

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
OCEANOGRAFIA**

Leticia Vasques dos Reis Portella Nascimento

Os processos hidrodinâmicos da Enseada do Itapocorói

Florianópolis

2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
OCEANOGRAFIA**

Leticia Vasques dos Reis Portella Nascimento

**OS PROCESSOS HIDRODINÂMICOS DA ENSEADA DO
ITAPOCORÓI**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Oceanografia.

:

Prof. Dr. Antonio Fernando Härter
Fetter Filho

Florianópolis

2017

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

Nascimento, Leticia Vasques dos Reis Portella
Os processos hidrodinâmicos da Enseada do
Itapocoróí / Leticia Vasques dos Reis Portella
Nascimento ; orientador, Antônio Fernando Härter
Fetter Filho, 2017.
148 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e
Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em
Oceanografia, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. hidrodinâmica. 3. correntes
de vento. 4. enseada. I. Härter Fetter Filho,
Antônio Fernando. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia.
III. Título.

À minha mãe, que me ensinou o que é lutar de verdade.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Fetter, por todo ensinamento que me foi passado com tanta paciência e por acreditar que seria possível realizar esse mestrado.

Agradeço ao Prof. Dr. Antonio H. da F. Klein e ao Professor João Luiz Baptista de Carvalho por terem gentilmente cedido os dados medidos imprescindíveis para o desenvolvimento do atual trabalho. Também devo agradecer à CB&I por toda a compreensão que foi necessária para que eu pudesse participar deste mestrado, bem como todo o apoio dado durante o processo.

Agradecimentos também devem ser feitos aos órgãos de fomento à pesquisa pelos projetos que resultados nos dados utilizados no presente trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo projeto CNPQ_CTTranArea 22/2008, Proc. No. 575008/2008-3 e CNPQ_CTTranArea 44/2008, Proc. No. 575008/2008-3. À Universidade do Vale do Itajaí pela instalação e manutenção do marégrafo disponível no Pier da Penha.

Quero agradecer também aos membros da banca por participarem dessa etapa e por todo ensinamento e contribuições dadas.

Aos queridos Felipe (Mineiro) e Lucas por me salvarem em meu flu. Não teria conseguido sem a sua ajuda.

À Sara, pela amizade e pela cuia sem a qual eu não conseguiria terminar o mestrado.

Aos queridos Gui Diego, Jonathan, Naomi, Feijão, Mainha, Luis,

João Boquinha, Murilo, Mawkee, Girol e todo o pessoal da Crave e Conectar, por terem me feito me sentir em casa em uma cidade totalmente estranha.

Ao Sérgio que acreditou no meu potencial para me trazer pro time da Crave e por sempre ter as ferramentas de trabalho que eu preciso desesperadamente :)

À mais algumas pessoas especiais que também fizeram diferença em algum momento dessa caminhada: Luana, Fernando, Godô, Júlia, Nery, Corinne, Quel e Alce, Luiz, Elisa, Victor...

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao Eric, por estar sempre disponível para me ajudar, 24/7. Obrigada por ter sido um anjo de guarda.

À Gabi, Charline, Jacqueline, Amanda e Fernando, Jessica, Marina, Juliana, Guilherme e Camila, Augusto, Marcelo, Ivana... pela parceria, amizade e amor. Amo vocês.

Ao meu irmão, Joninhas, que me apoiou na caminhada dura e em inúmeras noites de estudo. Por sempre me ajudar a analisar as coisas via whatsapp. Você sabe o quanto te amo.

Ao meu querido Mário que me ajudou a começar trilhar caminhos que eu jamais imaginei seguir. Você é demais!

Aos meus queridos amigos pythonicos: Vanessa, Elias, Masanori, Valdir e Cris, Leite, Jairo, Ivan, Henrique Bastos, Shiga, João, Jojo, Thais, Raquel e Cris, Biguá e todo "clube dos mozaum" por terem acreditado em mim e me ajudado a criar asas pra ir mais longe. Por todos os ensinamentos, por todas as lições.

Ao Wandrey e à Lu, por terem me dado energia em um momento que eu estava prestes a desabar.

Ao meu amor, Marco, por toda paciência, carinho e amor. Meu amor é todo seu <3

Aos meus queridos pais postiços, Nádia e Marcos, Geca e Victor. O apoio e amor de vocês foram fundamentais. Obrigada por

fazerem parte da família que eu escolhi para mim. Obrigada também a todas as minhas mães postças Eva, Fátima e Ana Rosa. Vocês são uns amores!

À minha querida Consuelo... obrigada por me ouvir falar 300 vezes as mesmas coisas, por me amar, por rezar e estar sempre acreditando que eu vou conseguir.

Ao amor da minha vida, minha mãe, que me apoiou em todos os momentos, até nos sonhos mais loucos. Que me ensinou como lutar de verdade por essa vida tão difícil. Você é meu exemplo e motivação. Obrigada por tudo.

E ao meu pai, pois o seu amor é sentido até hoje apesar de tanto tempo ter se passado.

"Now is better than never."

Zen do Python

Resumo

Este estudo apresenta uma série de análises das características hidrodinâmicas de uma enseada subtropical no sul do Brasil, a Enseada do Itapocorói. Dados analisados aqui foram coletados de 3 perfiladores de corrente dispostos ao longo da áreas da enseada, cada um com diferente grau de exposição às ondulações mais energéticas, durante um período de 33 dias. Também foram analisados dados de um marégrafo localizado no sul da enseada. Os resultados indicam que a enseada pode ser dividida em dois ambientes separados: uma área interna, protegida, com correntes amenas (abaixo de 8cm.s^{-1}) e que se encontra sob a influência da brisa marinha e uma área exposta regida principalmente por ventos regionais, com a presença de uma corrente costeira estável fluindo paralela a costa na direção sul e velocidades mais elevadas (por volta de 20cm.s^{-1}). O nível meteorológico pode ser correlacionado com o vento indicando a presença de uma ressurgência costeira, com um aumento de nível associado à ventos do quadrante NE e o abaixamento de nível associado com ventos de S-SE. Também foi verificado uma tendência de empilhamento de água conforme a onda de maré entra na enseada. Correntes residuais revelaram que as correntes são predominantemente regidas pelo vento e que podem chegar a 2cm.s^{-1} , o que representa cerca de 10% da velocidade típica da enseada.

Palavras-chave: correntes de vento, enseadas, ressurgência costeira, correntes residuais.

Abstract

This study presents a sequence of analysis on the hydrodynamic characteristics of a subtropical bay on South of Brazil, the Itapocorói Bay. The data analyzed was collected by three current profilers deployed at different areas of the bay, each one with different degrees of exposure to the most energetic waves, for a 33 days period. Additionally a one year tide gauge measurement was analyzed too. Results indicated that the bay can be divided in two separate environments: a sheltered area being under the influence of diurnal sea-land breeze and mild currents (under 8cm.s^{-1}) and the exposed area being mainly driven by regional winds, with a presence of a quite stable coastal current flowing along the coast towards south and higher velocities (around 20cm.s^{-1}). Meteorological water level could also be correlated with winds indicating the presence of local upwelling, with an increase water level associated with NE winds and a decrease with SE winds. Tidal analysis indicated that there is a tendency of a water pile up as the tide wave enters the bay. Residual currents on the bay revealed that currents are mainly influenced by wind and velocities can reach up to 2cm.s^{-1} wich represents 10% of typical currents on the bay.

Keywords: wind currents, headland-bay beaches, local upwelling, residual currents.

Sumário

1	Introdução	29
1.1	Hipótese	31
1.2	Objetivos	31
1.2.1	Geral	31
1.2.2	Específicos	31
1.3	Organização do trabalho	31
2	Revisão bibliográfica	33
2.1	Maré e Circulação Residual	33
2.2	Área de estudo	38
3	Materiais e Métodos	47
3.1	Dados medidos	48
3.2	Análises e Tratamentos	52
3.2.1	Dados de nível dos ADCPs	52
3.2.2	Cálculo do número de forma	52
3.2.3	Temperatura	53
3.2.4	Interpolação	58
3.2.5	TTide	60
3.2.6	Transformada Rápida de Fourier (FFT)	60
3.2.7	Análises Vetoriais de Funções Ortogonais Em- píricas Complexas	61
3.3	Dados diversos	61
3.3.1	Linha de Costa	61
3.3.2	Batimetria	62
3.4	Modelo Numérico	64

3.4.1 DELFT3D-FLOW	64
3.5 Forçantes dos modelos	66
3.5.1 Maré	66
3.5.2 Vento	68
3.6 Avaliação dos resultados do modelo.....	68
3.7 Escolha dos cenários de análise.....	70
4 Resultados	73
4.1 Nível	73
4.2 Temperatura	86
4.3 Interação entre Nível, Temperatura e Vento	92
4.4 Corrente	94
4.4.1 Comportamento observado - Integrado na vertical	94
4.4.2 Comportamento observado - Análise por camada	98
4.4.3 Análise EOF	101
4.5 Modelo Numérico	106
4.5.1 Grade Numérica e Batimetria	106
4.5.2 Calibração.....	110
4.5.3 Mapas de Residuais	115
5 Discussão	131
6 Conclusão	137
Referências Bibliográficas	139

Lista de Figuras

2.1	Localização da Enseada do Itapocorói e dos dados a serem utilizados no presente estudo. Fonte: Google Earth 2017.	39
2.2	Efeitos da erosão em Piçarras. Fonte: Maciel (2010)..	41
2.3	Imagem do Google Earth da Praia de Piçarras de 18 de Setembro de 2015. Fonte: Google Earth.....	42
2.4	Máxima elevação do nível do mar causada por marés meteorológicas e astronômicas. Fonte: Parise, Calliari e Krusche (2009).....	44
3.1	Fluxograma da metodologia aplicada.	47
3.2	Localização das coletas de dados através de ADCPs.	51
3.3	Dados de temperatura na Enseada de Piçarras. A linha azul apresenta as variações no ponto ST001 (equipamento mais abrigado) enquanto a linha verde indica as variações no ponto ST003 (equipamento mais externo). Verifica-se que as variações de temperatura diminuem conforme a medição ocorre em águas mais profundas.....	54
3.4	Dados de temperatura na Enseada de Piçarras - detalhe. A linha azul apresenta as variações no ponto ST001 (equipamento mais abrigado) enquanto a linha verde indica as variações no ponto ST003 (equipamento mais externo). Verifica-se que as variações de temperatura diminuem conforme a medição ocorre em águas mais profundas.....	55

3.5	Dados de temperatura na Enseada de Piçarras. A linha preta representa o dado original medido em ST002 e a linha vermelha representa o resultado do filtro de média móvel.	56
3.6	Dados de temperatura na Enseada de Piçarras. A linha preta representa o dado original medido em ST003 e a linha vermelha representa o resultado do filtro de média móvel.	57
3.7	Dados medidos no ADCP ST001. Pontos em vermelho indicam que os dados foram obtidos através de interpolação linear e os dados em azul são dados medidos pelo ADCP.....	59
3.8	Localização das variáveis calculadas em uma malha do tipo Arakawa C.	66
3.9	Interface gráfica do TMD para obtenção das constituintes harmônicas calculadas pelo modelo TPXO.	67
4.1	Variação de Nível no ponto ST001 separado entre: A) dado medido B) dados de maré previsto (azul) e o residual meteorológico (vermelho).	76
4.2	Variação de Nível no ponto ST002 separado entre: A) dado medido B) dados de maré previsto (azul) e o residual meteorológico (vermelho).	77
4.3	Variação de Nível no ponto ST003 separado entre: A) dado medido B) dados de maré previsto (azul) e o residual meteorológico (vermelho).	78
4.4	Variação de Nível no Pier da Penha separado entre: A) dado medido B) dados de maré previsto (azul) e o residual meteorológico (vermelho).	79
4.5	Espectro de energia no ponto ST001. A) Sinal medido B) Sinal com eliminação de tendência C) Espectro de energia.....	82
4.6	Espectro de energia ponto ST002. A) Sinal medido B) Sinal com eliminação de tendência C) Espectro de energia.	83

4.7	Espectro de energia no ponto ST003. A) Sinal medido B) Sinal com eliminação de tendência C) Espectro de energia.....	84
4.8	Espectro de energia no Píer da Penha. A) Sinal medido B) Sinal com eliminação de tendência C) Espectro de energia.....	85
4.9	Detalhe do espectro de energia do Píer da Penha onde pode-se observar os picos referentes às constantes harmônicas semidiurnas (M2 e S2) e diurnas (K1 e O1), da direita para a esquerda, respectivamente.....	85
4.10	Dados de temperatura de fundo na Enseada do Itapocrói.....	87
4.11	A) Dados de temperatura do ponto ST001 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho); B) Valor do sinal uma vez retirada a tendência linear apresentada no painel A; C) Espectro de energia no domínio da frequência.	89
4.12	A) Dados de temperatura do ponto ST002 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho); B) Valor do sinal uma vez retirada a tendência linear apresentada no painel A; C) Espectro de energia no domínio da frequência.	90
4.13	A) Dados de temperatura do ponto ST003 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho); B) Valor do sinal uma vez retirada a tendência linear apresentada no painel A; C) Espectro de energia no domínio da frequência.	91
4.14	Comparação entre A) elevação meteorológica de nível; B) variação de temperatura; e C) intensidade e direção do vento no ponto ST001.....	93
4.15	Rosa de correntes no ponto ST001 integrada na vertical (em $cm.s^{-1}$).....	94
4.16	Rosa de correntes no ponto ST002 integrada na vertical (em $cm.s^{-1}$).....	95

4.17	Rosa de correntes no ponto ST003 integrada na vertical (em $cm.s^{-1}$).....	95
4.18	Histograma cumulativo da velocidade da corrente em $m.s^{-1}$ no ST001. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.....	96
4.19	Histograma cumulativo da velocidade da corrente em $m.s^{-1}$ no ST002. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.....	96
4.20	Histograma cumulativo da velocidade da corrente em $m.s^{-1}$ no ST003. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.....	97
4.21	EOF de correntes para o ponto ST003.	102
4.22	EOF de correntes para o ponto ST002.	104
4.23	EOF de correntes para o ponto ST001.	105
4.24	Grade numérica utilizada para o presente estudo.	108
4.25	Batimetria interpolada na grade numérica.	109
4.26	Calibração em ST001.	113
4.27	Calibração em ST002.	114
4.28	Calibração em ST003.	114
4.29	Mapa de correntes residuais para um período de 2 meses no Cenário 01.	115
4.30	Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 01	116
4.31	Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 02.....	117
4.32	Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 03.....	119
4.33	Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 04.....	120
4.34	Mapa de correntes residuais para um período de 2 meses no Cenário 05.	121
4.35	Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 05.	122
4.36	Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 06.....	123

4.37	Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 07.....	124
4.38	Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 07	125
4.39	Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de sizígia no Cenário 07	126
4.40	Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 08.....	127
4.41	Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 09.....	128
4.42	Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 10.....	130

Lista de Tabelas

2.1	Movimento estimado de turistas para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012)	39
2.2	Receita estimada em reais para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012).....	39
2.3	Principais atrativos turísticos considerados pelos turistas para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012)	39
2.3	Principais atrativos turísticos considerados pelos turistas para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012)	40
3.1	Localização dos equipamentos	50
3.2	Cartas Náuticas utilizadas	63
3.3	Configuração dos cenários de análise.	70
3.3	Configuração dos cenários de análise.	71
4.1	Características das Variações de Nível Medidas (em metros).....	74
4.2	Estatística dos valores de nível das marés meteorológicas medidas (em metros)	75
4.3	Número de Forma para cada um dos dados analisados.....	80
4.4	Porcentagem de energia em períodos acima de 50h..	81
4.5	Características dos dados de temperatura.	86

4.6	Valores de velocidade da corrente por camada das camadas mais inferiores (Camada 12) para as camadas mais de superfície (Camada 1).	99
4.6	Valores de velocidade da corrente por camada das camadas mais inferiores (Camada 12) para as camadas mais de superfície (Camada 1).	100
4.7	Propriedades da grade numérica.	107
4.8	Configurações utilizadas na calibração.....	110
4.9	Amplitude máxima do valor medido e percentual de erro do modelo para cada equipamento e parâmetro medido	112

Nomenclatura

Acrônimos e Abreviaturas

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler, eq. (3.0), pág. 49.
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis, eq. (3.1), pág. 68.
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação, eq. (3.0), pág. 52.
F	Fator de Forma, eq. (3.0), pág. 52.
FFT	Transformada Rápida de Fourier, eq. (3.1), pág. 60.
GSHHG	Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database, eq. (3.1), pág. 61.
NCEP	National Center For Environmental Prediction, eq. (3.1), pág. 68.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration, eq. (3.1), pág. 61.
RMSE	Raiz do Erro Médio Quadrático, eq. (3.1), pág. 69.
RTR	Relative Tidal Range, eq. (2.1), pág. 43.
TMD	Tidal Model Driver, eq. (3.1), pág. 67.
WDBII	CIA World Data Bank II, eq. (3.1), pág. 61.

- WVS World Vector Shorelines, eq. (3.1), pág. 61.
- ZEA Zona de Erosão Acentuada, eq. (2.1), pág. 42.

1 Introdução

Sentado numa cadeira na praia, um turista pode perceber facilmente que existe uma dinâmica na praia que o cerca. As ondas quebram incessantemente, às vezes maiores, às vezes menores, o vento varia de intensidade e direção e a faixa de areia pode se apresentar maior ou menor conforme o horário em que ela é observada. Apesar de facilmente observados, os processos costeiros que regem as dinâmicas de zonas costeiras são bastante complexos e interligados.

A zona costeira é uma região de alto dinamismo, e está sujeita a oscilações periódicas de altas e baixas frequências como ondas e marés, respectivamente. Dado que a água pode ser considerada incompressível, o volume remanescente após uma oscilação deve ser conservado e é de se esperar que as componentes geradas pela oscilação tenham uma resultante nula (LEBLOND, 1991). Entretanto, o que se observa na realidade é que a resultante das oscilações durante longos períodos (por exemplo, após um ou vários ciclos de maré) é não nula. Essa resultante pode ser causada ou amplificada por diversos parâmetros ambientais tais como: não linearidade da corrente de maré, padrão de onda predominante, direção do vento predominante, eventos de tempestade, entre outros (BROWN; BOLAÑOS; SOUZA, 2010).

As magnitudes dessas correntes residuais e de longo período normalmente são ordens de magnitude menores que as correntes de maré. No entanto, mesmo sendo muito menos intensas, a magnitude e a variação espacial e temporal dessa circulação exerce uma grande influência na interação de processos físicos, bioquímicos e sedimentares. Os processos de transporte através da

circulação residual e de longo período têm controle sobre fluxo de água doce, descarga de contaminantes, dispersão e transporte de sedimentos e nutrientes além de poderem auxiliar na manutenção ou declínio de recursos vivos (CHENG, 1990). Além disso, dependendo da variação dessa circulação, seja por sazonalidade ou pela frequência dos eventos de tempestade, a mesma também pode ter papel fundamental na morfodinâmica regional (BROWN; BOLAÑOS; SOUZA, 2010).

A Enseada do Itapocorói se destaca no cenário catarinense por sua importância turística. No entanto, a região sofre com sucessivos problemas erosivos desde a década de 70, quando a barra do rio Piçarras foi fixada (HEUVEL et al., 2008). Considerando então a importância econômica e social da Enseada do Itapocorói tanto em termos econômicos como sociais, o seu estudo é de vital importância. Visto que a circulação residual pode ter um papel importante para o entendimento do transporte de partículas, um estudo da mesma pode vir a contribuir para o entendimento da morfodinâmica de longo prazo, bem como avaliar a taxa de recirculação local, podendo colaborar para a melhora da qualidade da água. Além disso, o estudo da morfodinâmica de enseadas necessita que os processos hidrodinâmicos da região sejam bem conhecidos (SILVA et al., 2010). Dessa forma, o presente estudo visa avaliar o comportamento hidrodinâmico da região focando na circulação residual bem como o papel dos parâmetros ambientais da região em sua formação, de forma a avaliar qual parâmetro é mais relevante na modificação dessa circulação.

As correntes residuais dificilmente conseguem ser medidas em campo (CHENG, 1990) por isso, para alcançar o objetivo proposto, será feito uso da modelagem numérica e avaliação de dados de ADCP (temperatura, corrente e nível) coletados ao longo de um mês em três pontos na enseada.

1.1 Hipótese

Existe uma circulação residual típica na Enseada do Itapocorói que é gerada principalmente por um algum fator ambiental (maré ou vento), mas cujas características principais podem ser eventualmente alteradas no caso de eventos de tempestade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo geral do estudo é compreender o padrão de circulação e a circulação residual na Enseada do Itapocorói (Balneário Piçarras), bem como as variáveis ambientais que os influenciam, através da análise de dados medidos e do uso de modelagem numérica, de forma a compreender os padrões de longo prazo e as possíveis influências destes na área de estudo.

1.2.2 Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Caracterizar a circulação local através da análise das séries de fundeio;
- Definir o padrão típico da circulação residual;
- Compreender o papel dos parâmetros ambientais na modificação da circulação e qual o parâmetro dominante.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos. Os três primeiros capítulos abordam os temas bases para entendimento da problemática de circulação em enseadas e as etapas de coleta e processamento de dados utilizados na pesquisa. Os três capítulos seguintes abordam o resultado e a discussão dos resultados. Os capítulos e apêndices estão organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução dos conceitos básicos sobre circulação em enseadas e contextualização da problemática na área de estudo. Apresentam-se também a hipótese e os objetivos;

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre circulação e circulação residual com foco em ambientes de enseada e revisão bibliográfica sobre a área de estudo em particular.

Capítulo 3: Apresentação dos dados utilizados para as análises e os processos e ferramentas de trabalho utilizados no presente estudo.

Capítulo 4: Descrição dos resultados encontrados no presente trabalho.

Capítulo 5: Discussão dos resultado e contextualização dos mesmos com a literatura.

Capítulo 6: Conclusões gerais alcançadas no estudo.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Maré e Circulação Residual

As principais variações de nível ocorridas em zonas costeiras acontecem devido às oscilações causadas pelas marés, tornando-se de fundamental importância para estudos costeiros o seu conhecimento, bem como as correntes que são por elas geradas (EGBERT; EROFEEVA, 2002). Apesar de bem compreendidas num âmbito global, a onda de maré em águas costeiras tem uma dinâmica muito diferente daquela encontrada em regiões oceânicas (LEBLOND, 1991).

As marés são consideradas ondas de água rasa e, portanto, estão sempre sujeitas à influência do fundo. Entretanto, ao adentrar águas ainda mais rasas, como as plataformas continentais interna, as suas escalas laterais passam a ser reduzidas (LEBLOND, 1991). Conforme a onda de maré passa a propagar para águas costeiras ela tende a interagir e sofrer diversos processos: reflexão total ou parcial (uma vez que a linha de costa passa a agir como uma barreira), efeitos inerciais, efeitos de continuidade, perda de energia por fricção, entre outros. Dessa forma, uma vez que se encontra em águas rasas, a onda de maré se torna progressivamente não linear e dissipativa. Além disso, esses processos não lineares podem transferir energia para constituintes harmônicas de águas rasas totalmente novas (SCHUREMAN, 1958; MASSEL, 1989; PARKER, 2007). Outra consequência da redução das escalas laterais é a criação de regiões de gradiente de velocidade. Os termos inerciais passam a ganhar importância no balanço de momento e contribuem para a geração de correntes residuais e vorticidade (LEBLOND,

1991). Portanto, em águas rasas, vários processos compõem um complexo cenário a ser estudado e, por mais que os fenômenos que gerem as marés sejam muito bem conhecidos e compreendidos, os movimentos resultantes requerem um estudo mais aprofundado.

Ao se considerar a água como incompressível, independente das oscilações ocorridas, seria natural se pensar, em um primeiro momento, que o residual da circulação deveria ser nulo (LEBLOND, 1991). O que se vê na realidade é bastante distinto e a observação de longo prazo nos dá a clara predominância de uma direção indicando a presença de resultantes não nulas. A fonte mais óbvia de geração de velocidade residual é a descarga fluvial, uma vez que seu fluxo é unidirecional. Entretanto, o que se observa é que existem resultantes de velocidade mesmo em locais sem presença de rios. Diversos parâmetros ambientais podem gerar residuais de velocidade. Entre eles pode-se citar não linearidade da corrente de maré, padrão de onda predominante, direção do vento predominante, eventos de tempestade, diferença de densidade, características batimétricas ou mesmo obras costeiras (TEE, 1976; TRUCCOLO, 2009; BROWN; BOLAÑOS; SOUZA, 2010).

A circulação residual, especialmente a da maré, está normalmente relacionada a processos de longo período, com frequências baixas e velocidades uma ou duas ordens menores que as próprias correntes de maré e, assim, pode acabar sendo negligenciada por conta dessas características (CHENG, 1990). Apesar de serem consideradas irrelevantes quando comparadas com as correntes de maré, elas podem ser bastante relevantes em longo prazo dado que podem dominar o transporte e a distribuição geral de propriedades da água como temperatura e salinidade quando considerada a sua persistência. Dessa forma, sua determinação pode contribuir para o manejo costeiro (como o tempo de permanência de poluentes) ou mesmo para a proteção costeira, dado que ela também pode ter papel significativo para o transporte de partículas sedimentares (TRUCCOLO, 2009).

Parker (1991) cita os trabalhos de Hunt e Johns (1963), Huthnance (1973) e Nihoul e Ronday (1975) como os primeiros trabalhos a

proporem mecanismos de geração de correntes residuais geradas por maré. Hunt e Johns (1963) estudaram a geração de correntes de fundo induzidas por maré em águas rasas, já citando a importância de fluxos residuais tanto na circulação geral quanto em mudanças morfológicas significativas. Huthnance (1973) verificou que as forças geradoras de correntes residuais em bancos de maré no Norfolk Sandbanks foram a força de Coriolis e fricção de fundo. Nihoul e Roday (1975) mostraram que em regiões com marés expressivas os termos não lineares das equações passam a agir como uma “tensão de cisalhamento de maré” que, aliada ao vento, produz movimentos residuais.

De forma geral e simplificada, o termo circulação residual é utilizado para remeter às circulações de longo período, ou seja, o resultante da circulação uma vez que os processos atuantes são findados. No entanto é possível perceber na literatura uma certa variação em relação à sua definição.

Nihoul e Roday (1975) discutem sobre as diferentes formas como o termo circulação residual é utilizado em diferentes campos. Os autores citam que, sob um olhar matemático, as correntes residuais podem ser consideradas como o fluxo estacionário descrito pelas equações fundamentais desconsiderando os termos transientes das equações. Em se tratando do campo experimental, tende-se a definir as correntes residuais como o fluxo que sobra ao se subtrair uma maré modelada (ou prevista) de um fluxo medido. Segundo os autores, ainda existem os cientistas que consideram as correntes residuais aquelas encontradas após se realizar uma integração das correntes naturais ao longo de um período de tempo suficientemente longo, de forma a se cancelarem as contribuições da maré. Os autores afirmam que a última parece ser a mais realista.

Yanagi (1976) afirma que o fluxo estacionário (*steady-state*) é causado por diversos processos físicos como vento, gradiente de pressão atmosférica, descarga de rios, correntes de densidade, correntes de oceano aberto, força de Coriolis e marés. Especificamente, o autor considera fluxo residual de maré como aquele causado por não linearidades das correntes de maré relativas à topografia de

fundo e geometria das bordas.

Tee (1976) considera corrente residual aquela corrente que permanece após retiradas as frequências diurnas, semidiurnas ou superiores.

No estudo de Brown, Bolaños e Souza (2010) a circulação residual é tratada como a circulação instantânea que permanece após a remoção da maré astronômica da circulação total encontrada, tanto em dados medidos quanto nos modelados.

No presente estudo, será considerada como circulação residual aquela descrita como a média da circulação local em um longo período de tempo, conforme relatado por Nihoul e Roday (1975). Este termo foi definido por Imasato (1983) como velocidade residual euleriana gerada por maré e calculada conforme a equação 2.1 onde T é um período de tempo suficientemente grande para anular as componentes de maré. O recomendado é que se utilize ao menos o período de 2 ciclos de marés diurnas.

$$U_{residual}(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T U(x, y, t) dt \quad (2.1)$$

Onde,

U é a componente da velocidade;

T é o período de tempo analisado;

x, y, t são as componentes espaciais e temporal.

Verifica-se na literatura que muitos estudos são focados em circulação residual em ambientes estuarinos com enfoque especial naquela gerada pela baroclinicidade do sistema (MACCREADY; BANAS, 2010; BURCHARD et al., 2011; BROWN; BOLAÑOS; SOUZA, 2010). Poucos esforços foram feitos na tentativa de estudos de circulação residual em sistemas com predominância barotrópica. Poucos estavam relacionados à separação e avaliação da influência das componentes barotrópicas.

Valle-Levinson et al. (2000) tinham como objetivo compreender a circulação residual em uma baía semi-árida bastante semelhante

ao que se pode encontrar na Enseada do Itapocorói: orientação preferencial norte-sul, aberta para o oceano, localizada entre dois promontórios, com uma baixa descarga fluvial, regime de micro-maré semidiurna e importante centro urbano. Os autores verificaram que a circulação básica poderia ser dividida em duas: uma camada superior dominada por uma componente diurna (atmosférica e mareal) e uma camada inferior com influência diurna e semi-diurna gerada principalmente pela maré.

Já o trabalho de Brown, Bolaños e Souza (2010) tinha como objetivo compreender a contribuição de parâmetros físicos na variação temporal das correntes residuais em um ambiente estuarino fortemente influenciado pela maré e comparar a contribuição desses parâmetros, em condições normais e de tempestade, quando comparados com a maré. Os processos físicos avaliados foram: forçantes meteorológicas, baroclinicidade, descarga de rios, residual externo, marés e ondas.

O trabalho de Truccolo, Franco e Schettini (2006) verificou que em São Francisco do Sul, na região exposta às ondulações, apenas 74% da variação de nível poderia ser explicada por marés astronômicas e que 24% da variação poderia ser explicada pelas oscilações em frequência submareal. Além disso, oscilações do nível do mar em frequência submareal não podem ser completamente desconsideradas em um regime de micromaré como o encontrado no sul do Brasil, uma vez que sobre-elevações de até 1m já foram registradas na região de Itajaí (TRUCCOLO, 2009).

Dessa forma, o presente trabalho levará em consideração as variações em frequência submareal, desconsiderando frequências supramareais (e.g. ondas de gravidade) e terá como foco principal o estudo de correntes residuais barotrópicas cujos principais parâmetros ambientais serão a maré e o vento. Também se propõe contribuir nessa área de pesquisa, guiando-se pelos trabalhos de Valle-Levinson et al. (2000) e Brown, Bolaños e Souza (2010) e visando expandir os resultados encontrados por Leite et al. (2011).

2.2 Área de estudo

No contexto das zonas costeiras as praias de enseadas (*headland-bay beaches*) representam quase 51% das linhas de costa do mundo. Estas são características em regiões rochosas associadas com topografias montanhosas e cujas dimensões podem variar dependendo da topografia pré-existente parcialmente afogada durante a transgressão holocênica. Tipicamente possuem um formato assimétrico caracterizado por uma área curva denominada zona de sombra, uma área parcialmente curva transicional e uma região reta alinhada ao clima de ondas predominante (SHORT; MASSELINK, 1999).

A Enseada do Itapocorói está localizada no litoral centro-norte de Santa Catarina e engloba os municípios de Piçarras, Penha e Barra Velha (Figura 2.1). A enseada se enquadra na característica típica de uma praia de enseada, com uma área sombreada, protegida por um costão rochoso (Ponta da Penha) no formato de uma espiral e uma área mais exposta na direção das ondulações predominantes.

O principal município que constitui a enseada é a Praia de Piçarras, que possui 8 km de extensão, sendo delimitada ao norte pelo promontório de Itajuba e ao sul pela foz do rio Piçarras. Do rio Piçarras até a Ponta da Penha, esta parte do município de Penha. A praia de Piçarras tem orientação de 157 a 337° com altura de quebra de onda (Hb) de 0,4 m e período de 7 segundos (KLEIN; MENEZES, 2001).

Grande parte da economia local advém do turismo. Na maior parte do mundo, praias são o principal atrativo turístico da costa sendo que boa parte da economia de países desenvolvidos ou em desenvolvimento dependem desse tipo de turismo (KLEIN et al., 2009). No Balneário Piçarras esta tendência é bastante significativa. Em 2010 cerca de 17 mil pessoas residiam permanentemente na cidade (IBGE, 2015), porém estima-se que apenas nos primeiros três meses de 2010, mais de 133 mil turistas estiveram no município de Piçarras (Tabela 2.1) com uma receita estimada de mais de 62,5 milhões de reais (Tabela 2.2). Também verifica-se que o turismo

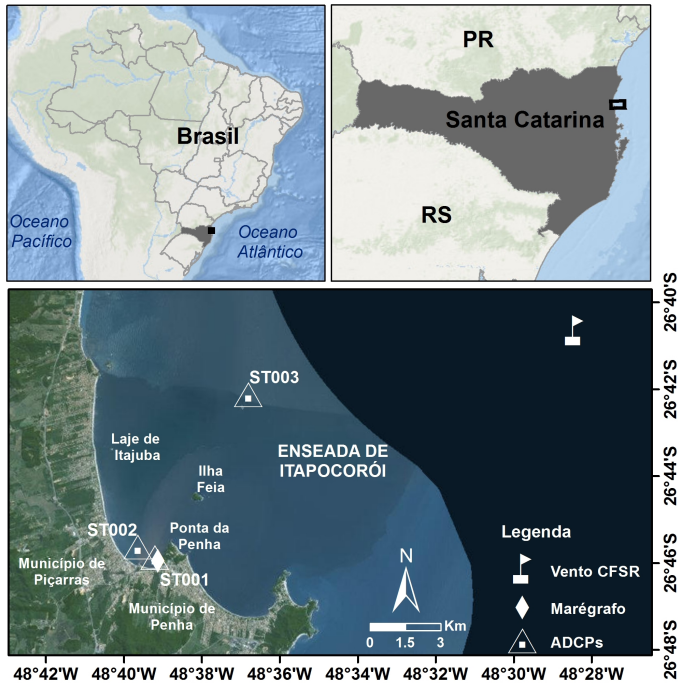


Figura 2.1: Localização da Enseada do Itapocorói e dos dados a serem utilizados no presente estudo. Fonte: Google Earth 2017.

representa mais de 50% dos motivos de viagem (SANTUR, 2012) e os atrativos naturais aparecem como o grande motivador turístico da região (Tabela 2.3).

Tabela 2.1: Movimento estimado de turistas para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012)

Origem	Janeiro	Fevereiro	Março
Nacionais	60.123	54.682	16.774
Estrangeiros	323	1.066	60
Total	60.446	55.748	16.834

Tabela 2.2: Receita estimada em reais para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012)

Tabela 2.3: Principais atrativos turísticos considerados pelos turistas para os três primeiros meses de 2010 no município de Piçarras. Fonte: SANTUR (2012)

Origem	Janeiro	Fevereiro	Março
Tratamento de Saúde	16,03%	12,86%	6,51%
At. Históricas e Culturais	2,48%	-	1,53%
Entretenimento	0,23%	-	0,39%
Compras	0,23%	-	0,38%
Religião/Peregrinação	0,22%	-	-
Visita a Amigos e Parentes	-	0,26%	-
Total	100,0%	100,0%	100,0%

Principalmente por conta desse atrativo turístico, a Enseada sofreu o mesmo processo acelerado de urbanização que o litoral centro-norte catarinense passou, em especial nos últimos 30 anos. Nesse período, houve um incremento populacional considerável e com pouca atenção, por parte das autoridades locais, aos processos costeiros que fazem parte da dinâmica da região (KLEIN et al., 2006). A praia de Piçarras, região sul da Enseada e local das maiores taxas de desenvolvimento urbano, sofre com um grande problema erosivo (Figura 2.2) e vem sendo constantemente estudada em busca de formas de mitigá-lo (HEUVEL et al., 2008; ARAUJO et al., 2010; FREITAS et al., 2010; ALMEIDA, 2013; RIBEIRO, 2014).



Figura 2.2: Efeitos da erosão em Piçarras. Fonte: Maciel (2010).

A população local afirma que os problemas erosivos começaram a ocorrer na década de 70, quando a desembocadura do rio Piçarras foi fixada (KLEIN et al., 2009). Diversas intervenções tem sido feitas para solucionar o problema erosivo, como a construção de espigões (1989 e 1994) e o engordamento praial (1999 e 2008) mas ambos os métodos não se apresentaram efetivos para a solução do problema no longo prazo (ALMEIDA, 2013). Na figura 2.3 pode-se observar na parte inferior direita a fixação da barra do rio Piçarras por dois espigões e na parte superior esquerda a presença de um espigão para retenção de sedimentos. Nota-se claramente na figura que determinadas partes da praia se apresentam muito menos extensas

que outras e que as ondas continuam a chegar em ângulo na praia.

Araujo et al. (2010) verificaram um perfil erosivo ao longo de toda a praia, mas foi observado que o sedimento removido da parte sul não estava sendo depositado na mesma proporção na direção da deriva litorânea. A principal zona de erosão, identificada como uma zona de erosão acentuada (ZEA), se situa cerca de 500 m na parte ao norte da desembocadura do Rio Piçarras. Os valores de taxa de erosão chegaram a $-14 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$ na região mais crítica da praia entre os anos de 1998 e 2008.

Almeida (2013) verificou que, independente do estado de mar, as ondas que chegam à praia são pouco energéticas e as correntes de baixa intensidade, gerando uma dinâmica constante com um transporte litorâneo contínuo de norte para sul.

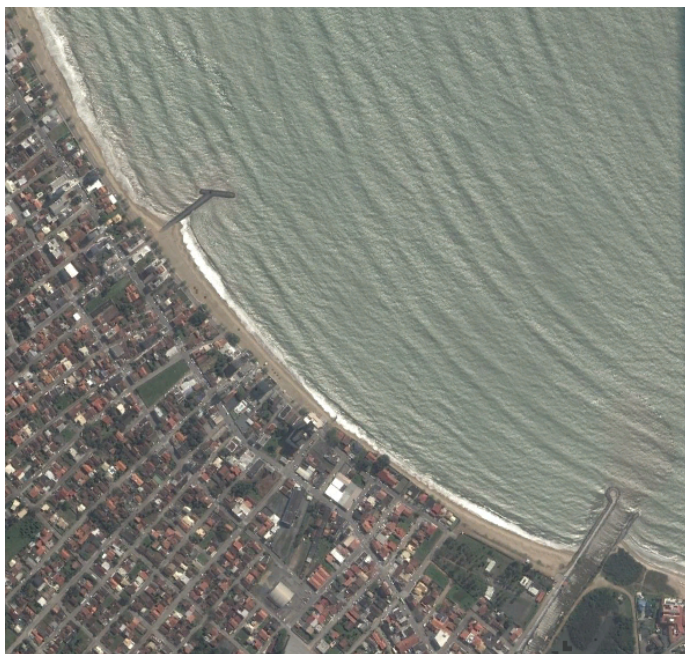


Figura 2.3: Imagem do Google Earth da Praia de Piçarras de 18 de Setembro de 2015. Fonte: Google Earth.

Klein e Menezes (2001) verificaram que, em Piçarras, o *Relative*

Tidal Range(RTR) é de 2,02, o que indica que a praia é tipicamente dominada por ondas. Isso se deve ao fato de que toda a região sul do Brasil apresenta regimes de micromarés, principalmente pela influência de um ponto anfidrômico localizado aproximadamente em 33°S e 46°W.

Valores da média da altura da maré são discrepantes na literatura. JICA (1990) reportaram valores de 0,51m para as sizígias e 0,13 para as quadraturas enquanto Schettini et al. (1999) afirmam valores de 1,2 m e 0,3 m, respectivamente. A região é classificada como regime de micro-maré semi-diurno (SCHETTINI et al., 1999). No entanto, análises feitas pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantábria indicaram que a maré pode alcançar 1,83 m (ALMEIDA, 2013). Dados da estação maregráfica da UNIVALI indicam que também existe a presença de seiches em frequências sub-horárias (SCHETTINI et al., 1999).

Devido ao regime de micromarés do sul do país, as marés meteorológicas passam a ter uma grande importância na dinâmica local. Parise, Calliari e Krusche (2009) verificaram que entre Junho de 2006 e Julho de 2007, 23 eventos de marés meteorológicas foram registrados na praia do Cassino, extremo sul do Brasil. As marés meteorológicas alcançaram, em média 1 m de elevação acima da maré astronômica com uma medição máxima de 1,9 m. Os autores também verificaram que ventos de sudoeste estiveram presente em 70% dos casos de sobrelevação, uma vez que a orientação nordeste-sudoeste da costa do Rio Grande do Sul e o efeito de Coriolis favorece efeitos de elevação. É importante citar que os autores também verificaram que as maiores erosões costeiras eram provenientes de marés meteorológicas com maior duração e não com maior elevação. Esse resultado reforça a importância de estudos de longo prazo para avaliação do efeito cumulativo na dinâmica praial.

As principais forças do regime de corrente na Enseada são a maré e o vento, porém ficando em velocidades baixas, usualmente inferiores a 10cm.s^{-1} nas áreas internas (SCHETTINI et al., 1999; LEITE et al., 2011) podendo chegar a 30cm.s^{-1} nas áreas externas

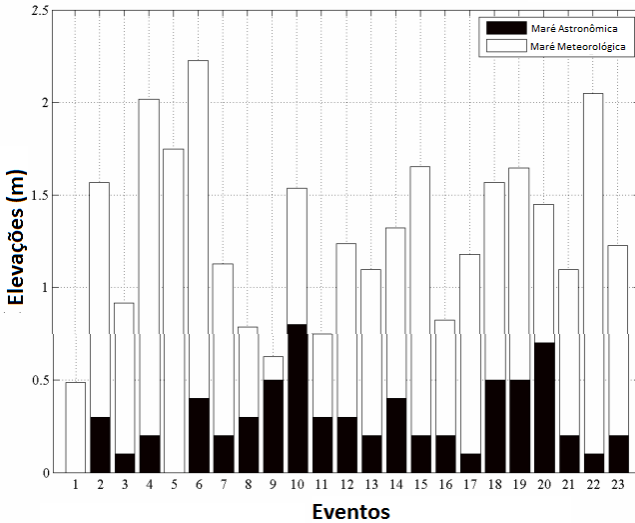


Figura 2.4: Máxima elevação do nível do mar causada por marés meteorológicas e astronômicas. Fonte: Parise, Calliari e Krusche (2009).

(JICA, 1990). Estudos anteriores verificaram que a circulação local é, no entanto, muito mais influenciada pelos regimes de vento do que pela maré e esta só passa a ser dominante no caso de ventos fracos ou ausentes (SCHETTINI et al., 1999; LEITE et al., 2011). Também foi verificado que existe uma forte presença de ventos de L-O em áreas internas da enseada, associados com as brisas marinhas, enquanto a componente N-S tem uma maior energia e períodos de 6 a 7 dias (SCHETTINI et al., 1999). Leite et al. (2011) encontraram a presença de dois vórtices gerados dentro, na parte abrigada da enseada, com direções variando conforme o sentido do vento e pouca influência da maré. Normalmente ventos do quadrante sul geram um vórtice no sentido anti-horário na parte sul da área protegida pelo promontório enquanto ventos de NE geram um vórtice pequeno e esporádico de sentido horário e localizado próximo do promontório da Ponta da Penha.

O litoral de Santa Catarina é submetido regularmente à passagem de frentes frias, normalmente com trajetória sudoeste para nordeste

que afetam todo o litoral da América do Sul. O ar frio e é trazido pela aproximação de anticiclones que se deslocam sobre a Argentina e avançam sobre o Brasil (MONTEIRO, 2001). Rodrigues, Franco e Sugahara (2004) verificaram que em 10 anos, 429 frentes frias puderam ser identificadas em Santa Catarina com uma média de 3 a 4 frentes ocorrendo em todos os meses do ano. Entretanto, os autores também verificaram que existe uma leve tendência de aumento das frentes frias na primavera (cerca de 30% das ocorrências, com uma média de 12,6 frentes frias). O intervalo médio entre duas passagens consecutivas de frentes é de 8 dias, porém mais de 50% das frentes frias atingem o litoral catarinense entre 3 a 8 dias.

As ondulações também são bastante importantes na região, especialmente no setor norte. Devido ao posicionamento abrigado, a parte sul da Enseada é protegida das ondulações mais energéticas provenientes do quadrante S, permanecendo na maior parte do tempo sujeita à ondulações de NE com alturas modestas e períodos inferiores a 8 s (SCHETTINI et al., 1999).

Ribeiro (2014) avaliou dados de ADCP coletados entre agosto e setembro de 2011 e notou uma ausência de ondulações provenientes de NE durante este período. O autor encontrou períodos de pico oscilando entre 12 s, referentes a ondas mais longas de sudeste, e 8 s, referentes a ondas geradas mais próximo da costa, associadas à direção E.

Ramirez (2010) encontrou que as correntes exibem o mesmo comportamento tanto em ondas de altura média como extrema e variam apenas em intensidade. A autora descobriu também que correntes são quase nulas quando as ondulações são oriundas de S e que ondas incidentes de ESE e ENE têm as menores intensidades daquelas vindas do quadrante E, principalmente devido à orientação da praia.

Muitos estudos realizados na Enseada do Itapocorói focaram no estudo da morfodinâmica local (KLEIN; MENEZES, 2001; ARAUJO et al., 2010; RAMIREZ, 2010; OLIVEIRA, 2013), no padrão de ondas (RIBEIRO, 2014) e nos perigos costeiros e evolução da linha de

costa (FREITAS et al., 2010; SILVA, 2012). Estes estudos foram estimulados pelo grande problema erosivo que a enseada apresenta bem como pela característica de predominância dos efeitos de onda na região. Entretanto, em praias de enseada a dinâmica é dominada por ondas em períodos curtos, como alguns estados de mar ou tempestades (SILVA et al., 2010) porém a circulação residual gerada pela maré e/ou vento pode ter um efeito cumulativo no longo prazo (BROWN; BOLAÑOS; SOUZA, 2010). Dessa forma, visando complementar os estudos anteriores, a presente pesquisa pretendeu atuar no estudo de padrões residuais na enseada, tomando o trabalho de Schettini et al. (1999) e Leite et al. (2011) como referência principal da dinâmica da região. Almejou-se que esta análise contribua para a compreensão do tempo de recirculação, que pode contribuir para a compreensão dos processos dinâmicos e, possivelmente contribuir com os estudos morfodinâmicos que buscam entender o processo erosivo da região.

3 Materiais e Métodos

Dado os objetivos propostos pelo presente estudo, a figura 3.1 apresenta o fluxograma da metodologia aplicada para alcançar os objetivos.

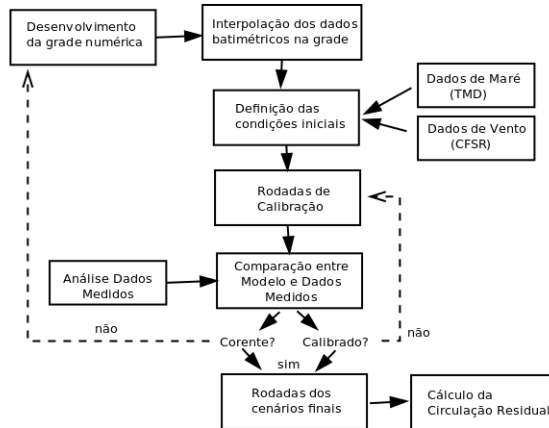


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia aplicada.

A primeira etapa foi desenvolver uma grade numérica e interpolar a batimetria nesta grade. Concomitantemente, foram avaliados os dados de três perfiladores acústicos que serão usados para a calibração do modelo. O objetivo dessas análises foi avaliar a consistências dos dados, compreender melhor o comportamento encontrado e desenvolver análises estatísticas para melhor compreender a hidrodinâmica da região de estudo em termos pontuais. Também foram feitas análises em dados de um marégrafo localizado no Píer da Penha, parte sul da enseada.

Os dados utilizados como forçantes do modelo foram dados de maré do TPXO e dados de vento do CFSR/NCEP. Detalhes sobre cada um dos dados utilizados como forçante serão descritos nas seções que seguem. O resultado desse modelo será comparado com os dados medidos pelos perfiladores acústicos, para avaliar a acurácia do modelo. Esse processo é denominado calibração e assume-se que, quanto menor a diferença entre o dado modelado e medido, melhor é o modelo (WAVEREN et al., 2010). Dessa forma, ao se atestar a confiabilidade dos dados em um ou mais pontos, assume-se que os processos reproduzidos em todo o domínio foram corretamente reproduzidos de forma a gerar resultados coerentes naquele(s) ponto(s) e, portanto, que o modelo está adequado, dentro de suas limitações, a reproduzir a dinâmica da área de interesse.

Os erros entre os dados simulados e os dados medidos podem existir por diversos problemas: erros conceituais nas simplificações assumidas pelos modelos, parâmetros inadequados, erros de forçantes ou problemas de aquisição dos dados medidos. Dessa forma, a ideia geral da calibração é modificar parâmetros do modelo de modo a otimizar os resultados do modelo. Esse é um processo iterativo e deve ser realizado até que o valor de erro esteja dentro de um limite aceitável (WAVEREN et al., 2010).

Após a obtenção de um modelo calibrado, serão realizadas rodadas com as configurações finais. Serão feitos esquemas conforme descrito em Brown, Bolaños e Souza (2010), onde o modelo será rodado em uma condição "simples" (apenas com maré) e outros serão rodados com diferentes forçantes associadas, de forma a avaliar a contribuição de cada uma. O resultado encontrado será comparado àqueles obtidos através das análises dos dados dos perfiladores acústicos.

3.1 Dados medidos

Foram coletados dados de temperatura, pressão, corrente e ondas com perfiladores acústicos do tipo *Acoustic Doppler Current Profiler*

(ADCP) da marca Nortek, sendo dois deles do modelo AWAC 1MHz (ST001 e ST002) e um do tipo AWAC 600kHz utilizado no ponto ST003. Os dados de ondas não serão utilizados no presente trabalho e mais informações a este respeito podem ser encontradas no trabalho de Ribeiro (2014).

Os perfiladores acústicos utilizam-se do efeito Doppler para avaliar a direção e a velocidade das correntes com base na modificação de um sinal sonoro de alta frequência ao ser refletido em partículas suspensas do fluido em movimento. O ADCP consegue avaliar essa diferença de velocidade entre o pulso emitido e o refletido em diferentes intervalos de profundidade, denominado células. A suposição básica desse método é que as partículas em suspensão deslocam-se com a mesma velocidade do fluxo de água (MÖLLER; ABE, 2011). De forma simples, a velocidade é dada por:

$$F_D = -2F_s \frac{V}{c}$$

onde,

F_d é a mudança na frequência de transmissão;

V é a velocidade relativa entre a fonte e o alvo;

c é a velocidade de propagação do som;

F_s é a frequência de transmissão do som.

Os perfiladores acústicos podem ser usados basicamente de duas formas: da forma estática, onde são feitas medições eulerianas de dados e o equipamento é instalado em um ponto fixo (pilares, pontes ou fundeados) ou de forma dinâmica quando o mesmo é instalado no casco de uma embarcação. Quando instalados da forma dinâmica se faz necessário um sistema rastreador do fundo (*bottom tracking*) para descontar a velocidade da embarcação (MÖLLER; ABE, 2011).

Foram instalados três perfiladores acústicos do tipo ADCP na região da Enseada do Itapocorói em pontos fixos (fundeados), de forma a se obter uma medição euleriana de dados (Figura 3.2). Os equipamentos foram dispostos em diferentes níveis de exposição às ondulações mais intensas: abrigado (ST001), semi-exposto (ST002) e exposto (ST003) de acordo com as coordenadas dispostas na tabela 3.1 e no mapa da figura 3.2.

Tabela 3.1: Localização dos equipamentos

Equipamento	Latitude	Longitude	Profundidade
ST001	26° 46' 5,79"S	48° 39' 15,58"W	4m
ST002	26° 45' 51,74"S	48° 39' 42,37"W	7m
ST003	26° 42' 18,36"S	48° 36' 56,70"W	17m

Os equipamentos foram fundeados voltados para cima (*upward-looking*) e configurados para adquirirem informações com intervalos de 30 minutos. As medições de pressão (nível) e temperatura foram coletadas de forma instantânea (medidas pontuais) enquanto que as medições de corrente são resultados de uma média de 5 minutos de aquisição.

Os dados passaram por diversos processos de análise de consistência descritos em Ribeiro (2011) e obtiveram uma taxa de recuperação dos dados acima de 96% para todos os parâmetros coletados (corrente, onda, temperatura e pressão) nos 3 ADCPs. Os dados já foram usados nos trabalhos de Ribeiro (2014) e Oliveira (2013) e podem ser considerados de ótima qualidade para utilização no presente trabalho.

Também foram utilizados dados de um marégrafo localizado no sul da enseada, no Píer da Penha, coletado entre 6 de Outubro de 1995 e 31 de Dezembro de 1996. Os dados foram resultado de um trabalho da Universidade do Vale do Itajaí e já tinham sido processados e tratados por inconsistências.

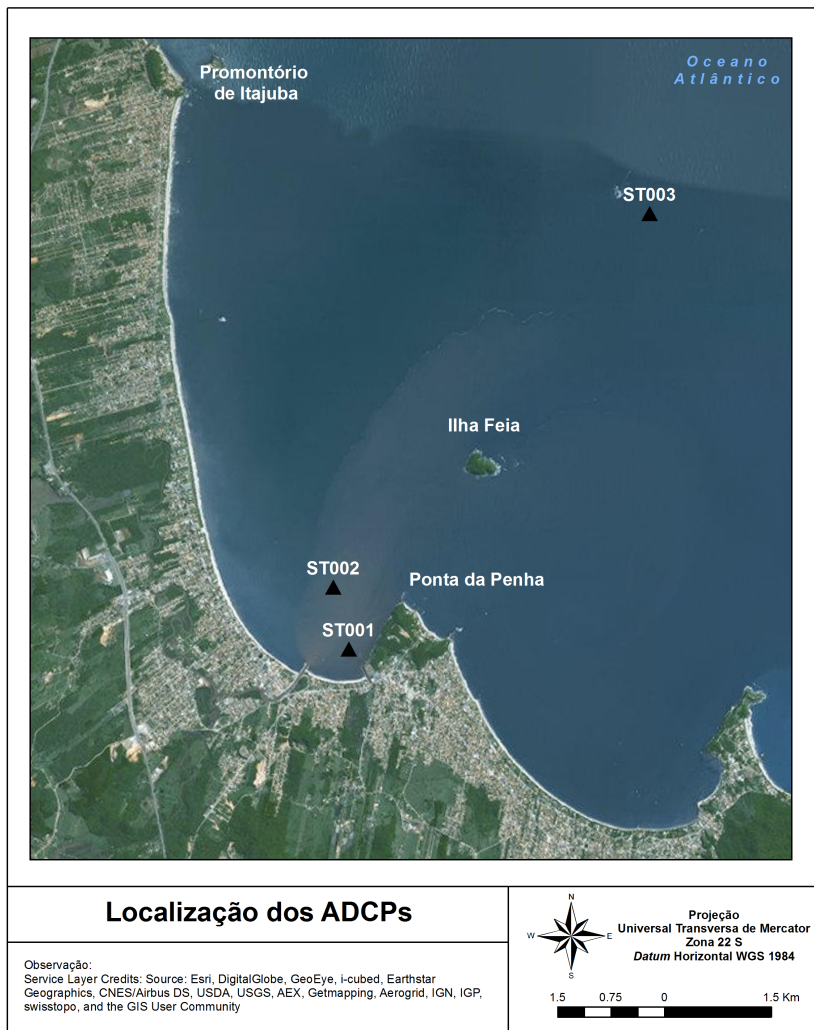


Figura 3.2: Localização das coletas de dados através de ADCPs.

3.2 Análises e Tratamentos

3.2.1 Dados de nível dos ADCPs

Como a medição de nível tem influência da profundidade onde o ADCP foi instalado, existe uma diferença entre as profundidades nos três pontos medidos. Para normalizar os dados e conseguir uma real comparação entre as medições obtidas nos três equipamentos, a média do nível de cada aparelho foi obtida e subtraída da série, de forma que as curvas estivessem em relação ao nível zero DHN.

3.2.2 Cálculo do número de forma

A importância relativa das constituintes diurnas e semidiurnas pode ser expressa pelo número de Forma (*Form Factor*, F) de acordo com as constantes harmônicas. No presente trabalho foi utilizada a fórmula definida por Pugh (1987):

$$F = \frac{H_{K1} + H_{O1}}{H_{M2} + H_{S2}} \quad (3.1)$$

Onde:

H_{K1} : é a amplitude da componente lunisolar diurna;

H_{O1} : é a amplitude da componente principal lunar diurna;

H_{M2} : é a amplitude da componente principal lunar;

H_{S2} : é a amplitude da componente principal solar.

e:

Se F estiver entre 0 e 0,25 a maré tem forma semidiurna;

Se F estiver entre 0,25 e 1,5 a maré é considerada mista com predominância semidiurna;

Se F estiver entre 1,5 e 3 a maré é considerada mista com predominância diurna;

Se F for maior que 3 a maré é puramente diurna.

3.2.3 Temperatura

Os dados de temperatura de fundo obtidos pelos ADCPs podem ser observados na figura 3.3. É notável que, nos dados do ponto ST002 e ST003 existe uma frequência muito alta que prejudica sua visualização mais detalhada. Esta variação de alta frequência poderia estar relacionada a variações diárias, mas, ao se observar os dados de forma mais atenta (Figura 3.4) verificou-se que os dados apresentam um padrão em formato serrilhado, não condizente com esse tipo de dado. Dessa forma, assumiu-se que os dados de temperatura nos pontos ST002 e ST003 apresentam erros de medição e buscou-se aplicar uma média móvel para que os mesmos apresentassem um padrão mais natural. O resultado detalhado do filtro aplicado pode ser observado na figura 3.5 e 3.6.

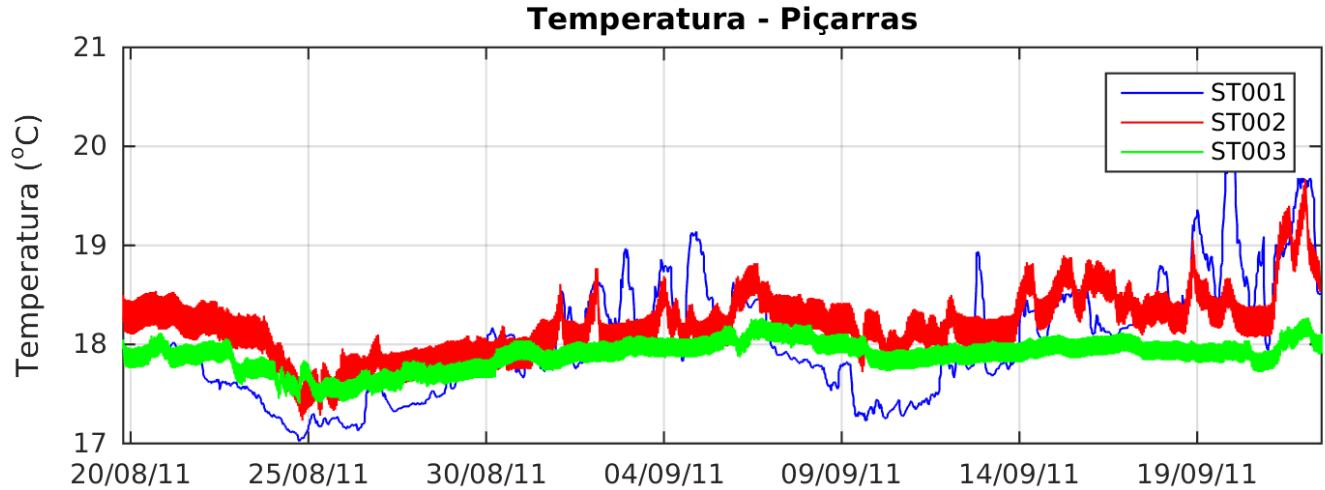


Figura 3.3: Dados de temperatura na Enseada de Piçarras. A linha azul apresenta as variações no ponto ST001 (equipamento mais abrigado) enquanto a linha verde indica as variações no ponto ST003 (equipamento mais externo). Verifica-se que as variações de temperatura diminuem conforme a medição ocorre em águas mais profundas.

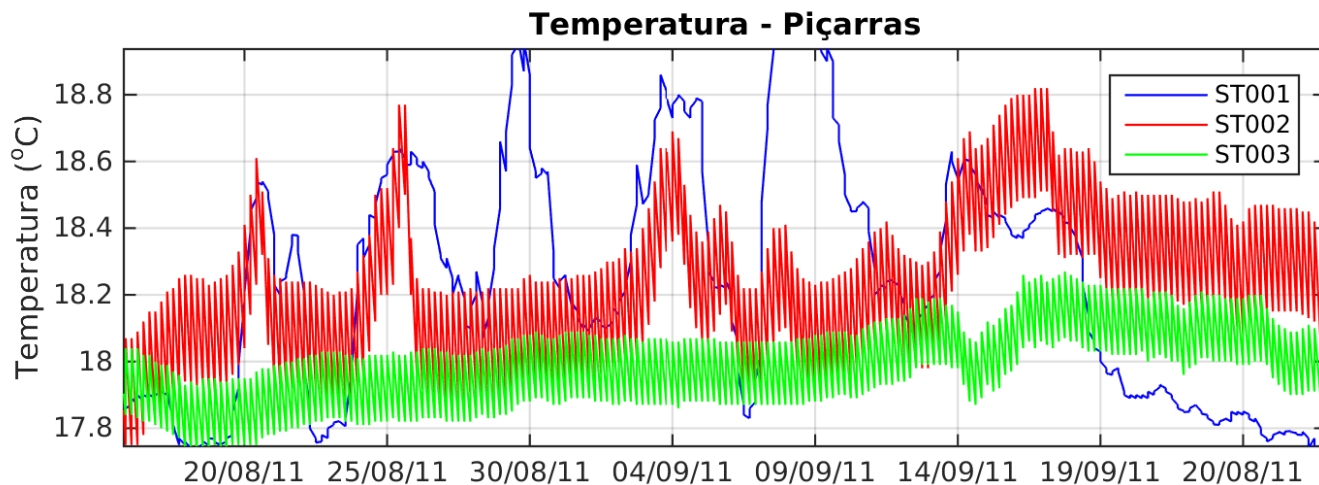


Figura 3.4: Dados de temperatura na Enseada de Piçarras - detalhe. A linha azul apresenta as variações no ponto ST001 (equipamento mais abrigado) enquanto a linha verde indica as variações no ponto ST003 (equipamento mais externo). Verifica-se que as variações de temperatura diminuem conforme a medição ocorre em águas mais profundas.

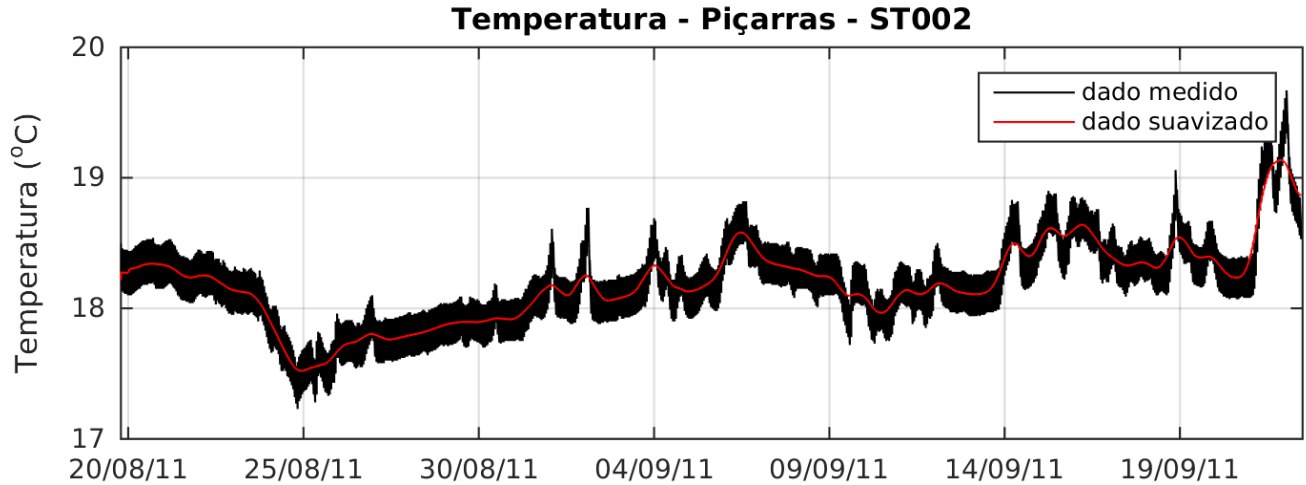


Figura 3.5: Dados de temperatura na Enseada de Piçarras. A linha preta representa o dado original medido em ST002 e a linha vermelha representa o resultado do filtro de média móvel.

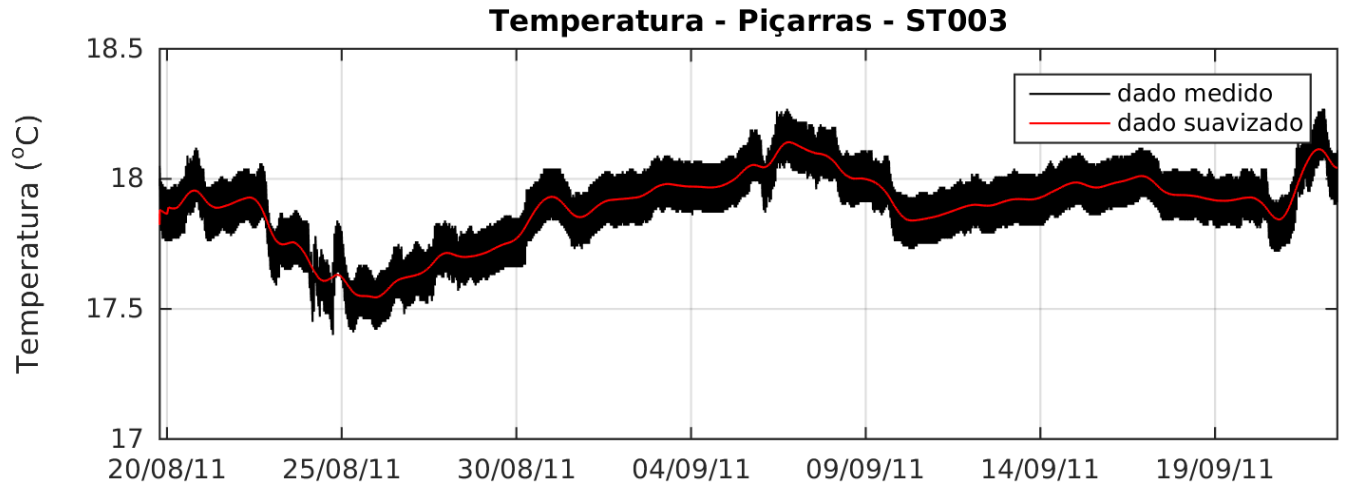


Figura 3.6: Dados de temperatura na Enseada de Piçarras. A linha preta representa o dado original medido em ST003 e a linha vermelha representa o resultado do filtro de média móvel.

3.2.4 Interpolação

Durante as medições dos perfiladores acústicos, alguns dados não puderam ser coletados e, portanto, as séries temporais continuam interrupções (dados ausentes). Em geociências, a ausência de dados em uma série temporal traz uma série de problemas, tornando algumas análises muito complexas para serem aplicadas, principalmente análises espectrais (KONDRASHOV; GHIL, 2006).

Junninen et al. (2004) verificou que métodos univariados como interpolação linear atingem bons resultados em séries com poucos dados ausentes e que, portanto, pode ser considerado um excelente método para este tipo de variável. Dessa forma, dado que a quantidade de dados faltantes era esparsa, representando menos de 5% da série temporal, e não havia sucessão de dados ausentes, escolheu-se utilizar a interpolação linear simples para suprir os dados que não foram medidos pelos ADCPs. A figura 3.7 apresenta um exemplo dos dados medidos e da quantidade de dados faltantes no ponto de coleta ST001.

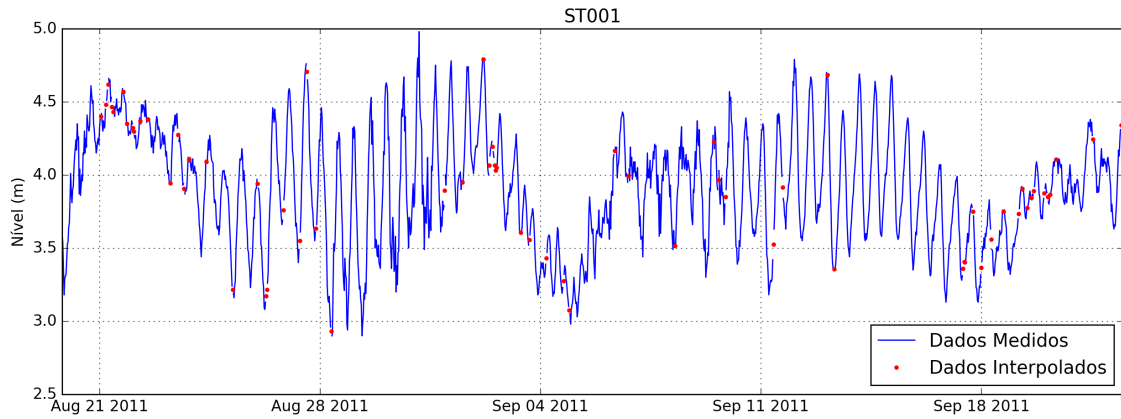


Figura 3.7: Dados medidos no ADCP ST001. Pontos em vermelho indicam que os dados foram obtidos através de interpolação linear e os dados em azul são dados medidos pelo ADCP.

3.2.5 TTide

Existe uma série de problemas associados com utilizar análises harmônicas clássicas para análise de sinais de maré. Visando corrigir e melhorar as análises harmônicas em sinais de maré, Pawlowicz, Beardsley e Lentz (2002) fizeram o pacote T_TIDE, que consiste em uma série de rotinas para análise harmônica clássica porém com algumas correções e opções para os usuários. A partir desse pacote, foi possível definir as constantes harmônicas presentes nos dados, bem como sua amplitude e fase. O modelo também consegue reconstituir o sinal harmônico do período medido. Uma vez que é possível obter o sinal astronômico do sinal, subtraiu-se o sinal astronômico calculado do sinal medido e obteve-se o residual, aqui considerado como a componente meteorológica do sinal.

3.2.6 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A Transformada Rápida de Fourier (do inglês, FFT) é um método de aplicação da Transformada Discreta de Fourier (do inglês, DFT) de modo a se alcançar eficiência computacional. A ideia da metodologia da DFT é decompor um sinal (ou uma série temporal) em termos de funções de base sinusoidal (seno e cosseno) multiplicadas por amplitudes. Dessa forma, é possível avaliar o sinal no domínio da frequência, onde determinadas tendências que não podem ser identificadas no domínio do tempo podem ser mais facilmente identificadas (COCHRAN et al., 1967). Entretanto, o método da DFT espera que haja um número infinito de pontos na série temporal para serem analisados, o que é impossível. A FFT é uma metodologia que permite trabalhar a DFT em séries finitas (COCHRAN et al., 1967). Essa análise foi utilizada no presente trabalho para avaliar o sinal medido de nível e temperatura em no domínio da frequência.

3.2.7 Análises Vetoriais de Funções Ortogonais Empíricas Complexas

A análise de função ortogonais empíricas (EOF, em inglês) foi aplicada nos dados atuais para entender sua estrutura vertical. O principal objetivo da EOF é decompor um conjunto de dados multi-variável em suas principais componentes, de modo que a variância de um dado pode ser descrita por alguns modos ortogonais (LEE, 2003). Isso fornece um método eficiente para facilitar a observação de propriedades principais uma vez que pode dar uma exibição de tempo e de espaço para um campo de espaço-tempo (HANNACHI; JOLLIFFE; STEPHESON, 2007). Este método estatístico está sendo usado pelas ciências naturais desde a década de 80 e está muito difundido hoje em dia para fornecer pistas sobre a física e a dinâmica do sistema em estudo (HANNACHI; JOLLIFFE; STEPHESON, 2007).

3.3 Dados diversos

3.3.1 Linha de Costa

A linha de costa utilizada no presente trabalho foi obtida no banco de dados GSHHG (Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database) da NOAA. Este tem como base dois bancos de dados de domínio público: o World Vector Shorelines (WVS) e a CIA World Data Bank II (WDBII) e podem ser gratuitamente obtidos em formato ESRI de Shapefile ou em formato binário. Os dados do GSHHG incluem 4 níveis hierárquicos fronteira entre o continente e o oceano (L1), fronteira entre lagos e terras (L2), fronteira entre ilhas lacustres e lagos (L3) e fronteiras entre lagos internos e ilhas (L4). Cada um desses níveis está disponível em cinco resoluções diferentes: grosseira (crude), baixa (low), intermediária (intermediate), alta (high) e máxima (full). Os dados foram adquiridos em dezembro de 2015 através do endereço <<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html>>.

3.3.2 Batimetria

Foram utilizadas cartas náuticas da DHN obtidas através do endereço <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html>. Foram utilizados dados pontuais de batimetria e isóbatas para refinar o detalhamento da batimetria do modelo das cartas náuticas listadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Cartas Náuticas utilizadas

Número da Carta	Nome	Escala
30	Costa Sueste da América do Sul	1:3.500.000
90	Da Ilha de Santa Catarina a Maldonado	1:990.526
23300	De Paranaguá a Imbituba	1:300.000
21070	Do Cabo Frio ao Cabo de Santa Marta Grande	1:1.000.000
1910	Da Ilha da Coral ao Cabo de Santa Marta Grande	1:100.211
1902	Proximidades da Ilha de Santa Catarina	1:100.928
1801	Porto de Itajaí	1:15.000

Na região próxima da costa na Enseada do Itapocorói foram utilizados dados de batimetria coletados pela Universidade Federal de Santa Catarina e Universidade do Vale do Itajaí no período de 02/11/2011 a 06/11/2011. Todos os procedimentos de coleta e tratamento dos dados estão descritos em Bitencourt e Silva (2011).

Todos esses dados foram interpolados do mais recente e detalhado (medida em 2011) até o mais esperso (Carta No. 30), de forma que a batimetria interpolada fosse construída dando prioridade aos dados recentes. Os dados foram normalizados para o datum vertical do 0 DHN.

3.4 Modelo Numérico

3.4.1 DELFT3D-FLOW

O Delft 3D é um modelo numérico desenvolvido pela WL Delft Hydraulics em cooperação com a Universidade de Delft de Tecnologia e constitui um avançado sistema integrado de modelos numéricos adequados para estudos multidisciplinares de sistemas complexos como áreas costeiras, rios e áreas estuarinas. O modelo possui diversos módulos que podem ser acoplados para gerar simulações de fluxo, transporte de sedimento, geração e propagação de ondas curtas, qualidade de água, evolução morfológica e ecologia (DELTARES, 2014). No cerne do Delft3D está o módulo FLOW, que faz as computações hidrodinâmicas.

O módulo Delft3D-FLOW é um módulo para simulações hidrodinâmicas e de transporte. Este calcula fluxos não estacionários e fenômenos de transporte que são resultados de forçantes mareais e meteorológicas em grades complexas, retilíneas e curvilíneas. Este módulo inclui diversos processos como cisalhamento de vento (*wind shear*), forçantes de onda, forçantes de maré, fluxos gerados por densidade, estratificação por gradientes de salinidade e/ou temperatura, modificações de pressão atmosférica, entre outros. Isso faz com que o modelo seja capaz de ser aplicado em uma grande gama de situações costeiras (LESSER et al., 2004), e já foi utilizado em diversos estudos (HU et al., 2009; HU; DING,

2009; LEONARDI et al., 2013; HORSTMAN; DOHMEN-JANSSEN; HULSCHER, 2013).

O modelo utiliza-se de equações de águas rasas não-estáveis (*unsteady*) em duas (integradas na vertical) ou três dimensões. O sistema de equações consiste nas equações horizontais de momentum, a equação da continuidade, a equação de transporte e o modelo de fechamento turbulento. A equação de momentum vertical é reduzida à pressão hidrostática, uma vez que se assume que as acelerações verticais são pequenas quando comparadas às acelerações gravitacionais e, portanto, não são levadas em consideração. Ele se torna, então, adequado para prever fenômenos de transporte onde as escalas horizontal e temporal são significativamente maiores que as escalas verticais (LESSER et al., 2004).

Na horizontal é utilizado um modelo tradicional e centralizado de aproximações de diferenças finitas de segunda ordem, num esquema do tipo Arakawa C (ARAKAWA; LAMB, 1977). Neste esquema, as velocidades são calculadas nas bordas da célula enquanto variáveis escalares são calculadas no centro da célula de cálculo. Dessa forma, cada uma das variáveis (u , v e $zeta$) tem uma matriz de coordenadas independente. A figura 3.8 apresenta o padrão típico de uma grade no Delft.

Cada representação inserida na figura pode ser identificada abaixo:

linhas cheias representam a grade numérica

área cinza representa os itens com os mesmos índices de grade (m , n)

+ representa a localização dos parâmetros de nível, concentração de constituintes, salinidade e temperatura

| representa a localização da componente horizontal da velocidade na direção x

| representa a localização da componente horizontal da velocidade na direção y

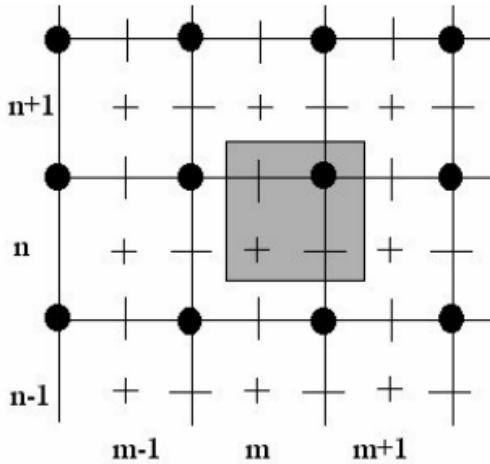


Figura 3.8: Localização das variáveis calculadas em uma malha do tipo Arakawa C.

● representam os valores de profundidade

Dado que a área de estudo apresenta-se em uma região com pouca influência estuarina e constitui-se de uma área aberta, onde a coluna de água tende a ser homogênea, optou-se por utilizar a versão bidimensional (2D) do modelo.

3.5 Forçantes dos modelos

3.5.1 Maré

Os dados de maré que foram utilizados para forçar o modelo hidrodinâmico foram obtidos do projeto *OSU TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO* disponíveis em Egbert e Erofeeva (2015). O TPXO é um modelo global de marés com resolução de $1/4^\circ$ de grau (aproximadamente 28 km) que permite obter as constantes harmônicas.

Ele foi inicialmente idealizado por Egbert, Bennet e Foreman (1994) que desenvolveram um método inverso generalizado para combinar as equações hidrodinâmicas, as quais os campos de

velocidade e elevações devem atender, e dados de marés medidos e obtidos através de imagens de altimetria. Dessa forma, os autores conseguiram inserir dados de altimetria em um modelo barotrópico através da diminuição dos erros, pelo método de mínimos quadrados, entre os dados reais e as equações de águas rasas linearizadas. No entanto, esse processo demandava muito tempo computacional, já que as equações deveriam ser calculadas duas vezes para cada observação (uma avançada e uma atrasada no tempo). Egbert e Erofeeva (2002) desenvolveram um método para implementar o modelo inverso generalizado de Egbert, Bennet e Foreman (1994) de forma mais eficiente computacionalmente e este é o método usado hoje nas versões mais modernas do TPXO (7.2).

Através desse modelo é possível obter oito constituintes harmônicas principais: quatro semi-diurnas (M2, S2, N2, K2) e quatro diurnas (K1, O1, P1, Q1), duas constituintes de longo período (Mf e Mm) e três constituintes não lineares (M4, MS4, MN4). Os resultados do modelo são facilmente acessíveis através de uma interface gráfica desenvolvida em ambiente MATLAB e denominada *Tidal Model Driver* (TMD). A versão mais moderna do modelo (7.2) e o TMD estão disponibilizados gratuitamente no endereço: <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>.

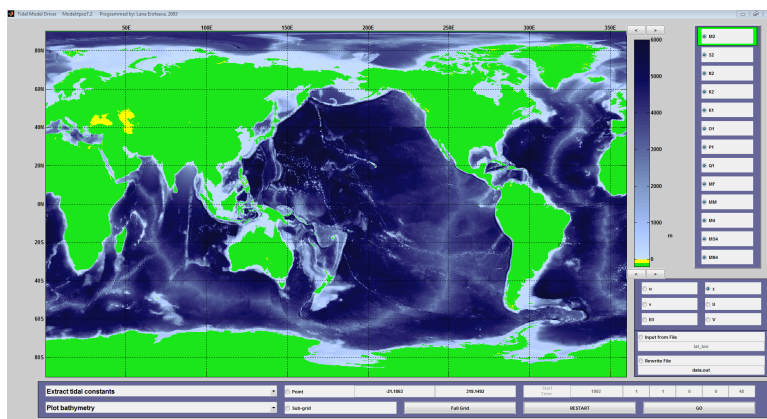


Figura 3.9: Interface gráfica do TMD para obtenção das constituintes harmônicas calculadas pelo modelo TPXO.

3.5.2 Vento

Para a forçante do modelo numérico os dados de ventos utilizados foram obtidos do modelo de reanálise do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR).

O propósito geral de modelos de reanálise é produzir representações globais plurianuais acuradas de condições atmosféricas, geradas por um modelo e uma aquisição constante de dados que passam a ser incorporados ao sistema. Pode-se dizer que em um dado momento t é o resultado de uma curta previsão iniciada por uma análise passada ($t - \Delta t$), modificada por assimilação de dados em uma pequena janela centrada em t . Por convenção a janela Δt é de seis horas. Dessa forma, toda nova reanálise é beneficiada por todas as reanálises anteriores e os erros têm mais chances de serem descobertos e corrigidos nos resultados posteriores (SAHA et al., 2010).

O CFSR é um modelo de reanálise mais recente, cuja primeira versão foi lançada em 2004, abrange o período de 1981 até 2011. Em Março de 2011, foi lançada a versão 2 do sistema, com maior resolução, apresentando uma série de dados disponíveis a partir de 01 de Janeiro de 2011. O modelo de reanálise tem módulos de interação entre a atmosfera, os oceanos, a terra e o gelo marinho. A nova série tem resoluções horizontais de $0,2^\circ$, $0,5^\circ$, 1° e $2,5^\circ$ e dados horários (SAHA et al., 2011). Para o presente trabalho serão utilizados apenas os dados referentes à segunda versão do modelo.

Os resultados estão disponíveis e podem ser gratuitamente adquiridos no seguinte endereço: <<http://rda.ucar.edu/datasets/ds094.1/>>.

3.6 Avaliação dos resultados do modelo

A performance do modelo será avaliada conforme os cálculos propostos por Fox (1981) e Wilmott (1982). Estima-se que variações na ordem de 10% da amplitude de variação do parâmetro modelado sejam aceitáveis.

Fox (1981) descreve os esforços da Sociedade Meteorológica Americana (AMS) para desenvolver técnicas de avaliação de performance de modelos atmosféricos. Dois tipos principais de mensuração de performance foram encontrados: medidas das diferenças (ou residuais) e medidas de correlação. O primeiro diz respeito a uma quantificação do tamanho da diferença entre valores medidos e modelados. Medidas de correlação avaliam a associação ou concordância entre os valores medidos e modelados. O autor afirma que o primeiro é mais coerente com a teoria estatística.

Wilmott (1982) avaliou as medidas propostas por Fox (1981) e verificou que a Raiz do Erro Médio Quadrático (em inglês, RMSE) é uma das medidas que melhor conseguem avaliar a performance de modelos. Seu cálculo é dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (3.2)$$

Onde,

O são os dados observados;

M são os dados modelados;

$$M'_i = M_i - \bar{O};$$

$$O'_i = O_i - \bar{O}.$$

Buscou-se alcançar erros na casa de 10% da amplitude máxima dos valores modelados. Por exemplo, para uma maré com amplitude de 2m, o ideal é que os valores de erro estejam na casa de ± 20 cm.

3.7 Escolha dos cenários de análise

Para análise das correntes residuais foram selecionados 10 casos de estudo descritos na tabela 3.3.

Os cenários selecionados tiveram como base o padrão de vento típico da região. Foram escolhidos quatro direções de vento, NE, S, E e SE e duas intensidades de vento (4 e $10 m.s^{-1}$). Além desses cenários hipotéticos de vento constante, um cenário apenas com maré e um cenário com vento real (variando no tempo), foram selecionados. O primeiro visa entender qual o papel da maré na região, sem a influência do vento enquanto o segundo visa entender o comportamento da enseada em uma situação mais realista.

Uma vez que os resultados foram obtidos, foram desenvolvidos mapas de circulação residual para diferentes períodos de tempo. Buscou-se entender como a circulação de longo prazo se comporta na região da enseada e se diferentes períodos de tempo considerados para compreendê-la poderia influenciar nos resultados finais. Foram feitos mapas de residual a cada 50, 100 e 200 horas além de um mapa com o residual considerando 2 meses de simulação.

Tabela 3.3: Configuração dos cenários de análise.

Rodada	Padrão de análise
1	Apenas maré (sem vento)
2	Maré e vento real (rodada de calibração)
3	Maré e vento NE de $4 m.s^{-1}$
4	Maré e vento NE de $10 m.s^{-1}$
5	Maré e vento S de $4 m.s^{-1}$
6	Maré e vento S de $10 m.s^{-1}$
7	Maré e vento E de $4 m.s^{-1}$
8	Maré e vento E de $10 m.s^{-1}$

Tabela 3.3: Configuração dos cenários de análise.

Rodada	Padrão de análise
9	Maré e vento SE de 4 m.s^{-1}
10	Maré e vento SE de 10 m.s^{-1}

4 Resultados

4.1 Nível

Foram estudados os dados de nível dos três ADCPs e do marégrafo localizado ao sul da Enseada.

Os dados analisados em cada um dos pontos dos ADCPs podem ser vistos nas figuras 4.1A a 4.3A. Os três aparelhos mediram um comportamento de nível muito semelhante tanto em termos astronômicos quanto em termos meteorológicos. No painel B se encontram os dados previstos (ou componente astronômica do sinal) sobrepostos pelo residual que daqui em diante será considerado como a componente meteorológica do sinal.

O sinal meteorológico possui diversos picos e cavas, normalmente ficando entre 0,5m e -0,5m. No total, puderam ser observados três períodos de alta e três períodos de baixa.

Os dados maregráficos do Píer da Penha serviram apenas como base de comparação das estatísticas gerais, uma vez que suas medições aconteceram por um período maior e em momento diferente da coleta dos dados dos ADCPs. A figura 4.4 apresenta os dados para o período de Outubro de 1995 a Dezembro de 1996. É possível observar que a componente meteorológica é bastante variável, sendo a principal responsável pelo sinal original observado pelo marégrafo. Os valores, no entanto, apresentam-se maiores que aqueles verificados nos ADCPs, alcançando -1,3m logo no início das medições, o que é quase duas vezes maior do que o maior valor encontrado nos ADCPS.

A tabela 4.1 contém as principais características dos dados adquiridos em todos os equipamentos. Foi calculada a maior

variação de nível encontrada em cada ponto medido. O que verificou-se foi que a variação entre o nível máximo e mínimo encontrado pelos ADCPs foi de aproximadamente 2m mas que existiu uma leve tendência de aumento dessa variação nos pontos mais internos (ST001 e ST002) em relação ao ponto externo (ST003). Esse resultado indica que existe uma tendência de empilhamento de água nas regiões mais internas da enseda. Essa variação apresentou-se ainda maior nos dados do píer da Penha, o que corrobora a tendência de empilhamento verificada nos ADCPs.

Tabela 4.1: Características das Variações de Nível Medidas (em metros)

Equip.	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Variação Máx.
ST001	2,90	4,98	3,90	3,91	2,08
ST002	6,30	8,33	7,25	7,25	2,03
ST003	15,52	17,80	16,77	16,78	1,98
Penha	-1,13	1,18	-0,04	-0,04	2,32

Na tabela 4.2 estão apresentados os valores máximos e mínimos de nível de origem meteorológica. Nos dados colhidos pelos ADCPs, a maré meteorológica gerou um nível mínimo de -0,71m e máximo de 0,65m. Dessa forma, a maré meteorológica foi responsável por uma variação de nível de 1,3m no ponto ST003 e 1,2m nos outros dois locais de coleta. Já no Píer da Penha, verificou-se que enquanto o nível máximo foi semelhante ao encontrado no dados dos ADCPs (0,70m), o nível mínimo foi quase o dobro, atingindo -1,37m. Entretanto, verificou-se que esse nível mínimo registrado na verdade fez parte de um evento de maré meteorológica negativa que persistiu entre 3 e 4 dias, atingindo o máximo de -1,37m em um dos dias, porém com o nível permanentemente baixo em todo o período.

Tabela 4.2: Estatística dos valores de nível das marés meteorológicas medidas (em metros)

Equipamento	Mínimo	Máximo	Varição Máxima
ST001	-0,71	0,65	1,37
ST002	-0,68	0,53	1,21
ST003	-0,70	0,50	1,20
Penha	-1,37	0,70	2,08

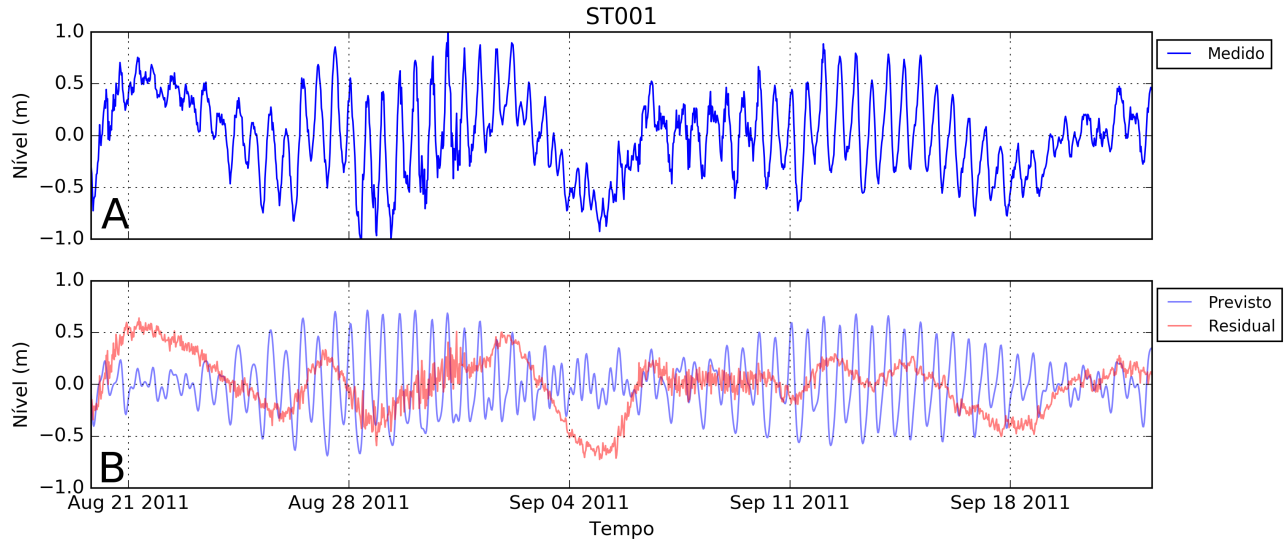


Figura 4.1: Variação de Nível no ponto ST001 separado entre: A) dado medido B) dados de maré previsto (azul) e o residual meteorológico (vermelho).

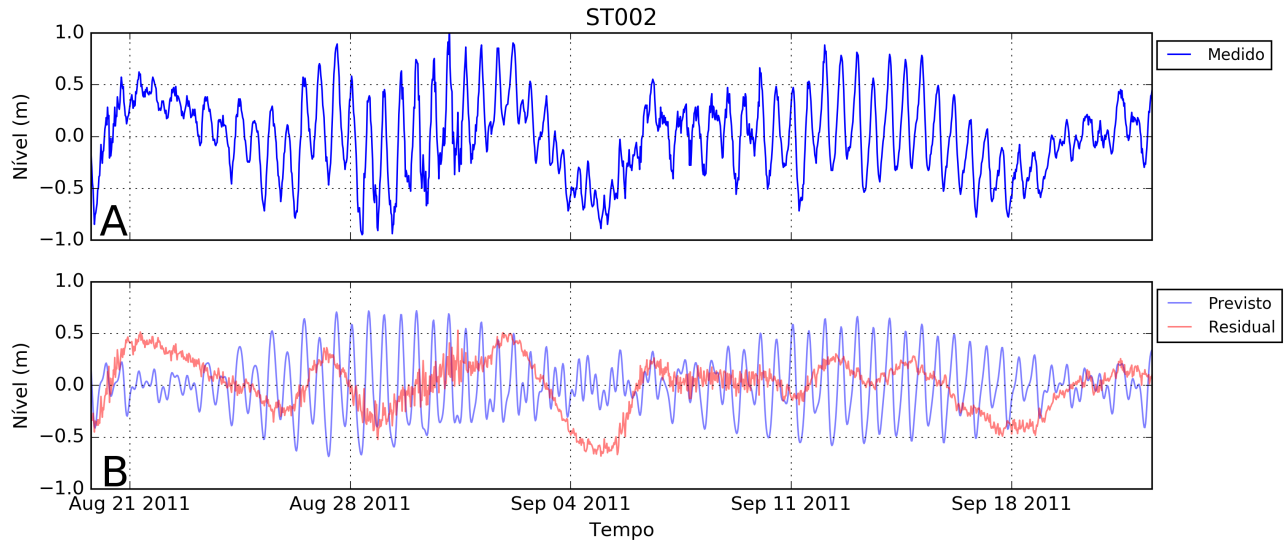


Figura 4.2: Variação de Nível no ponto ST002 separado entre: A) dado medido B) dados de maré previsto (azul) e o residual meteorológico (vermelho).

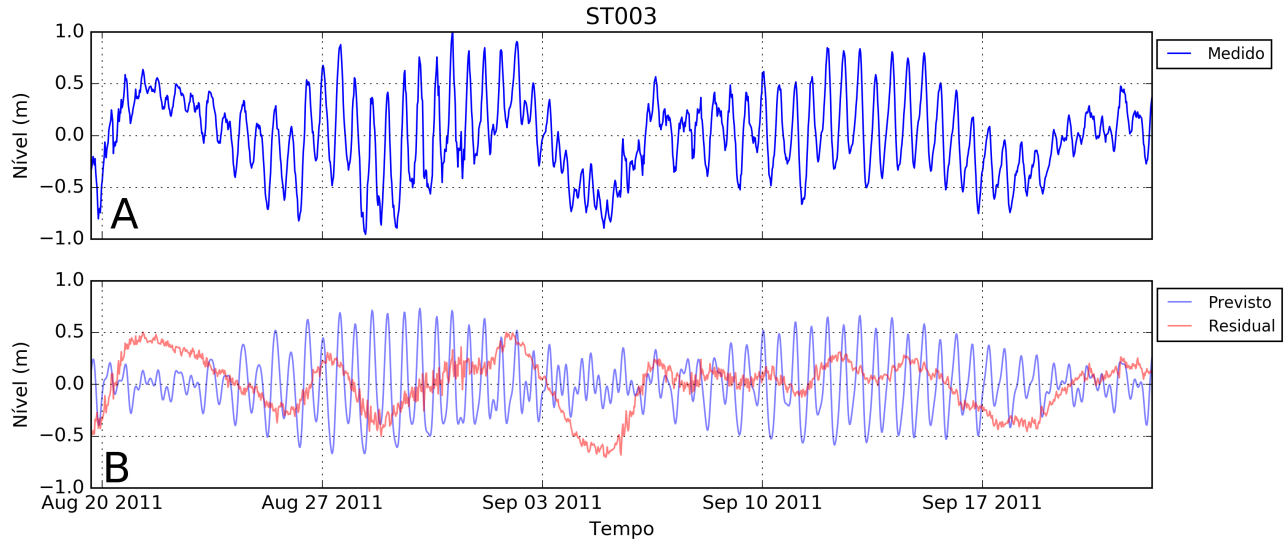


Figura 4.3: Variação de Nível no ponto ST003 separado entre: A) dado medido B) dados de maré previsto (azul) e o residual meteorológico (vermelho).

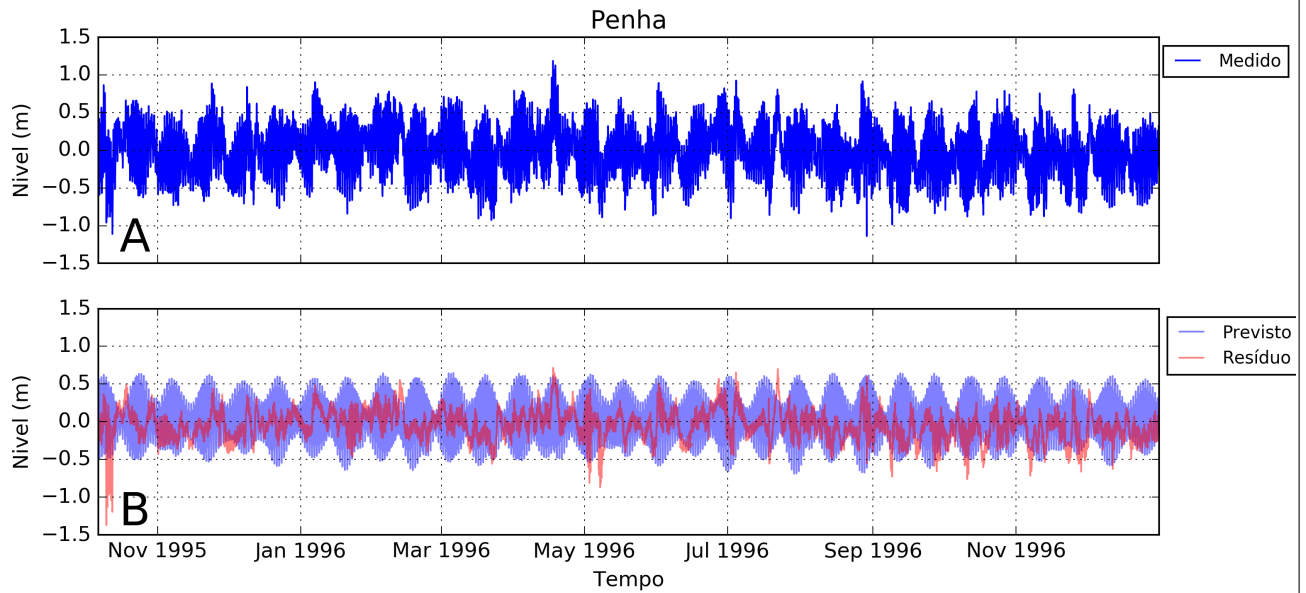


Figura 4.4: Variação de Nível no Píer da Penha separado entre: A) dado medido B) dados de maré previsto (azul) e o residual meteorológico (vermelho).

Os números de forma encontrados para os dados medidos podem ser observados na tabela 4.3. A maré na Enseada do Itapocorói pode ser considerada do tipo mista com uma predominância semidiurna. Ressalta-se no entanto que, pelo baixo valor de número de forma encontrado, pode-se notar a alta influência das componentes semidiurnas sobre as componentes diurnas.

Tabela 4.3: Número de Forma para cada um dos dados analisados.

Local	Número de Forma
ST001	0,2978
ST002	0,2962
ST003	0,2873
Penha	0,3131

Também é possível observar a grande influência das componentes semidiurnas nas figuras 4.5 a 4.8 onde estão apresentados os resultado de nível no domínio da frequência (painel C). Deve-se notar que apesar de os dados terem um tempo de medições diferentes (1 ano para Penha e 1 mês para Piçarras), os resultados de espectro se mostraram muito semelhantes. É possível perceber que existem quatro picos de energia distintos cujos períodos associados a esses picos são de 25,5, 12, 8 e 6 horas (respectivamente, 0,25, 0,34, 0,50 e 1,07 dias).

O maior pico de energia em ambos os dados analisados estava localizado no período aproximado de 12 horas indicando a predominância semidiurna, como já verificado anteriormente pelo número de forma. As componentes terçidiurnas e quaterdiurnas se apresentaram com picos de energia semelhantes entre si, sem predominância, mas com menos energia do que a componente diurna, que se apresenta ligeiramente mais energética.

Analisando detalhadamente o espectro do dado referente ao Píer

da Penha é possível identificar dois picos de energia por volta de 12 horas e dois picos de energia por volta de 24 horas (Figura 4.9). Ao se identificar os períodos de cada pico verificou-se que os sinais correspondiam a 12, 12,4, 23,9 e 25,8 horas, o que corresponde aos períodos das principais componentes semidiurnas (M2 e S2) e diurnas (K1 e O1), respectivamente. Esse detalhamento das componentes não pode ser observado em nenhum dos sinais dos ADCPs.

Além disso, pode-se observar que em todos os gráficos existe uma energia considerável em períodos maiores que 25h, mas que não pode ser bem identificada no espectro. Verificou-se que energias com períodos maiores que 50h representaram mais de 30% nos dados de Piçarras e 27,5% dos dados analisados conforme pode ser observado na tabela 4.4. Também é possível perceber um aumento da importância desses períodos conforme do ST001 (abrigado) para o ST003 (exposto).

Tabela 4.4: Porcentagem de energia em períodos acima de 50h.

Local	Porcentagem
ST001	30,55%
ST002	30,86%
ST003	31,09%
Penha	27,54%

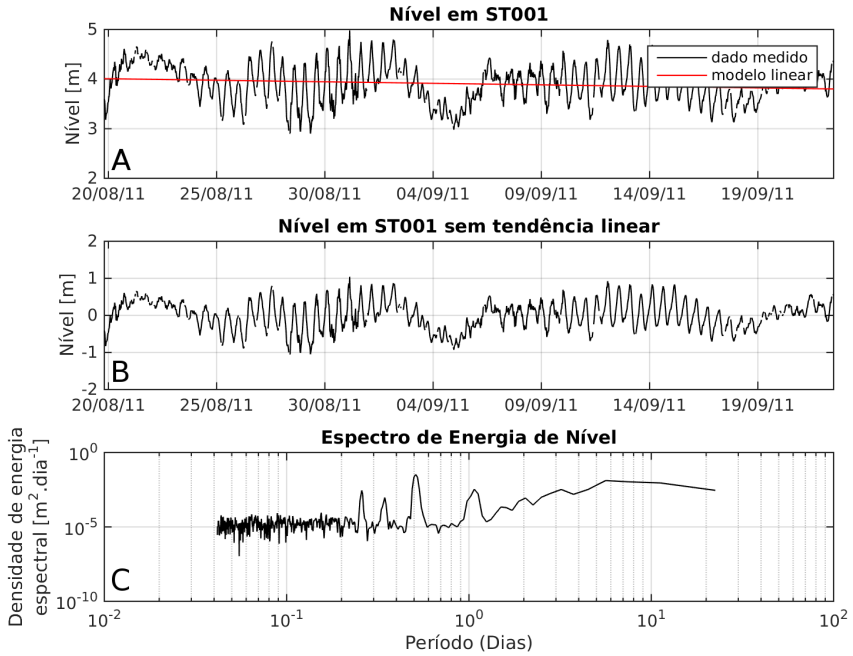


Figura 4.5: Espectro de energia no ponto ST001. A) Sinal medido B) Sinal com eliminação de tendência C) Espectro de energia.

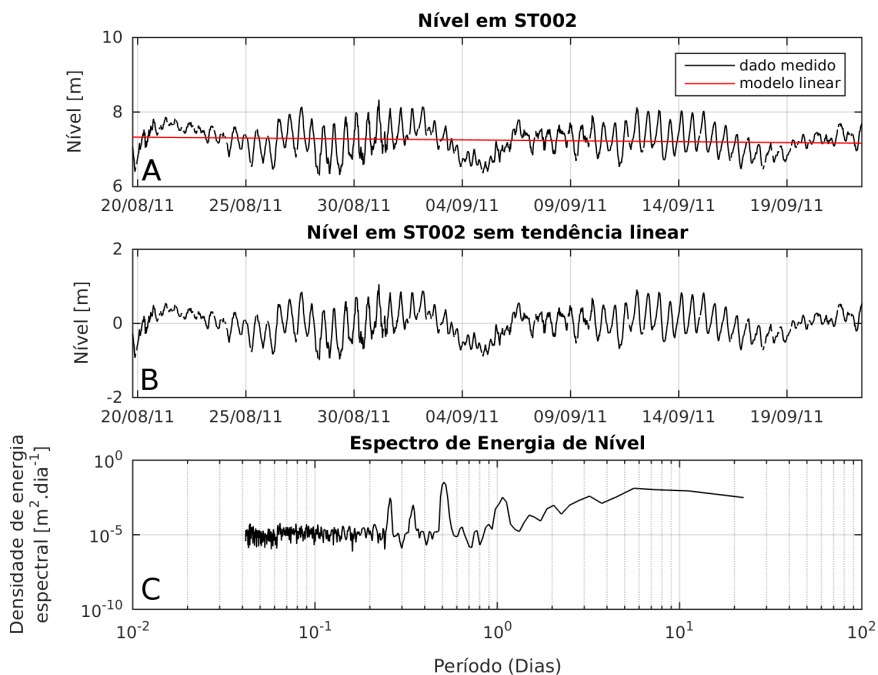


Figura 4.6: Espectro de energia ponto ST002. A) Sinal medido B) Sinal com eliminação de tendência C) Espectro de energia.

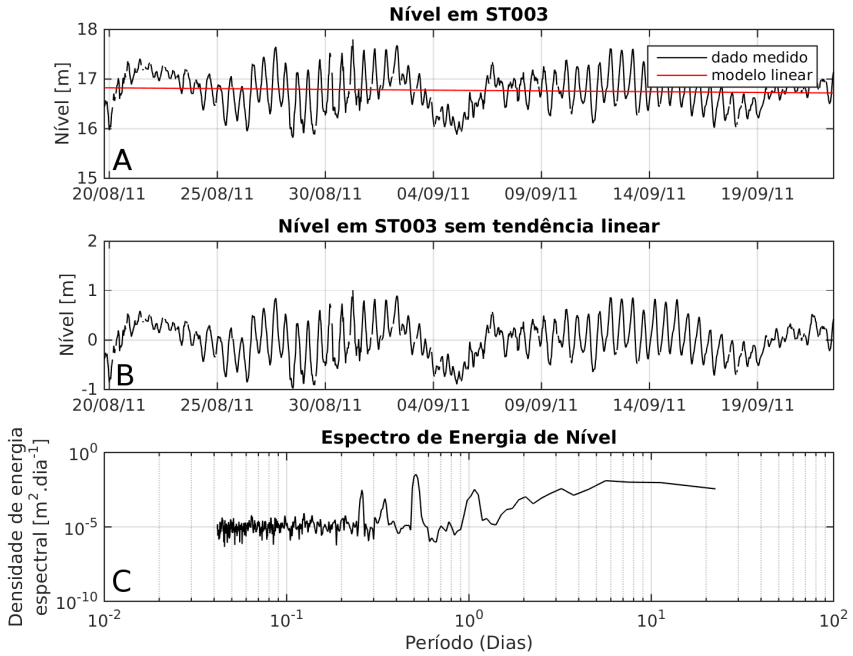


Figura 4.7: Espectro de energiano ponto ST003. A) Sinal medido B) Sinal com eliminação de tendência C) Espectro de energia.

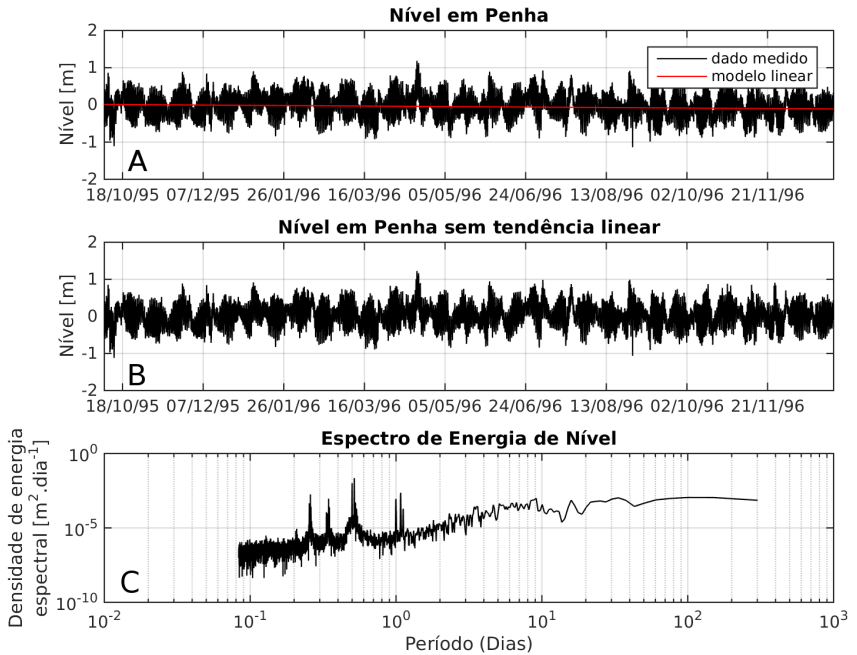


Figura 4.8: Espectro de energia no Píer da Penha. A) Sinal medido B) Sinal com eliminação de tendência C) Espectro de energia.

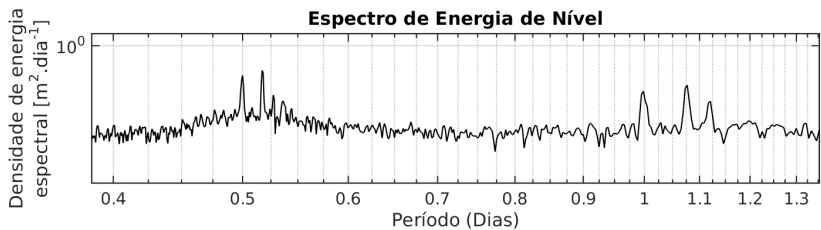


Figura 4.9: Detalhe do espectro de energia do Píer da Penha onde pode-se observar os picos referentes às constantes harmônicas semidiurnas (M2 e S2) e diurnas (K1 e O1), da direita para a esquerda, respectivamente.

4.2 Temperatura

Na figura 4.10 estão dispostas as séries filtradas do ST002 e ST003 em conjunto com o dado medido em ST001.

É possível perceber uma mudança brusca no comportamento da variável ao longo dos três pontos. O ponto ST001, mais próximo da praia e na menor profundidade, possui uma grande variação de temperatura ao longo do mês. A temperatura chegou próximo a 17°C no dia 24 de Agosto (18h) e ultrapassou os 20°C em 19 de Setembro (23h). Essa variação de mais de 3,5°C contrasta bastante com o ponto ST003 cuja variação foi de apenas 0,98°C em todo o período analisado. Já o ponto ST002 apresentou características intermediárias em relação aos pontos ST001 e ST003 (Tabela 4.5).

Deve-se notar que as temperaturas mínimas foram bastante semelhantes (menos de 0,5°C de diferença) enquanto a temperatura máxima se apresentou com os dados mais contrastantes.

Tabela 4.5: Características dos dados de temperatura.

Equipamento	Mínimo	Máximo	Média	Varição Máxima
ST001	17,02°C	20,61°C	18,02°C	3,59°C
ST002	17,52°C	19,13°C	18,18°C	1,61°C
ST003	17,16°C	18,14°C	17,88°C	0,98°C

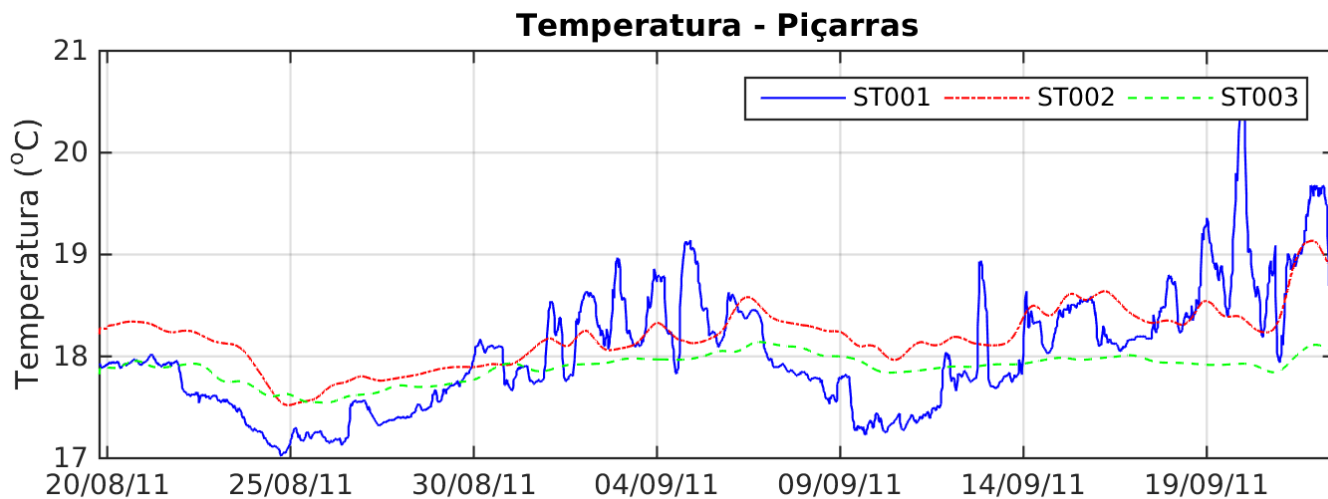


Figura 4.10: Dados de temperatura de fundo na Enseada do Itapocrói.

Nas figuras 4.11 a 4.13 estão apresentados os resultados da análise de no domínio da frequência da temperatura em todos os pontos medidos.

É possível observar que existe uma tendência de aumento de energia conforme o período aumenta. Períodos maiores que 1 dia tem uma maior energia associada, mas, devido ao curto período de aquisição, os picos passam a ser menos identificáveis. Os pontos ST001 e ST002 apresentam uma maior energia no período de 1 dia. No ponto ST003 o pico no período de 1 dia fica pouco evidente e com menos energia que os picos próximos a ele. Isso pode ser causado pelo distanciamento do ponto ST003 da costa e sua maior profundidade, mostrando que o mesmo está menos sujeito a variações diurnas de temperatura, como verificado nos pontos mais internos.

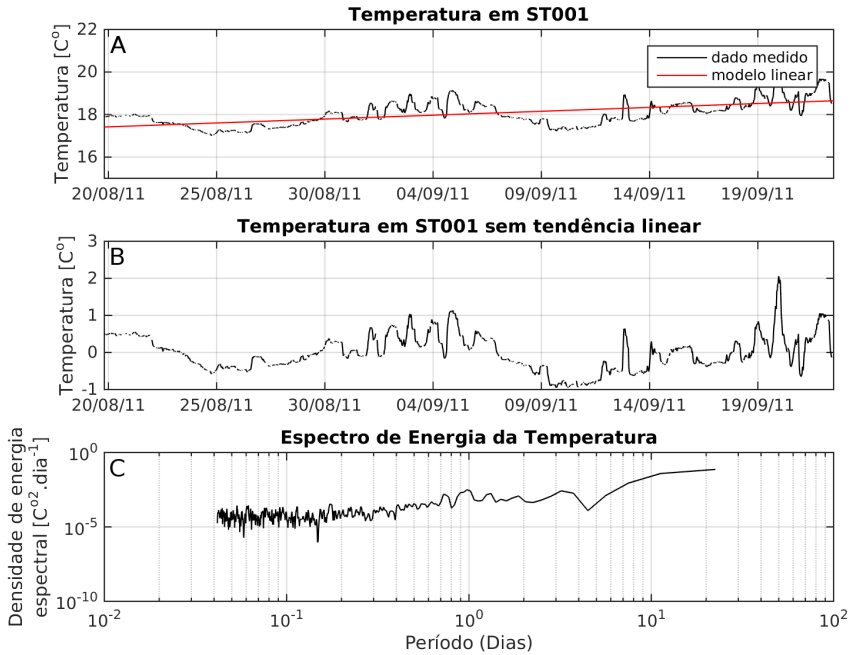


Figura 4.11: A) Dados de temperatura do ponto ST001 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho); B) Valor do sinal uma vez retirada a tendência linear apresentada no painel A; C) Espectro de energia no domínio da frequência.

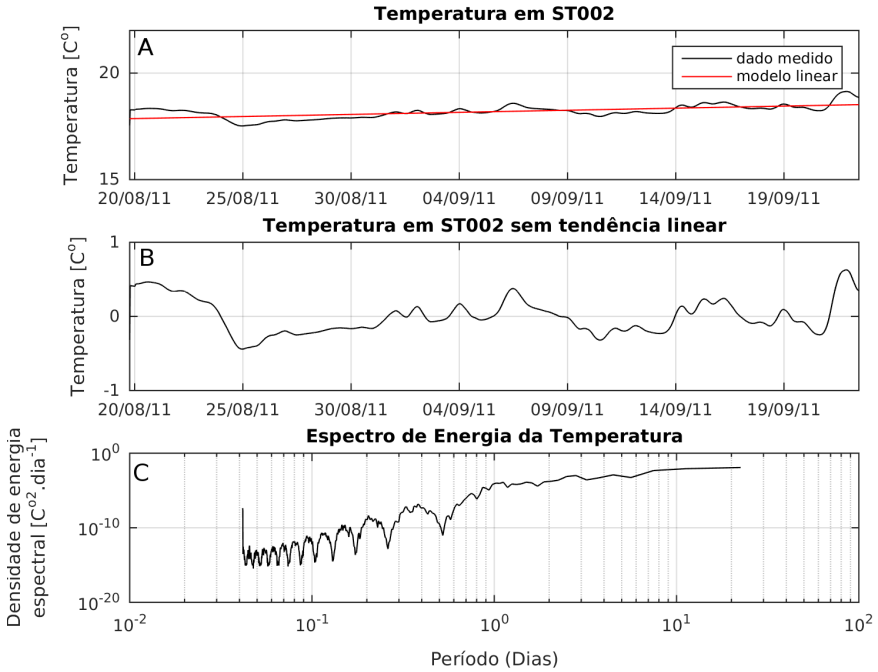


Figura 4.12: A) Dados de temperatura do ponto ST002 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho); B) Valor do sinal uma vez retirada a tendência linear apresentada no painel A; C) Espectro de energia no domínio da frequência.

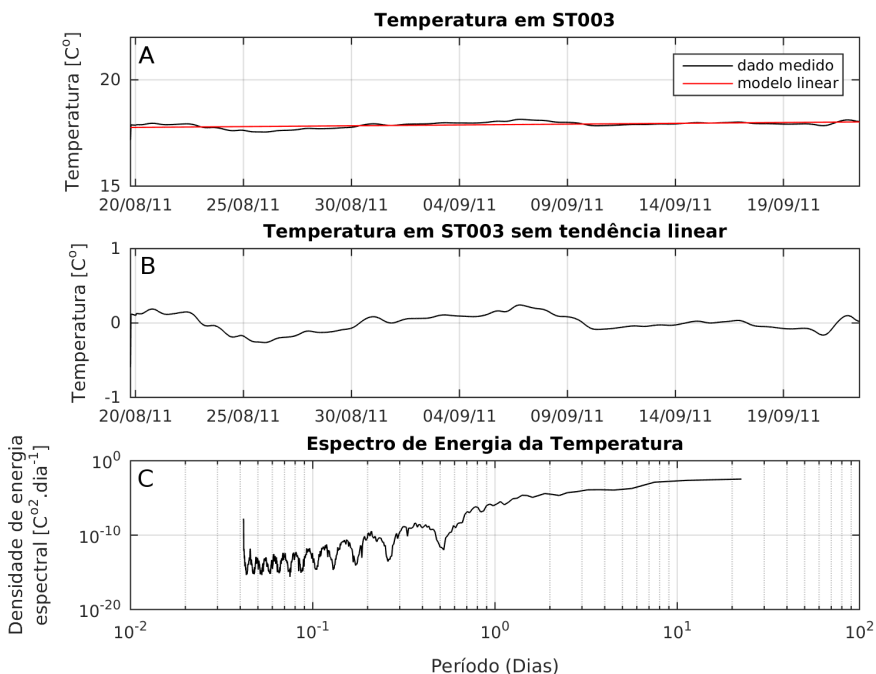


Figura 4.13: A) Dados de temperatura do ponto ST003 (em preto) e a tendência linear verificada nos dados (em vermelho); B) Valor do sinal uma vez retirada a tendência linear apresentada no painel A; C) Espectro de energia no domínio da frequência.

4.3 Interação entre Nível, Temperatura e Vento

Na figura 4.14 estão apresentadas análises comparativas entre a maré meteorológica (painel A), a temperatura (painel B) no ponto ST001 e os vetores de vento (painel C) durante o período medido.

Por volta do dia 22 de Agosto verifica-se que o aumento de nível que ultrapassa 0,5m e temperaturas por volta de 18°C estão associadas a um período de ventos S-SO. De 25 a 30 de Agosto, diversas mudanças no regime de ventos estão associadas com mudanças de nível, com ventos de NE resultando em um decréscimo do nível enquanto ventos de SE estão associados com o aumento de nível. Neste período, entretanto, verifica-se uma tendência geral de aumento da temperatura com pouca variação podendo ser associada com o vento.

Entre 2 e 6 de Setembro, houve um período de constante vento NE associado com uma descida do nível enquanto temperaturas oscilaram quase 1,3°C. No final do período de medições, ventos constantes de NE ocorrem ao mesmo tempo que existe uma diminuição do nível. Neste mesmo período, existe uma tendência geral de aumento de temperatura, mas com diversas oscilações acontecendo no período.

Estes resultados indicam que existe uma associação da temperatura local e do nível meteorológico com o vento regional, sendo que a relação entre vento e nível aparenta ser mais próxima. Buscou-se encontrar uma correlação entre esses sinais. Para isso a correlação foi feita não apenas considerando o sinal no momento mas atrasos entre o o sinal de vento e o sinal de temperatura ou nível. A melhor correlação encontrava foi com um coeficiente de determinação de 0,55 para vento e nível com um atraso de 1h entre o vento e uma resposta por parte do sinal de nível. Para a temperatura, o coeficiente de determinação foi menor (0,16), também com um atraso de 1h.

Como as variações de temperatura são muito menores nos pontos ST002 e ST003, pouca associação pode ser feita entre o sinal de temperatura e o vento. O sinal meteorológico nestes outros pontos é

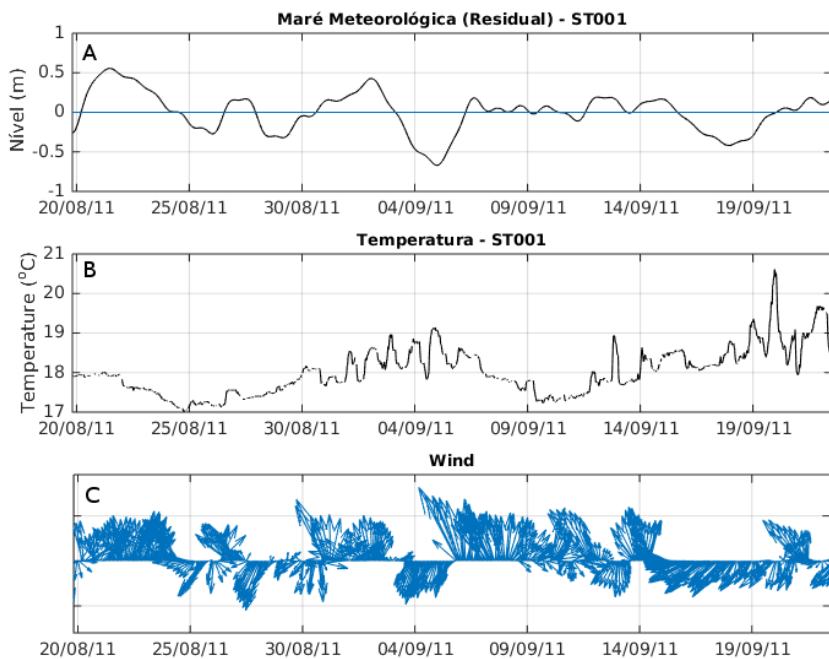


Figura 4.14: Comparação entre A) elevação meteorológica de nível; B) variação de temperatura; e C) intensidade e direção do vento no ponto ST001.

muito semelhante aquele visto no ST001, fazendo com que a análise feita no ponto ST001, valha também para os demais pontos. Dessa forma, optou-se por suprimir as figuras no atual trabalho.

4.4 Corrente

4.4.1 Comportamento observado - Integrado na vertical

Nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17 podem ser observadas as rosas de corrente integradas na vertical para os pontos ST001, ST002 e ST003, respectivamente.

Em termos de velocidades integradas na coluna, as correntes apresentam velocidades muito baixas, abaixo de 20cm.s^{-1} na maior parte do tempo. É possível notar nas figuras 4.18 a 4.20 que em 90% do tempo, as velocidades ficam abaixo de 8cm.s^{-1} nos pontos ST001 e ST002 e abaixo de 21cm.s^{-1} em ST003.

As correntes em ST001 são normalmente para NE, enquanto no ST002 o padrão fica próximo do eixo L-O com maior quantidade de correntes para L. No ponto ST003 para sul representam praticamente todos os dados.

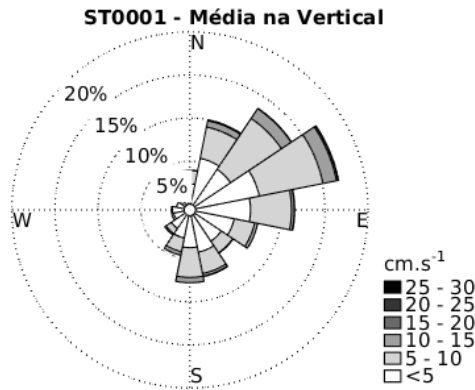


Figura 4.15: Rosa de correntes no ponto ST001 integrada na vertical (em cm.s^{-1}).

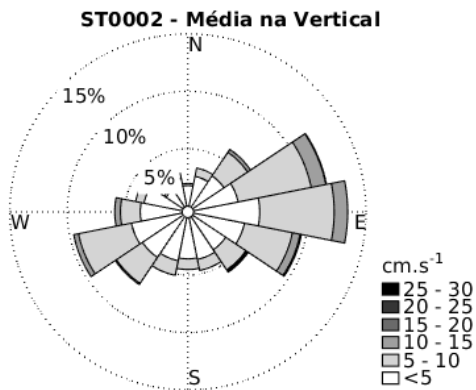


Figura 4.16: Rosa de correntes no ponto ST002 integrada na vertical (em $cm.s^{-1}$).

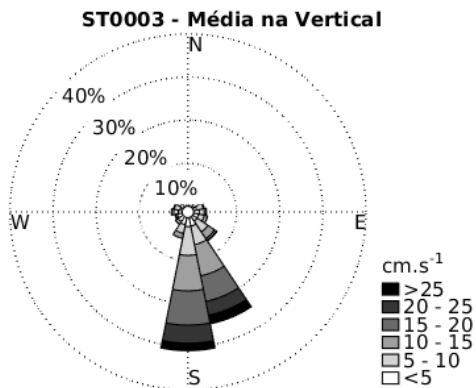


Figura 4.17: Rosa de correntes no ponto ST003 integrada na vertical (em $cm.s^{-1}$).

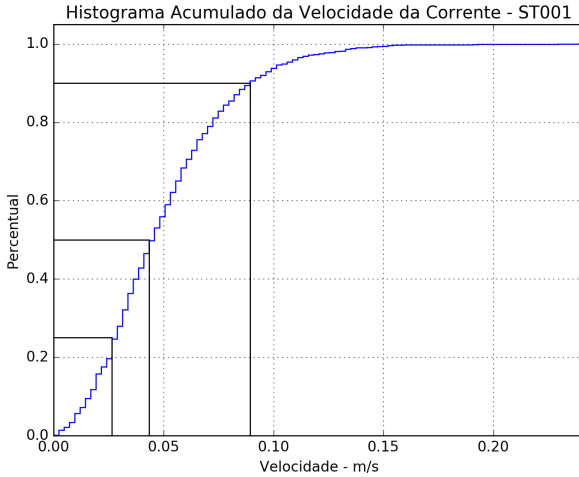


Figura 4.18: Histograma cumulativo da velocidade da corrente em $m.s^{-1}$ no ST001. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.

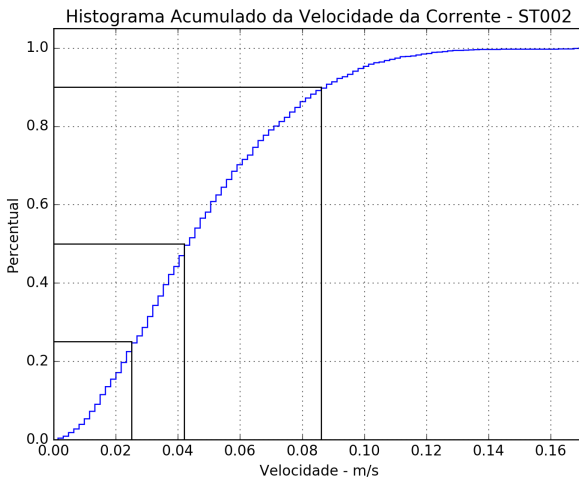


Figura 4.19: Histograma cumulativo da velocidade da corrente em $m.s^{-1}$ no ST002. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.

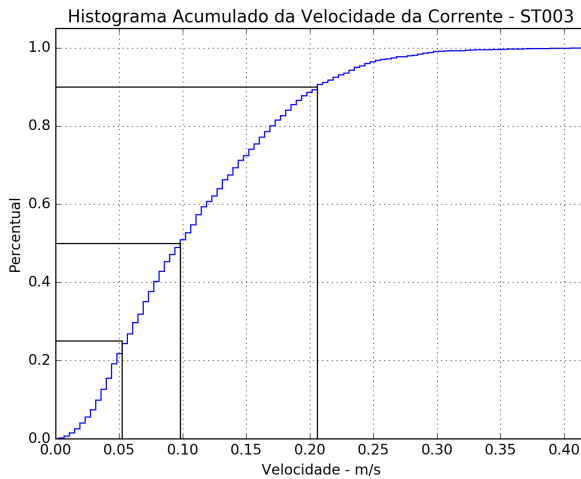


Figura 4.20: Histograma cumulativo da velocidade da corrente em $m.s^{-1}$ no ST003. Linhas em preto indicam os quartis de 25, 50 e 90%.

4.4.2 Comportamento observado - Análise por camada

Foram feitos, para cada camada e cada ADCP, gráficos com as rosas de correntem mas, para evitar sobrecarga de imagens, todas estão dispostas no apêndice E (Figuras ?? a ??). Na tabela 4.6 pode-se observar os valores de velocidade médias e máximas para cada uma das camadas dos ADCPs.

No ponto ST001 as correntes se apresentaram mais fortes na superfície (Figura ??) tanto em média ($5,82\text{cm.s}^{-1}$) quanto em velocidade máxima ($26,63\text{cm.s}^{-1}$), com direção predominante para NE mas com direções variando entre N e SE. Já perto do fundo (Figura ??) as velocidades foram ligeiramente menores, com média de $5,31\text{cm.s}^{-1}$ e velocidade máxima de $22,20\text{cm.s}^{-1}$ com predominância de correntes para NE em ambas as camadas 2 e 3.

Em ST002 a velocidade é mais bem distribuída ao longo da coluna de água em média (entre $6,5$ e 7cm.s^{-1}) com velocidades alcançando 30cm.s^{-1} . Interessante notar que a maior velocidade foi associada à uma camada intermediária (camada 7 - $3,59\text{m}$) enquanto tanto a camada mais superficial e a de fundo ficaram com velocidades máximas entorno de 26cm.s^{-1} . Percebe-se, entretanto, que existe uma variação considerável de direções ao longo das camadas, com as camadas mais profundas tendo um eixo de direção entre NE e OSO passando por correntes mais alinhadas ao eixo NNE-SSO na camada 6 ($4,09\text{m}$) até um alinhamento com o eixo E-O na camada 7 ($3,59\text{m}$) e uma predominância de correntes para N na superfície.

O ponto ST003 apresenta velocidades médias bem mais altas que os pontos anteriores, com menores velocidades associadas ao fundo (média de $12,40\text{cm.s}^{-1}$ e máxima de $43,68\text{cm.s}^{-1}$) e velocidades médias mais elevadas no centro da coluna de água. A maior velocidade encontrada ocorreu na superfície ($48,47\text{cm.s}^{-1}$). As direções das correntes variam bastante de camada para camada, alternando-se entre para S e para O.

Tabela 4.6: Valores de velocidade da corrente por camada das camadas mais inferiores (Camada 12) para as camadas mais de superfície (Camada 1).

Camada	ST001		ST002		ST003	
	Máx.	Média	Máx.	Média	Máx.	Média
Camada 12	–	–	–	–	48,47	13,20
Camada 11	–	–	–	–	47,76	13,13
Camada 10	–	–	25,94	6,79	45,69	13,30
Camada 9	–	–	28,30	6,94	44,94	13,36
Camada 8	–	–	24,74	6,86	43,42	13,37
Camada 7	–	–	30,80	6,86	42,95	13,38
Camada 6	–	–	25,02	6,85	43,46	13,51
Camada 5	–	–	26,17	6,88	43,86	13,57
Camada 4	–	–	23,77	7,02	47,13	13,43
Camada 3	26,63	5,82	26,47	6,93	48,10	13,44
Camada 2	25,55	5,80	27,78	6,94	45,31	12,62

Tabela 4.6: Valores de velocidade da corrente por camada das camadas mais inferiores (Camada 12) para as camadas mais de superfície (Camada 1).

Camada	ST001		ST002		ST003	
	Máx.	Média	Máx.	Média	Máx.	Média
Camada 1	22,20	5,31	26,00	6,47	43,68	12,40

4.4.3 Análise EOF

Análises usando Funções Empíricas Ortogonais foram utilizadas para entender o comportamento da corrente ao longo da coluna de água, tanto em média (painel A) quando no tempo (painel B e C) para cada um dos equipamentos. O painel A apresenta vetores coloridos que indicam a média da direção e velocidade da corrente para cada camada medida pelo perfilador acústico. Cores avermelhadas indicam camadas superiores enquanto tons de azul indicam camadas inferiores, mais próximas ao fundo. O painel B irá indicar a variação de velocidade dos vetores de corrente ao longo do tempo, apresentada como um fator de multiplicação em relação aos vetores apresentados no painel A. O painel C irá apresentar a variação da orientação do vetor apresentado no painel A em relação ao tempo. Valores na ordem de -180 ou $+180$ indicam uma inversão dos vetores apresentados no painel A.

A figura 4.21 apresenta a análise EOF para o equipamento ST003. No painel A é possível verificar uma espiral de Ekman reversas, com os vetores girando no sentido horário da superfície para o fundo, sugerindo a formação de uma camada de Ekman de fundo. A camada superior deste equipamento se encontra em 4,28m, tornando impossível capturar o movimento da camada superficial de Ekman, que deve acontecer em profundidades menores que aquelas medidas pelo aparelho. É possível verificar que a camada superior apresentada no painel A possui orientação NO-SE enquanto a camada inferior assume uma orientação num eixo N-S.

Verifica-se na 4.21B que existem momentos em que a velocidade chegou a apresentar um valor duas vezes superiores do que aqueles encontrados em média, apresentados na 4.21A. Também é possível observar que existem diversos casos de inversão da direção de corrente ao longo do tempo (painel C), em geral associados com ventos de sul. Ressalta-se que as inversões e os aumentos de velocidade dos vetores não se apresentam relacionados.

Na 4.21A ainda pode-se observar uma grande variabilidade entre os ângulos dos vetores, alcançando 35 graus entre os vetores do

meio da coluna e uma média de 11,73 graus entre vetores. As correntes são ligeiramente mais intensas na superfície ($15,97\text{cm.s}^{-1}$) e mais fracas no fundo ($12,32\text{cm.s}^{-1}$) com um valor médio de $15,25\text{cm.s}^{-1}$.

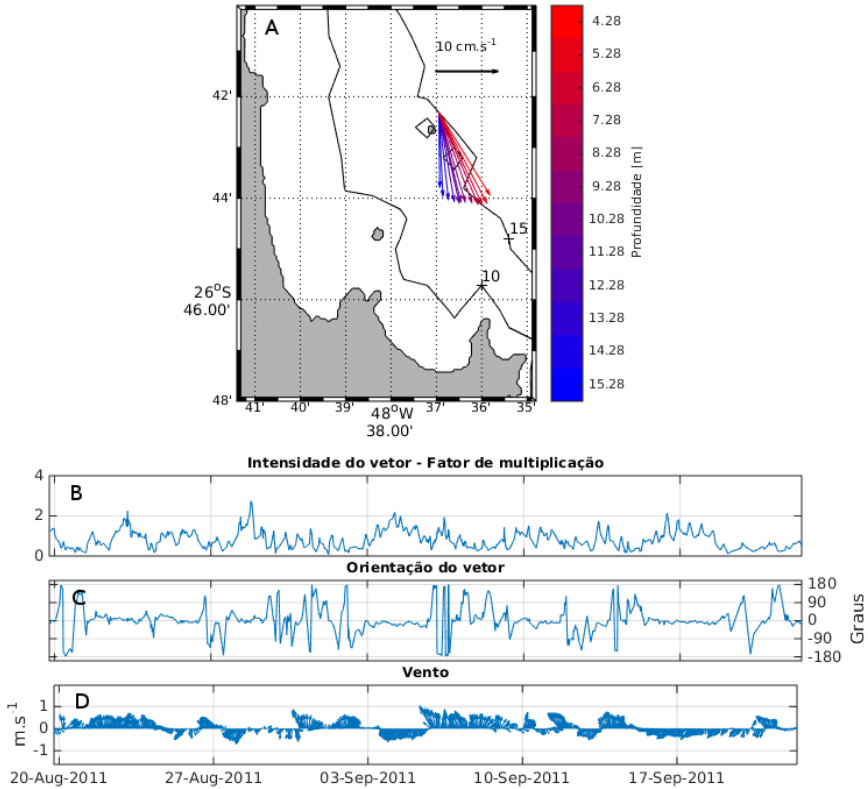


Figura 4.21: EOF de correntes para o ponto ST003.

A figura 4.22 apresenta o resultado para a análise EOF no ponto ST002. Neste caso, os vetores tem uma tendência de rotação em sentido anti-horário da superfície para o fundo. Este resultado se assemelha a uma típica espiral de Ekman de superfície (EKMAN, 1905) uma vez que este equipamento está localizado em águas rasas (abaixo de 7m).

A camada superior tem uma direção predominante de NW para

SE enquanto a camada mais inferior apresenta uma orientação L-O. Existe um aumento dos ângulos entre os vetores em cada camada, passando de 3,3 graus entre as primeiras duas camadas superiores para 8.6 graus entre as duas camadas mais inferiores. Esse aumento de ângulo entre vetores se apresenta semelhante ao que foi descrito por Ekman (1905). As maiores velocidades neste caso foram observadas no centro da coluna de água, com velocidades alcançando $8,5\text{cm.s}^{-1}$ enquanto as velocidades nas camadas inferiores e superiores ficaram próximas de 6cm.s^{-1} .

Na 4.22B é possível observar que durante o período analisado, foram poucas as vezes que as velocidades aumentaram a ponto de chegar duas vezes os valores apresentados na 4.22A. Isso aponta que mesmo com maiores velocidades acontecendo periodicamente na área externa da enseada, a área interna se apresenta sempre com velocidades baixas na maior parte das vezes.

Verifica-se, no entanto, que apesar de as correntes apresentarem baixa variabilidade em termos de velocidade, mudanças de orientação da corrente, normalmente associadas com inversão total da mesma, aparecem em diversos momentos. Em média, são observadas 7 inversões da direção da corrente por semana. Infelizmente, nenhum dado de vento dentro da enseada foi medido e sugere-se que este tipo de fenômeno seja investigado em estudos posteriores. Os ventos regionais apresentados no painel D da figura não apresentam relação, uma vez que eles vêm de um modelo global.

A figura apresenta a mesma análise para o ponto ST001. Como este equipamento se encontrava em uma área muito rasa, apenas três camadas foram capturadas, o que resultou em uma análise bem menos rica que aquelas encontradas nos pontos ST002 e ST003. A série apresentou uma alta variabilidade de orientação ao longo do tempo e nenhum padrão emergiu desta análise. Verificou-se, entretanto, que este ponto está mais sujeito a modificações nas velocidades das correntes que o ST002.

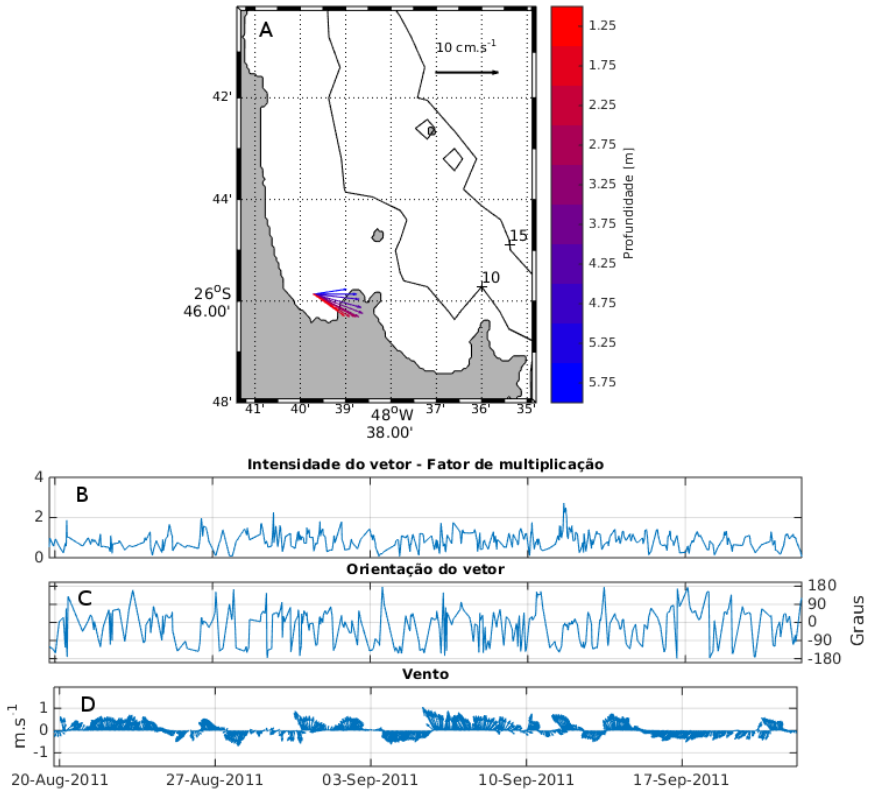


Figura 4.22: EOF de correntes para o ponto ST002.

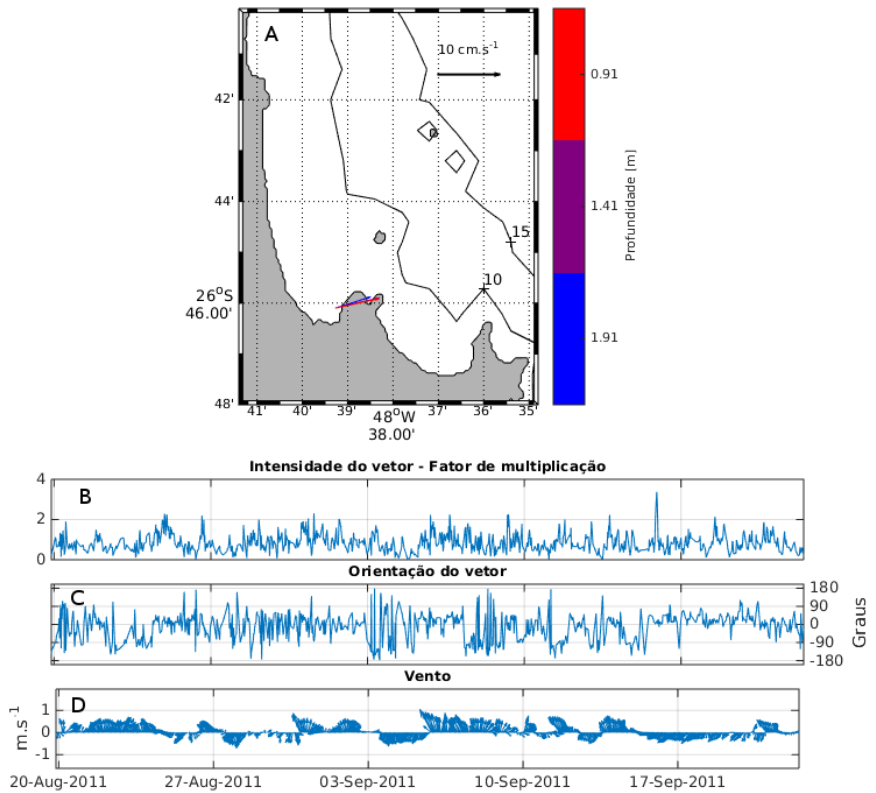


Figura 4.23: EOF de correntes para o ponto ST001.

4.5 Modelo Numérico

4.5.1 Grade Numérica e Batimetria

A grade numérica foi desenvolvida através da ferramenta Delft3D-RGFGRID disponível no pacote de módulos do Delft3D. O objetivo do RGFGRID é criar, modificar e visualizar grades curvilineares de forma fácil. Para isso, o software conta com diversas ferramentas para a geração de grades tais como aumentar ou diminuir a resolução da grade globalmente ou localmente, apagar ou adicionar células individuais e ortogonalização (DELTARES, 2011b). A qualidade de uma grade pode ser determinada pela ortogonalidade e pela taxa com que algumas certas propriedades (*smoothness*) mudam ao longo da área a ser modelada (DELTARES, 2014). A medida de ortogonalidade é o ângulo (ou o cosseno do ângulo) entre as linhas de grade em ambas as direções x e y . A medida de *smoothness* é a relação entre os tamanhos das células de grade em ambas as direções.

O manual do RGFGRID recomenda alguns valores de propriedades da grade para que a mesma possa ser considerada de qualidade e para que se evite a introdução de erros numéricos devido ao aumento de resolução na área de estudo e curvatura da grade. Buscou-se manter o máximo possível dentro dos parâmetros recomendados conforme pode ser observado na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Propriedades da grade numérica.

Parâmetro	Valor Padrão/Recomendado	Valor Máx.
Ortogonalidade	<0,02	0,01
M Smoothness	<1,2	1,050
N Smoothness	<1,2	1,136
<i>Aspect Ratio</i>	1-2	<1,7 na área de estudo
Resolução Mínima	-	200 m
Resolução Máxima	-	23,7 m

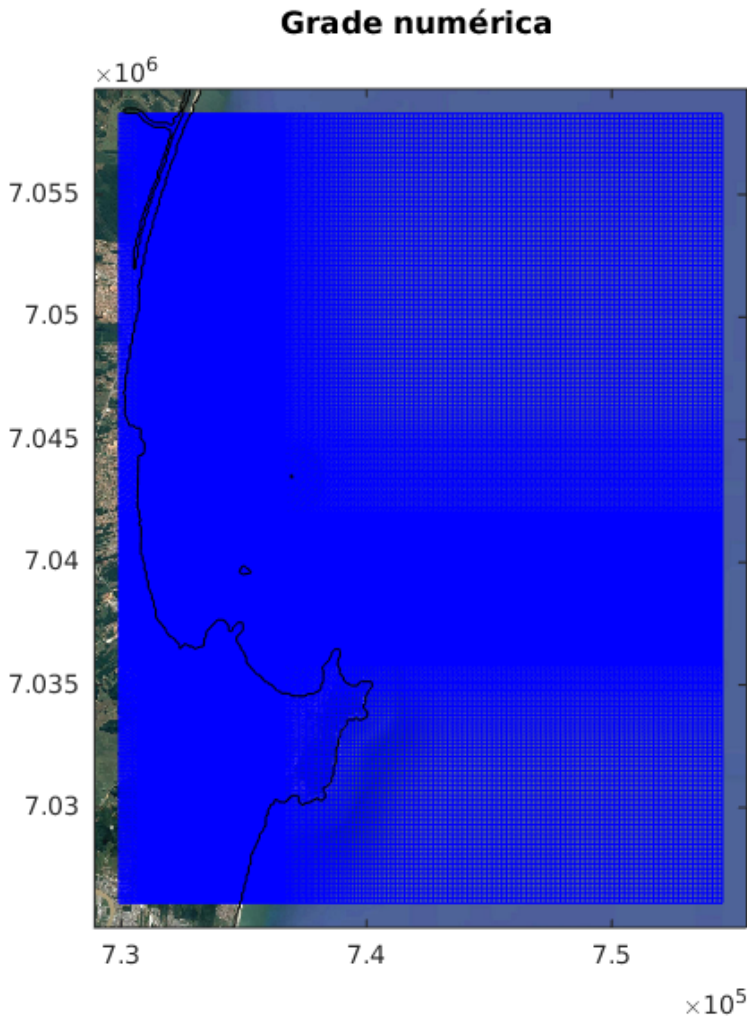


Figura 4.24: Grade numérica utilizada para o presente estudo.

Uma vez a grade definida, os pontos batimétricos descritos anteriormente foram interpolados na mesma. Para isso, utilizou-se o programa Delft3D-QUICKIN (DELTA RES, 2011a). O valor máximo de profundidade dentro do domínio numérico é de 39,2 m e o resultado pode ser verificado na figura ??.

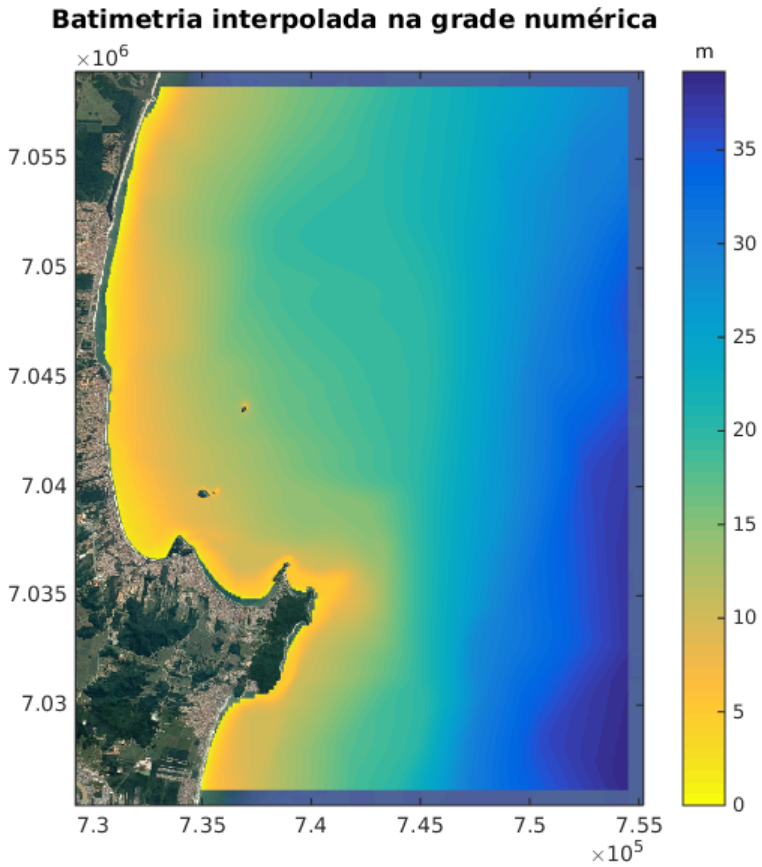


Figura 4.25: Batimetria interpolada na grade numérica.

4.5.2 Calibração

Diversos parâmetros foram testados de modo que se conseguisse chegar a um modelo que representasse aproximadamente a realidade. No total, foram construídas três grades numéricas e geradas 10 batimetrias. Por fim, chegou-se na grade numérica e batimetria apresentadas anteriormente. Alguns parâmetros de configuração do modelo foram testados e aqueles definidos na calibração e seus valores padrão estão apresentados na tabela 4.8.

Tabela 4.8: Configurações utilizadas na calibração.

Parâmetro	Valor padrão	Valor utilizado
Densidade da água	1000 $kg.m^{-3}$	1025 $kg.m^{-3}$
Formulação de Rugosidade	Chezy	Manning
Rugosidade do fundo (U)	65	0,025
Rugosidade do fundo (V)	65	0,025
Viscosidade	1 $m^2.s^{-1}$	0,1 $m^2.s^{-1}$
Coef. de Arrasto de Vento	100 $m.s^{-1}$	50 $m.s^{-1}$

Nas figuras 4.26 a 4.28 podem ser observados os resultados da calibração de corrente do modelo em comparação com os dados medidos nos três ADCPs posicionados em diferentes profundidades na Enseada do Itapocorói. Para avaliar a performance do modelo, foi calculada a amplitude máxima de variação dos dados medidos e, assumiu-se como ideal valores de erros que correspondessem a aproximadamente 10% ou menos que o valor máximo de variação do dado medido. A tabela 4.9 apresenta os valores de amplitude e o valor de erro do modelo para cada parâmetro avaliado em cada um dos equipamentos.

Primeiramente, é notável que os valores de erro de nível sejam consideravelmente mais baixos que aqueles encontrados

nas componentes de velocidade, ficando sempre abaixo de 6% do valor da amplitude da maré na região, que se encontra em aproximadamente 1,4m. Essa diferença de erros entre a calibração das componentes da velocidade e os valores nível indica que os processos que regem a hidrodinâmica local não estão associados às variações de nível, mas a outros processos costeiros como sugerido por Schettini et al. (1999).

É possível verificar que, em relação à corrente, os valores de erro são menores no ponto ST002. O ponto ST001 apresenta-se muito próximo da costa, o que o faz sujeito a influências da batimetria e da linha de costa. A resolução da grade pode ter sido um limitante de calibração do modelo neste ponto costeiro, justificando os maiores valores de erro encontrados em ST001 do que ST002. Já o ponto ST003 apresenta-se em uma área muito externa. A inserção de vento no modelo teve menor influência neste ponto do que nos demais pontos costeiros, indicando que o mesmo está muito menos sujeito a variações locais do que os demais pontos analisados. O fato de não se ter conseguido uma calibração em ST003 em diversas tentativas com diferentes forçantes de maré e vento local, indica que o ponto está muito externo para serem desconsideradas forçantes de larga escala, ondas de plataforma e/ou a baroclinicidade do sistema. Isso também pode ser verificado no domínio da frequência, onde o ponto ST003 apresentou a maior porcentagem de energia em frequência submareais (31%)

De forma geral, os erros ficaram próximos a 10% da amplitude do dado avaliado. O ponto ST002 foi o que apresentou os menores valores de erro (<10,5%), mesmo apresentando amplitudes de variação menores que os outros dois locais avaliados. O ponto ST003 teve o maior erro associado na calibração em relação à componente V ($\sim 14\%$). Apesar de os valores não estarem necessariamente abaixo de 10%, considerou-se que eles estão próximos o suficiente para representarem os processos da região e, portanto, deu-se prosseguimento aos cenários de análise.

Tabela 4.9: Amplitude máxima do valor medido e percentual de erro do modelo para cada equipamento e parâmetro medido

Equip.	Componente Meridional		Componente Zonal		Nível	
	Ampl. Máx	Erro	Ampl. Máx	Erro	Ampl. Máx	Erro
ST001	0,323 $m.s^{-1}$	10,98%	0,303 $m.s^{-1}$	11,21%	1,411 m	5,60%
ST002	0,286 $m.s^{-1}$	9,37%	0,192 $m.s^{-1}$	10,43%	1,405 m	5,69%
ST003	0,346 $m.s^{-1}$	10,76%	0,678 $m.s^{-1}$	14,05%	1,401 m	5,78%

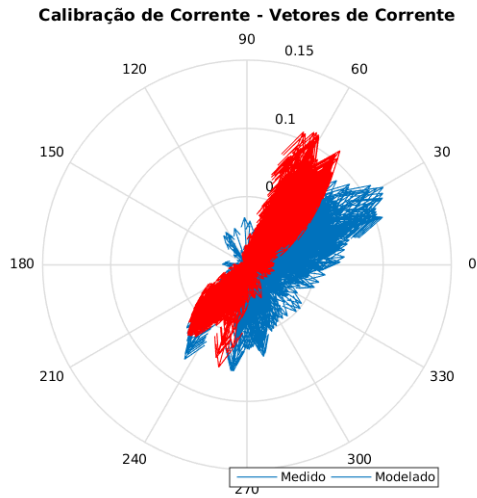


Figura 4.26: Calibração em ST001.

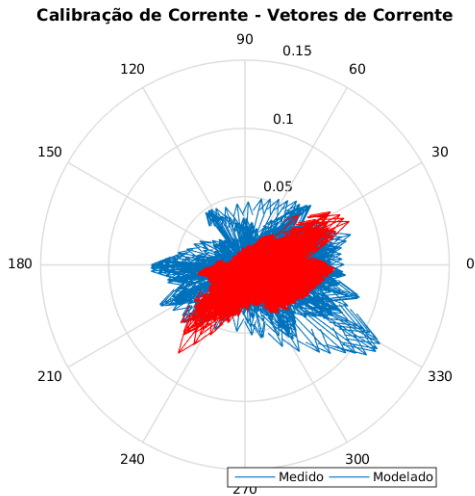


Figura 4.27: Calibração em ST002.

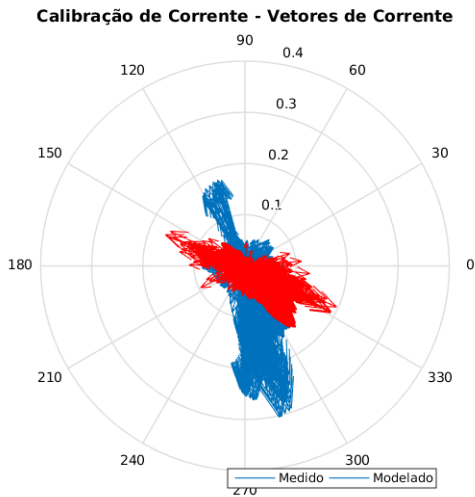


Figura 4.28: Calibração em ST003.

4.5.3 Mapas de Residuais

A figura 4.29 apresenta o mapa de residual total para o período de 2 meses simulado para o Cenário 01, simulado apenas com maré. As correntes apresentam-se bem amenas, não alcançando $0,4\text{cm.s}^{-1}$. As maiores velocidades estão associadas ao costão rochoso da Ponta da Penha e à ilha Feia. Em geral, as velocidades ficam abaixo de $0,1\text{cm.s}^{-1}$ na maior parte do domínio, com uma tendência de correntes de norte para sul. Um vórtice no sentido anti-horário pode ser observado na parte sul da ilha Feia, mas velocidades ligeiramente superiores podem ser observadas ao redor de toda a ilha.

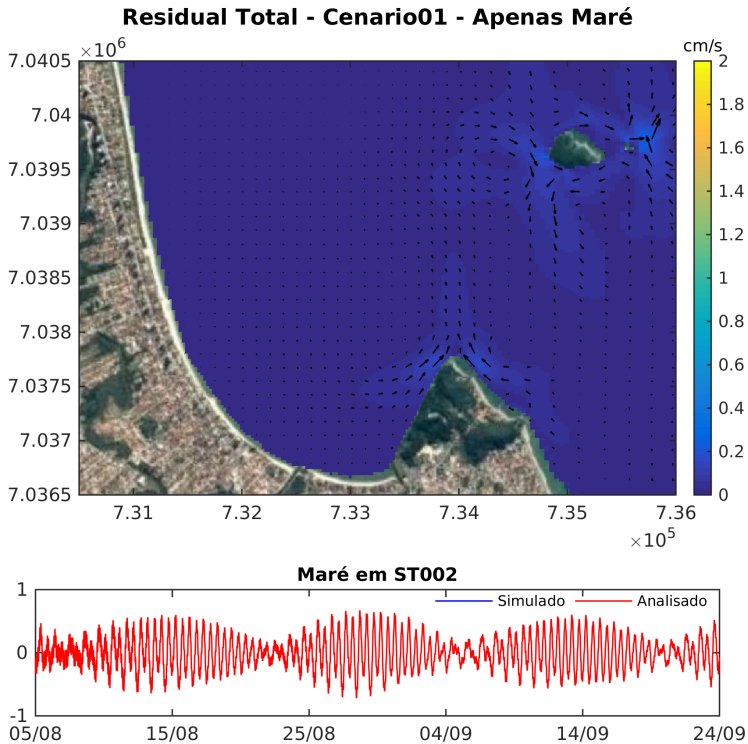


Figura 4.29: Mapa de correntes residuais para um período de 2 meses no Cenário 01.

A tendência verificada no mapa foi vista em todos os mapas de análise de residuais a cada 50, 100 e 200 horas. O que pode ser observado é que, em momentos de maré de quadratura, as correntes passam a ser ainda menos intensas, muitas vezes não alcançando $0,2\text{cm.s}^{-1}$ em todo o domínio avaliado (Figura 4.30). Ainda na quadratura é possível verificar um vórtice sendo formado exatamente na frente da Ponta da Penha e o vórtice sul da ilha Feia se estende até quase a Ponta da Penha. Em momentos de sizígia, o padrão de distribuição das correntes é semelhante ao padrão residual total, porém, com correntes mais intensas, que chegam a $0,6\text{cm.s}^{-1}$.

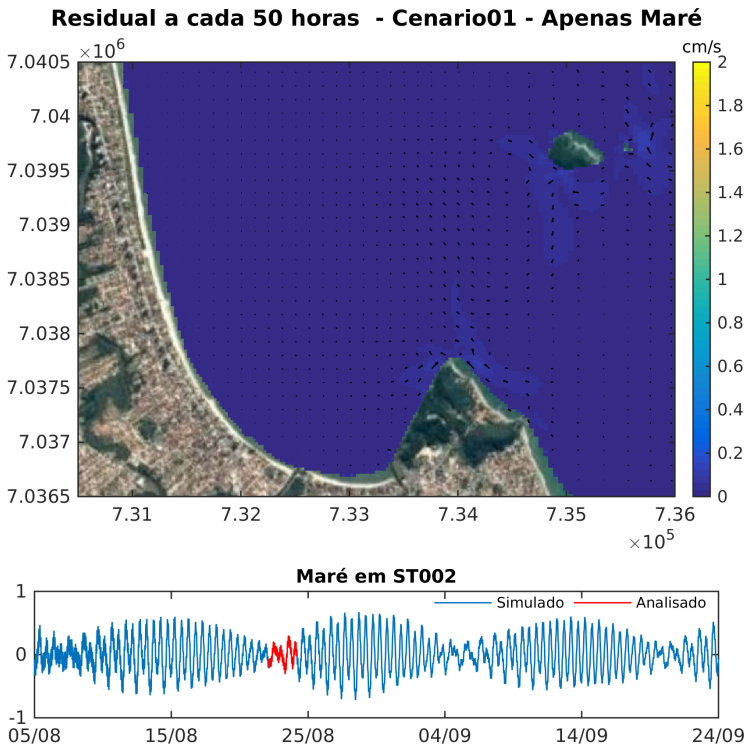


Figura 4.30: Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 01

A figura 4.31 apresenta o mapa de residual total para o período de 2 meses simulado para o Cenário 02, simulado com maré e vento variando no tempo. Buscou-se entender como é o residual na região considerando um vento real, ou seja, esse é o cenário que mais se aproxima da realidade na Enseada.

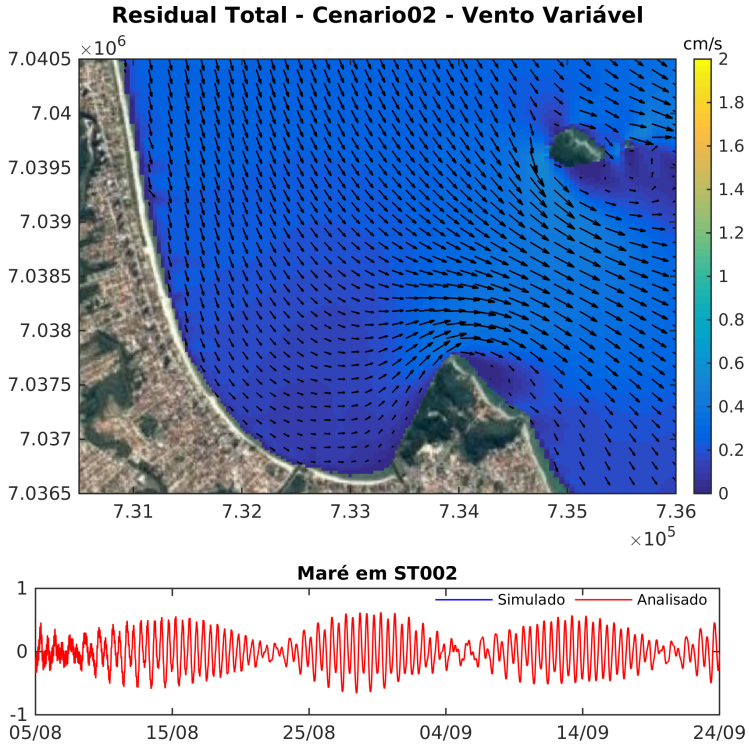


Figura 4.31: Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 02.

Pode-se verificar que o padrão é tipicamente de norte para sul em todos os momentos, sem formação de vórtice. As correntes são intensificadas no estreitamento da plataforma entre a Ilha Feia e a Ponta da Penha, onde chega a valores próximos de $0,6\text{cm.s}^{-1}$. As correntes mais intensas, no entanto, ficam logo ao sul da Ilha Feia. Ao longo da praia, os valores são homogêneos e em torno de

$0,3\text{cm.s}^{-1}$.

É interessante notar que existe uma diminuição na intensidade da corrente conforme esta se aproxima da zona de sombra da enseada, e as correntes exatamente próximas do costa ficam mais amenas, em torno de $0,1\text{cm.s}^{-1}$.

As figuras geradas a cada 50h, 100h e 200h mostraram cenários muito distintos ao longo do tempo. Formação de vórtices na região da enseada, intensificação da corrente ao longo do costão, uma região de zona de sombra na parte leste da Ponta da Penha. O que verificou-se é que o vento é um fator atuante e representativo para as correntes na região e, por isso, análises mais detalhadas do padrão de acordo com o vento serão apresentadas nos cenários posteriores.

A figura 4.32 apresenta o mapa de residual total para o período de 2 meses simulado para o Cenário 03, simulado com maré e vento constante de NE com 4m.s^{-1} . É possível perceber que um grande vórtice de sentido horário passa a aparecer na zona de sombra da praia. As correntes ao longo do costão invertem a direção e passam a ser de Norte para Sul. Correntes nas proximidades da praia tem maior intensidade e chegam a $0,4\text{cm.s}^{-1}$. Próximo à região onde se encontra a Zona de Erosão Acentuada existe uma diminuição na intensidade da corrente, quando as correntes de norte, vindas da parte mais exposta da praia se encontram com as correntes associadas ao vórtice.

Correntes de até $0,7\text{cm.s}^{-1}$ são observadas no setor sul da Ilha Feia. Um vórtice no sentido anti-horário pode ser observado na parte sudeste da ilha, com velocidades na ordem de $0,1\text{cm.s}^{-1}$.

É interessante notar que, neste cenário, a parte leste da Ponta da Penha, normalmente associada com maiores velocidades nos cenários anteriores, se apresenta numa zona de sombra, com velocidade também na ordem de $0,1\text{cm.s}^{-1}$.

A figura 4.33 apresenta o mapa de residual total para o período de 2 meses simulado para o Cenário 04, com maré e vento constante de NE com 10m.s^{-1} . O padrão de correntes é muito semelhante àquele encontrado no cenário anterior, porém, com velocidades consideravelmente superiores aos cenários anteriores, chegando

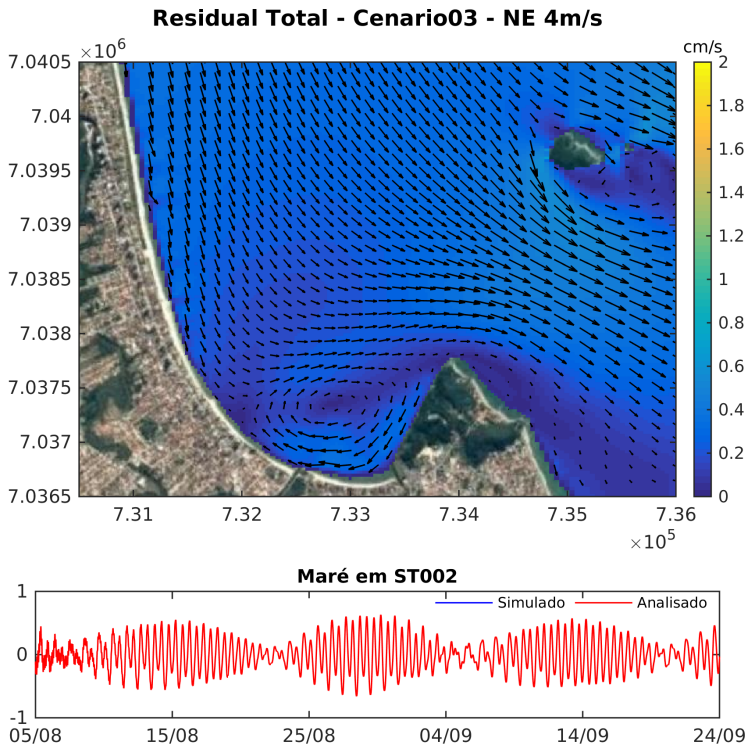


Figura 4.32: Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 03.

a $2cm.s^{-1}$ na área NE da Ilha Feia. O vórtice da área de sombra da praia chega a alcançar $1,6cm.s^{-1}$. Esses valores representam mais de 10% da velocidade encontrada na região. Ou seja, o residual de corrente para ventos intensos pode ser bastante decisivo para variações na hidrodinâmica e, por consequência, na morfodinâmica da região.

A zona de sombra a SE da Ilha Feia e na Ponta da Penha passam a ser ainda mais contrastantes com as correntes intensificadas devido ao estreitamento da plataforma.

O padrão apresentado na figura 4.33 se apresentou praticamente constante nas demais análises feitas, o que mais uma vez corrobora

a teoria de que o vento é muito mais relevante para a geração de correntes na região de estudo do que a maré.

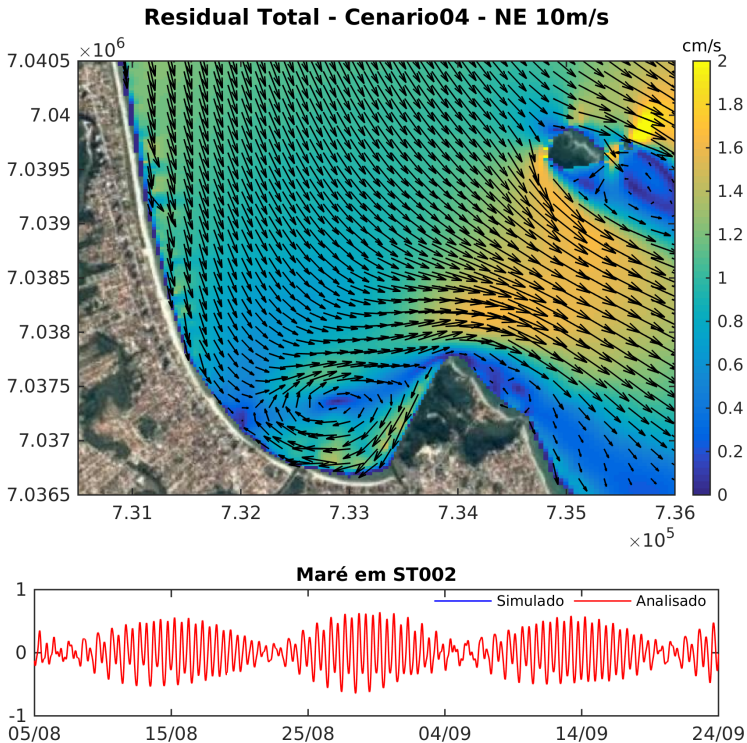


Figura 4.33: Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 04.

A figura 4.34 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 05, com maré e vento constante de S com $4m.s^{-1}$. Neste cenário, correntes de sul com velocidades de até $0,8cm.s^{-1}$ aparecem na parte leste da Ponta da Penha. Esse fluxo segue em direção ao norte, mas parte dele entra na zona de sombra gerada pelo costão e dá origem a um vórtice de sentido anti-horário, com velocidades abaixo de $0,2cm.s^{-1}$. O vórtice tem início, na praia, na altura da desembocadura do rio Piçarras, seguindo em correntes amenas para sul. A corrente na parte exposta da enseada onde, nos

cenários anteriores, sempre esteve de norte para sul, passa a ser de sul para norte a parte da desembocadura do rio, com velocidades de até $0,8\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

A ilha Feia continua causando uma zona de sombra, desta vez localizada a NO desta. O fluxo que passa pela ilha apresenta-se uniforme e sem geração de vórtices naquela área.

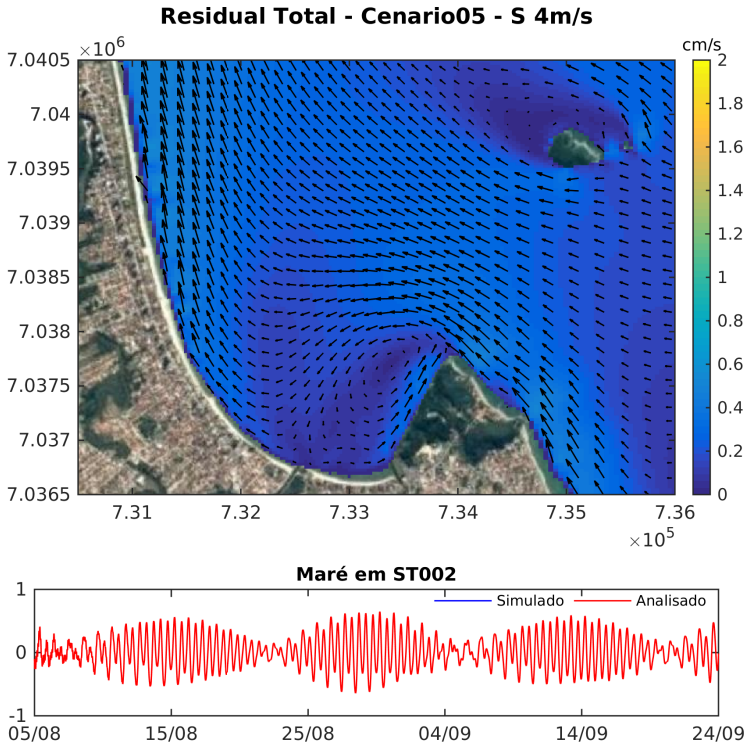


Figura 4.34: Mapa de correntes residuais para um período de 2 meses no Cenário 05.

Este padrão de velocidade e direção de correntes se manteve muito semelhante em todas as análises de residual por horas, com pequenas alterações causadas pelo momento do ciclo de maré que se está sendo analisado. Marés de quadratura acabam permitindo a intensificação da corrente mais do que os momentos de maré de

sizígia mas, em geral o padrão é o mesmo (Figura 4.35).

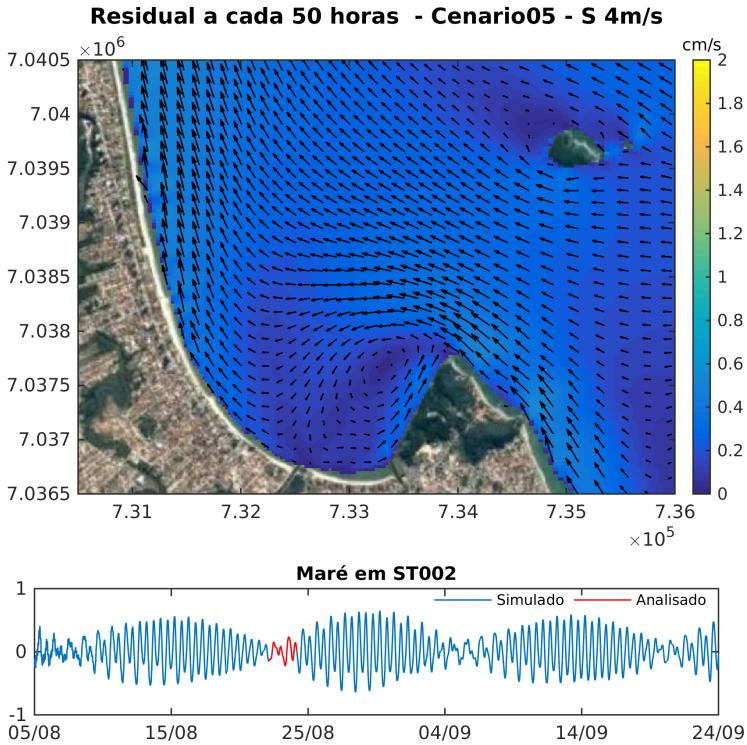


Figura 4.35: Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 05.

A figura 4.36 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 06, com maré e vento constante de S com $10m.s^{-1}$. Verifica-se um padrão semelhante em termos de direção, com o vórtice sendo gerado na região de sombra da enseada. Entretanto, os valores de velocidade de corrente podem alcançar $2cm.s^{-1}$ na região leste da Ponta da Penha e na parte exposta da enseada, com intensificação gradual da corrente a partir da desembocadura do rio Piçarras.

O próprio vórtice gerado neste cenário teve correntes mais intensas, com correntes que chegam a $2cm.s^{-1}$ na parte superior da

Ponta da Penha. Nas proximidades da Ilha Feia houve um aumento de velocidade, porém não tão nítido quanto aquele sentido nas áreas mais próximas da costa.

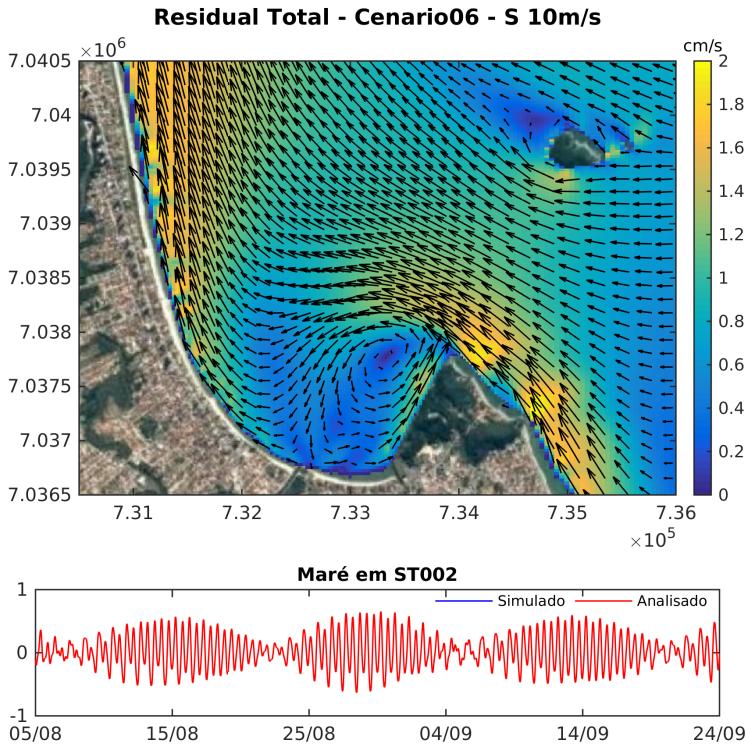


Figura 4.36: Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 06.

A figura 4.37 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 07, com maré e vento constante de E com $4m.s^{-1}$. O mesmo padrão de um “corredor de correntes” na parte leste da Ponta da Penha, visto no cenário anterior, é visto no presente cenário. Entretanto, não há a geração de um vórtice e as correntes passam pela Ponta da Penha, seguem sul pelo costão, e então continuam pela praia seguindo para norte. As velocidades em geral não ultrapassam $0,7cm.s^{-1}$ com uma

zona de baixas velocidades localizadas no centro da Enseada, com velocidades na ordem de $0,1\text{cm.s}^{-1}$.

Neste cenário, ficou mais nítido que apesar de ter pouca influência na geração de correntes, a maré consegue ter uma influência modesta na velocidade da corrente residual, como pode ser visto na figura 4.38 e 4.39.

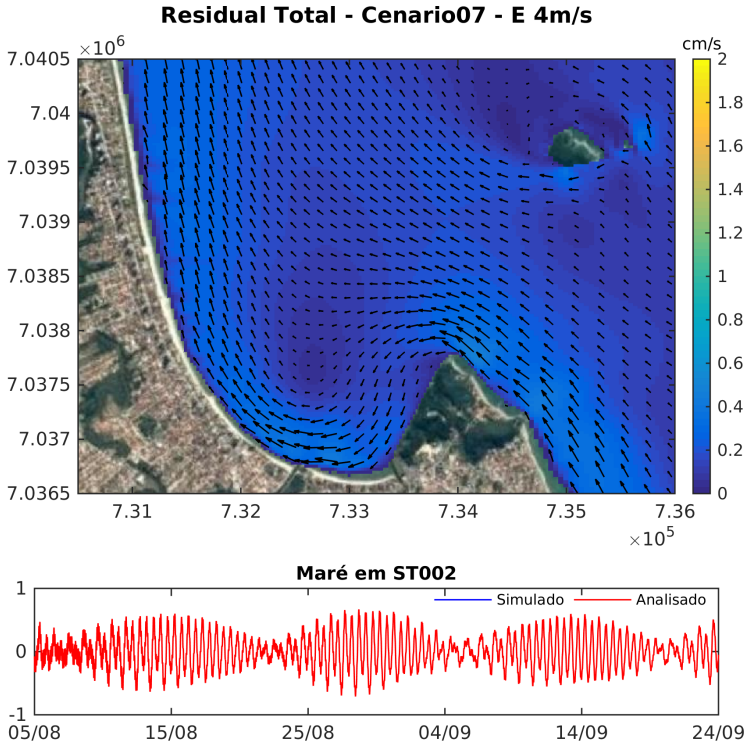


Figura 4.37: Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 07.

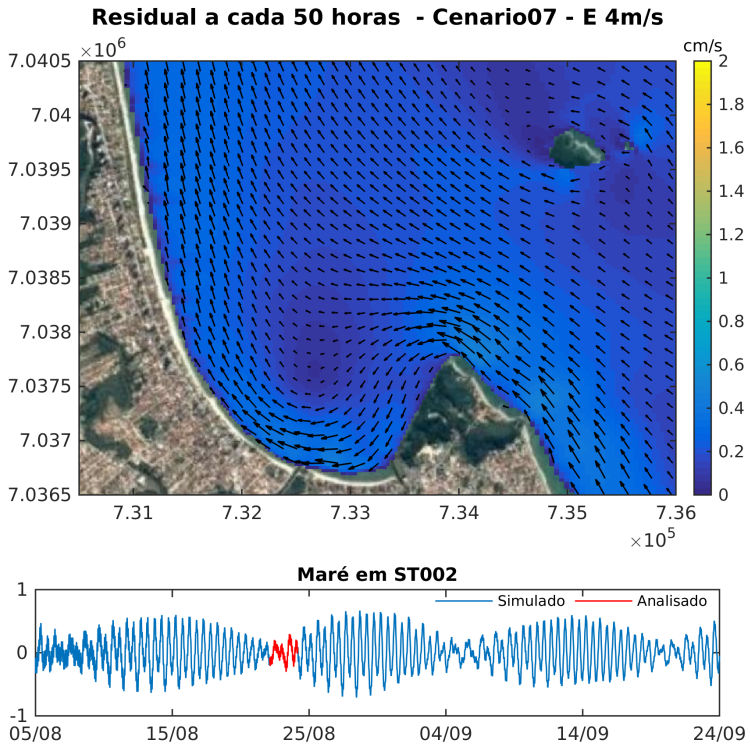


Figura 4.38: Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de quadratura no Cenário 07

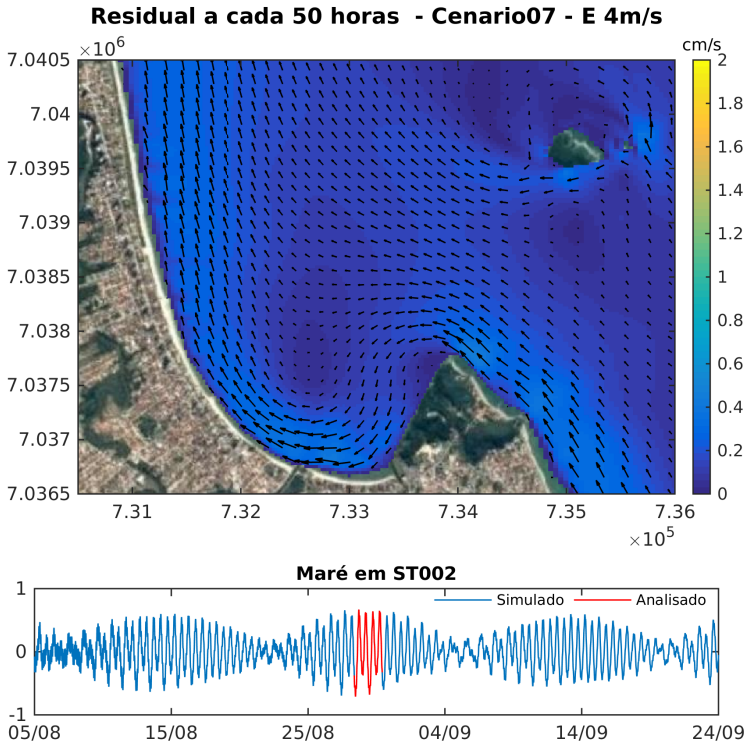


Figura 4.39: Mapa de correntes residuais para um período de 50h e maré de sizígia no Cenário 07

A figura 4.40 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 08, com maré e vento constante de E com $10m.s^{-1}$. Apesar do mesmo padrão sem vórtice e com direção preferencial de sul para norte aparece neste cenário, as correntes são consideravelmente mais intensas, alcançando velocidades acima de $1,2cm.s^{-1}$ em praticamente toda a praia. Velocidades próximas a $2cm.s^{-1}$ aparecem logo ao norte da Ponta da Penha, diminuindo de intensidade conforme seguem para norte.

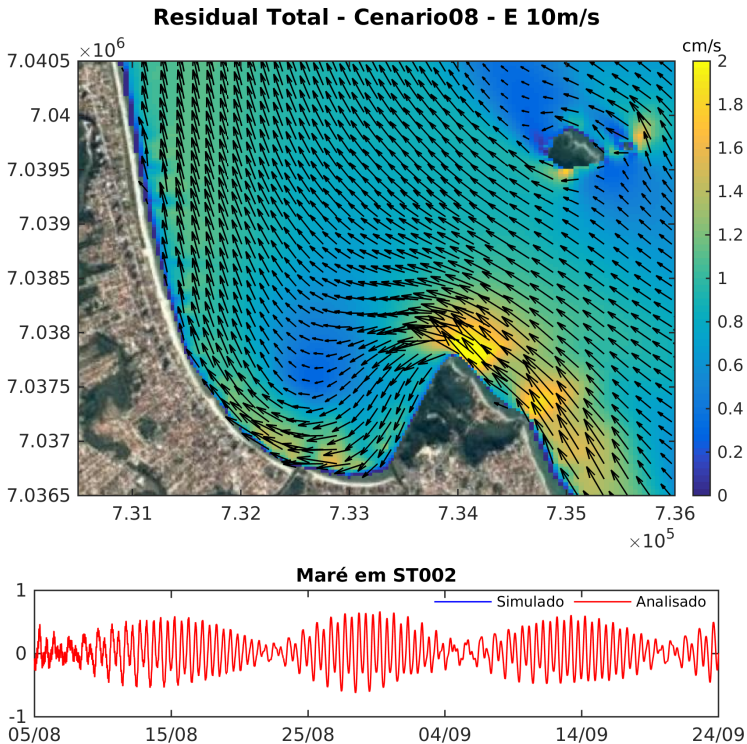


Figura 4.40: Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 08.

A figura 4.41 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 09, com maré e vento constante de SE com $4m.s^{-1}$. O perfil de correntes deste cenário é semelhante àquele encontrado no Cenário 05 de vento S (Figura 4.34). Entretanto, o atual cenário apresenta, no geral, velocidades superiores em todo o domínio quando comparado com o cenário de vento S, com velocidades perto de $0,8cm.s^{-1}$ ocorrendo ao longo de toda praia.

O vórtice de sentido anti-horário também pode ser visto, também com velocidades mais intensas que aquele encontrado no Cenário 05.

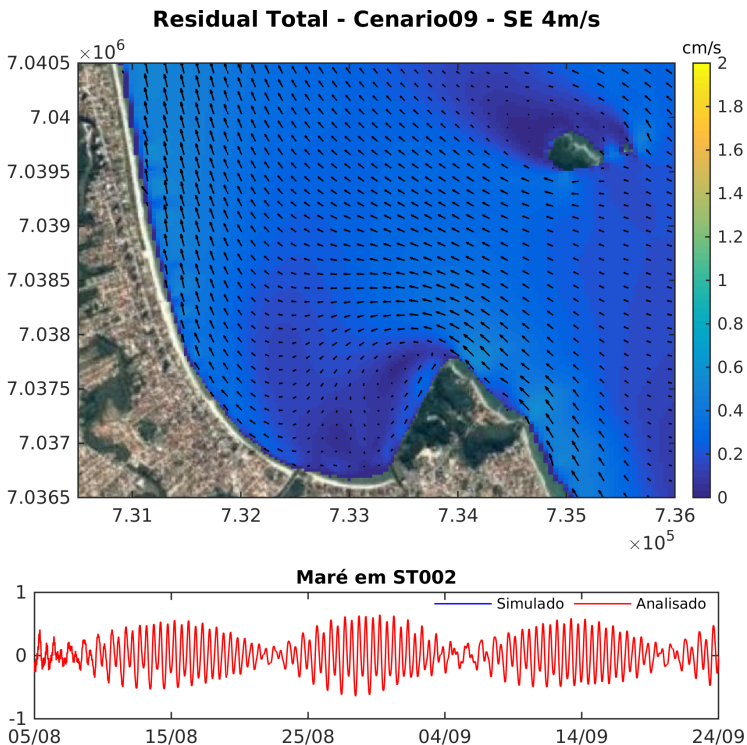


Figura 4.41: Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 09.

A figura 4.42 apresenta o mapa de residual total para o período de dois meses simulado para o Cenário 10, com maré e vento constante de SE com $10m.s^{-1}$. Além da intensificação das correntes por conta do aumento da velocidade do vento, este cenário apresenta a formação de dois vórtices de sentido contrário dentro da Enseada. Mais ao norte, próximo do final da Ponta da Penha, está o vórtice de sentido anti-horário também presente nos cenários 05, 06 e 09. Entretanto, vê-se a formação de um segundo vórtice, mais ao sul e de sentido horário.

Semelhante ao cenário 06, as correntes próximas a costa, na parte exposta da praia, podem ultrapassar $1,2cm.s^{-1}$ e têm direção de sul para norte.

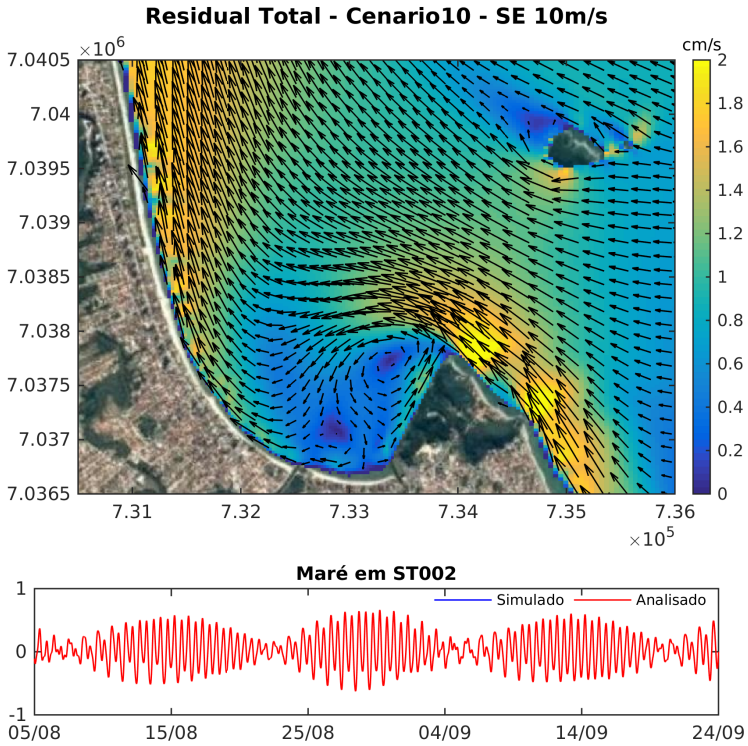


Figura 4.42: Mapa de correntes residuais para um período de dois meses no Cenário 10.

5 Discussão

Os resultados no domínio da frequência e número de forma indicam que a Enseada do Itapocorói possui um regime de marés misto influenciado principalmente pela componente semidiurna, conforme foi descrito por Schettini et al. (1999), com considerável influência da componente meteorológica no sinal medido. Verificou-se que existe uma variação de nível entre a parte externa e interna da enseada, com uma leve tendência de empilhamento na área interna da enseada ($\approx 10\text{cm}$).

Em relação ao espectro de energia do sinal do Píer da Penha, os picos de frequência das constantes harmônicas M2, S2, K1 e O1 aparecem de forma muito nítida, ao contrário dos dados dos ADCPs, onde picos indistintos eram visto nos períodos de 12 e 25h. Esse resultado indica que dados mensais podem ser insuficientes para uma análise detalhada do espectro de maré da região e, portanto, é imprescindível medições de longo período para uma melhor descrição da região. Uma descrição detalhada dos resultados harmônicos pode ser encontrada no Apêndice B.

Estudos anteriores no sul do Brasil (ALMEIDA, 2013; PARISE; CALLIARI; KRUSCHE, 2009) verificaram que as marés meteorológicas podem alcançar até 1,9m. Nas medições analisadas neste estudo para o período de 2011, a variação de nível meteorológica não excedeu 70cm, com um valor médio de 19cm. Estes resultados concordam com aqueles encontrados por Hoefel (1998), que encontrou valores de até 60cm para a Enseada do Itapocorói, sendo que valores de até 20cm representavam cerca de 80% dos registros de variação de nível causadas por efeitos meteorológicos no trabalho da autora. Entretanto, os registros de nível do Píer

da Penha, com maior tempo de medição, mediram um evento que alcançou cerca de 1,4m, indicando que eventos de maior amplitude podem acontecer na região.

Mais de um quarto da energia (>27%) do sinal medido de nível estava contida em frequências submareais, resultado semelhante àquele encontrado por Truccolo, Franco e Schettini (2006) que verificou que 24% da variação do nível do mar em São Francisco do Sul estava associada a estas frequências. Dessa forma, é possível concluir que o sul do Brasil está submetido à presenças de outros processos de larga escala, como ondas de plataforma, que devem ser levados em consideração em estudos futuros. Também foi observado que o percentual de energia em frequências submareais aumentou do ponto ST001 (totalmente abrigado) para o ponto ST003 (exposto).

Temperaturas variaram entre 17°C to 21°C, o que corresponde a temperaturas características da massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS) descrita por Schettini et al. (1999). No entanto, Silveira et al. (2000) indicam que 20°C é o limite superior de temperatura para a ACAS e que temperaturas acima deste valor indicariam a presença da massa de Água Tropical (AT). Portanto, essa temperatura pode estar relacionada à presença de uma massa d'água descrita por Carvalho, Schettini e Ribas (1998) chamada Água de Plataforma que seria o resultado da mistura da ACAS com a AT. Resultados no domínio da frequência indicaram que áreas internas estão sujeitas a variações diurnas de temperatura, enquanto áreas externas não apresentaram picos significativos de energia em nenhum período.

As temperaturas registradas neste estudo se apresentaram consideravelmente menores que àquelas descritas por Schettini et al. (1999), que encontrou valores variando entre 25 e 27°C. No entanto, os autores fizeram as medições no verão enquanto as medições do presente estudo foram feitas no período do inverno, onde temperaturas mais baixas são esperadas.

O residual de nível apresentou uma sincronia com os dados de vento com a queda de nível associada a ventos de NE e

aumento do nível associado a ventos de SE, como verificado por Carvalho, Schettini e Ribas (1998). Verificou-se a presença de uma ressurgência local causada por vento, resultante do transporte de Ekman, com influência nos sinais de nível e de temperatura. Os resultados indicaram uma maior correlação vento com o nível meteorológico ($r^2=0.55$) do que da temperatura ($r^2=0,16$). Essa menor correlação com a temperatura pode ser devido à influência de trocas de calor comuns em águas rasas. De modo geral, a melhor correlação entre vento e nível e vento e temperatura ocorre com 1 hora de diferença entre a atuação do vento e a resposta por parte do sistema.

As análises de corrente indicaram a presença de duas áreas bastante distintas tanto em termos de velocidade quanto em termos de influência.

As áreas internas da baía estão sujeitas a forte influência de ventos local com correntes amenas, normalmente abaixo de 8cm.s^{-1} , resultado que concorda com estudos anteriores (SCHETTINI et al., 1999; LEITE et al., 2011; ALMEIDA, 2013).

Schettini et al. (1999) observaram que a brisa marinha tem um papel importante na região e os resultados do presente trabalho corroboram as observações feitas pelo autor, indicando que existe uma variação diária que causa a inversão dos vetores de corrente. No ponto ST002 correntes possuem, em geral, direção NO-SE na camada mais superficial e direção L-O nas camadas mais inferiores com maiores velocidades de corrente acontecendo nas camadas centrais da coluna d'água.

Leite et al. (2011) observou em seu trabalho a presença de um vórtice de sentido anti-horário na parte abrigada da enseada gerado principalmente em momentos de predominância de ventos nordeste. O que pode se observar nos dados medidos analisados é que o padrão de sentido anti-horário observado por Leite et al. (2011) acontece também na coluna d'água, com um típico formato de espiral de Ekman (EKMAN, 1905).

A direção encontrada no ponto ST002 é condizente com o resultado observado nos cenários de modelagem com ventos

do quadrante sul, que foram de fato os ventos predominantes durante o período de medição. Dessa forma, pode-se dizer que a estrutura geral das correntes em regiões rasas tem um padrão típico condizente com o vento regional, com formação da espiral de Ekman de superfície, mas com eventuais inversões influenciadas pela brisa marinha.

Vale ressaltar que os episódios de velocidade acima de 25cm.s^{-1} em ST001 e ST002 não aconteceram no mesmo período de tempo. Essa diferença parece indicar que mesmo na área interna da enseada processos diferentes podem reger as correntes em cada uma das regiões analisadas, porém nenhuma outra análise apresentou possíveis causas para essas alterações.

Já as áreas externas apresentam correntes mais intensas, podendo alcançar quase 50cm.s^{-1} e uma média de 13cm.s^{-1} . A presença de uma camada de Ekman de fundo na área externa da enseada parece estar associada à uma ressurgência local, com retirada de água pela parte superior e entrada de água pelo fundo. As grandes velocidades alcançadas nesta região e as pequenas mudanças de orientação de corrente ao longo do tempo indicam a presença de uma corrente costeira bastante estável fluindo pela costa em direção sul. Ao longo do tempo verificou-se aumentos de velocidade normalmente associados com ventos de NE e algumas inversões de corrente ao longo do tempo, normalmente associadas à presença de ventos do quadrante sul.

A maior influência do vento nas correntes, quando comparado com a maré, já tinha sido reportada por Schettini et al. (1999) no seu trabalho e também puderam ser novamente observadas através das análises de correntes residuais. Os residuais gerados apenas pela maré não alcançam $0,2\text{cm.s}^{-1}$, enquanto residuais de vento chegaram a alcançar 2cm.s^{-1} em alguns cenários. Esse resultado também corrobora com o trabalho de Leite et al. (2011).

As correntes residuais são normalmente muito menores que as correntes típicas da região, usualmente inferiores a 1cm.s^{-1} . Ventos de intensidade de 10m.s^{-1} , independente da direção, podem gerar correntes residuais da ordem de 2cm.s^{-1} , o que representa cerca

de 25% das médias velocidades alcançadas pelas áreas internas da enseada. Dessa forma, ventos intensos e de direção constante podem ter uma influência significativa na hidro e morfodinâmica da região e não devem ser ignorados seus efeitos de longo prazo.

Ventos de S e SE geraram um vórtice de sentido anti-horário na zona de sombra da Enseada, enquanto ventos de NE geram um vórtice em sentido horário, semelhante ao que foi descrito por Leite et al. (2011). Ventos de E não geraram nenhum vórtice em ambas as velocidades de vento enquanto o cenário com vento SE de $10m.s^{-1}$ foi o único que gerou a presença de dois vórtices em sentidos contrários, ambos dentro da zona de sombra da enseada.

O estreitamento da plataforma entre a Ponta da Penha e a Ilha Feia está associado a aumento de velocidades de corrente, especialmente correntes de norte. Quando o residual tem correntes de sul, as maiores velocidades ficam associadas à parte leste da Ponta da Penha, mais próximo da costa e não tanto no encurtamento da plataforma.

Apesar de todos os resultados de correntes residuais integradas em dois meses, 50, 100 ou 200 horas terem apresentado resultados semelhantes na grande maioria dos cenários, verificou-se que os mapas a cada 50 horas são mais adequados para avaliar o comportamento dos residuais em momentos específicos de maré.

6 Conclusão

Este trabalho buscou ampliar os conhecimentos sobre a Enseada do Itapocorói, focando-se na hidrodinâmica da mesma. A hipótese foi aceita, sendo o vento o principal fator predominante na Enseada.

Foi possível verificar que a Enseada do Itapocorói se encontra sob diferentes processos em sua área interna e sua área externa, ambas com influência do vento. Uma ressurgência costeira local pode ser observada tanto nas áreas abrigadas quanto nas áreas expostas, sendo a última se apresenta através de uma camada de Ekman de fundo.

A parte interna, protegida, da enseada é influenciada por processos mais locais como aquecimento local e a brisa marinha. Esses processos mais locais geram correntes amenas (abaixo de 8cm.s^{-1}) e que aparecem como uma espiral de Ekman de superfície ao longo da coluna d'água, sofrendo inversão da direção ao menos uma vez por dia, influenciada pela própria inversão da brisa marinha. A temperatura e o nível meteorológico apresentaram correlação com o vento regional, embora o primeiro esteja sujeito também à influência de aquecimento local e, portanto, apresenta menor correlação com o vento do que o segundo porém ambos apresentaram um atraso de 1 hora entre a ocorrência do vento e a resposta do sistema.

Já a área exposta da enseada é regida por processos regionais, com a presença de uma corrente costeira bastante estável que flui ao longo da costa em direção ao sul com velocidades maiores que aquelas registradas na parte interna. As velocidades tem em média 13cm.s^{-1} podendo ultrapassar 40cm.s^{-1} . Essa corrente costeira apresenta inversão de direção, assim como aquelas vistas

no interior da enseada, porém essas inversões são menos frequentes e normalmente associadas com a inversão do vento para ventos do quadrante sul.

A grande influência do vento na enseada também pode ser vista nos resultados de correntes residuais. A maré mostrou ter pouca influência, enquanto ventos de todas as direções geram correntes relevantes, quando considerado a dinâmica local. Correntes residuais chegam a alcançar 25% das velocidades médias encontradas no interior da enseada são bastante comuns com ventos na ordem de $10m.s^{-1}$, o que implica que sua influência no longo prazo não deve ser desconsiderada.

O vento foi o padrão predominante na Enseada, enquanto a maré representa uma parte muito pequena da circulação local.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, L. R. de. *Estudio de dinámica litoral y evolución de la zona sur de la Playa de Piçarras (Santa Catarina/ Brasil)*. Dissertação (Mestrado) — Universidad de Cantabria, Santander, 2013. 263 p.

ARAKAWA, A.; LAMB, V. Methods of computational physics. *Academic Press*, v. 17, p. 174–265, 1977.

ARAUJO, R. S.; SPROVIERI, F. C.; FREITAS, D.; KLEIN, A. H. F. Variação da morfologia praial e identificação de zonas de erosão acentuada (zea) na enseada do itapocorói-sc. *Braz. J. Aqua. Sci. Technol.*, v. 14, n. 1, p. 29–38, 2010.

BITENCOURT, D.; SILVA, G. V. *Levantamento Batimétrico na Enseada do Itapocorói utilizando Motoaquática*. [S.l.], 2011.

BROWN, J. M.; BOLAÑOS, R.; SOUZA, A. J. a. Process contribution to the time-varying residual circulation in tidally dominated estuarine environments. *Braz. J. Aqua. Sci. Technol.*, v. 14, n. 1, p. 29–38, 2010.

BURCHARD, H.; HETLAND, R. D.; SCHULZ, E.; SCHUTTELAARS, H. M. Drivers of residual estuarine circulation in tidally energetic estuaries: Straight and irrotational channels with parabolic cross section. *Journal of Physical Oceanography*, v. 41, p. 548–570, 2011.

CARVALHO, J. L. B.; SCHETTINI, C. A. F.; RIBAS, T. M. Estrutura termohalina do litoral centro-norte catarinense. *Notas Técnicas Facimar*, v. 2, p. 181–197, 1998.

CHENG, R. T. Residual currents and long-term transport. In: _____. New York, U.S.A.: Springer-Verlag, 1990. cap. Introduction.

COCHRAN, W. T.; COOLEY, J. M.; FAVIN, D. L.; HELMS, H. D.; KAENEL, R. A. What is the fast fourier transform. *Proceeding of the IEEE*, v. 55, p. 1664–1674, 1967.

DELTAIRES. *Delft3D-QUICKIN User Manual*. [S.l.], 2011.

DELTAIRES. *Delft3D-RGFGRID User Manual*. [S.l.], 2011.

DELTAIRES. *Delft3D-FLOW User Manual*. [S.l.], 2014.

EGBERT, G. D.; BENNET, A. F.; FOREMAN, M. G. G. Topex/-poseidon tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 821–852, 1994.

EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *American Meteorologica Society*, v. 19, p. 183–204, 2002.

EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. *TPXO/Poseidon*. 2015. Acessado em 09 ago 2015. Disponível em: <<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>>.

EKMANN, V. W. On the influence of the earth's rotation on ocean-currents. *Arkiv for Matematik, Astronomi O. Fysik.*, v. 2, n. 11, 1905.

FOX, D. G. Judging air quality model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, p. 599– 609, 1981.

FREITAS, D.; ARAÚJO, R. S.; KLEIN, A. H. F.; MENEZES, J. T. Quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras para a enseada do itapocorói - sc. *Braz. J. Aqua. Sci. Technol.*, v. 14, n. 1, p. 39–49, 2010.

HANNACHI, A.; JOLLIFFE, I. T.; STEPHESON, D. B. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: a review. *International Journal of Climatology*, v. 27, 2007.

HEUVEL, S. van den; HOEKSTRA, R.; ZEEUW, R. de; ZOON, A. *Case Study Piçarras Beach: Erosion and nourishment of a headland bay beach*. [S.l.], 2008.

HOEFEL, F. G. *Morfodinâmica de praias arenosas oceânicas: Uma revisão bibliográfica*. [S.l.]: Editora da Univali, 1998.

HORSTMAN, E.; DOHMEN-JANSSEN, M.; HULSCHER, S. Modeling tidal dynamics in a mangrove creek catchment in delft3d. *Coastal Dynamics*, p. 833–844, 2013.

HU, K.; DING, P. The effect of deep waterway constructions on hydrodynamics and salinities in yangtze estuary, china. *Journal of Coastal Research*, v. 56, p. 961–965, 2009.

HU, K.; DING, P.; WANG, Z.; YANG, S. A 2d/3d hydrodynamic and sediment transport model for the yangtze estuary, china. *Journal of Marine Systems*, v. 77, p. 114–136, 2009.

HUNT, J. N.; JOHNS, B. Currents induced by tides and gravity waves. *Tellus*, v. 15, n. 4, p. 343–351, 1963.

HUTHNANCE, J. M. Tidal current asymmetries over the norfolk sandbanks. *Estuarine and Coastal Marine Science*, I, p. 89–99, 1973.

IBGE. 2015. Acessado em fev. 2015. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=421280&search=santa-catarina|balneario-picarras>>.

IMASATO, N. What is tide-induced residual current. *American Meteorological Society*, p. 1307–1317, 1983.

JICA. *Feasibility Study on the Flood Control Project in the Lower Itajaí River Basin: Final report, supporting report*. [S.l.], 1990.

JUNNINEN, H.; NISKA, H.; TUPPURAINEN, K.; RUUSKANEN, J.; KOLEHMAINEN, M. Methods for imputation of missing values in air quality data sets. *Atmospheric Environment*, v. 38, p. 2895–2907, 2004.

KLEIN, A. H. F.; ARAUJO, R. S.; POLETTE, M.; SPERB, R. M.; NETO, D. F.; SPROVIERI, F. C.; PINTO, F. T. Beach management: Principles and practice. In: _____. 100 Cambridge Grove: Earthscan, 2009. cap. Ameliorative Strategies at Balneário Piçarras Beach.

KLEIN, A. H. F.; MENEZES, J. T. Beach morphodynamics and profile sequence for a headland bay coast. *Journal of Coastal Research*, v. 17, n. 4, p. 812–835, 2001.

KLEIN, A. H. F.; MENEZES, J. T. de; DIEHL, F. L.; ABREU, J. G. N. de; POLETTE, M.; SPERB, R. M.; SPERB, R. C.; HORN, N. Erosão e progradação do litoral brasileiro. In: _____. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2006. cap. Santa Catarina.

KONDRASHOV, V.; GHIL, M. Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 13, p. 151–159, 2006.

LEBLOND, P. H. *Tydal Hydrodynamics*. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc, 1991.

LEE, M. A. Empirical orthogonal function analysis of avhrr sea surface temperature patterns in taiwan strait. *Journal of Marine Science and Technology*, v. 11, 2003.

LEITE, L. M.; DIAS, J. M.; CARVALHO, J. M. B.; KLEIN, A. H. F. Hydrodynamic study of bay beaches - a case study os itapocoroi bay, brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 64, p. 1086–1090, 2011.

LEONARDI, N.; CANESTRELLI, A.; SUN, T.; FAGHERAZZI, S. Efect of tides on mouth bar morphology and hydrodynamics. *Journal of Geophysical Research*, v. 118, p. 4169–4183, 2013.

LESSER, G. R.; ROELVNIK, J. A.; KESTER, J. A. T. M. V.; STELLING, G. S. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, v. 51, p. 883–915, 2004.

MACCREADY, P.; BANAS, N. S. *Estuary Treatise: Residual circulation, mixing and dispersion*. [S.l.: s.n.], 2010.

MACIEL, R. *Prefeitura de Piçarras decreta novo estado de calamidade pública devido ao avanço das ondas*. 2010. Acessado em 10 ago. 2015. Disponível em: <<http://diariocatarinense.clicrbs.com.br/sc/noticia/2011/11/prefeitura-de-picarras-decreta-novo-estado-de-calamidade-publica-devid.html>>.

MASSEL, S. R. *Hydrodynamics of Coastal Zones*. [S.l.]: Elsevier Science Publisher, 1989.

MONTEIRO, M. A. Caracterização climática do estado de santa catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. *Geosul*, v. 21, n. 16, p. 69–78, 2001. Florianópolis.

MÖLLER, O.; ABE, M. P. Estudos oceanográficos: do instrumental ao prático. In: _____. Pelotas, RS: Editora Textos, 2011. cap. Oceanografia Física.

NIHOUL, J. C. J.; RONDAY, F. C. The influence of the "tidal stress" on the residual circulation. *Tellus XXVII*, v. 5, 1975.

OLIVEIRA, J. G. de. *Modelagem numérica das respostas do perfil praiial a eventos extremos em praias de enseada: Estudo de caso da enseada do itapocorói, santa catarina, brasil*. 2013. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Santa Catarina.

PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J.; KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of brazil: Atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 57, n. 3, p. 175–188, 2009.

PARKER, B. B. *Tydal Hydrodynamics*. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc, 1991.

PARKER, B. B. *Tidal Analysis and Prediction*. [S.l.], 2007.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using ttide. *Computers & Geosciences*, v. 28, p. 929–937, 2002.

PUGH, D. T. *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1987.

RAMIREZ, M. R. *Estudo de la estabilidad de las playas en la enseada de Itapocorói (SC, Brasil)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade da Cantábria, Santander, 2010. 184 p.

RIBEIRO, P. J. da C. *Medição de correntes e ondas na enseada do Itapocorói: Processamento dos dados e resultados*. [S.l.], 2011.

RIBEIRO, P. J. da C. *Transformação de ondas em praias de enseada: Estudo de Caso na Enseada de Itapocorói*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Florianópolis, Florianópolis, 2014. 140 p.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de santa catarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 22, n. 2, p. 135–151, 2004.

SAHA, S.; MOORTHI, S.; PAN, H. L.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P. The ncep climate forecast system reanalysis. *American Meteorological Society*, p. 1015–1057, 2010.

SAHA, S.; MOORTHI, S.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S. *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Selected Hourly Time-Series Products*. [S.l.]: Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2011. Acessado em 16 ago 2015.

SANTUR. *Pesquisa Mercadológica e Estudo da Demanda Turística*. [S.l.], 2012.

SCHETTINI, C. A. F. et al. Aspectos hidrodinâmicos da enseada da armação de itapocorói. *NOTAS TÉC. FACIMAR.*, v. 3, p. 99–109, 1999.

SCHUREMAN, P. *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides*. [S.l.], 1958.

SHORT, A. D.; MASSELINK, G. Handbook of beach and shoreface morphodynamics. In: _____. West Sussex, England: John Wiley & Sons, LTD, 1999. cap. Santa Catarina.

- SILVA, G. V. *Cota de Inundação e Recorrência para a Enseada do Itapocorói e Praia do Morro dos Conventos, Santa Catarina*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 98 p.
- SILVA, R.; BAQUERIZO, A.; LOSADA, M. A.; MENDOZA, E. Hydrodynamics of a headland-bay beach: Nearshore current circulation. *Coastal Engineering*, v. 57, p. 160–175, 2010.
- SILVEIRA, R.; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S.; IKEDA, Y. A corrente do brasil ao largo da costa brasileira. *Rev. Bras. Oceanogr.*, v. 48, p. 171–183, 2000.
- TEE, K. T. Tide-induced residual current - verification of a numerical model. *Journal of Physical Oceanography*, v. 7, p. 396–402, 1976.
- TRUCCOLO, E. C. *Hidrodinâmica em frequência mareal e submareal do estuário do Rio Itajaí-Açu, SC*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 204 p.
- TRUCCOLO, E. C.; FRANCO, D.; SCHETTINI, C. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of santa catarina, brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 547–552, 2006.
- VALLE-LEVINSON, A.; MORAGA, J.; OLIVARES, J.; BLANCO, J. L. Tidal and residual circulation in a semi-arid bay: Coquimbo bay, chile. *Continental Shelf Research*, v. 20, p. 2009–2028, 2000.
- WAVEREN, R. H. van; GROOT, S.; SCHOLTEN, H.; GEER, F. C. van; WOSTEM, J. H. M.; KOEZE, R. D.; NOORT, J. J. *Good Modelling Practice Handbook*. [S.l.], 2010.
- WILMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, p. 1309 – 1313, 1982.
- YANAGI, T. Fundamental study on the tidal residual circulation i. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, v. 32, p. 199–208, 1976.

