado nas proximidades do centro urbano de Balneário Barra do Sul. Nas demais regiões da Baía da Babitonga, observou-se uma redução da cota máxima da água de menos de 2 cm. Estes resultados comprovam o baixo impacto no nível de água, principalmente nas áreas mais afastadas do aterro, gerado pela reabertura do canal, não podendo ser considerado como solução para a gestão de riscos de inundações. O comportamento de redução de cotas da baía e do canal pode ser explicado pela

alteração do regime hidrodinâmico, pois altera-se do sistema atual praticamente hidrostático para um sistema de troca hídrica entre o interior da baía e o canal.

Através dos resultados de velocidades e forças cisalhantes máximas, foi possível observar um potencial relevante de alteração morfológica na região. Em ambos os cenários foi observado que na região do aterro, a reabertura causará forças atuando no leito do canal, gerando um potencial maior de transporte de sedimentos. Essas diferenças entre cenários evidenciam a necessidade de estudo de transporte de sedimentos para a reabertura, sendo importante a avaliação dos impactos ambientais da retirada destes sedimentos da região do aterro e deposição em outro local. Outro ponto importante a salientar é a necessidade de uma modelagem que levem em conta a potencial transformação morfológica apresentada pelos resultados de forças cisalhantes.

Outra região impactada seria a foz do Canal do Linguado que registrou aumento de forças cisalhantes atuando no seu leito, o que implica na necessidade de revisão das estruturas de estabilização de leito antes da efetivação da reabertura. Atualmente, moradores ribeirinhos do município já sofrem com os períodos de maré intensa, como as ressacas, sendo comum danos às estruturas de beira de rio, porém com a reabertura, existe possibilidade destas estruturas atuais não comportarem a força das marés, sendo necessário medidas compensatórias por parte do município para tais eventos.

O presente trabalho traz resultados importantes, mas ele cumpre apenas uma parcela dos estudos que devem ser executados para avaliação de impactos que a reabertura do Canal do Linguado pode trazer ao ecossistema da região. Os resultados deste estudo podem nortear outras análises a serem executadas, como a sedimentológica.

REFERÊNCIAS

- ALONCIO, M. **O Preço do Progresso: Canal do Linguado**. Brasil: LabD12, 2024.
- COSTA, N. C. D. de B.; VENÂNCIO, S. de S.; SILVA PINHO, J. L. da; PEREIRA VIEIRA, J. M. Análise hidrodinâmica do estuário do rio Lima, Portugal, a partir de simulação numérica. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 3, p. 476, 2 maio 2017.
- CREMER, M. J. O ESTUÁRIO DA BAÍA DA BABITONGA. In: CREMER, M. J.; MORALES, P. R. D.; OLIVEIRA, T. M. N. (orgs.). **Diagnóstico ambiental da Baía da Babitonga**. Joinville: Editora Univille, 2006. p. 15–19.

CRISTOFOLINI, L.; FOGLIATTO, M. M.; MOREIRA, M. E. ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL DO FECHAMENTO DO CANAL DO LINGUADO/SC. **Revista Geográfica de América Central**, v. 2, p. 1–8, 2011.

DUC, L.; SAWADA, Y. A signal-processing-based interpretation of the Nash–Sutcliffe efficiency. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 27, n. 9, p. 1827–1839, 9 maio 2023.

HOITINK, A. J. F.; JAY, D. A. Tidal river dynamics: Implications for deltas. **Reviews of geophysics (Washington, D.C.: 1985)**, v. 54, n. 1, p. 240–272, mar. 2016.

KOEHNTOPP, P. I.; MELLO, Y. R. de; MAGNA, D. J.; SIMM, M.; BALDO, W.; VIEIRA, C. V. Caracterização climatológica na Baía Babitonga - parâmetros climáticos e meteorológicos - pluviosidade, temperatura e ventos. **Revista CEPSUL - Biodiversidade e Conservação Marinha**, v. 10, p. eb2021002, 31 maio 2021. . Acesso em: 16 set. 2024.

LIU, Y.; YANG, S.-Q.; JIANG, C.; SIVAKUMAR, M.; ENEVER, K.; LONG, Y.; DENG, B.; KHALIL, U.; YIN, L. Flood mitigation using an innovative flood control scheme in a large lake: Dongting Lake, China. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 9, n. 12, p. 2465, 17 jun. 2019.

MAZZER, A. M.; GONÇALVES, M. L. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS DA BAÍA DA BABITONGA, SANTA CATARINA , BRASIL: CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 1 fev. 2012. DOI 10.20502/rbg.v12i0.264. Disponível em: <https://www.rbggeomorfologia.org.br/rbg/article/view/264>.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50(3), p. 885–900, 2007. . Acesso em: 21 fev. 2024.

OLIVEIRA; T., M. N.; TURECK, C. R.; BASSFELD, J. C.; TORRENS, B. M. O.; FARIA, J. M.; BRASIL, K. INTEGRIDADE AMBIENTAL DA BAÍA DA BABITONGA : CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS, MICROBIOLÓGICAS E ECOTOXICIDADE. In: CREMER, M. J.; MORALES, P. R. D.; OLIVEIRA, T. M. N. (orgs.). **Diagnóstico ambiental da Baía da Babitonga**. Joinville: Editora Univille, 2006. p. 20–80.

SILVA, L. F. **Alterações morfodinâmicas no Canal do Linguado pela remoção do dique que o separa da Baía da Babitonga (SC)**. 2011. PhD – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 9, p. 4815–4842, 18 set. 2018.

TRUCCOLO, E. C.; SCHETTINI, C. A. F. **MARÉS ASTRONÔMICAS NA BAÍA DA BABITONGA, SC**. [S. l.]: FACIMAR, 1999.

USACE, U. S. A. C. E. **HEC-RAS: River Analysis System User's Manual**. Davis: US Army Corps of Engineers -Hydrologic Engineering Center, 2021.

VIEIRA, C. V.; FILHO, N. O. H.; VAN DER HAAGEN CUSTÓDIO BONETTI, C.; BONETTI, J. CARACTERIZAÇÃO MORFOSEDIMENTAR E SETORIZAÇÃO DO COMPLEXO ESTUARINO DA BAÍA DA BABITONGA/SC. **Boletim da Sociedade Paranaense de Matematica. 3rd Serie**, v. 62–63, p. 85–105, 2008.

YALIN, M. S. **Mechanics of sediment transport**. 2. ed. Oxford: Pergamon Press, 1977.

NOTAS DE AUTOR

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

João Luiz da Rocha Borin – Concepção; Coleta de dados; Análise de dados; Desenvolvimento da metodologia; Aplicação da Metodologia; Obtenção de resultados; Elaboração do manuscrito; Participação ativa da discussão dos resultados; Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

Leonardo Romero Monteiro – Concepção; Desenvolvimento da metodologia; Participação ativa da discussão dos resultados; Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

FINANCIAMENTO

Não se aplica.

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica.

APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica.

CONFLITO DE INTERESSES

Não se aplica.

LICENÇA DE USO

Este artigo está licenciado sob a [Licença Creative Commons CC-BY](#). Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, desde que atribua a autoria da obra.

HISTÓRICO

Recebido em: 05-04-2024

Aprovado em: 29-01-2025