

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA
CURSO DE OCEANOGRAFIA

Bruna Alves

MODELAGEM E REFINAMENTO HIDRODINÂMICO DA BAÍA DE FLORIANÓPOLIS

Florianópolis

2020

BRUNA ALVES

MODELAGEM E REFINAMENTO HIDRODINÂMICO DA BAÍA DE FLORIANÓPOLIS

Monografia apresentada ao curso de Bacharelado em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Mendonça Pimenta.

Coorientador: Dr. Luis Hamilton Pospissil Garbossa.

Florianópolis
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Alves, Bruna
MODELAGEM E REFINAMENTO HIDRODINÂMICO DA BAÍA DE
FLORIANÓPOLIS / Bruna Alves ; orientador, FELIPE MENDONÇA
PIMENTA, coorientador, LUIS HAMILTON POSPISSIL GARBOSSA,
2020.
54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia,
Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Hidrodinâmica Costeira. 3. Era5. 4.
Copernicus. 5. Baía de Florianópolis. I. MENDONÇA PIMENTA,
FELIPE . II. HAMILTON POSPISSIL GARBOSSA, LUIS. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Oceanografia. IV. Título.

BRUNA ALVES

**MODELAGEM E REFINAMENTO HIDRODINÂMICO DA BAÍA DE
FLORIANÓPOLIS**

Monografia apresentada ao curso de Bacharelado em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Florianópolis, 17 de dezembro de 2020.

Prof. Felipe Mendonça Pimenta, Dr.
Coordenador do Curso e Orientador

Luis Hamilton Pospissil Garbossa, Dr.
Coorientador
Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Felipe Mendonça Pimenta, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antonio Fernando Härter Fetter Filho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Anthea Carla Czizewski, MSc.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha avó,

Fulmira Saraiva Alves

(Em memória).

“Quando vejo o mar, vejo você.
Assim como naquele dia eu vi o mar em seus olhos,
Um azul maravilhoso e cheios de lágrimas.
Você me disse que alguns dos seus maiores sonhos eram
Conhecer o fundo do mar e entender os movimentos do oceano”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e por me dar coragem e ousadia para enfrentar os desafios ao longo do caminho.

Minha mãe, Yan e Yze (filhotes da titia), os amores da minha vida, razões do meu viver.

Wendy, minha prima e melhor amiga.

Agradeço a Edy, Marci e Pri, pela família que formamos quando moramos juntas na casa do estudante.

Carol, Jaque, Lucas... Serei sempre grata por nossa amizade.

Ao psiquiatra Kayo Gheno por sua parceria nesses anos. Agradeço imensamente pelo maravilhoso trabalho, pelas terapias e por tantos ensinamentos.

Ao professor Felipe Pimenta, pela orientação, pela compreensão, por todo o apoio e paciência ao longo da elaboração do projeto, e por não desistir de mim frente as minhas dificuldades.

Agradeço ao Luis Garbossa pela coorientação.

Ao EPAGRI/CIRAM pela disponibilização dos dados ambientais de nível do mar e correntes e batimetria e ao SMC-Brasil pela base de dados batimétricos, ambos fundamentais a condução deste trabalho.

Minha banca avaliadora, Antônio Fetter e Anthea Czizeweski.

Agradeço ao Programa de Assistência Estudantil da UFSC, pois sem os auxílios (moradia estudantil, bolsa e isenção do restaurante universitário) teria sido muito mais difícil.

Agradeço ao Projeto ROAD-BESM (*Regional Oceanic and Atmospheric Downscaling*) financiado pela CAPES (88887.145393/2017-00), do qual essa pesquisa faz parte.

Agradeço, por fim, a mim. Pois, por mais que a vontade de desistir fosse grande, continuei tentando.

“Explicar toda a natureza é uma tarefa difícil demais para qualquer homem ou para qualquer época. É muito melhor fazer um pouco e com certeza deixar o resto para outros que vêm depois de você.”

(Isaac Newton)

RESUMO

Modelos matemáticos têm sido amplamente utilizados para o estudo da circulação de sistemas costeiros, com aplicações em estudos de qualidade de água, transporte de sedimentos e previsão de alagamentos. Neste trabalho o modelo hidrodinâmico Delft3D foi implementado na sua configuração verticalmente integrada para as baías de Florianópolis. Uma grade curvilínea de 232 x 1450 pontos, profundidades entre 1 e 28 metros e resolução espacial entre 32 e 69 m foi utilizada. O modelo foi forçado por dados de nível do mar e ventos para comparação com dados de um ADCP e duas estações maregráficas do interior das baías. A comparação dos resultados com a simulação B1, forçada somente com nível astronômico, obteve uma correlação $R=0,92$ para o nível astronômico e $R=0,78$ para as correntes de maré. A simulação B2, forçada com nível do mar observado, resultou em $R=0,94$ e $R=0,54$ na correlação para o nível e corrente observados, respectivamente. Para a simulação B3, forçada com nível do mar observado e ventos, o coeficiente de correlação foi $R=0,92$ para o nível e $0,72$ para as correntes observadas. Após as simulações, o Delft3D foi utilizado para o refinamento hidrodinâmico simplificado da Baía de Florianópolis, a partir da reanálise oceânica *Copernicus* (resolução: 9 km) e reanálise atmosférica ERA5 (31 km). O método empregado sugere que o refinamento hidrodinâmico de corpos hídricos com estreitas comunicações com o oceano possa ser empregado a partir de poucos pontos de grade, dispensando o uso de grades intermediárias na plataforma continental para acoplamento com o modelo global. O refinamento hidrodinâmico simulado foi capaz de reproduzir um evento de sobrelevação do nível do mar ocorrido em 28 de Outubro de 2016, que causou transtornos na Ilha de Florianópolis com o alagamento da rodovia SC-405 na baía Sul.

Palavras-chave: Hidrodinâmica costeira. Modelagem numérica. Refinamento hidrodinâmico. Delft3D. Baía de Florianópolis. Reanálise. ERA5. *Copernicus*.

ABSTRACT

Mathematical models have been widely used to study the circulation of coastal systems, with applications in studies of water quality, sediment transport and flood forecasting. In this work, the Delft3D hydrodynamic model was implemented in its vertically integrated configuration for the Florianópolis bays. A curvilinear grid of 232 x 1450 points, depths between 1 and 28 meters and spatial resolution between 32 and 69 m was used. The model was forced by sea level and wind data for comparison with data from an ADCP and two tide stations inside the bays. The comparison of results with a B1 simulation, forced only with an astronomical level, obtained a correlation $R = 0.92$ for the astronomical level and $R = 0.78$ for tidal currents. Simulation B2, forced to the observed level, resulted in $R = 0.94$ and $R = 0.54$ in the correlation for the observed level and current, respectively. For simulation B3, forced with observed level and winds, the correlation coefficient was $R = 0.92$ for the level and 0.72 for the observed currents. After these simulations, the Delft3D was used for a simplified hydrodynamic downscaling, using the oceanic Copernicus reanalysis (resolution: 9 km) and the atmospheric reanalysis ERA5 (31 km). The method employed suggests that the hydrodynamic refinement of water bodies with small communications with the ocean can be performed with few grid points, thus dispensing the use of intermediate grids over the continental shelf for coupling with the global model. The simulated hydrodynamic refinement was able to reproduce an event of sea level rise that occurred on October 28, 2016, which caused disturbances on the Island of Florianópolis with the flooding of the SC-405 highway in the South bay.

Keywords: Coastal hydrodynamics. Numerical modeling. Hydrodynamic downscaling. Delft3D. Florianópolis Bay. Reanalysis. ERA5. Copernicus.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Alagamento na rodovia SC-405 no sul da Ilha de Florianópolis em 28 de Outubro de 2016, devido a sobrelevação maré..... 17
- Figura 2 - Área de estudo ilustrando a localização das Baías Norte e Sul entre o continente e a Ilha de Florianópolis. A localização dos marégrafos da EPAGRI está indicada pelos pontos T1 e T2 em vermelho. Os marégrafos citados em Prudêncio (2003) estão indicados pelos pontos C1 (Iate Clube) e C2 (Enseada do Brito) na cor amarela. O ADCP da EPAGRI está indicado pelo ponto A (Estreito) na cor verde. 19
- Figura 3 - Série temporal corrigida de nível do mar referente aos marégrafos instalados ao sul e ao norte da Ilha de Santa Catarina. 21
- Figura 4 - Dados batimétricos aplicados na modelagem. A) Dados do SMC-Brasil e B) Dados da EPAGRI. 22
- Figura 5 - Séries temporais de velocidade das componentes u e v observadas do ADCP fundeado no estreito. A linha preta representa a componente v e a linha azul representa a componente u. 23
- Figura 6 - Série temporal da velocidade do vento registrada na estação meteorológica do INMET. A linha preta representa a componente v e a linha azul representa a componente u. 24
- Figura 7 - Campos de vento e nível do mar derivados respectivamente dos produtos de reanálise atmosférica e oceânica. A) Campo de ventos em superfície derivado do ERA5, destacando os pontos de grid continental (onshore) e oceânico (offshore) selecionados para forçar o modelo hidrodinâmico. B) Campo de nível médio do mar derivado do produto Copernicus. Os pontos em verde ilustram os pontos de grid utilizados para o refinamento do modelo hidrodinâmico. Contornos indicam elevação da superfície em metros com incremento de 0,02 m. 25
- Figura 8- Comparação entre o conjunto de dados de reanálise ERA5 (linha vermelha) e dados da estação meteorológica do INMET (linha azul). Painel superior: pressão atmosférica. Painel intermediário: componente U da velocidade do vento. Painel inferior: componente V da velocidade do vento. 26
- Figura 9 - Série temporal das componentes U e V da velocidade do vento da reanálise global ERA5 nos pontos offshore (primeiro painel) e onshore (segundo painel). 27
- Figura 10 - Série temporal do nível médio da reanálise oceânica do Copernicus nas entradas das baías. A linha preta representa o nível ao sul e a linha vermelha o nível ao norte, ambas demonstrando um pico no dia 28 de outubro. 28
- Figura 11 - Correlação entre o nível residual do marégrafo e o nível médio do Copernicus. A reta cinza representa a correlação ideal entre as variáveis e os pontos azuis representam a correlação obtida..... 28

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 12 - Grades computacionais G1, G2 e G3 construídas com o módulo RGFGRID. A parte em azul representa as linhas da grade e as vermelhas são as splines, que definem a forma da grade numérica. | 32 |
| Figura 13 - Grade numérica G2 utilizada nas simulações numéricas..... | 33 |
| Figura 14 - Exemplo da interpolação e suavidade da batimetria para a região da desembocadura sul da Baía. A) Somente interpolação da grade batimétrica; B) Interpolação batimétrica com suavização máxima (smoothing factor = 1,0); C) Suavização com valor de 0,25; D) Suavização com valor de 0,025. | 34 |
| Figura 15 - Resultados da simulação B1, forçada somente por nível mar astronômico. Painel superior: séries temporais de nível em T1, T2 e ADCP. Painel intermediário: Nível do mar modelado e observado no local do ADCP. Painel inferior: Componente N-S das correntes médias na coluna d'água comparadas com dados observados (hora local). | 40 |
| Figura 16 - Resultados da simulação B2, forçada por nível observado (hora local) de T1 e T2. Painel superior: Série temporal do nível em T1, T2 e ADCP. Painel intermediário: comparação do nível do mar observado e modelado no local do ADCP. Painel inferior: componente N-S das correntes modeladas comparadas com dados observados. | 42 |
| Figura 17 – Representação dos resultados da simulação B3. Primeiro painel: Série temporal da componente N-S dos ventos offshore implementada do modelo (linha azul). Segundo painel: Nível do mar observado (hora local) em T1, T2 e ADCP. Terceiro painel: Nível de B3 comparadas com dados observados do ADCP. Quarto painel: Comparação das componente N-S das correntes observadas e modeladas no local do ADCP..... | 44 |
| Figura 18 - Ilustração do efeito da soma do nível Copernicus (primeiro painel) com a previsão do nível astronômico (segundo painel). Destacando a elevação do dia 28 de outubro (hora local). O terceiro painel representa o nível sintético implementado na simulação B4..... | 46 |
| Figura 19 - Mapas do nível médio do mar ilustrando a evolução da onda de plataforma a partir dos dados Copernicus (GLOBAL-ANALYSIS-FORECAST-PHY-001-024). | 47 |
| Figura 20 - Campos de nível e corrente da maré na Baía de Florianópolis (hora local). A) Enchente às 13:00 horas. B) Enchente às 13:30, ilustrando o empilhamento de água na região central da Baía. C) Nível máximo da maré às 14:00 horas e início da vazante. D) Momento de vazante. | 48 |
| Figura 21 – Séries temporais (hora local) da componente N-S dos ventos implementadas no modelo (painel superior) e dos resultados da simulação B4 para um ponto na Enseada do Saco Limões. Painel intermediário: Nível do mar. Painel inferior: Componente N-S das correntes. | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Características dos conjuntos de reanálises globais ERA5 e Copernicus utilizados no estudo..... | 24 |
| Tabela 2 - Resolução (máxima e mínima), ortogonalidade (máxima e mínima) e porcentagem de pontos secos para cada grade. | 32 |
| Tabela 3 - Forçantes inseridas no modelo para as diferentes simulações B1, B2, B3 e B4. | 35 |
| Tabela 4 - Comparação das componentes harmônicas do nível do mar astronômico para o ponto do Iate Clube, indicado pelo símbolo C1 na Figura 2. As componentes listadas no estudo de Prudêncio (2003) e aquelas obtidas pela análise harmônica das simulações B1 e B2 estão indicadas em termos de amplitude e fase. | 38 |
| Tabela 5 - Comparação das componentes harmônicas do nível do mar astronômico para o ponto da Enseada do Brito, indicado pelo símbolo C2 na Figura 2. As componentes listadas no estudo de Prudêncio (2003) e aquelas obtidas pela análise harmônica das simulações B1 e B2 estão indicadas em termos de amplitude e fase. | 38 |
| Tabela 6 - Comparação das componentes harmônicas do nível do mar astronômico para o ponto de fundeio do ADCP, indicado pelo símbolo A na Figura 2. As componentes obtidas pela análise harmônica das séries de nível do mar do ADCP e das simulações B1 e B2 estão indicadas em termos de amplitude e fase. | 39 |
| Tabela 7 – Resultados das comparações estatísticas do nível do mar e correntes entre as simulações B1, B2 e B3 com os dados do ADCP | 45 |

SUMÁRIO

| | |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 OBJETIVOS | 18 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 18 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 18 |
| 3 ÁREA DE ESTUDO | 19 |
| 4 METODOLOGIA | 21 |
| 4.1 DADOS PARA A CALIBRAÇÃO DO MODELO | 21 |
| 4.1.1 Marés | 21 |
| 4.1.2 Batimetria | 22 |
| 4.1.3 ADCP | 23 |
| 4.1.4 Estação meteorológica INMET | 23 |
| 4.1.5 Produtos de Reanálise | 24 |
| 4.2 DELFT3D | 29 |
| 4.3 CONFIGURAÇÃO DO MODELO | 30 |
| 4.3.1 Grades Numéricas | 31 |
| 4.3.2 Interpolação e suavização da Batimetria | 33 |
| 4.3.3 Tempo Computacional | 34 |
| 4.4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS | 35 |
| 4.4.1 Cenários | 35 |
| 4.4.2 Coeficientes de arrasto e parâmetro de reflexão | 36 |
| 4.4.3 Comparação estatística | 36 |
| 5 RESULTADOS | 37 |
| 5.1 CONSTANTES HARMÔNICAS DO NÍVEL ASTRONÔMICO | 37 |
| 5.2 CORRENTES E NÍVEL - SIMULAÇÃO B1 | 39 |
| 5.3 CORRENTES E NÍVEL - SIMULAÇÃO B2 | 41 |
| 5.4 CORRENTES E NÍVEL - SIMULAÇÃO B3 | 42 |
| 5.5 CORRENTES E NÍVEL - SIMULAÇÃO B4 | 45 |
| 5.5.1 Prescrição das condições de contorno | 45 |
| 5.5.2 Resultados da simulação | 47 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 50 |
| REFERÊNCIAS | 52 |

1 INTRODUÇÃO

Modelos numéricos têm sido amplamente utilizados como ferramentas de auxílio ao entendimento e gestão de sistemas hídricos, seja na resolução de problemas de qualidade de água, transporte de sedimentos ou alagamento costeiro. A coleta de dados batimétricos para construção de grades numéricas, e o levantamento de dados de nível e corrente para ajustes do modelo, são partes essenciais do processo de modelagem computacional (MEHDI, 2005). Cada etapa de ajuste e avaliação do modelo deve ser conduzida para se obter uma configuração satisfatória para o estudo da circulação do ambiente costeiro.

Diversas pesquisas de modelagem numérica foram realizadas para a Baía de Florianópolis com o objetivo de compreender a dinâmica deste ambiente. Melo *et al.* (1997) realizou um estudo da dispersão de poluentes do Rio Cubatão. As simulações foram realizadas através de um modelo verticalmente integrado, forçado com vento e apenas com a componente M2 nas fronteiras abertas. O estudo sugeriu que as condições meteorológicas influenciam o transporte entre as baías e o oceano. Os autores descreveram a formação de uma onda estacionária devido à propagação das marés através da baía norte e sul, com a formação de um antinó na baía Sul.

Prudêncio (2003) implementou o modelo numérico POM (*Princeton Ocean Model*) a fim de caracterizar a circulação hidrodinâmica das baías. O autor utilizou dados observados de nível como forçantes nas extremidades das baías Norte e Sul. O modelo foi validado com as componentes astronômicas do nível do mar em três pontos do interior das baías. Os resultados mostraram-se adequados na representação básica da hidrodinâmica local, mas o autor sugeriu ajustes necessários na grade batimétrica, fricção com o fundo e na forçante do vento.

Garbossa *et al.* (2014) utilizou o modelo numérico MOHID verticalmente integrado com o objetivo de avaliar a qualidade de água e processos de transporte nas regiões de maricultura. O MOHID foi validado com dados observados de nível, velocidade e direção das correntes medidos por um ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), com resultados bastante satisfatórios.

Simonetti (2016) utilizou o ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) para estudar a circulação induzida pela maré astronômica. O trabalho demonstrou a necessidade de atualização dos dados de batimetria na região do estreito e entrada da baía Sul.

Czizewski (2016), utilizou o *Delft3D* para simular a circulação nos arredores da Ilha de Santa Catarina, incluindo as baías de Florianópolis. A validação do modelo foi realizada com

dados previstos de maré astronômica em três locais ao longo da costa. Mapas de fase e amplitude e elipses das constituintes M2, S2, O1 e K1 demonstraram a intensificação das marés no sentido norte, a intensificação das correntes nas baías e a presença de um antinó na baía Sul. O resultado da circulação gerada pelo vento sugeriu a necessidade de aprimoramento das condições de contorno para estudo da circulação.

Vieira *et al.* (2016) estudou o transporte de sedimentos na costa norte da Ilha de Santa Catarina com o *Delft3D*, incluindo a modelagem de ondas e correntes induzidas pelas marés astronômicas e ventos. Os autores verificaram que em condições bimodais as ondas de leste são as que afetam mais significativamente a região da Praia da Daniela na baía Norte, onde a maré intensifica bastante as correntes. O *Delft3D* foi forçado com dados de nível nas fronteiras norte e sul do domínio e pelas componentes astronômicas na fronteira oceânica. Os autores destacaram a limitação de dados obtidos *in situ* nesta região e a importância de modelos calibrados para a condução de estudos de maior abrangência espacial e temporal.

Silva *et al.* (2019) utilizou o MOHID para simular a dispersão e biodeposição de resíduos dos cultivos de moluscos bivalves nas baías da Ilha de Santa Catarina. O modelo foi forçado por dados de nível nas fronteiras norte e sul. Os cenários foram modelados para marés de quadratura e sizígia. A maré de sizígia resultou em correntes mais intensas e uma maior dispersão dos depósitos, comparada com a maré de quadratura. Houve também maior deposição em áreas abrigadas do que áreas expostas.

Pelo menos cinco dos estudos de modelagem acima mencionados realizaram a modelagem a partir de condições de contorno prescritas com dados de nível observado e ventos coletados por estações meteorológicas. As séries temporais observadas, entretanto, são esparsas e frequentemente descontínuas, o que dificulta a simulação de outras situações pretéritas. Seria assim desejável o desenvolvimento de métodos que permitam a reconstrução de cenários de circulação da Baía de Florianópolis para um maior intervalo de tempo.

Neste contexto, os modelos globais que assimilam dados de diversas fontes têm sido cada vez mais utilizados como fonte primária para a forçante de modelos regionais (RUIZ, 2020). As bases de dados geradas por estes modelos são denominadas “reanálises” e podem ser utilizadas para a reconstrução de condições ambientais pretéritas.

A reanálise atmosférica ERA5, por exemplo, é produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e refere-se a um modelo que assimila dados observados, produzindo informações de cobertura global de 1950 até o presente em alta resolução espacial (31 km) e temporal (horária) (HERSBACH *et al.*, 2020). O ERA5

disponibiliza dados de vento, temperatura, pressão, evaporação e precipitação, mais comumente necessários à modelagem oceânica (MUÑOZ, 2019).

Como reanálise oceânica, podemos citar o produto GLOBAL ANALYSIS FORECAST PHY-001-24 disponibilizado pelo *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS). Nele o modelo NEMO3.1 assimila dados de altimetria, temperatura da superfície do mar, dados hidrográficos e concentração de gelo marinho produzindo uma série histórica de alta resolução espacial e temporal (CHUNE *et al.*, 2011). A cobertura é global e a resolução $1/12^\circ$, com dados horários disponíveis a partir de abril de 2016.

De maneira geral, as informações destes modelos globais são assimiladas através do aninhamento de grades sucessivas de crescente resolução espacial, as quais procuram resolver o escoamento em escalas cada vez menores (COSTA 2019, RUIZ, 2020, SILVA *et al.*, 2019). No caso de modelos oceânicos com grades estruturadas, é frequente o uso de domínios sobre a plataforma continental, que repassam informações das grades globais para as grades locais, capazes de resolver a circulação dos corpos hídricos costeiros e regiões portuárias.

Este trabalho tem o objetivo de implementar o modelo hidrodinâmico *Delft3D* para o estudo da circulação das baías de Florianópolis, demonstrando também seu uso para o refinamento hidrodinâmico a partir de modelos de reanálise. Em uma primeira etapa o modelo será implementado para região através da construção de uma grade batimétrica curvilínea. O modelo será forçado por dados observados de nível do mar em suas fronteiras e pela tensão dos ventos em superfície. As informações de nível do mar serão derivadas de dois marégrafos instalados nas entradas das baías Norte e Sul, descritos no estudo de Garbossa *et al.* (2014). O modelo será avaliado com observações de corrente e nível do mar coletadas por um ADCP instalado na região central das baías (GARBOSSA *et al.*, 2014), além de constantes harmônicas de maré astronômica (PRUDÊNCIO, 2003).

Na última etapa, o modelo será adaptado para um refinamento hidrodinâmico (*hydrodynamic downscaling*) simplificado, a partir dos dados de reanálise oceânica e atmosférica globais. Dados de nível do mar da reanálise oceânica do *Copernicus* serão combinados com a maré astronômica para forçar as fronteiras de uma única grade batimétrica local. A reanálise atmosférica ERA 5 irá fornecer a tensão de vento para o modelo hidrodinâmico.

A implementação deste método possibilitará a reprodução de um evento de sobrelevação do nível do mar ocorrido em 28 de outubro de 2016, que causou diversos transtornos em Balneário Arroio do Silva, na rodovia SC 405 de Florianópolis e em Itajaí conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1- Alagamento na rodovia SC-405 no sul da Ilha de Florianópolis em 28 de Outubro de 2016, devido a sobrelevação maré.



Fonte: Santiago (2016).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Implementar um modelo hidrodinâmico verticalmente integrado para as baías de Florianópolis forçado por dados observados e produtos de reanálise oceânica e atmosférica.

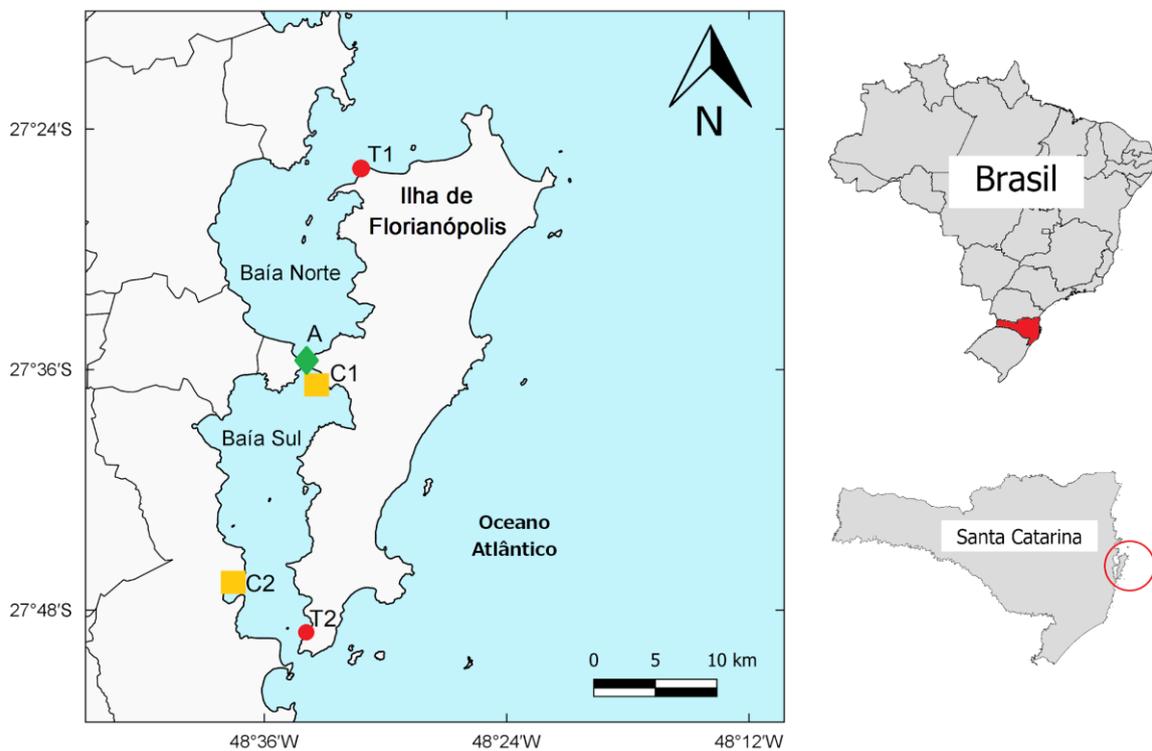
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar o modelo *Delft3D* para as baías de Florianópolis no seu modo verticalmente integrado e forçado por nível do mar e ventos;
- Comparar os resultados do modelo com informações de um ADCP e constantes harmônicas de maré;
- Comparar o produto de Reanálise Oceânica *Copernicus* com os dados de nível do mar da estação maregráfica do EPAGRI;
- Comparar o produto de Reanálise Atmosférica ERA5 com os dados de uma estação meteorológica do INMET;
- Implementar uma metodologia para reconstrução da circulação das Baías de Florianópolis a partir de produtos de reanálise.

3 ÁREA DE ESTUDO

A Baía de Florianópolis está localizada no litoral Central de Santa Catarina entre as latitudes $48^{\circ}33'57''$ O e $27^{\circ}35'46''$ S. Ela é subdividida em setores Norte e Sul, as quais estão conectadas na região central por um canal de aproximadamente 500 metros, denominado Estreito (Figura 2). Este corpo d'água costeiro é paralelo à linha de costa e comunica-se com o Oceano Atlântico através de duas passagens, uma ao sul com 1 km de largura a outra ao norte com 10 km de extensão.

Figura 2 - Área de estudo ilustrando a localização das Baías Norte e Sul entre o continente e a Ilha de Florianópolis. A localização dos marégrafos da EPAGRI está indicada pelos pontos T1 e T2 em vermelho. Os marégrafos citados em Prudêncio (2003) estão indicados pelos pontos C1 (Iate Clube) e C2 (Enseada do Brito) na cor amarela. O ADCP da EPAGRI está indicado pelo ponto A (Estreito) na cor verde.



Fonte: Autora (2020).

A Baía possui uma área total de 430 km^2 e seu comprimento longitudinal é de aproximadamente 50 km, com profundidades que chegam até 30 metros (PRUDÊNCIO, 2003). As bacias de drenagem dos rios Cubatão e Biguaçu são os maiores contribuintes de água doce para a Baía e os rios Ratonés, Tavares, Massiambu e Maruim também possuem descargas fluviais significativas (CAMPOS, 2011).

A circulação das baías é gerada principalmente através da transferência de momento pelo vento e pela variação do nível do mar em suas entradas. Os ventos predominantes na área de estudo são os de quadrante norte e os mais intensos são os de quadrante sul com velocidade média de 10 ms^{-1} (MARTINS *et al.*, 1997 *apud* FLORIPAMANHÃ, 2012). Segundo Dalbosco *et al.* (2020), o vento sul está associado à passagem de frentes frias na região.

A propagação da onda de maré (M2) ocorre de sul para norte na plataforma continental, com entrada pelas baías sul e norte. Devido a diferença de fase e sobreposição de ondas progressivas, uma onda estacionária é formada na baía Sul, com a presença de um antinó (MELO *et al.*, 1997). Por esta configuração, há convergência do escoamento e uma maior tendência de acúmulo de partículas nesta região. Melo (1997) destaca que o Rio Cubatão deságua na região de antinó da baía Sul, fazendo com que as substâncias que provêm do Rio se concentrem na região de convergência, dificultando seu transporte pela ação da maré.

4 METODOLOGIA

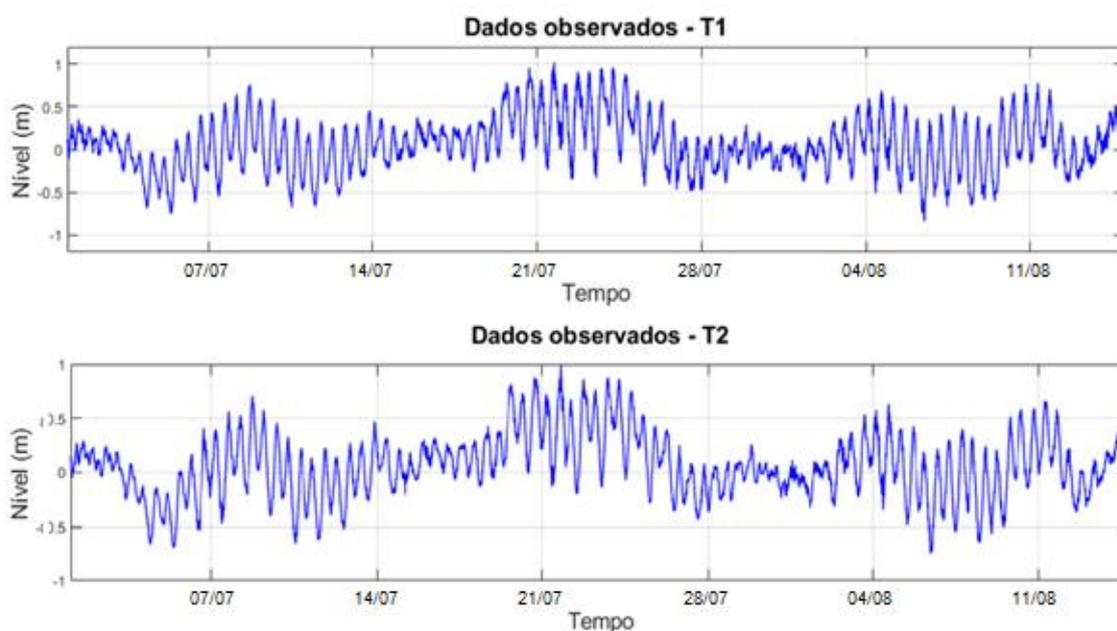
4.1 DADOS PARA A CALIBRAÇÃO DO MODELO

4.1.1 Marés

Nas simulações preliminares, as componentes harmônicas de maré foram implementadas para simular as oscilações de maré nos contornos abertos. Os dados aplicados na modelagem incluem registros de marés de duas estações maregráficas, uma ao norte (T1) e a outra ao sul (T2) da Baía de Florianópolis (Figura 1). Os dados foram disponibilizados pela EPAGRI/CIRAM (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina) e encontram-se descritos em Garbossa *et al.* (2014). Os dados observados pelos marégrafos possuem componentes astronômicas e não astronômicos do nível do mar. A componente astronômica dominante, M2 possui valores de amplitude e fase de 0,22 m e fase de 154° para a baía Norte e 0,17 m e 151° para a baía Sul. Já a componente S2 possui valores de amplitude e fase de 0,19 m e 150° para a baía Norte e 0,14 m e 146° para a baía Sul.

As séries temporais de nível observado selecionadas para simulações cobrem o período de 01 de julho de 2013 a 15 de agosto de 2013. As séries de nível médio do mar foram interpoladas para o intervalo de 15 minutos e filtradas com um filtro Lanczos passa-baixa com período de corte de 2 horas para remover ruídos de alta frequência (Figura 3).

Figura 3 - Série temporal corrigida de nível do mar referente aos marégrafos instalados ao sul e ao norte da Ilha de Santa Catarina.



Fonte: Autora (2020).

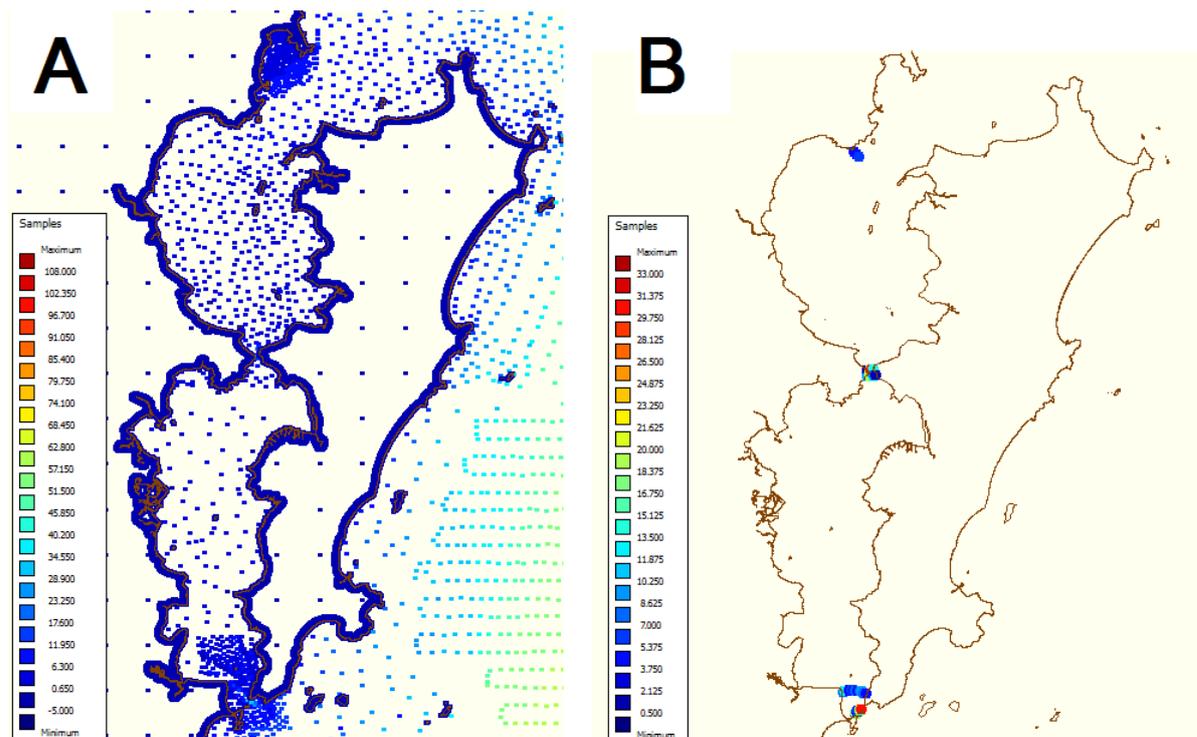
4.1.2 Batimetria

É comum ocorrer processos de erosão ou deposição de sedimentos em ambientes de alta hidrodinâmica, modificando a batimetria, tornando as cartas náuticas desatualizadas. A integração de dados pode ser um método alternativo para se gerar um mapa batimétrico mais atualizado (GAGG, 2016).

Parte dos dados de batimetria utilizados na modelagem foram disponibilizados pelo SMC-Brasil (Sistema de Modelagem Costeira para o Brasil), oriundos da digitalização de cartas náuticas (Figura 4A). Os dados complementares de batimetria foram disponibilizados pela EPAGRI/CIRAM, possuindo um total de 129 pontos, com levantamento feito no ano de 2012 para a região do Estreito, Baía Sul e próximo a Baía de São Miguel (Figura 4B).

Os dados da EPAGRI demonstram que houve um aprofundamento do canal na desembocadura sul da Baía, assim a atualização dos dados contribui para a elaboração de uma batimetria mais confiável.

Figura 4 - Dados batimétricos aplicados na modelagem. A) Dados do SMC-Brasil e B) Dados da EPAGRI.

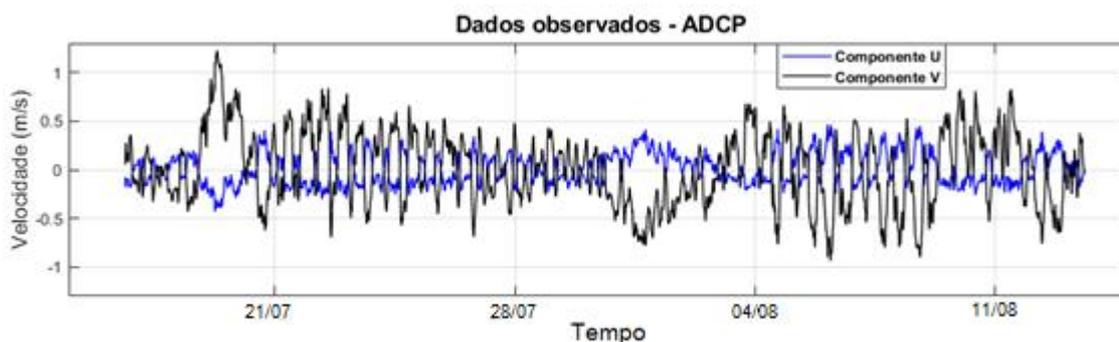


Fonte: Autora (2019).

4.1.3 ADCP

Dados de um *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)*, contendo séries temporais de velocidade e direção de correntes, foram utilizados para a validação do modelo. Os dados disponibilizados pela EPAGRI/CIRAM abrangem um período de 31 dias com início em 16 de Julho de 2013 até 13 de agosto de 2013 (Figura 5). O equipamento foi fundeado no Estreito na latitude -27.5976° e longitude -48.5631° em uma profundidade de 11,6 metros (Figura 2). O ADCP foi configurado para medir a cada 15 minutos, com 24 células de 69 centímetros e um *blanking* de 1 metro (do leito até o sensor do equipamento).

Figura 5 - Séries temporais de velocidade das componentes u e v observadas do ADCP fundeado no estreito. A linha preta representa a componente v e a linha azul representa a componente u.

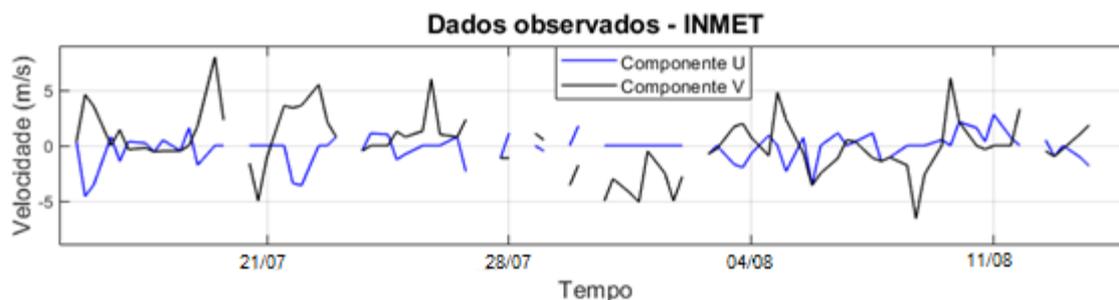


Fonte: Autora (2020).

4.1.4 Estação meteorológica INMET

Dados observacionais de uma estação meteorológica do INMET localizada em São José, próxima ao Estreito, foram obtidas com o intuito de aplicação na modelagem. As informações de direção, intensidade do vento e pressão atmosférica, são registrados três vezes ao dia com dados às 12:00, 18:00 e 00:00 horas (Figura 6).

Figura 6 - Série temporal da velocidade do vento registrada na estação meteorológica do INMET. A linha preta representa a componente v e a linha azul representa a componente u.



Fonte: Autora (2020).

A série de dados, entretanto, apresentou muitas discontinuidades e falhas, dificultando sua aplicação na modelagem hidrodinâmica. Um produto de reanálise atmosférica foi utilizado em substituição a estação meteorológica local.

4.1.5 Produtos de Reanálise

Dois produtos de reanálise são considerados neste trabalho. A reanálise atmosférica do ERA5 (ECMWF, 2020), com cobertura espacial de 1950 até o presente, com dados de vento horários em uma resolução de 31 km. Já a reanálise oceânica disponibiliza dados de 2016 até o presente, com dados de nível médio do mar horários em uma resolução de 9 km (Copernicus, 2020). As características básicas destes produtos encontram-se listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos conjuntos de reanálises globais ERA5 e Copernicus utilizados no estudo.

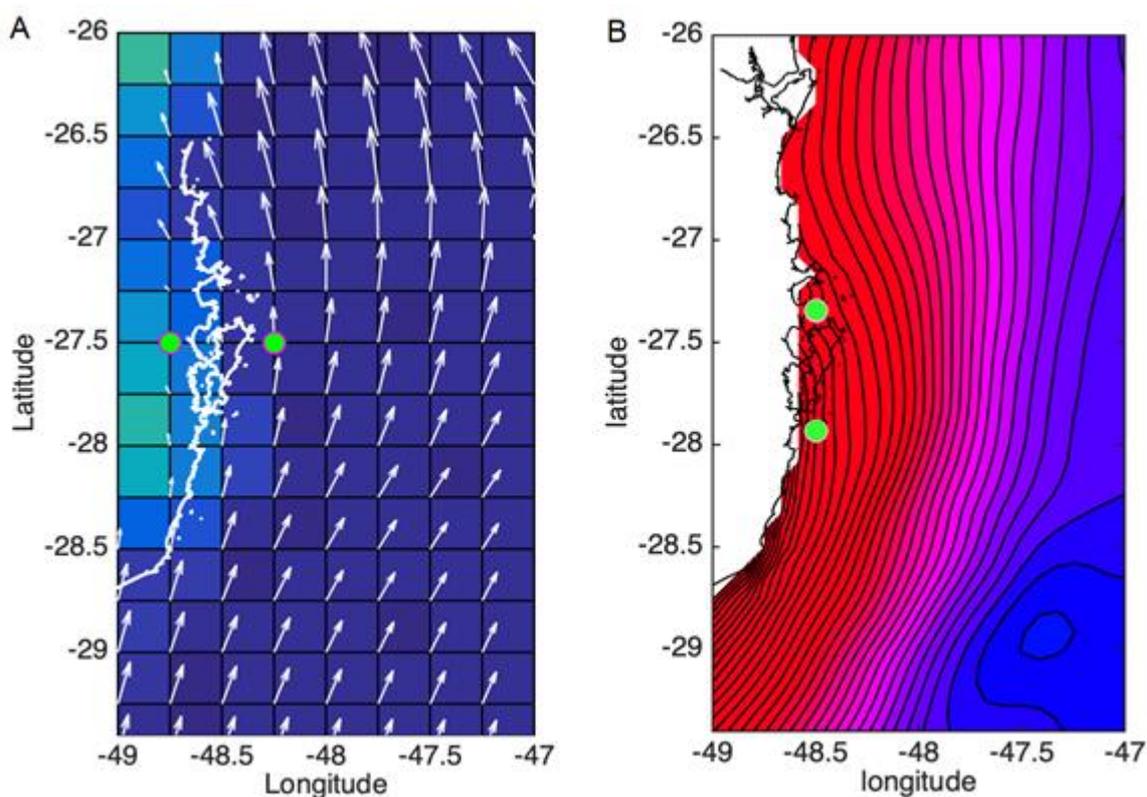
| Produto | Cobertura Temporal | Resolução Temporal | Cobertura Espacial | Resolução Espacial | Dados utilizados |
|--------------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| Reanálise Atmosférica ERA5 | 1950 até o tempo presente | 1 hora | Global | 31 km | Direção Intensidade do vento |
| Reanálise Oceânica Copernicus | 2016 até o presente | 1 hora | Global | ~9 km (1/12°) | Nível médio do mar |

Fonte: Autora (2020).

4.1.4.1 Reanálise atmosférica do ERA5

Para implementar a tensão de cisalhamento do vento na superfície livre, foi utilizada a série temporal de dados de reanálise ERA5-Land do ECMWF (Tabela 1). Foram selecionados dois pontos para análise, um ponto continental (*onshore*) e um ponto oceânico (*offshore*) a poucos quilômetros da costa da Ilha de Santa Catarina, para uma altura de 10 metros. A Figura 7 destaca os pontos da grade utilizados para extração de dados de velocidade e direção dos ventos.

Figura 7 - Campos de vento e nível do mar derivados respectivamente dos produtos de reanálise atmosférica e oceânica. A) Campo de ventos em superfície derivado do ERA5, destacando os pontos de grid continental (*onshore*) e oceânico (*offshore*) selecionados para forçar o modelo hidrodinâmico. B) Campo de nível médio do mar derivado do produto *Copernicus*. Os pontos em verde ilustram os pontos de grid utilizados para o refinamento do modelo hidrodinâmico. Contornos indicam elevação da superfície em metros com incremento de 0,02 m.

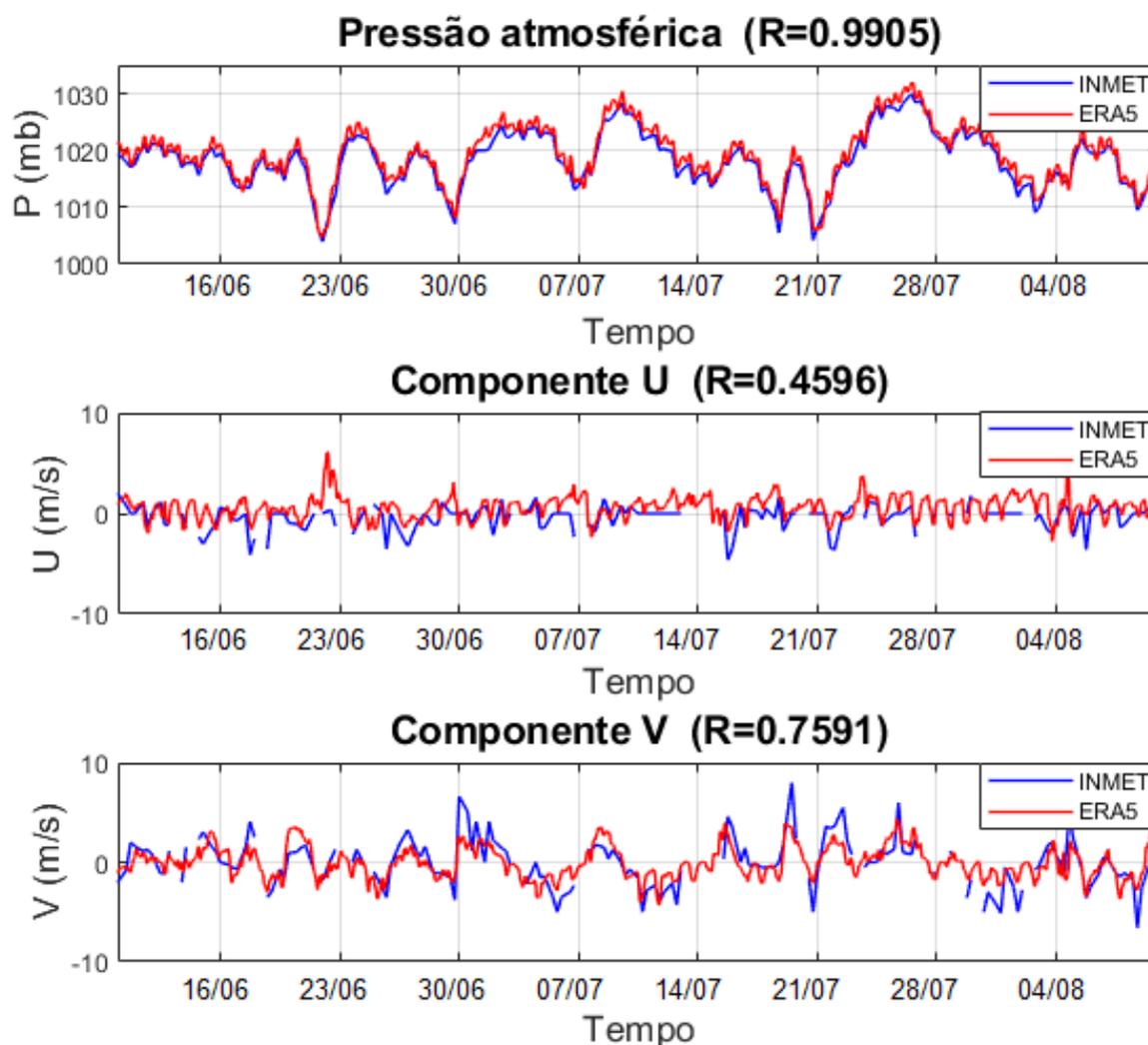


Fonte: Autora (2020)

Os dados de reanálise foram comparados com os dados da estação do INMET (Figura 8). A pressão atmosférica resultou em uma correlação de 0,9905 indicando alta precisão dos dados ERA5. As componentes U e V do vento tiveram correlações de 0,4596 e 0,7591, respectivamente, em que a componente V mostrou uma boa similaridade nas duas bases de

dados. De forma geral, os dados do ERA5 se mostraram mais adequados e de melhor qualidade para serem utilizados como forçante do modelo hidrodinâmico.

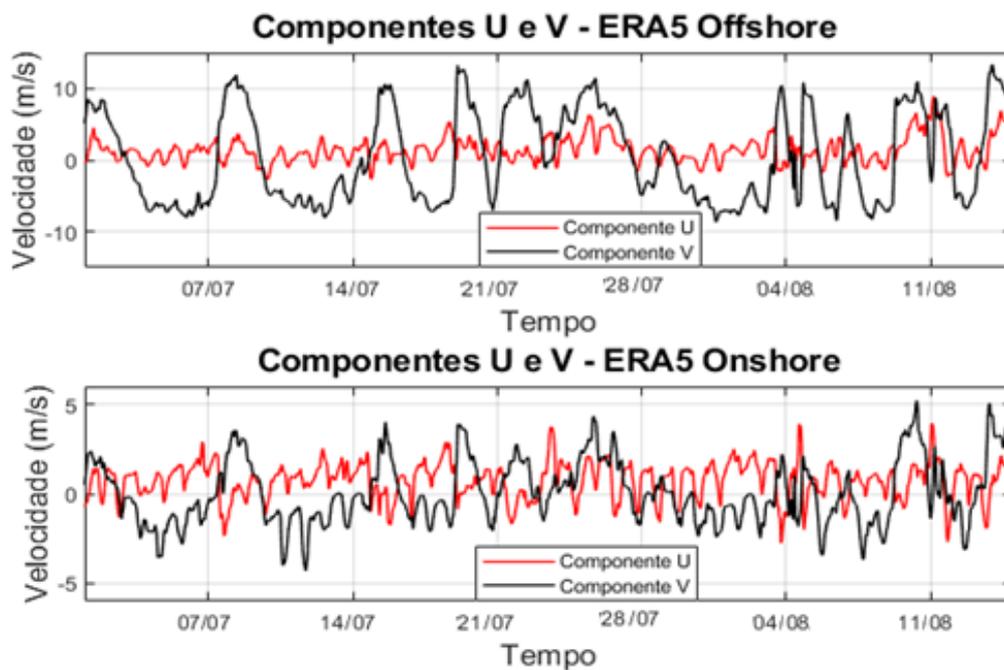
Figura 8- Comparação entre o conjunto de dados de reanálise ERA5 (linha vermelha) e dados da estação meteorológica do INMET (linha azul). Painel superior: pressão atmosférica. Painel intermediário: componente U da velocidade do vento. Painel inferior: componente V da velocidade do vento.



Fonte: Autora (2020).

Embora a reanálise ERA5 e a estação do INMET continental sejam bem correlacionadas, simulações hidrodinâmicas preliminares demonstraram que os ventos continentais não são suficientes para explicar a circulação. Por este motivo, foi utilizado o ponto de grid ERA5 *offshore*, onde os ventos são mais intensos e condizentes com a condição local sobre as baías. O período selecionado para o estudo foram os meses de julho e agosto de 2013 e outubro e novembro de 2016 (Figura 9).

Figura 9 - Série temporal das componentes U e V da velocidade do vento da reanálise global ERA5 nos pontos *offshore* (primeiro painel) e *onshore* (segundo painel).

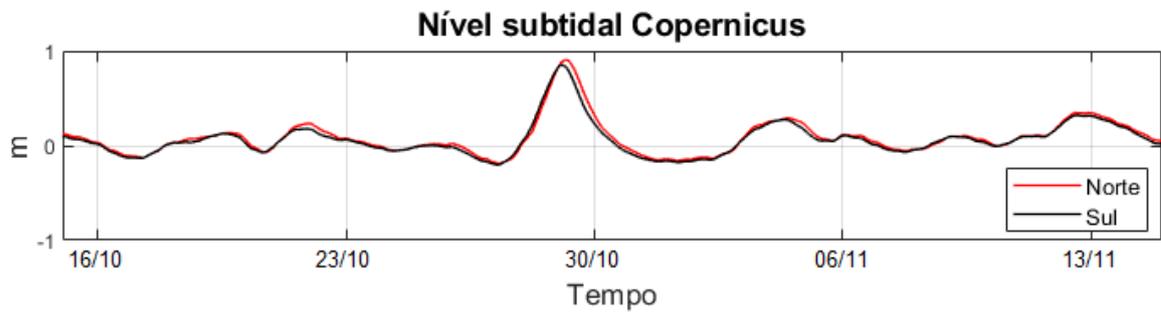


Fonte: Autora (2020).

4.1.4.2 Reanálise oceânica do *Copernicus*

Os dados de reanálise do nível médio do mar também foram comparados para fins de verificação dos produtos assimilados. A base de dados escolhida do *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), foi o GLOBAL-ANALYSIS-FORECAST-PHY-001-024, produto de abrangência global e resolução temporal horária para nível médio do mar. Foram escolhidos dois pontos para extração das séries de nível do mar *Copernicus*, próximos às entradas das baías Sul e Norte (Figuras 7B). As séries de nível do mar médio derivadas do *Copernicus* para o evento de 2016 podem ser visualizadas na Figura 10. Conforme ilustrado, houve um período de sobrelevação anormal do nível do mar no dia 28 de Outubro de 2016.

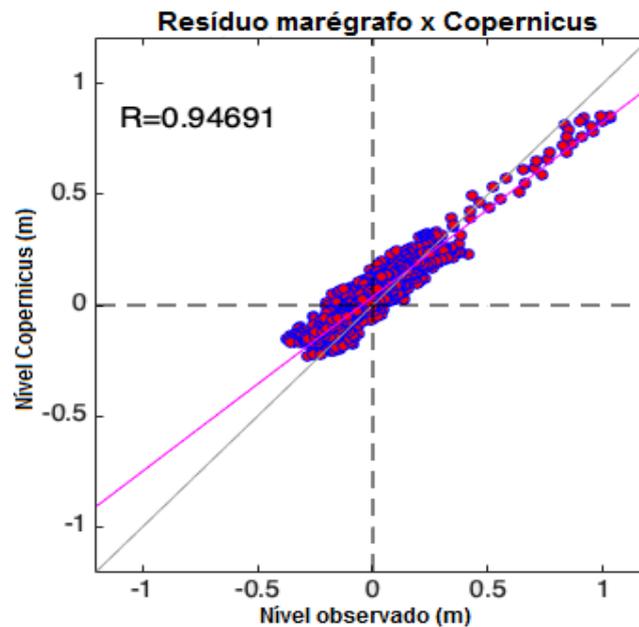
Figura 10 - Série temporal do nível médio da reanálise oceânica do *Copernicus* nas entradas das baías. A linha preta representa o nível ao sul e a linha vermelha o nível ao norte, ambas demonstrando um pico no dia 28 de outubro.



Fonte: Autora (2020).

De forma a validar os dados de nível derivados do produto oceânico, este produto foi comparado com um período em que o registro do marégrafo T2 encontrava-se disponível. O nível residual (não astronômico) em T2 foi calculado subtraindo o nível astronômico previsto. A Figura 11 ilustra a comparação dos dados do marégrafo com o *Copernicus*. A correlação entre o nível residual (*subtidal*) do marégrafo e nível do *Copernicus* teve um coeficiente de 0,94691 (Figura 11), indicando uma boa concordância entre os dados.

Figura 11 - Correlação entre o nível residual do marégrafo e o nível médio do *Copernicus*. A reta cinza representa a correlação ideal entre as variáveis e os pontos azuis representam a correlação obtida.



Fonte: Autora (2020).

4.2 DELFT3D

O *software Delft3D* refere-se a um sistema de modelagem desenvolvido pela *Deltares* para estudo de regiões costeiras, rios e estuários. O *Delft3D* pode ser aplicado para investigação de escoamentos gerados por marés astronômicas, ondas, ventos e gradientes de densidade. Este programa possui ainda um conjunto módulos auxiliares que possibilita a simulação de processos como o decaimento de substâncias, rastreamento de partículas e o transporte de sedimentos (Delft3D-FLOW, 2014). Para a modelagem da circulação da Baía de Florianópolis foi utilizado o módulo hidrodinâmico principal, *Delft3D – FLOW*, que possui diferentes ferramentas para o pré-processamento dos dados.

O *RGFGRID* é uma ferramenta utilizada para a geração da grade numérica, ortogonal ou curvilínea. O sistema de coordenadas pode ser esférico ou cartesiano. As grades curvilíneas possibilitam alta resolução em áreas de interesse auxiliando na eficiência computacional. Ao se criar a grade no Delft3D a resolução e a ortogonalidade são fatores importantes a serem considerados. A ortogonalidade é o ângulo entre as linhas de grade nas direções m e n e, em geral, seu valor deve ser menor que 0,04. Uma grade menos ortogonal resulta em erros na direção do gradiente de pressão. A resolução é definida como a raiz quadrada da área da célula e deve ser determinada de acordo com o tamanho da área de interesse e possuir variação suave. No *QUICKIN* é feita a interpolação dos dados batimétricos para a grade computacional (Delft3D-RGFGRID, 2014).

O *Delft3D-FLOW* é o módulo hidrodinâmico que resolve equações não-lineares de *Navier-Stokes*, considerando a aproximação de águas rasas, a aproximação de *Boussinesq* e escoamentos incompressíveis com superfície livre, em duas ou em três dimensões (OLPE, 2016). Este módulo tem como atributos fundamentais: o efeito da rotação da Terra (força de Coriolis); cálculos dos gradientes de densidade; modelo de fechamento de turbulência, levando em consideração a viscosidade e difusividade vertical; tensão cisalhante causada pelo escoamento no fundo; cisalhamento lateral ao longo das fronteiras fechadas; tensão do vento na superfície; simulação de descargas de rios; simulação de transportes de contaminantes/constituintes passivos, bem como coliformes fecais termotolerantes (PEREIRA, 2003). Neste trabalho o *Delft3D-FLOW* foi utilizado no seu modo 2D verticalmente integrado com densidade constante. As equações governantes do modelo na sua forma cartesiana são descritas a seguir. A equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [hU]}{\partial x} + \frac{d[hV]}{dy} = 0 \quad (1)$$

Onde η é o nível, t é o tempo, h é a profundidade, U e V são as velocidades em $m\ s^{-1}$ nas direções x e y . As equações que representam o princípio da conservação da quantidade de movimento são:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{P_x}{\rho} + \left(\frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho(h+\eta)} \right) + Fu \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -\frac{P_y}{\rho} + \left(\frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho(h+\eta)} \right) + Fv \quad (3)$$

Onde U e V são as componentes do vetor velocidade nas direções x e y respectivamente; ρ é a densidade; η é o nível do mar; h é a profundidade local; τ_{sx} e τ_{sy} são as tensões de cisalhamento do vento e τ_{bx} e τ_{by} as tensões junto ao fundo. Os termos: $\frac{\partial U}{\partial t}$ e $\frac{\partial V}{\partial t}$ são os termos de acelerações local; $U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$ e $U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y}$ são as acelerações advectivas; fV e fU representam a aceleração de Coriolis; $\frac{P_x}{\rho}$ e $\frac{P_y}{\rho}$ representam a força gradiente de pressão por unidade de massa; $\tau_{sx} - \tau_{bx}$ é a diferença entre a tensão de superfície e fundo; e Fu e Fv são as tensões horizontais viscosas.

As equações governantes em termos de coordenadas curvilíneas podem ser encontradas no manual do modelo. Neste trabalho, as saídas hidrodinâmicas do modelo são analisadas em termos do sistema geográfico, onde u representa a componente zonal (Leste-Oeste) e a v a componente meridional (Norte-Sul).

4.3 CONFIGURAÇÃO DO MODELO

Segundo Assad *et al.* (2009), as soluções das equações governantes em um modelo numérico, permitem o estudo de determinados fenômenos. Ao definir as características básicas do fenômeno a ser descrito, as equações governantes podem ser discretizadas para solução numérica. Assim, é possível resolver o fenômeno em cada ponto do domínio de interesse para diferentes instantes de tempo.

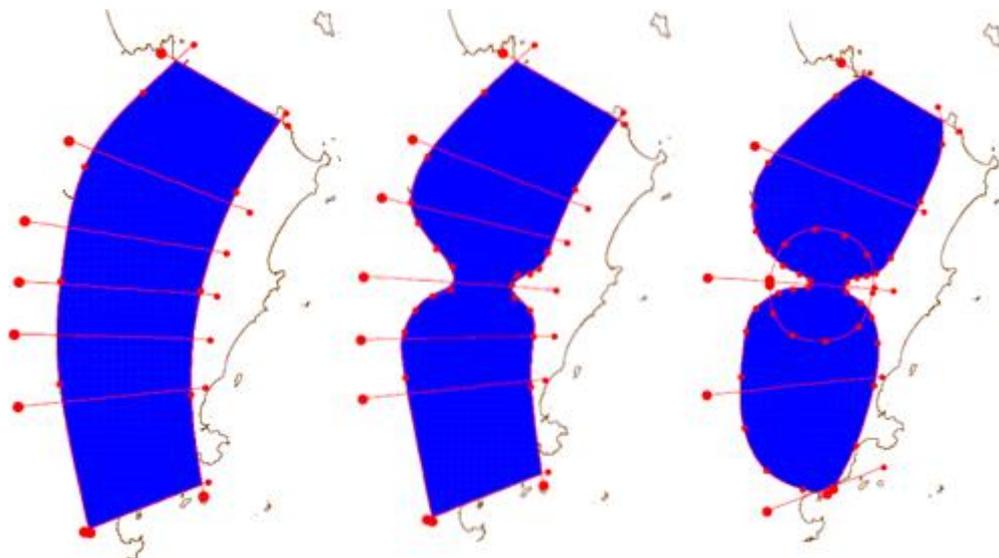
Neste estudo, o domínio numérico de interesse cobre as baías Norte e Sul de Florianópolis. Três tipos de grade foram testadas, explorando-se diferentes configurações, obtendo diferentes valores de resolução espacial, ortogonalidade e porcentagem de pontos secos. Uma vez selecionada a grade, a mesma foi aprimorada quanto a suavidade da batimetria.

4.3.1 Grades Numéricas

A grade do modelo compõe pontos discretos do domínio de interesse em que são resolvidas numericamente as equações governantes para se chegar a uma solução. Para se obter resultados adequados na modelagem, a construção da grade numérica requer uma boa definição em regiões de geometria e topografia complexa. Ao refinar a grade, obtém-se melhor resolução espacial, porém o passo de tempo também deve ser reduzido para manter a estabilidade numérica. Quanto menor a dimensão das células da grade, menor o passo de tempo necessário e maior o esforço computacional (ASSAD, 2009).

Foram criadas três grades curvilíneas com coordenadas esféricas e dimensões de 232 x 1450 pontos, denominadas G1, G2 e G3. A Figura 12 ilustra as linhas de controle *splines* desenhadas no *RGFGRID* para as três grades. A grade G1 procura seguir a orientação geral das baías, mas sem acompanhar as constrições geográficas da baía Sul, Estreito e baía Norte. Já as grades G2 e G3 foram trabalhadas de forma a acompanhar as regiões de constrição geográfica. Na grade G2 as *splines* definem com melhor resolução espacial a região do estreito, sem prejuízo às outras regiões das baías. Já a grade G3, ao tentar adaptar-se às constrições das entradas, acaba reduzindo a resolução espacial no interior das baías. A Tabela 2 apresenta a resolução espacial obtida, a porcentagem de pontos secos e os valores de ortogonalidade alcançados para cada grade.

Figura 12 - Grades computacionais G1, G2 e G3 construídas com o módulo RGFGRID. A parte em azul representa as linhas da grade e as vermelhas são as *splines*, que definem a forma da grade numérica.



Fonte: Autora (2019).

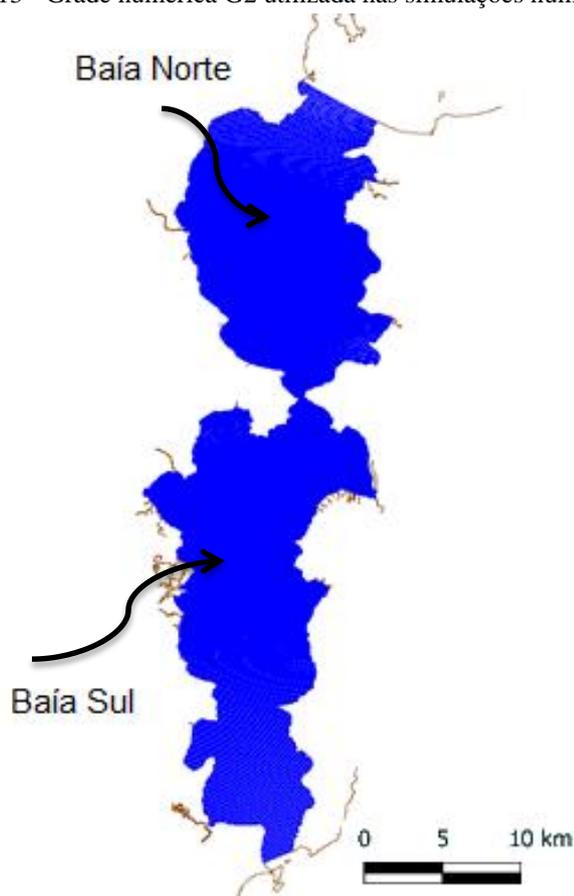
Tabela 2 - Resolução (máxima e mínima), ortogonalidade (máxima e mínima) e porcentagem de pontos secos para cada grade.

| Grades | Resolução (m) | Pontos Secos (%) | Ortogonalidade |
|---------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|
| G1 | 38,9 mín/67,5 máx | 47,81 | 0.1836E-06 mín/0.2854 máx |
| G2 | 31,6 mín/68,9 máx | 41,56 | 0.0000 mín/0.4900 máx |
| G3 | 26,4 mín/88,7 máx | 60,06 | 0.0000 mín/0.7025 máx |

Fonte: Autora (2019).

Devido aos menores valores de pontos secos e melhor resolução, a grade G2 foi a que se mostrou mais adequada para as simulações com o modelo. Os valores máximos de ortogonalidade da G2 ficaram mais próximos ao contorno do domínio. Embora a grade G3 tenha a menor resolução mínima, ela obteve maior número de pontos secos e maiores valores de ortogonalidade, reduzindo também a qualidade da grade em regiões mais estreitas, principalmente na desembocadura sul da Baía. A Figura 13 ilustra a grade final utilizada para a implementação de todas as simulações do modelo. As fronteiras abertas norte e sul coincidem com a localização dos marégrafos da EPAGRI/CIRAM, ilustradas na Figura 2.

Figura 13 - Grade numérica G2 utilizada nas simulações numéricas.

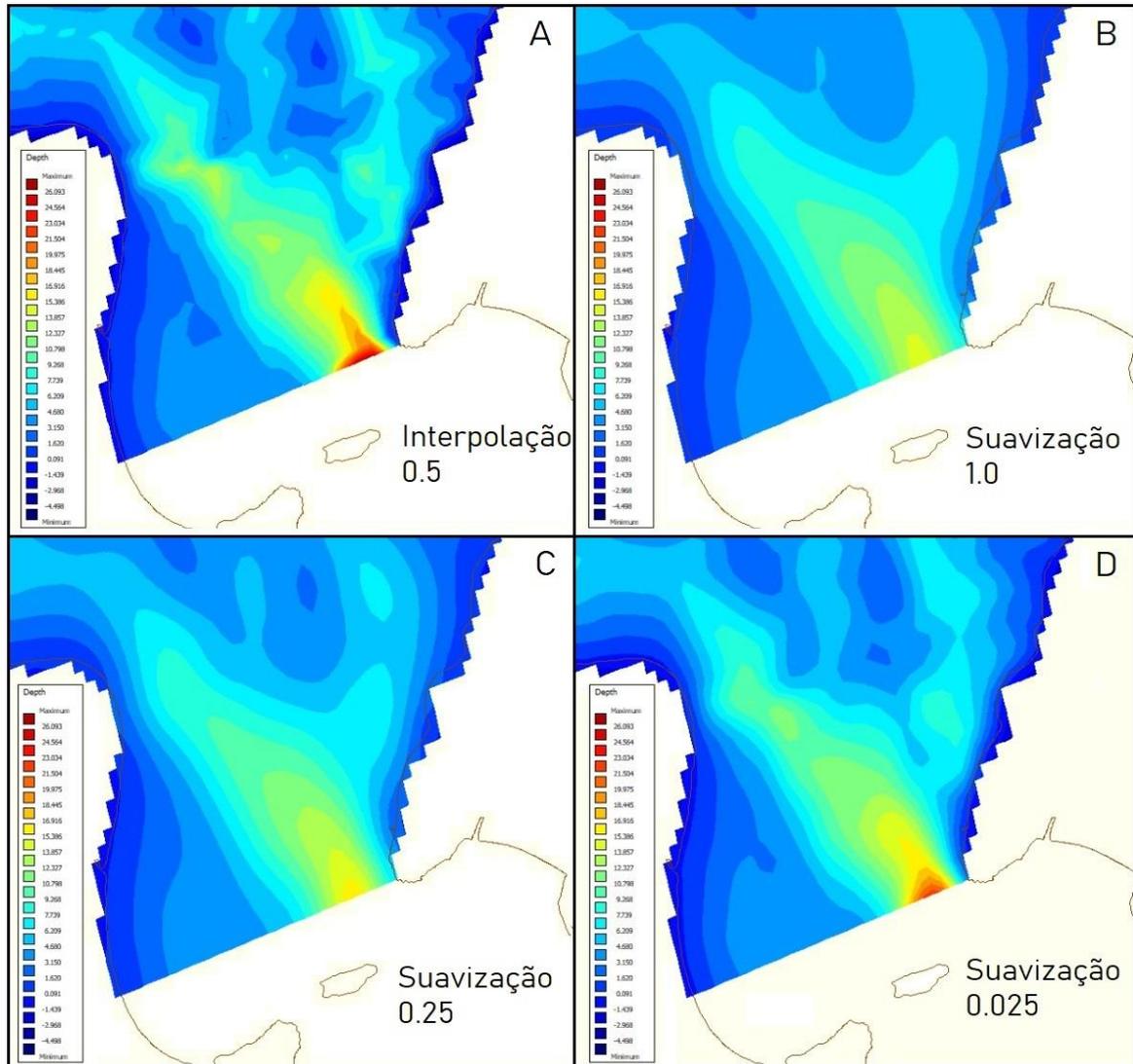


Fonte: Autora (2019).

4.3.2 Interpolação e suavização da Batimetria

Ao gerar a grade batimétrica, a interpolação dos dados batimétricos pode causar descontinuidades que podem desestabilizar as simulações numéricas. Por este motivo, é comum a aplicação de filtros espaciais numéricos, os quais permitem remover problemas de interpolação, suavizando a batimetria. Um exemplo é a opção *smoothing factor* da ferramenta *QUICKIN* de interpolação batimétrica. Um *smoothing factor* valor 0 (zero) não realiza qualquer suavização e um valor 1,0 faz da profundidade em um ponto a média das profundidades vizinhas. Para a interpolação dos pontos foi utilizado o valor de 0,5, padrão do Delft3D, e a profundidade da grade foi configurada para um mínimo de 1 metro. Após esta etapa, a superfície foi suavizada com diferentes valores para a análise da batimetria que melhor se aplica na região da área modelada. A suavização feita com os fatores 1,0 e 0,25 resultou em uma diferença de aproximadamente 10 metros na desembocadura sul da Baía, em contraste, o *smoothing factor* 0,025 foi o que melhor representou a batimetria da região mantendo a profundidade mais realista (Figura 14D).

Figura 14 - Exemplo da interpolação e suavidade da batimetria para a região da desembocadura sul da Baía. A) Somente interpolação da grade batimétrica; B) Interpolação batimétrica com suavização máxima (*smoothing factor* = 1,0); C) Suavização com valor de 0,25; D) Suavização com valor de 0,025.



Fonte: Autora (2020).

4.3.3 Tempo Computacional

Um passo de tempo de 0,5 minuto foi escolhido para as simulações, satisfazendo o critério do CFL (número de Courant-Friedrichs-Lewy), definido por:

$$CFL = \Delta t \cdot \frac{\sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} \quad (4)$$

Onde Δt é o tempo em segundos, g é a aceleração da gravidade, H é a profundidade da água e $\{\Delta x, \Delta y\}$ é um valor característico do espaço da grade nas direções x e y .

Foram simulados dois casos para a grade G2, com apenas uma camada vertical e para 5 e 30 dias. O passo de tempo escolhido para esses casos pôde dar uma estimativa de tempo para simulações de períodos mais longos.

4.4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

4.4.1 Cenários

Três simulações numéricas, denominadas B1, B2 e B3 foram realizadas para implementação das forçantes e comparação com os dados observados. O período de simulação é de 01 de julho a 15 de agosto de 2013 e cobre o período de coleta dos dados de ADCP. O modelo foi "aquecido" por 14 dias, até o dia 15 de julho de 2013. As análises e comparações do modelo com observações cobrem 30 dias entre os dias 15 de julho a 15 de agosto de 2013. A simulação B1 foi realizada somente sob a forçante de nível astronômico (Tabela 3). A simulação B2 foi realizada somente sob a forçante do nível do mar observado, que inclui as componentes astronômica e não astronômica (*subtidal*) do nível do mar. A simulação B3 utilizou, além dos dados observados de nível, uma série de ventos derivada do ERA5 (Tabela 3).

Tabela 3 - Forçantes inseridas no modelo para as diferentes simulações B1, B2, B3 e B4.

| Simulação | Período | Forçante nível do mar (fronteiras norte e sul) | Forçante atmosférica |
|------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| B1 | 15 Julho a 15 Agosto de 2013 | Maré astronômica (T1 e T2) | Nenhuma |
| B2 | 15 Julho a 15 Agosto de 2013 | Nível do mar observado (T1 e T2) | Nenhuma |
| B3 | 15 Julho a 15 Agosto de 2013 | Nível do mar observado (T1 e T2) | ERA5 |
| B4 | 13 Outubro a 16 Novembro de 2016 | Maré astronômica (T1 e T2) + Nível médio da Reanálise <i>Copernicus</i> | ERA5 |

Fonte: Autora (2020).

A simulação B4 foi realizada após a comparação e ajustes realizados nas simulações B1, B2 e B3. Na simulação B4 é demonstrado o refinamento hidrodinâmico simplificado, onde o nível do mar nas fronteiras do modelo é descrito por:

$$\eta = \eta_a + \eta_c$$

Onde η_a refere-se a previsão astronômica realizada através do software *t_tide* (PAWLOWICZ, *et al.* 2002), baseada nos dados dos marégrafos T1 e T2 do EPAGRI/CIRAM (Figura 2). Já η_c refere-se ao nível do mar derivado da reanálise do *Copernicus* (Figura 7). Os dados de vento da simulação B4 referem-se ao produto de reanálise atmosférica ERA5 para o ponto *offshore*.

O período da simulação B4 foi de 30 dias entre 13 de outubro e 16 novembro de 2016, implementada para avaliar um evento extremo de sobrelevação do nível do mar ocorrido em 28 de Outubro de 2016.

4.4.2 Coeficientes de arrasto e parâmetro de reflexão

O coeficiente de arrasto do vento C_d é utilizado para prescrição da tensão do vento na superfície da água. Neste estudo foi utilizado um valor inicial $C_{dA}=0.001$ com ponto de quebra $U_A = 0 \text{ m s}^{-1}$, $C_{dB}=0.005$ com velocidade de quebra $U_B = 15 \text{ m s}^{-1}$ e $C_{dC}=0.001$ com $U_C = 100 \text{ m s}^{-1}$, baseado no trabalho de Ruiz (2020) e Bastidas (2016). O coeficiente de Chézy aplicado foi de $65 \text{ m}^{1/2} / \text{s}$ referente ao arrasto de fundo e o parâmetro de reflexão alfa foi adotado um valor 0 (zero) (Delft3D-FLOW, 2014).

4.4.3 Comparação estatística

A análise estatística foi realizada através do coeficiente de correlação de Pearson, em que os resultados variam entre -1 e 1 na comparação entre duas variáveis. Quanto mais perto de 1, maior a correlação entre as variáveis. A magnitude do erro foi obtida pelo *Root Mean Squared Error* (RMSE) ou Raiz do Erro Quadrático Médio.

5 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados para as diferentes implementações do modelo *Delft3D* no modo 2D e como cada forçante atua na hidrodinâmica da Baía de Florianópolis. Os resultados são apresentados em 5 etapas: comparação das componentes harmônicas astronômicas do nível do mar; e análise das séries temporais de correntes e nível para a simulação B1, B2 e B3. Na última etapa é realizada a análise de correntes e nível da simulação B4, forçada com um nível do mar sintético. Para comparação dos resultados de correntes foi selecionada a componente meridional, visto que, pela geomorfologia das baías o fluxo norte-sul é mais expressivo.

5.1 CONSTANTES HARMÔNICAS DO NÍVEL ASTRONÔMICO

A primeira etapa da validação do modelo foi realizada comparando os resultados das simulações B1 e B2 do *Delft3D* com constantes harmônicas de amplitude (cm) e fase (graus, em relação a Greenwich) de dois marégrafos da DHN (Prudêncio,2003) e do ADCP da EPAGRI/CIRAM fundeado no estreito (GARBOSSA *et al*, 2014). A posição dos marégrafos C1 e C2 e do ADCP estão ilustrados na Figura 2.

A partir da análise harmônica do t_{tide} foram identificados as componentes de diferentes frequências que compõem a onda de maré, com suas respectivas amplitudes e fases. Para o período de 1 mês, o tempo considerado na calibração do modelo, obteve-se as componentes K1, O1, M2, S2, Q1 e N2, de maior relevância para a área de estudo. Como mostrado nas Tabelas 4, 5 e 6, as amplitudes da Enseada do Brito, Iate Clube Veleiros e estreito, das simulações B1 e B2, reproduziram satisfatoriamente as amplitudes observadas em C1, C2 e ADCP. Para os mesmos locais, as fases mostraram alguma diferença entre o observado e modelado.

Tabela 4 - Comparação das componentes harmônicas do nível do mar astronômico para o ponto do Iate Clube, indicado pelo símbolo C1 na Figura 2. As componentes listadas no estudo de Prudêncio (2003) e aquelas obtidas pela análise harmônica das simulações B1 e B2 estão indicadas em termos de amplitude e fase.

| | Amplitude (cm) | | | | Fase (graus) | | |
|-----------|-----------------|-----------------------------|------|------|-----------------------------|---------|---------|
| | Período (horas) | Marégrafo (Prudêncio, 2003) | B1 | B2 | Marégrafo (Prudêncio, 2003) | B1 | B2 |
| Q1 | 26,86 | 2,38 | 3,8 | 4,1 | 99,256 | 85,163 | 46,444 |
| O1 | 25,82 | 11,09 | 11,3 | 11,0 | 128,07 | 126,190 | 90,608 |
| K1 | 23,93 | 5,64 | 7,6 | 8,6 | 201,67 | 206,099 | 166,369 |
| N2 | 12,65 | 4,84 | 3,4 | 4,0 | 282,11 | 246,882 | 165,766 |
| M2 | 12,42 | 24,89 | 17,8 | 26,0 | 181,52 | 176,071 | 96,335 |
| S2 | 12,00 | 16,21 | 11,9 | 17,9 | 179,51 | 196,572 | 113,72 |

Fonte: Autora (2020).

Tabela 5 - Comparação das componentes harmônicas do nível do mar astronômico para o ponto da Enseada do Brito, indicado pelo símbolo C2 na Figura 2. As componentes listadas no estudo de Prudêncio (2003) e aquelas obtidas pela análise harmônica das simulações B1 e B2 estão indicadas em termos de amplitude e fase.

| | Amplitude (cm) | | | | Fase (graus) | | |
|-----------|-----------------|-----------------------------|------|------|-----------------------------|---------|---------|
| | Período (horas) | Marégrafo (Prudêncio, 2003) | B1 | B2 | Marégrafo (Prudêncio, 2003) | B1 | B2 |
| Q1 | 26,86 | 4,41 | 3,8 | 4,1 | 116,41 | 85,241 | 45,864 |
| O1 | 25,82 | 10,91 | 11,3 | 10,9 | 98,84 | 124,997 | 87,054 |
| K1 | 23,93 | 6,6 | 7,6 | 8,4 | 176,81 | 204,369 | 161,979 |
| N2 | 12,65 | 6,24 | 3,2 | 3,8 | 247,22 | 248,464 | 163,461 |
| M2 | 12,42 | 22,71 | 17,0 | 22,7 | 161,66 | 178,544 | 94,270 |
| S2 | 12,00 | 13,96 | 11,3 | 15,7 | 163,38 | 198,847 | 110,550 |

Fonte: Autora (2020).

Tabela 6 - Comparação das componentes harmônicas do nível do mar astronômico para o ponto de fundeio do ADCP, indicado pelo símbolo A na Figura 2. As componentes obtidas pela análise harmônica das séries de nível do mar do ADCP e das simulações B1 e B2 estão indicadas em termos de amplitude e fase.

| | Período (horas) | Amplitude (cm) | | | Fase (graus) | | |
|-----------|-----------------|----------------|------|------|--------------|---------|---------|
| | | ADC P | B1 | B2 | ADCP | B1 | B2 |
| Q1 | 26,86 | 3,4 | 3,8 | 4,1 | 37,772 | 54,321 | 44,110 |
| O1 | 25,82 | 10,6 | 11,3 | 11,0 | 85,686 | 91,853 | 88,887 |
| K1 | 23,93 | 8,4 | 7,9 | 8,6 | 154,740 | 168,957 | 163,715 |
| N2 | 12,65 | 4,6 | 4,6 | 4,3 | 148,401 | 167,321 | 161,709 |
| M2 | 12,42 | 24,9 | 25,6 | 25,8 | 78,372 | 93,085 | 91,163 |
| S2 | 12,00 | 18,4 | 18,1 | 17,9 | 91,365 | 111,071 | 107,972 |

Fonte: Autora (2020).

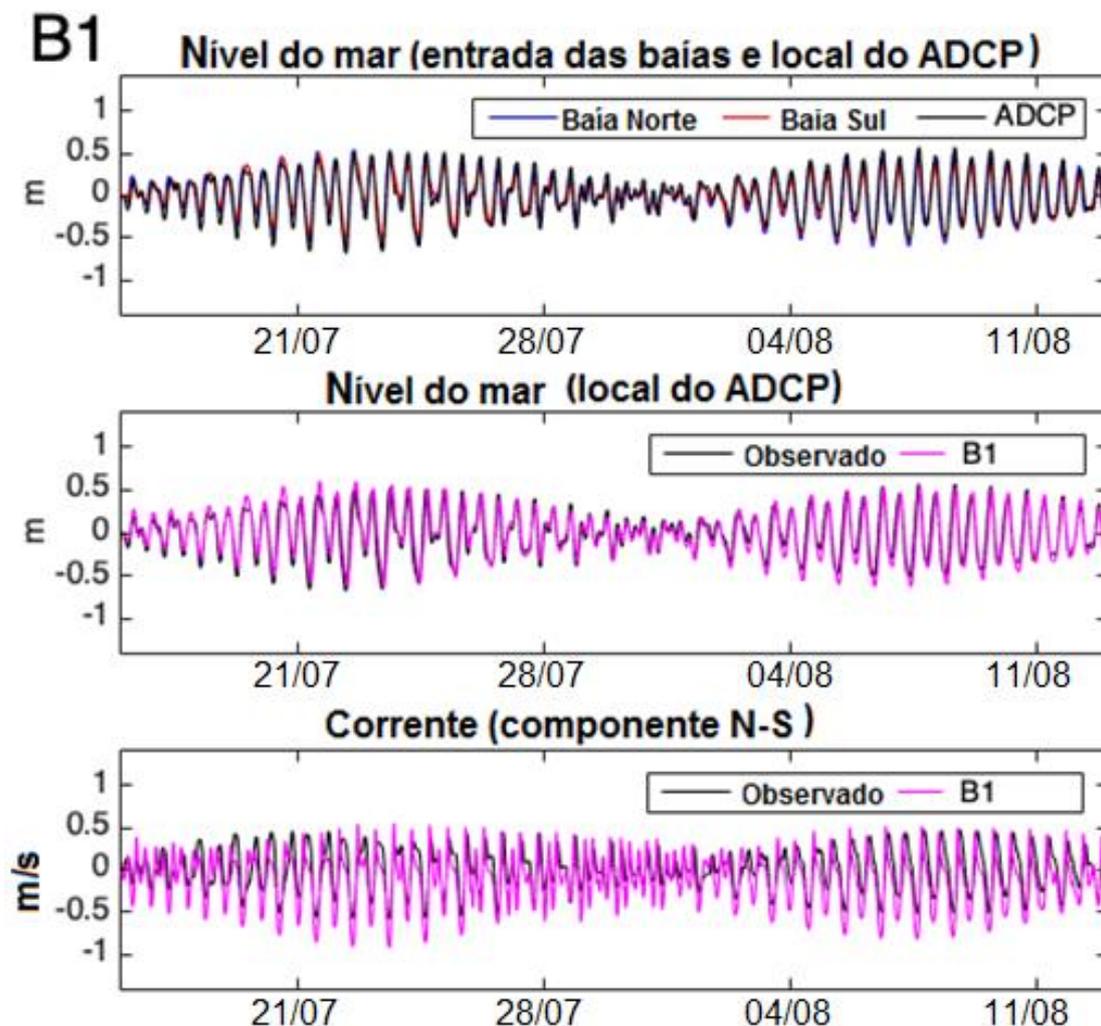
5.2 CORRENTES E NÍVEL - SIMULAÇÃO B1

A simulação B1 foi forçada com o nível astronômico dos marégrafos da EPAGRI/CIRAM e o resultado foi comparado com a série astronômica observada na localidade do ADCP e das entradas das baías. O painel superior da Figura 15 compara os níveis observados em três pontos. As linhas vermelha e azul representam o nível nas entradas das baías Norte e Sul respectivamente, enquanto a linha preta representa o nível astronômico no local do ADCP. Conforme observado, a diferença de amplitude é muito pequena entre estes locais. Na desembocadura norte a amplitude foi de 23,6 cm, local do ADCP 24,9 cm e desembocadura sul 19,3 cm, e a diferença de fase é da ordem de 46,19 graus para a componente M2, o que é equivalente a 94 minutos de atraso entre a baía Sul e Norte. Já o atraso da maré da entrada da baía Norte até o ponto do ADCP é da ordem de 61 minutos.

O painel intermediário da Figura 15 compara o nível do mar observado (astronômico) com a simulação B1 no local do ADCP. Observa-se que o modelo reproduziu satisfatoriamente as variações do nível do mar. O erro médio quadrático (RMSE) é 0,1057 m e a correlação obtida é de 0,9207 (Tabela 5).

O painel inferior da Figura 15 compara a componente meridional das correntes médias na coluna d'água. Conforme observado, a simulação B1 demonstra maior magnitude das correntes que as observações. As correntes modeladas na direção sul são cerca de 1 m s^{-1} no modelo contra 0.75 m s^{-1} descrito pelas observações. Nesta região o nível e a corrente estão praticamente em fase de forma que o nível máximo é observado com as correntes máximas para sul. Esta é uma situação de maré de enchente e corrobora os resultados de Czizewski (2016) que demonstram que a maré se propaga da baía Norte através do estreito. O erro médio quadrático (RMSE) entre as séries de correntes foi $0,2148 \text{ m s}^{-1}$ e a correlação obtida foi de $0,7846$ (Tabela 5).

Figura 15 - Resultados da simulação B1, forçada somente por nível mar astronômico. Painel superior: séries temporais de nível em T1, T2 e ADCP. Painel intermediário: Nível do mar modelado e observado no local do ADCP. Painel inferior: Componente N-S das correntes médias na coluna d'água comparadas com dados observados (hora local).



Fonte: Autora (2020).

5.3 CORRENTES E NÍVEL - SIMULAÇÃO B2

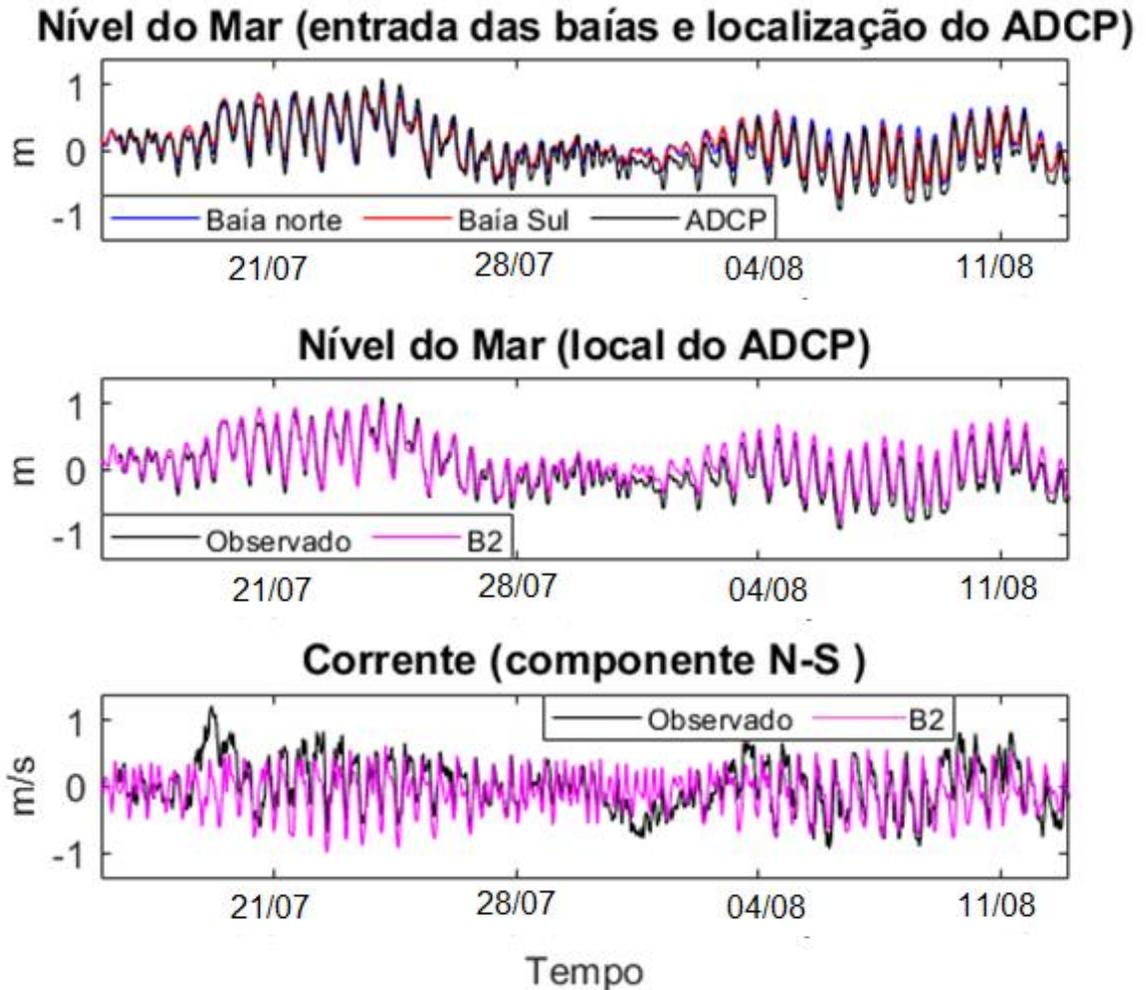
Os resultados da simulação B2, forçada com dados observados de nível, são comparados com dados de nível do mar observado dos marégrafos da EPAGRI/CIRAM e nível no local do ADCP. Na Figura 16 o painel superior ilustra o nível observado nas entradas norte (linha vermelha), sul (linha azul) e nível observado no local do ADCP (linha preta). Na desembocadura norte a amplitude da maré M2 foi de 23,2 cm, no local do ADCP foi 24,9 cm e na desembocadura sul 19,0 cm. A diferença de fase é da ordem de 46,63 graus para a maré M2, o que é equivalente a 96 minutos de atraso entre a baía Sul e Norte. Já o atraso da maré da baía Norte até o ponto do ADCP é da ordem de 61 minutos.

Para o nível no local do ADCP, painel intermediário da Figura 16, os dados do modelo tiveram ótima correlação com os dados observados, com coeficiente R igual a 0,9487 e RMSE de 0,1524 m, no qual a simulação B2 reproduziu de forma mais eficiente o nível do que a simulação B1.

Em relação a velocidade da corrente (terceiro painel), o modelo não conseguiu representar as correntes mais intensas entre 18 e 20 de Julho. A maior magnitude das observações passou de $1,2 \text{ m s}^{-1}$, com pico para norte, enquanto o modelo previu $0,4 \text{ m s}^{-1}$ para o mesmo instante, como resultado a correlação foi mais baixa com R igual a 0,5405 e RMSE de 0,3478. Os valores de correlações são mostrados na Tabela 5. A diferença entre as séries de corrente modelada e observada sugere que o vento local, não considerado nesta simulação B2, seja uma importante forçante, conforme será demonstrado a seguir.

Figura 16 - Resultados da simulação B2, forçada por nível observado (hora local) de T1 e T2. Painel superior: Série temporal do nível em T1, T2 e ADCP. Painel intermediário: comparação do nível do mar observado e modelado no local do ADCP. Painel inferior: componente N-S das correntes modeladas comparadas com dados observados.

B2



Fonte: Autora (2020).

5.4 CORRENTES E NÍVEL - SIMULAÇÃO B3

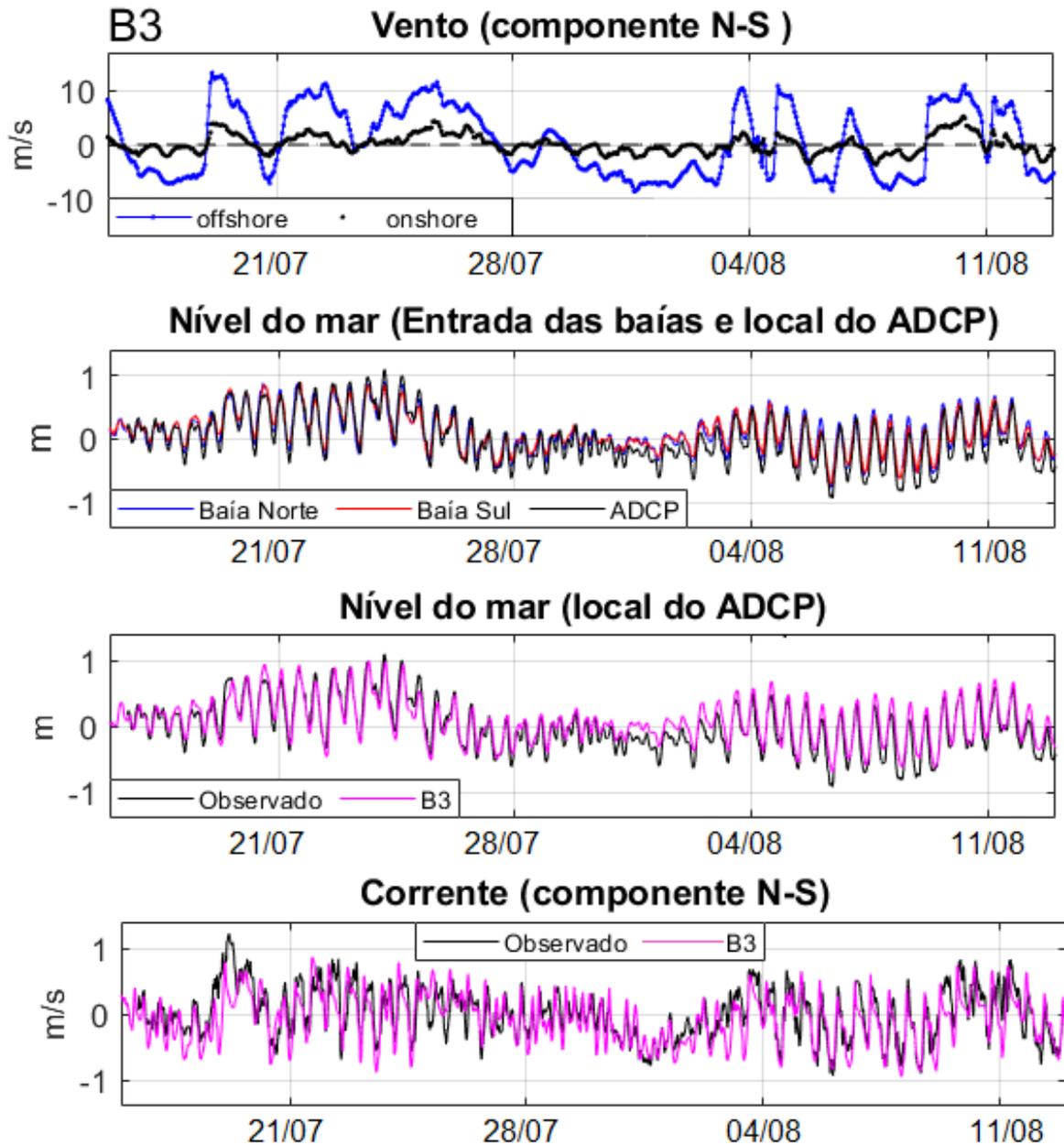
A simulação B3 foi forçada com o nível observado dos marégrafos da EPAGRI e ventos da reanálise ERA5 para o ponto offshore. O resultado foi comparado com a série de dados observados na localidade do ADCP, T1 e T2. O primeiro painel da Figura 17 ilustra a intensidade da componente meridional do vento, onde a linha azul representa a série temporal do ponto *offshore* e linha preta a série temporal do ponto *onshore*. O segundo painel ilustra o nível observado nas entradas norte (linha vermelha), sul (linha azul) e nível observado no local do ADCP (linha preta).

A comparação do nível do mar observado com a simulação B3 no local do ADCP é mostrada no terceiro painel. Observa-se que o modelo ainda reproduziu muito bem as variações do nível do mar, ficando com erro médio quadrático (RMSE) de 0,1641 m e a correlação de 0,9233, resultando em uma pequena redução na correlação do nível em relação à simulação B2 (Tabela 5). O último painel da Figura 17 compara as componentes meridionais das correntes na coluna d'água. Conforme observado, a implementação do vento como condição de contorno melhorou a previsão das velocidades meridionais, introduzindo correntes mais intensas para o norte entre 18 e 20 de Julho de 2013. A correlação (R) entre as correntes modelada e observada aumentou para 0,7295 e o erro reduziu para 0,2868 m s⁻¹. O pico com maior magnitude prevista foi de 0,8 m s⁻¹, o dobro da prevista em B2, no mesmo instante do pico observado.

A partir das comparações, percebe-se que a forçante do vento local é fundamental para a descrição das correntes.

Por fim, eventos de sobrelevação e rebaixamento do nível médio do mar acontecem em resposta às passagens de sistema atmosféricos sinóticos. A dinâmica oceânica prevê que ventos de quadrante sul (norte) atuando sobre a plataforma continental deverão causar o Transporte de Ekman em direção (contra) à costa, causando o empilhamento (rebaixamento) do nível do mar. Por certas vezes sistemas atmosféricos remotos na costa da Argentina, Uruguai e sul do Brasil podem promover o fenômeno da "maré meteorológica" que se propaga como ondas livres de plataforma continental viajando até a região de estudo (MELO, 2017).

Figura 17 – Representação dos resultados da simulação B3. Primeiro painel: Série temporal da componente N-S dos ventos *offshore* implementada do modelo (linha azul). Segundo painel: Nível do mar observado (hora local) em T1, T2 e ADCP. Terceiro painel: Nível de B3 comparadas com dados observados do ADCP. Quarto painel: Comparação das componente N-S das correntes observadas e modeladas no local do ADCP.



Fonte: Autora (2020).

Tabela 7 – Resultados das comparações estatísticas do nível do mar e correntes entre as simulações B1, B2 e B3 com os dados do ADCP

| | Nível do mar | | Corrente (N-S) | |
|----|--------------|--------|----------------|--------|
| | R | RMSE | R | RMSE |
| B1 | 0,9207 | 0,1057 | 0,7846 | 0,2148 |
| B2 | 0,9487 | 0,1524 | 0,5405 | 0,3478 |
| B3 | 0,9233 | 0,1641 | 0,7295 | 0,2868 |

Fonte: Autora (2020).

5.5 CORRENTES E NÍVEL - SIMULAÇÃO B4

5.5.1 Prescrição das condições de contorno

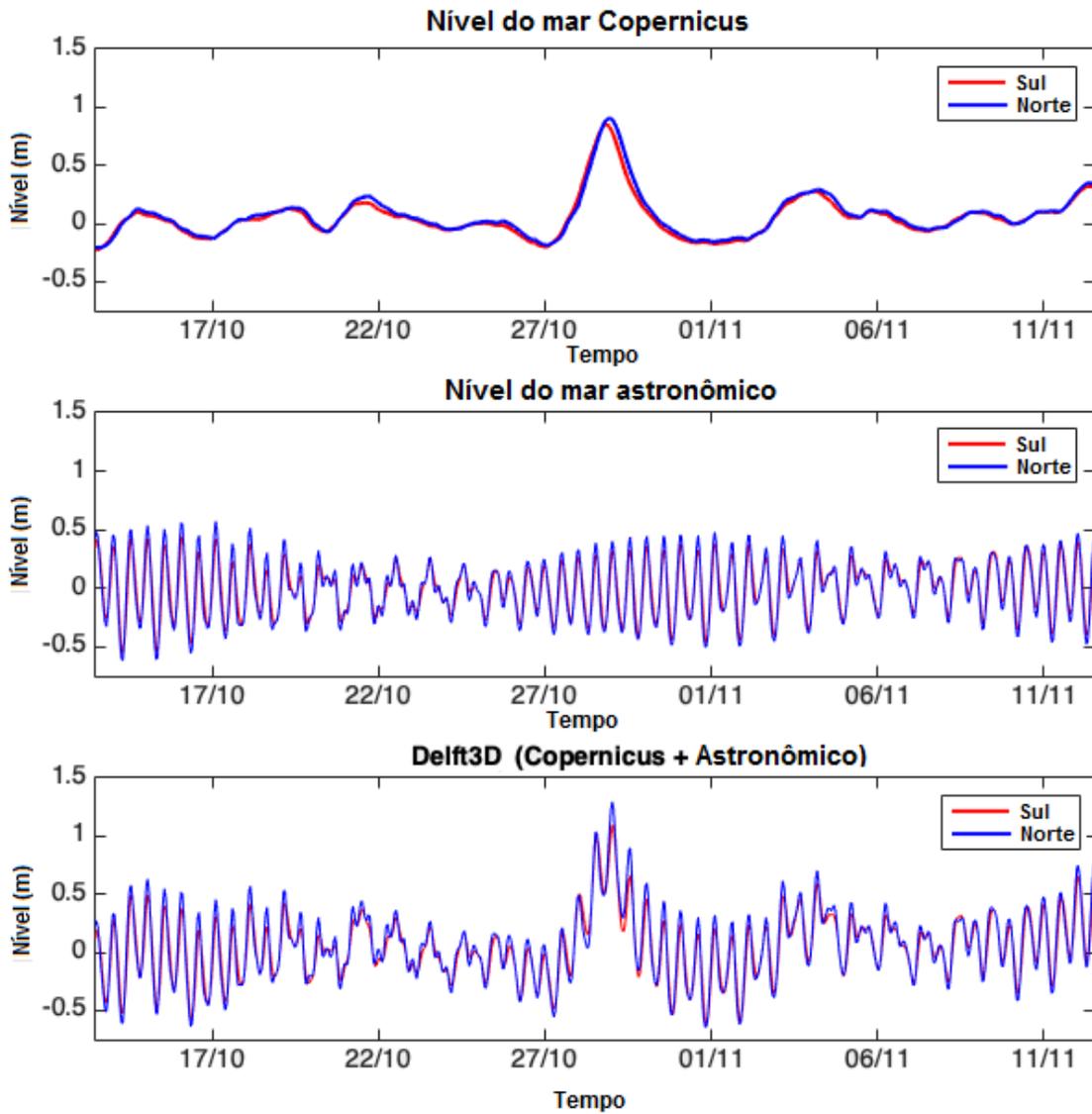
Para reconstrução do nível do mar sintético para a simulação B4 a previsão astronômica para a localidade dos marégrafos da baía Norte e Sul foi somada ao nível do mar derivado da reanálise, assim como descrito na seção 4.4.1 das simulações numéricas.

O nível médio do *Copernicus* representa variações do nível do mar de baixa frequência (frequência submareal ou *subtidal*), que incluem ondas livres de plataforma, a contribuição estérica do oceano profundo e o empilhamento (rebaixamento) do nível do mar pelo vento regional.

O painel superior da Figura 18 ilustra o nível do mar η_c da reanálise oceânica do *Copernicus* entre 15 de outubro e 15 de novembro de 2016 para dois pontos adjacentes às baías Norte e Sul. Fica evidente a sobrelevação do nível do mar de 1 m ocorrida em 28 de outubro de 2016, devido a um evento de vento sul, com consequente empilhamento do nível do mar e passagem de uma onda de plataforma (Figura 19).

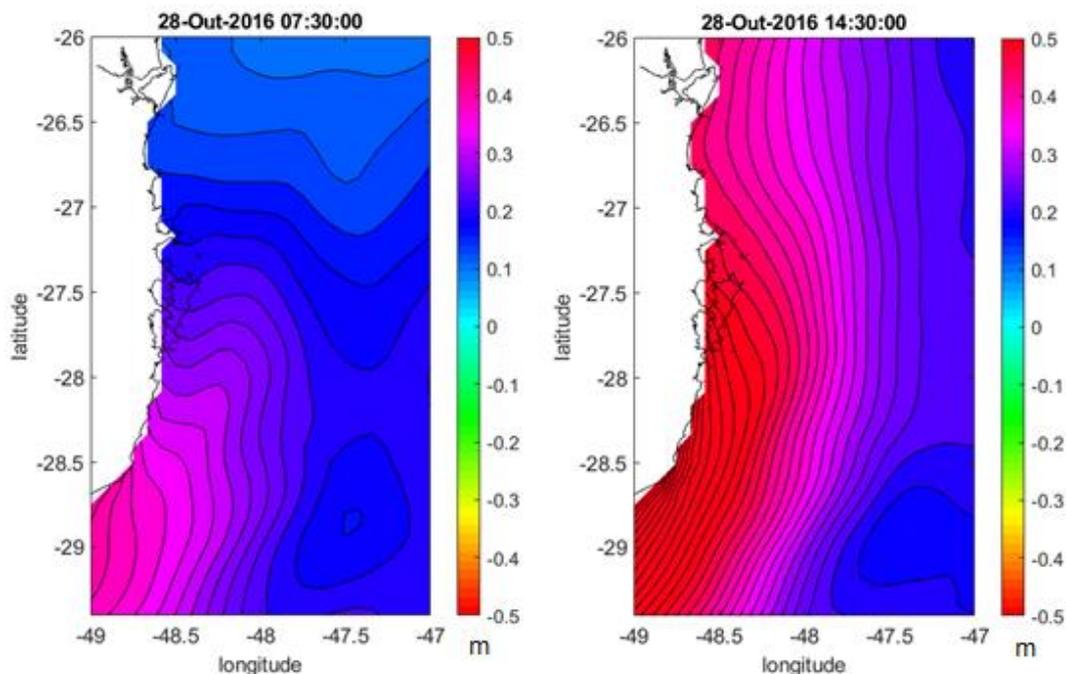
O painel intermediário da Figura 18 ilustra a maré astronômica η_a prevista para as baías Norte e Sul, evidenciando que o evento de sobrelevação coincidiu com a transição de marés de quadratura para sizígia. Por fim, o painel inferior da Figura 18 ilustra a soma destas últimas duas séries $\eta = \eta_c + \eta_a$. Estas duas séries temporais representam as condições de contorno impostas na simulação B4.

Figura 18 - Ilustração do efeito da soma do nível *Copernicus* (primeiro painel) com a previsão do nível astronômico (segundo painel). Destacando a elevação do dia 28 de outubro (hora local). O terceiro painel representa o nível sintético implementado na simulação B4.



Fonte: Autora (2020).

Figura 19 - Mapas do nível médio do mar ilustrando a evolução da onda de plataforma a partir dos dados Copernicus (GLOBAL-ANALYSIS-FORECAST-PHY-001-024).



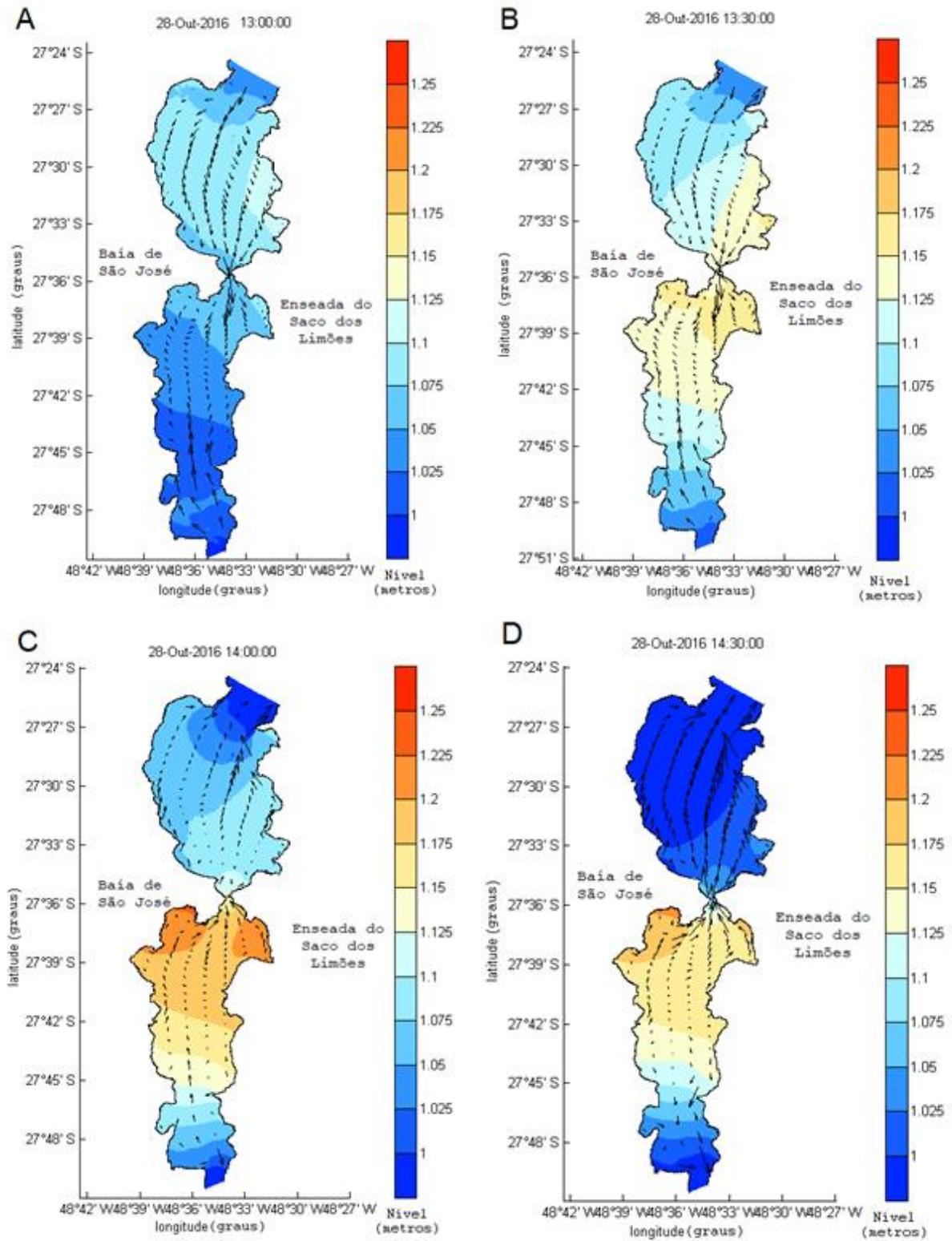
Fonte: Autora (2020).

5.5.2 Resultados da simulação

A Figura 20 ilustra o nível do mar instantâneo durante o período de sizígia e a circulação das águas através de vetores para quatro instantes de tempo. No geral, observa-se que em regiões mais estreitas se tem as maiores velocidades de corrente. O painel da Figura 20A ilustra a situação às 13:00 horas, quando as correntes de maré indicam o período final da enchente nas entradas das baías, com amplificação do nível em direção ao estreito. Às 13:30 horas a elevação do nível na região do estreito, tanto na baía Norte quanto na baía Sul, alcança 1,12 metros (Figura 20B).

O nível máximo da maré ocorre às 14:00 horas, com as maiores amplitudes de nível do mar, atingindo com 1,3 metros. Esta sobrelevação da maré resultou em alagamentos na Baía de São José e na enseada do Saco dos Limões (Figura 20C). A partir desse momento, as correntes de maré invertem nas bocas das baías com o fluxo de vazante. O escoamento através do estreito é em direção a baía norte. As correntes na baía Sul, a partir do Saco dos Limões, são no sentido sul. Como pode ser observado, até às 14:30 a velocidade de vazante atinge seu máximo mais rápido na baía Norte do que na baía Sul e o fluxo de corrente é da baía Sul para a baía Norte. A baía Norte atinge um nível de 1,0 metro, enquanto a baía Sul ainda possui locais com nível acima de 1,2 (Figura 20D).

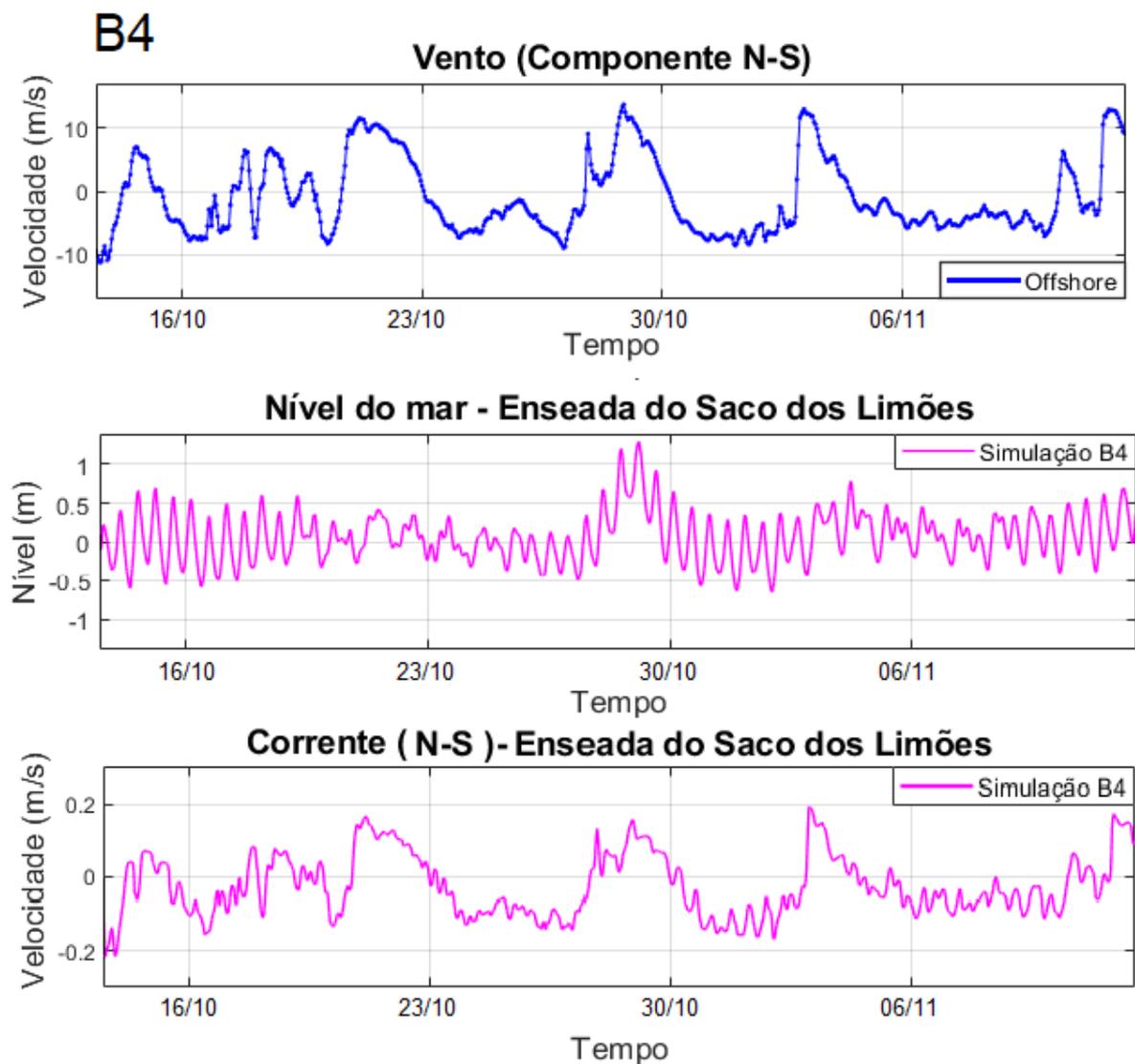
Figura 20 - Campos de nível e corrente da maré na Baía de Florianópolis (hora local). A) Enchente às 13:00 horas. B) Enchente às 13:30, ilustrando o empilhamento de água na região central da Baía. C) Nível máximo da maré às 14:00 horas e início da vazante. D) Momento de vazante.



Fonte: Autora (2020).

Por fim, a Figura 21 ilustra as séries temporais de intensidade do vento, nível e correntes no período da simulação B4. No primeiro painel observa-se a velocidade do vento com picos de quadrante sul e intensidade acima de 10 m s^{-1} , principalmente nos momentos de maré de sizígia (painel intermediário). A componente meridional das correntes para um ponto na enseada do Saco dos Limões (terceiro painel) ilustra a resposta como uma sobreposição de correntes de maré astronômica e correntes controladas pelo vento.

Figura 21 – Séries temporais (hora local) da componente N-S dos ventos implementadas no modelo (painel superior) e dos resultados da simulação B4 para um ponto na Enseada do Saco Limões. Painel intermediário: Nível do mar. Painel inferior: Componente N-S das correntes.



Fonte: Autora (2020).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo a implementação do modelo numérico *Delft3D* para o refinamento hidrodinâmico 2D da Baía de Florianópolis. Dados observados e produtos de reanálise foram aplicados ao modelo, de forma a se reproduzir a circulação hidrodinâmica das baías. A comparação dos dados modelados com dados observados demonstrou a importância de dados ambientais para ajuste e validação do modelo. Os resultados demonstraram que o modelo é capaz de reproduzir satisfatoriamente as correntes e nível do mar nas baías Norte e Sul. O nível do mar teve o maior valor do coeficiente de correlação na simulação B2 com R igual a 0,9487. A simulação B3 resultou no melhor valor de correlação para as correntes, com $R = 0,7295 \text{ m s}^{-1}$, demonstrando a importância da forçante local dos ventos para a correta descrição da circulação.

A passagem de sistemas sinóticos sobre a região é determinante sobre flutuações do nível médio do mar na plataforma continental. Ventos do quadrante sul induzem o empilhamento de água na costa, que combinados com marés astronômicas de sizígia, podem resultar em eventos extremos de sobrelevação do nível do mar na plataforma continental.

A Baía Florianópolis é comumente afetada pela sobrelevação da maré, causando inundação e gerando riscos para várias atividades. A partir dos dados de nível médio do mar da reanálise global *Copernicus*, foi possível observar uma onda de plataforma propagando para norte, atingindo a região no dia 28 de outubro de 2016. Os resultados da modelagem indicam que o efeito da maré astronômica e meteorológica somados resultou na sobrelevação do nível do mar em 1,3 m na região dos Saco dos Limões, adjacente à região de alagamentos da SC-405. Melo (2017) explica que os eventos de marés meteorológicas não deveriam ser vistos apenas como efeitos locais, visto que, há evidências de que eventos de sobrelevação da maré ocorrem em toda a costa brasileira por efeitos de escala não local, provenientes do extremo sul.

Assim, eventos meteorológicos ocorrentes na costa da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul podem gerar marés meteorológicas locais, que posteriormente se propagam como ondas de plataforma para baixas latitudes, causando a sobrelevação do nível do mar e correntes intensas na plataforma adjacente a Ilha de Santa Catarina (CASTRO & LEE, 1995, PIMENTA *et al.*, 2004, MELO, 2017). Melo (2017) reforça a importância de ondas de origem remota como condição de contorno para modelos com fronteiras abertas para sul.

Considerando que os modelos globais utilizados para reanálise oceânica resolvem de forma bastante razoável os processos de plataforma, estes tornaram-se ferramentas muito úteis para o estudo da circulação costeira. Este trabalho demonstrou, que para corpos hídricos com comunicação estreita com o oceano é possível aplicar a técnica de refinamento hidrodinâmico de forma simplificada, incorporando as informações do modelo global diretamente na grade local do *Deltt3D*. No caso da Baía de Florianópolis, o acoplamento foi realizado com dois pontos, do modelo global adjacentes as entradas da Baía de Florianópolis. Desse modo, a técnica de modelagem numérica demonstrada poderia ser adaptada também para sistemas de previsão do nível do mar acoplados a modelos globais, gerando um sistema de alerta de inundação costeira para a Baía de Florianópolis.

Contudo, serão necessários estudos complementares, incluindo a edição da topografia emersa para obtenção das cotas de inundação da região da SC 405, elaborando um modelo digital de terreno de alta resolução para a simulação das áreas de alagamento.

REFERÊNCIAS

- ASSAD, Luiz Paulo de Freitas; MANO, Manlio Fernandes. *Noções Básicas de Modelagem Hidrodinâmica Computacional e de Dispersão de Poluentes*. Editora COPPE. 2009.
- BASTIDAS, Luis A.; KNIGHTON, James; KLINE, Shaun W. Parameter sensitivity and uncertainty analysis for a storm surge and wave model. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. DOI:10.5194/nhess-16-2195-2016. 2016.
- CAMPOS, Alexandre Vilci. **Caracterização morfológica e sedimentar do substrato das baías norte e sul (SC) com base em técnicas de análise espacial**. Dissertação (mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.
- CASTRO FILHO, Belmiro Mendes de, & LEE, Thomas N. Wind forced sea level variability on the southeast brazilian shelf. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 100, n. c8, p. 16045-56, DOI: 10.1029/95jc01499. 1995.
- CHUNE, S. Law; NOUEL, F., DERVAL, C. “For the GLOBAL Ocean Sea Physical Analysis and Forecasting Products GLOBAL _ ANALYSIS _ FORECAST _ PHYS _ 001 _ 001 _ c And GLOBAL _ ANALYSIS _ FORECAST _ PHYS _ 001 _ 001,” no. **Copernicus-Europe’s eyes on Earth**: 1–26. 2011.
- COSTA, Carine de Godoi Rezende. **Physical processes in the Santos-São Vicente-Bertioga Estuarine System: from observations to forecasts**. Tese (Doutorado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, University of São Paulo, São Paulo, 2019. doi:10.11606/T.21.2019.tde-17122019-115622. 2019.
- CZIZEWESKI, Anthea Carla. **Circulação nos arredores da Ilha de Santa Catarina**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia). Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.
- DALBOSCO, Anna Luiza Pacheco *et al.* Analysis of currents on the continental shelf off the Santa Catarina Island through measured data. **RBRH**, Porto Alegre, v. 25, e7, <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020180175>. 2020.
- Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. **User Manual**. 2014.
- Delft3D-RGFGRID. Generation and manipulation of curvilinear grids for Delft3D-FLOW and Delft3D-WAVE. **User Manual**. 2014.
- FLORIPAMANHÃ. **Estudo complementar para a implementação do Ordenamento náutico do município de Florianópolis**. 2012.
- GAGG, Gilberto. **Apostila de levantamentos hidrográficos – noções gerais**. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul IGEO – Instituto de Geociências departamento de Geodésia. 2016.
- GARBOSSA, Luis Hamilton Pospissil. *et al.* **MODELLING AND VALIDATION OF THE SANTA CATARINA ISLAND BAYS HYDRODYNAMICS BASED ON ASTRONOMIC TIDES AND MEASURED TIDES**. 2014.

HERSBACH, Hans, Bill Bell, Paul Berrisford,; Shoji Hirahara,; András Horányi, Joaquín; Muñoz-Sabater,; Julien Nicolas, *et al* “The ERA5 Global Reanalysis.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, no. September 2019: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>. 2020.

MEHDI, Nicole. **Algoritmo Adaptativo Aplicado à Modelagem de Transporte de Óleo** Tese (Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 2005.

MELO Fº. E. **Maré Meteorológica na Costa Brasileira**, Tese Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 328 p, Abril 2017.

MELO, Eloi; MARTINS, Renato Parkinson; FRANCO, Davide. Standing wave tide at Florianópolis bay (Brazil) and its influence on bay pollution. **Coastal environment management and conservation**. Bordeaux, p. 143-151. jul. 1997.

MUÑOZ-SABATER, J.: **ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)**. (<Outubro de 2020>), 10.24381/cds.e2161bac. 2019.

OLPE, Carolina Alcantara. **Hidrodinâmica e transporte de sedimentos no Saco do Mamanguá (RJ), observações e modelagem numérica**. Dissertação (mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo. 2016.

PAWLOWICZ, Rich; BEARDSLEY, Bob; LENTZ, Steve. **Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using TTIDE**. 2002.

PEREIRA, Régis da Silva. **Processos que regem a qualidade da água da Lagoa dos Patos, segundo o modelo DELFT3D**. Dissertação (mestrado em Engenharia Oceânica). Fundação Universidade do Rio Grande. 2003.

PIMENTA, FELIPE M.; MELO FILHO, E.; FRANCO, D.; ZAVIALOV, P. Assessment of Santa Catarina Shelf Currents through the Analysis of Indirect Measurements. **Journal of Coastal Research**, Itajaí - SC, v. SI 39, p. 651-655, 2004.

PRUDENCIO, Ruy De Sá. **Estudo numérico da circulação induzida pela maré na Baía de Florianópolis**. Universidade Federal de Santa Catarina (Dissertação de mestrado). 2003.

RUIZ, Matheus Souza. **Modelagem de eventos extremos de nível do mar no Sistema Estuarino de Santos, São Vicente e Bertioga durante o ano de 2016**. Dissertação (mestrado em Ciências) Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 2020.

SANTIAGO, Marco. Após madrugada de ressaca e estragos, previsão é de novos picos de maré alta neste sábado. 2016. Disponível em:<<https://ndmais.com.br/noticias/apos-madrugada-de-ressaca-previsao-e-de-picos-de-mare-alta-neste-tarde-no-sul-da-ilha>>. Acesso em: Novembro de 2020.

SILVA, Eliziane A. C.; GARBOSSA, Luis Hamilton Pospissil, NUÑERC, A.P.O., LAPA Katt Regina. **Hydrodynamic modelling of the dispersion and deposition of biodeposits from marine bivalve mollusc farming under neap and spring tides in Santa Catarina Island Bays**. 2019.

SIMONETTI, Brunna Luiza Silva. **Modelagem numérica da maré astronômica nas Baías de Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.

VIEIRA da Silva G, TOLDO E., KLEIN A., SHORT A., WOODROFFE C. Headland sand bypassing - Quantification of net sediment transport in embayed beaches, Santa Catarina Island North Shore, Southern Brazil. **Marine Geology**. Vol: 379 pp: 13-27, 2016.