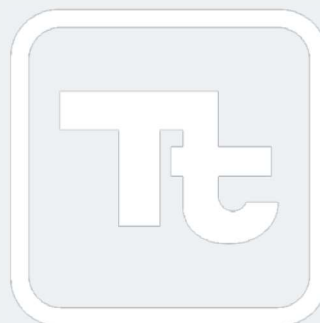


Estudos de Modelagem Numérica Morfodinâmica para Subsídio à Implantação do Complexo Portuário Petrocity São Mateus, Espírito Santo:

Odebrecht Engenharia & Construção



**Em atendimento ao item 9.1.7.2 - Hidrodinâmica Costeira e
Modelagem Computacional do Termo de Referência.**

Estudos de Modelagem Numérica Morfodinâmica para Subsídio à Implantação do Complexo Portuário Petrocity

RT_TT_O18093-01-C
Agosto/2018

APRESENTADO PARA

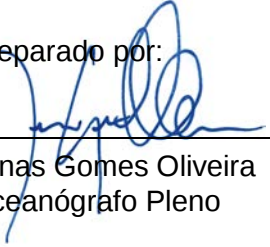
Odebrecht Engenharia & Construção
São Paulo - SP
www.odebrecht.com

APRESENTADO POR

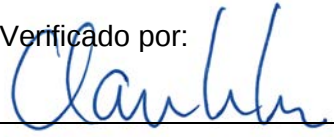
Tetra Tech
São Paulo - SP
www.tetrattech.com

REVISÃO:	DATA:	FINALIDADE:
0	28/06/2018	Emissão inicial
A	31/07/2018	Revisão A
B	03/08/2018	Revisão B
C	06/08/2018	Revisão C

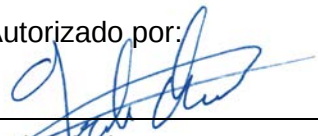
Preparado por:


Jonas Gomes Oliveira
Oceanógrafo Pleno

Verificado por:


Clarissa B. De Luca Menin
Oceanógrafa Sênior / Coordenação
Oceanografia e Engenharia Costeira

Autorizado por:


Gabriel Clauzet
Oceanógrafo Físico / Gerente de Meteorologia,
Oceanografia e Óleo & Gás

Tetra Tech é responsável pelo conteúdo do presente relatório incluindo: tecnologias, metodologias, especificações técnicas, desenhos, figuras, cópias, diagramas, fórmulas, modelos, amostras, e fluxogramas.

A utilização deste material deverá ser compatível com o escopo do projeto/trabalho contratado, fazendo-se expressa menção ao nome da Tetra Tech como autora do estudo. Da mesma forma, quando a equipe técnica da Tetra Tech for incorporada na equipe técnica da empresa contratante, esta deverá ser mencionada, e referenciada, como: "consultores da Tetra Tech". Qualquer dúvida ou alteração desta conduta deverá ser discutida entre o cliente e a Tetra Tech.

TETRA TECH, 2018. Estudos de Modelagem Numérica Morfodinâmica para Subsídio à Implantação do Complexo Portuário Petrocity. Relatório Técnico RT_TT_O18093-01-C, (06 de Agosto de 2018). 79pp+Anexo.

SUMÁRIO EXECUTIVO

Para dar suporte à Odebrecht Engenharia & Construção no licenciamento ambiental do Complexo Portuário Petrocity em São Mateus (ES) apresenta-se, neste estudo, a execução de caracterização meteoceanográfica, de variação de linha de costa e modelagens numéricas hidrodinâmica, ondas e transporte de sedimentos.

Para o presente estudo, a TETRA TECH propõe utilizar o que há de mais moderno em termos de ferramentas computacionais, metodologias e conhecimento científico/tecnológico. Para fornecer uma base compreensiva, justificável cientificamente em todos os aspectos abordados, e dar respaldo técnico às decisões relacionadas ao comportamento morfodinâmico na área de implantação do Complexo Portuário,

Para resolver o problema de dinâmica em escala espacial e temporal adequada para as aplicações finais (determinação da hidrodinâmica costeira e como suportes básicos no delineamento das obras de engenharia) e, simultaneamente, manter os custos computacionais em níveis razoáveis, utilizou-se o sistema de modelos Delft3D® desenvolvido pelo WF | Delft Hydraulics, através dos seus módulos Delft3D-FLOW (nível do mar, maré e correntes) e Delft3D-WAVE (propagação de ondas) e Delft3D-SED (transporte de sedimentos).

Através dos métodos apresentados para a avaliação do modelo numérico implementado para a região, constata-se que a modelagem numérica hidrodinâmica e de ondas foi aplicada com sucesso, permitindo avaliar as possíveis alterações em decorrência da implementação do empreendimento.

ÍNDICE

Página

1.0	INTRODUÇÃO	8
1.1	ÁREA DE ESTUDO	9
1.1.1	Características Meteorológicas	9
1.1.2	Características Hidrodinâmicas.....	10
2.0	ANÁLISE DE DADOS	14
2.1	VENTOS.....	15
2.2	MARÉ	17
2.2.1	FEMAR	17
2.4	ONDAS.....	21
2.5	ANÁLISE DE ALTERAÇÃO DE LINHA DE COSTA.....	27
2.5.1	Levantamento das Imagens de Satélite	27
2.5.2	Digitalização da Linha de Costa	30
2.5.2	Simulação da Variação da Linha de Costa	32
3.0	MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE ONDAS.....	36
3.1	DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO	36
3.1.1	Condições de Contorno Adotadas.....	40
3.2	PERÍODOS SIMULADOS	41
3.3	AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE ONDAS.....	42
3.4	RESULTADOS MODELAGEM HIDRODINÂMICA	44
3.5	RESULTADOS MODELAGEM DE ONDAS	46
4.0	MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	59
4.1	ESTUDO DE SEDIMENTAÇÃO E EROSÃO	60
4.2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE A LONGO PRAZO	63
6.0	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
7.0	BIBLIOGRAFIA.....	74
8.0	EQUIPE TÉCNICA	79

TABELAS

Tabela 1 - Diagrama de ocorrência conjunta de velocidade (m/s) e direção do vento no ponto de análise do CFSRv2 entre janeiro e dezembro de 2018.	16
Tabela 2 - Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa das ondas (m) e direção de propagação entre 01 de Janeiro de 2017 a 31 de Dezembro de 2017.....	24
Tabela 3 - Diagrama de ocorrência conjunta de período de pico das ondas (s) e direção de propagação entre 01 de Janeiro de 2017 a 31 de Dezembro de 2017.....	25
Tabela 4 - Data de obtenção, fonte, tipo, sensor e resolução espacial das imagens obtidas.	28
Tabela 5 - Características das grades numéricas.	36

FIGURAS

Figura 1 - Representação da circulação no Oceano Atlântico Sul, indicando as seguintes correntes oceânicas: Corrente Circumpolar (CC), Corrente do Atlântico Sul (CAS), Corrente de Benguela (BE), Corrente de Angola (CA), Corrente Sul Equatorial (CSE), Corrente do Brasil (CB) e Corrente das Malvinas (CM). Fonte: Adaptado de Tomczak & Godfrey (1994).....	11
Figura 2 - Indicação dos dados utilizados para a descrição do Vórtice de Vitória. As cruzes e círculos referem-se à perfilações por XBT e CTD, as linhas contínuas indicam as trajetórias dos derivadores lançados. Fonte: Schmid, 1995.	13
Figura 3 - Localização das bases de dados utilizadas.....	14
Figura 4 - Rosa direcional da velocidade do vento no ponto de análise do CFSRv2 entre janeiro e dezembro de 2018.	16
Figura 5 - Rosas dos ventos sazonais segundo dados da reanálise CFSv2 no período de modelagem.	17
Figura 6 - Tabela das componentes de maré com os valores de amplitude, fase e nível de referência para a Estação Conceição da Barra – ES.	18
Figura 7 - Previsão harmônica de maré obtida para estação maregráfica de Conceição da Barra (ES) para o período de janeiro a dezembro de 2017, a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR.	20
Figura 8 - Série temporal de altura significativa (Hs), 1/10 das maiores alturas (H1/10), direção de pico (Dp) e direção média (Dm), período de pico (Tp), e período médio (Tm).....	22
Figura 9 - Histograma direcional de altura significativa (m) – convenção meteorológica.	23
Figura 10 - Histograma direcional de período de pico (s) – convenção meteorológica.	24
Figura 11 - Rosas das ondas sazonais segundo dados do modelo WW3 no período de modelagem entre janeiro e dezembro de 2017.	26
Figura 12 - Imagens de satélite obtidas para a região de São Mateus. O número indicado em cada imagem corresponde ao Identificador assinalado na Tabela 4.	29
Figura 13 - Linhas de costa digitalizadas à partir das imagens de satélite obtidas, com detalhe na zona de costa da área do empreendimento.	30
Figura 14 - Mudança da zona de desembocadura do Rio Ipiranga.	31
Figura 15 - Localização dos transectos criados na linha de costa.	32
Figura 16 - Resultado DSAS – Evolução da Linha de Costa (m) entre 1985 e 2018 (painel à direita), e Zoom na Área do Empreendimento (painel à esquerda).	33
Figura 17 - Resultado DSAS – Taxa Anual de Variação Ponderada (m/ano) – Zoom na Área do Empreendimento (painel à direita), e Zoom na Área do Empreendimento (painel à esquerda).....	34
Figura 18 - Grade numérica do modelo hidrodinâmico.	37
Figura 19 - Batimetria associada à grade numérica, o zoom representa a localização do empreendimento. As cores apresentam a profundidade local (em metros).....	38
Figura 20 - Batimetria associada à grade numérica para o layout 1, offshore. As cores apresentam a profundidade local (em metros).	39
Figura 21 - Batimetria associada à grade numérica para o layout 2, onshore. As cores apresentam a profundidade local (em metros).	39
Figura 22 - Histogramas direcionais da corrente medida (painel à esquerda) e do modelo hidrodinâmico (painel à direita) para o período de 2013.	42
Figura 23 - Histogramas direcionais das alturas significativas de onda (m) obtidas a partir dos dados medidos (painel à esquerda) e do modelo de ondas (painel à direita) para o período de 2013.....	43
Figura 24 - Comparação da elevação do nível do mar (m) dos dados medidos (painel superior) com os resultados do modelo numérico (painel inferior), ambos englobam o ano de 2013;	44
Figura 25 - Campo instantâneo das diferenças velocidade das correntes antes (vetores vermelhos) e após (vetores pretos) a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar representativo do período de verão (24 de Janeiro de 2017 às 18h). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em m/s.	45

Figura 26 - Campo instantâneo das diferenças velocidade das correntes antes (vetores vermelhos) e após (vetores pretos) a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar representativo do período de inverno (13 de Agosto de 2017 às 16h). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em m/s.	46
Figura 27 – Campo instantâneo das diferenças de altura significativa (Hs) e direção das ondas (Dir) antes (vetores vermelhos) e após (vetores pretos) a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar representativo do período de verão (Hs=0,94m., Tp=9s., Dir=106°). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em metros.....	48
Figura 28 - Campo instantâneo das diferenças de altura significativa (Hs) e direção das ondas (Dir) antes e após a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar representativo do período de inverno (Hs=2,92m., Tp=14,4s., Dir=155°). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em metros.....	49
Figura 29 - Campo instantâneo das diferenças de altura significativa (Hs) e direção das ondas (Dir) antes e após a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar exposto às condições de NE (Hs=1,47m., Tp=6,5s., Dir=43°). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em metros.....	49
Figura 30 - Localização dos pontos de cálculo do fluxo de energia.	50
Figura 31 - Histograma direcional da altura significativa (m) para o ano de 2017 sem os empreendimentos na região de estudo.	51
Figura 32 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P1 sem os empreendimentos.	52
Figura 33 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P2 sem os empreendimentos.	52
Figura 34 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P3 sem os empreendimentos.	53
Figura 35 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P4 sem os empreendimentos.	53
Figura 36 - Histograma direcional da altura significativa (m) para o ano de 2017 com o empreendimento 1 na região de estudo.	54
Figura 37 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P1 com o empreendimento 1.....	54
Figura 38 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P2 com o empreendimento 1.....	55
Figura 39 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P3 com o empreendimento 1.....	55
Figura 40 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P4 com o empreendimento 1.....	56
Figura 41 - Histograma direcional da altura significativa (m) para o ano de 2017 com o empreendimento 2 na região de estudo.	56
Figura 42 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P1 com o empreendimento 2.....	57
Figura 43 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P2 com o empreendimento 2.....	57
Figura 44 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P3 com o empreendimento 2.....	58
Figura 45- Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P4 com o empreendimento 2.....	58
Figura 46. Resultante da feição de fundo para o período simulado comparando os cenários nas condições atuais e o cenário com o layout 1, offshore.....	62
Figura 47 - Resultante da feição de fundo para o período simulado comparando os cenários nas condições atuais e o cenário com o layout 2, onshore.....	63

Figura 48 - Diagrama para a definição das variáveis da forma em planta de equilíbrio. Fonte: "Documento temático: Regeneración de Playas", GIOC (Universidad de Cantabria) e Dirección General de Costas (MMA).	64
Figura 49 - Localização dos pontos de cálculo do fluxo de energia.	66
Figura 50- Direção e magnitude do fluxo médio de energia analisado para os 4 pontos (P1 a P4 da esquerda para a direita) ao longo da Praia da Barra Seca para a situação sem empreendimento.	67
Figura 51 - Direção e magnitude do fluxo médio de energia analisado para os 4 pontos (P1 a P4 da esquerda para a direita) ao longo da Praia da Barra Seca para o layout 1, offshore.	68
Figura 52 - Direção e magnitude do fluxo médio de energia analisado para os 4 pontos (P1 a P4 da esquerda para a direita) ao longo da Praia da Barra Seca para o layout 2, onshore.	68
Figura 53 - Forma em planta de equilíbrio da Praia da Barra Seca após a construção do layout 1, offshore, e a localização dos Pontos de Difração responsáveis pela dinâmica costeira.	70
Figura 54 - Forma em planta de equilíbrio da Praia da Barra Seca após a construção do layout 2, onshore, e a localização dos Pontos de Difração responsáveis pela dinâmica costeira.	70

ANEXOS

ANEXO A - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D.....	1
--	---

1.0 INTRODUÇÃO

Para dar suporte à Odebrecht Engenharia & Construção na elaboração de estudos de morfodinâmica costeira, para suporte à implantação do Complexo Portuário Petrocity, a TETRA TECH apresenta este estudo de caracterização meteoceanográfica, de variação de linha de costa, modelagem numérica hidrodinâmica, de ondas e transporte de sedimentos.

Para o presente trabalho, utilizou-se o que há de mais moderno em termos de ferramentas computacionais e conhecimento científico/tecnológico, bem como as mais robustas bases de dados ambientais.

A caracterização dos padrões atmosféricos e oceânicos locais foi realizada a partir de bases de dados globais e, também, dados medidos localmente.

Para obtenção da dinâmica em toda a região, utilizou-se o sistema de modelos Delft3D®, através de seus módulos Delft3D-FLOW (nível do mar, maré e correntes) e Delft3D-WAVE (propagação de ondas) e Delft3D-SED (transporte de sedimentos).

Este relatório descreve o as características oceanográficas da região de estudo, o modelo numérico implementado e as configurações utilizadas nas modelagens hidrodinâmica, de ondas e de transporte de sedimentos, com o objetivo de demonstrar a capacidade da base hidrodinâmica em representar as condições ambientais locais.

As características meteorológicas e hidrodinâmicas da área de estudo são descritas a seguir, enquanto no Capítulo 2 apresenta-se a análise de dados meteorológicos e oceanográficos associados à modelagem, além do estudo de variação de linha de costa. Já o Capítulo 3 apresenta a descrição, avaliação e resultados das modelagens hidrodinâmica e de ondas. No Capítulo 4 são apresentados os resultados de modelagem de transporte de sedimentos. Por fim, as considerações finais do estudo estão apresentadas no Capítulo 5. No Capítulo 6, as referências bibliográficas. O Anexo A apresenta a descrição dos sistemas de modelos Delft3D®.

1.1 ÁREA DE ESTUDO

1.1.1 Características Meteorológicas

A circulação atmosférica na região oceânica do Espírito Santo é caracterizada principalmente pela influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e por sistemas transitórios como as frentes frias.

A variação de temperatura do ar é caracterizada por valores médios mensais mínimos nos meses de inverno, em torno de 22°C, e máximos no verão, em torno de 28°C.

O regime de precipitação apresenta um período com volumes mensais mais elevados entre novembro e março (final da primavera e verão), com máximos entre 160 mm e 240 mm, e menores volumes acumulados nos meses de maio a setembro, com mínimos abaixo de 40 mm mensais. Os dados analisados indicam uma alta variabilidade interanual da precipitação.

A umidade relativa apresenta valores médios mensais entre 74 % e 86%, tendo uma alta variabilidade ao longo do ano. Já a pressão atmosférica apresenta um padrão sazonal inverso ao da temperatura, com máximos nos meses de inverno e mínimos durante o verão.

A evaporação por sua vez, apresenta valores médios mensais em torno de 7 a 100 mm ao longo do ano, porém com uma alta variabilidade ano-a-ano, indicada pela amplitude da diferença entre as mínimas e máximas mensais analisadas. A insolação média oscila entre 150 e 240 horas de sol por mês, sendo os menores valores observados nos meses de primavera.

Os principais sistemas de grande escala que interferem na circulação local são a ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul), e sistemas transientes, como ciclones extra-tropicais, frentes frias e a ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul). Periodicamente, a situação induzida pela ASAS, caracterizada por ventos vindos de nordeste, com intensidade de fraca a moderada e de céu sem nebulosidade, é perturbada pelo deslocamento de sistemas frontais.

Os sistemas frontais atuam durante o ano todo sobre todo o Atlântico Sul, apresentando-se com maior frequência nas latitudes mais altas, e com menor frequência nas latitudes mais baixas (Andrade, 2005). As perturbações geradas pelos sistemas frontais são essenciais para a determinação das variabilidades intra-anuais na superfície oceânica.

O deslocamento desses sistemas está associado ao escoamento ondulatório de grande escala, a intensificação ou dissipação dos mesmos está relacionada com as características atmosféricas sobre o continente. Algumas regiões do Brasil, tais como as Regiões Sul e Sudeste são regiões frontogenéticas, i.e. as frentes podem se formar ou se intensificar nessas regiões (SATYAMURTY & MATTOS, 1989). Stech e Lorenzzeti (1992) afirmam que em média 13 frentes frias de origem polar atingem a costa dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo durante os meses de inverno, com uma média de 6 dias entre duas frentes consecutivas.

As altas subtropicais são sistemas de alta pressão localizados em torno de 30 graus de latitude sobre os oceanos do planeta, nos hemisférios norte e sul, formados devido à circulação média meridional da atmosfera (BASTOS & FERREIRA, 2000). A ASAS se localiza sobre o oceano Atlântico, influenciando o clima na América do Sul. A circulação da ASAS é caracterizada, nos baixos níveis da atmosfera, pelo giro anti-horário do vento em torno do seu núcleo de alta pressão. A sazonalidade da ASAS é acoplada à da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), com um deslocamento levemente para norte no verão e para sul no inverno. Além disso durante o verão o centro da ASAS se aproxima mais do continente americano.

O vento predominante na região é proveniente dos quadrantes NE e N durante os períodos de verão e primavera, padrão influenciado pela circulação da ASAS. No entanto, durante o outono e inverno observa-se a influência do deslocamento de sistemas frontais. As maiores intensidades do vento são marcadamente observadas durante o período de primavera

Os eventos extremos identificados na região são caracterizados pela incidência de ventos na direção N, associados à circulação da ASAS. Com relação à sazonalidade destes eventos, observa-se uma maior ocorrência durante a primavera.

1.1.2 Características Hidrodinâmicas

A circulação oceânica na região subtropical, que é influenciada pelos sistemas de vento em grande escala, transporta massa em direção ao Equador por meios de giros anticiclônicos. Jatos intensos e estreitos fecham os giros subtropicais e caracterizam as chamadas Corrente de Contorno Oeste (STOMMEL, 1948; MUNK, 1950). A intensidade, variabilidade e direção predominante das correntes são resultado da combinação de

processos que envolvem, por exemplo, a circulação atmosférica, estrutura termohalina, topografia de fundo, orientação de linha de costa e processos de instabilidade da própria corrente (FRAGOSO, 2004; MATA, 1996).

O regime de correntes na Bacia do Espírito Santo tem como principal feição a Corrente do Brasil (CB), uma corrente de contorno oeste que, em seu caminho para sul, compõe o braço oeste do Giro Subtropical do Atlântico Sul (GSAS). A Figura 1 ilustra a circulação oceânica de macroescala que ocorre na região do Atlântico Sul.

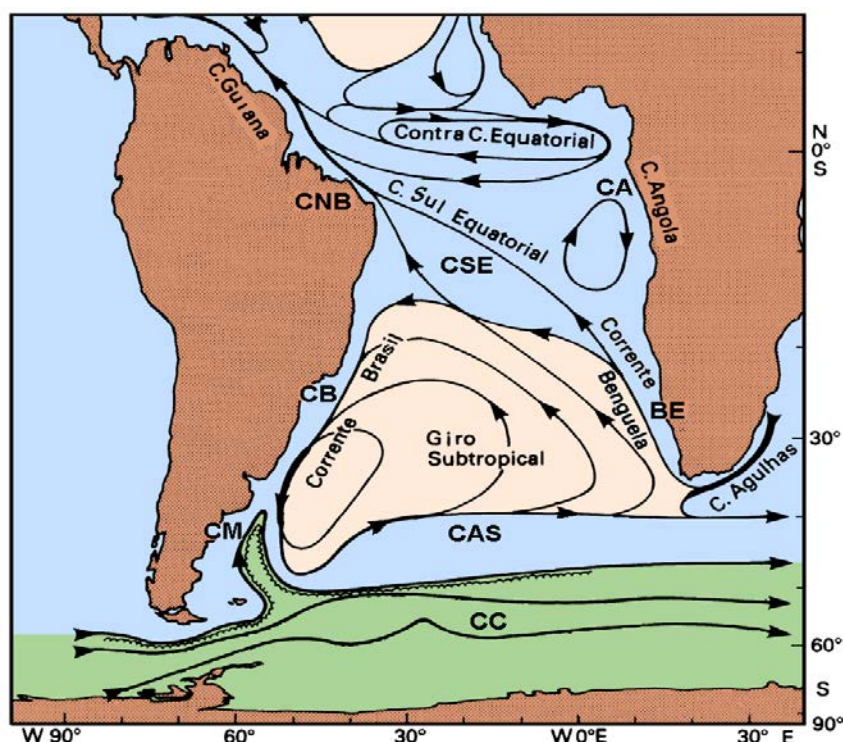


Figura 1 - Representação da circulação no Oceano Atlântico Sul, indicando as seguintes correntes oceânicas: Corrente Circumpolar (CC), Corrente do Atlântico Sul (CAS), Corrente de Benguela (BE), Corrente de Angola (CA), Corrente Sul Equatorial (CSE), Corrente do Brasil (CB) e Corrente das Malvinas (CM). Fonte: Adaptado de Tomczak & Godfrey (1994).

O Giro Subtropical é então formado em superfície pela Corrente do Brasil, em seu limite sul pela Corrente do Atlântico Sul (CAS), na parte leste pela corrente de Benguela e na porção norte pelo braço sul da corrente Sul Equatorial (STRAMMA & ENGLAND, 1999). Em seu caminho para oeste, a CSE bifurca-se ao longo da coluna d'água em diferentes latitudes à medida que se aproxima da margem continental brasileira. A bifurcação da CSE (BiCSE) na camada superficial (0-150 m) ocorre na latitude de aproximadamente 15°S. Em

níveis picnoclínicos (150-500 m) essa separação é observada em torno de 20°S e em níveis intermediários (500-1000m) em cerca de 25°S. Um esquema que ilustra o campo de correntes em grande escala na costa brasileira pode ser visualizado na Figura 2.

A Corrente do Brasil negocia sua passagem pelos diferentes canais da cadeia Vitória-Trindade (EVANS & SIGNORINI, 1985) numa forma ainda não muito bem descrita de jato ou meandro. Em níveis mais profundos encontra-se a Corrente de Contorno Intermediário (CCI). Essa corrente é formada em 28°S (BOEBEL *ET AL.*, 1999), flui para norte e compõe, em conjunto com a CB, o Sistema CB-CCI.

No interior do Embaiamento de Tubarão, uma circulação ciclônica foi observada na frente interna da CB, associada ao então chamado Vórtice de Vitória (VV) (SCHMID *et al.*, 1995). Os autores descrevem o vórtice como raso (350 m) e assimétrico, com extensão horizontal de aproximadamente 50 km de raio e velocidade máxima de 0,5 m/s e 0,4 m/s para norte e sul, respectivamente. Segundo os autores, o mecanismo de ressurgência na costa do Espírito Santo desencadearia o meandramento da CB e posterior formação do VV. Gaeta *et al.* (1999) encontram uma circulação ciclônica na região de ocorrência do VV, todavia sem evidências de ressurgência. Ainda não há na literatura uma descrição precisa do fenômeno de ressurgência na região.

Soutelino (2008) cita o vigoroso meandramento da CB observado desde a costa de Vitória até a Baía de Santos e a presença de vórtices recorrentes (de Vitória, de São Tomé e de Cabo Frio). Mill *et al.* (2015) observaram ainda vórtices gerados na região do Cabo de São Tomé que migram para norte no Embaiamento de Tubarão e apresentam feição semelhante ao Vórtice de Vitória em superfície.

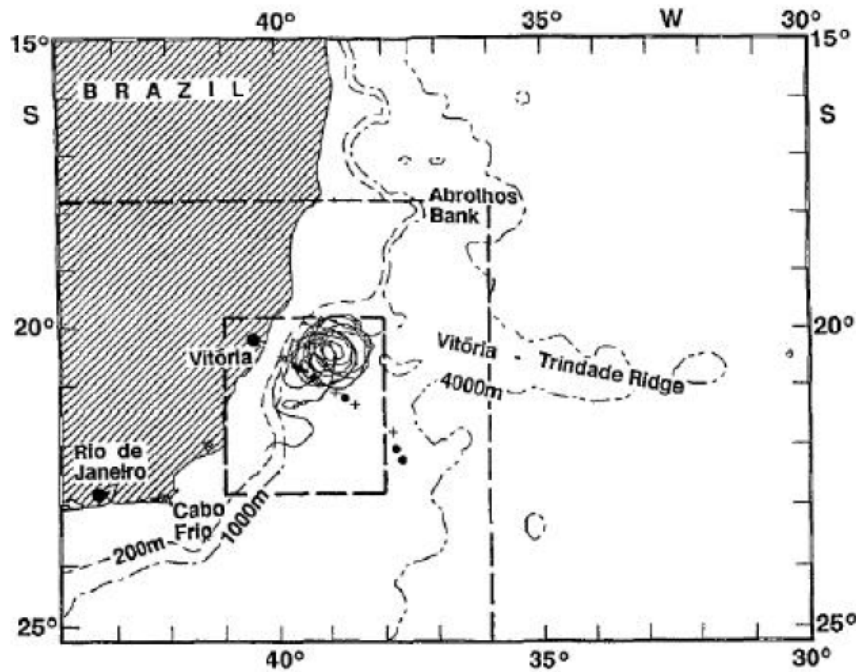


Figura 2 - Indicação dos dados utilizados para a descrição do Vórtice de Vitória. As cruces e círculos referem-se à perfilagens por XBT e CTD, as linhas contínuas indicam as trajetórias dos derivadores lançados. Fonte: Schmid, 1995.

A Bifurcação da Corrente Sul Equatorial em nível superficial apresenta um padrão de migração sazonal. A porção rasa da bifurcação, até 200 m de profundidade, se posiciona mais ao sul (cerca de 17°S) no período de inverno e mais ao norte (aproximadamente 13°S) no verão (RODRIGUES *et al.*, 2007). Esta migração ocorre em função de variações no rotacional das tensões do vento, que por sua vez respondem às excursões anuais norte-sul da Zona de Convergência Intertropical.

A região do Talude Continental da BSEAL é então governada pela Subcorrente Norte do Brasil, que têm seu núcleo em subsuperfície (SILVEIRA *et al.*, 1994; STRAMMA *et al.*, 1995) e abrangência vertical aproximada de 1200 m ao cruzar o paralelo de 11°S. Esta corrente é formada em 20°S, onde a bifurcação picnoclínica da Corrente Sul-Equatorial Sul se soma à Corrente de Contorno Intermediária (SOUTELINO & MIRANDA, 2013). Mais ao norte, entre 13 e 17°S, a SNB recebe aporte do ramo sul da Corrente Sul-Equatorial e torna-se completamente organizada em seu caminho para norte-nordeste.

2.0 ANÁLISE DE DADOS

Esta etapa consiste na apresentação da análise dos dados visando uma melhor compreensão da dinâmica da área, assim como a disponibilização de dados como forçante da modelagem hidrodinâmica

Para esta caracterização, foram utilizados dados de ventos, meteorológicos provenientes da base de dados CFSRv2 (*Climate Forecast System Reanalysis Version 2*; SAHA *et al.*, 2014), dados de maré obtidos da FEMAR¹ e dados de ondas obtidos do modelo de terceira geração WAVEWATCH III implementado para a região sudeste do Brasil (Figura 3).

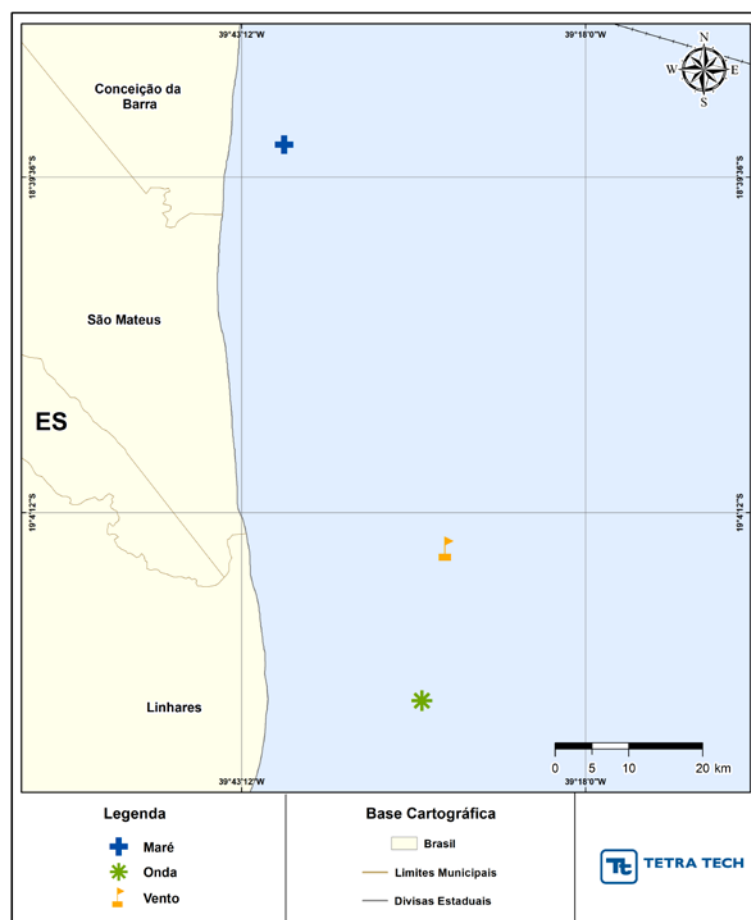


Figura 3 - Localização das bases de dados utilizadas.

¹Fundação Estudos do Mar. Disponível em: <<http://www.fundacaofemar.org.br/>>. Último acesso em: 22 de junho de 2016.

2.1 VENTOS

Para a caracterização local do regime de ventos na área de interesse, a seguir são apresentados dados da CFSv2 no ponto 19,114°S e 39,47°W.

A base de dados utilizada foi proveniente do produto de reanálise CFSv2 (Climate Forecast System Reanalysis Version 2; SAHA et al., 2014), gerado pelo centro norte-americano NCEP (National Center for Environmental Prediction). Trata-se de um conjunto de assimilação de dados que constitui uma sólida base de dados climatológicos com cobertura global. A CFSv2 dá continuidade ao produto CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), produzido pelo mesmo centro, a partir de janeiro de 2011 até o presente, porém incorporando upgrades nos processos de assimilação e interpolação de dados. O embasamento físico da CFSR e CFSv2 difere de outros produtos de reanálise pelo acoplamento entre o oceano e a atmosfera, por ter um modelo interativo de gelo marinho e também por assimilar dados de satélites através de um esquema de interpolação estatística. Além disso, contém informações sobre variações nos níveis de dióxido de carbono, aerossóis atmosféricos e gases-traço, incluindo assim seus efeitos sobre o sistema climático terrestre. A resolução espacial fornecida pela CFSv2 é de 0,2° e temporal horária.

A Figura 4 mostra os histogramas direcionais da série analisada de velocidade dos ventos, onde a direção de incidência do vento é dada a partir do Norte geográfico (0°, seguindo a convenção meteorológica), a intensidade do vento é indicada pela barra de cores e a porcentagem de ocorrências pela distância radial. Já na Tabela 1 é apresentado os diagramas associados de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento.

De maneira geral, através do conjunto de dados, Figura 4 e Tabela 1, observa-se uma predominância de ventos provenientes do entorno da direção NE e ENE. De acordo com os diagramas de ocorrência conjunta, durante o período de medição 34,5% dos dados são incidentes destas direções com intensidade média chegando a 6,6 m/s e máxima a 12,8 m/s. Já os ventos provenientes do quadrante S (SE, SSE e S), somam um total de 20,2% com médias variando entre 6,1 m/s e 7,8 m/s, sendo que as máximas chegam a atingir 14,9 m/s da direção de S.

Na Figura 5 para os dados da CFSv2 observa-se que a circulação dos ventos nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) ocorre predominantemente de NE e ENE,

enquanto nos meses de inverno (junho, julho e agosto) a direção de incidência predominante é de SE e SSE.

As análises demonstram que o período e ano de modelagem é representativo do padrão de circulação típico da região, pois encontra-se em concordância com os padrões apresentados no item 1.1.1.

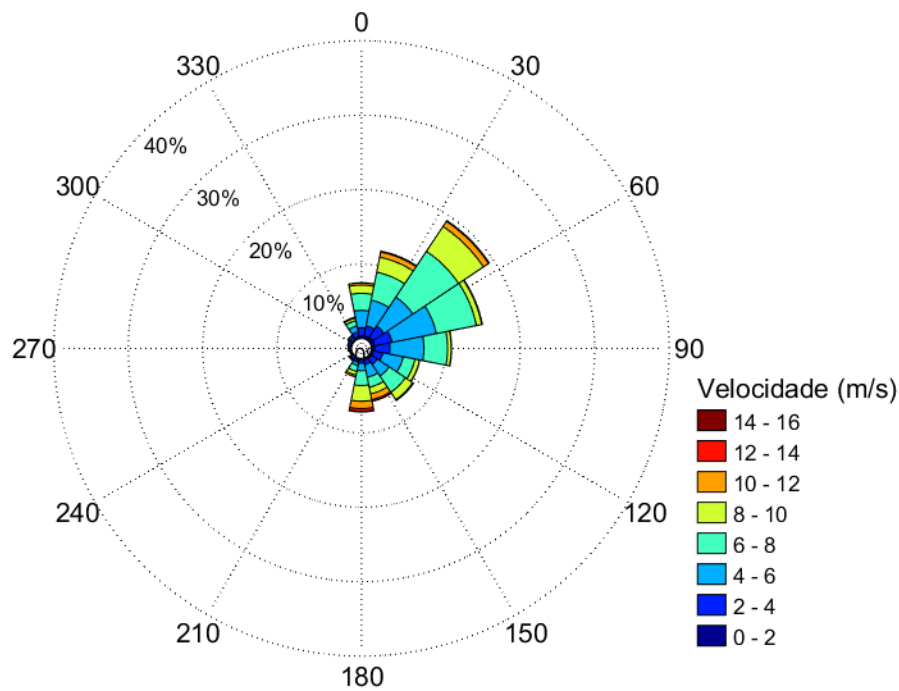


Figura 4 - Rosa direcional da velocidade do vento no ponto de análise do CFSRv2 entre janeiro e dezembro de 2018.

Tabela 1 - Diagrama de ocorrência conjunta de velocidade (m/s) e direção do vento no ponto de análise do CFSRv2 entre janeiro e dezembro de 2018.

Vel. (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	%
0.0- 2.0	32	39	47	44	42	27	24	26	19	24	10	13	23	16	13	20	4,4
2.0- 4.0	106	128	170	227	194	123	92	58	43	31	36	11	23	34	38	70	14,6
4.0- 6.0	221	334	445	575	434	265	180	164	95	42	11	3	0	4	23	75	30,2
6.0- 8.0	218	364	703	523	302	154	250	130	190	76	6	0	0	0	7	68	31,5
8.0-10.0	105	196	381	69	46	59	113	86	200	47	1	1	0	0	0	35	14,1
10.0-12.0	27	68	79	5	5	4	10	75	94	23	1	1	0	0	0	11	4,2
12.0-14.0	3	11	11	4	0	0	3	22	37	1	0	0	0	0	0	0	1
14.0-16.0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0,1
%	7,5	12	19,3	15,2	10,8	6,6	7,1	5,9	7,2	2,6	0,7	0,3	0,5	0,6	0,9	2,9	
Med. Vel.	5,9	6,4	6,6	5,5	5,3	5,3	6,1	6,8	7,8	6,3	3,4	2,7	1,8	2,5	3,6	5,4	
Max. Vel.	13,6	13,5	12,8	12,4	11,7	11,3	13,2	13,5	14,9	12,1	11,3	10,5	3,3	4,5	7,9	11,1	

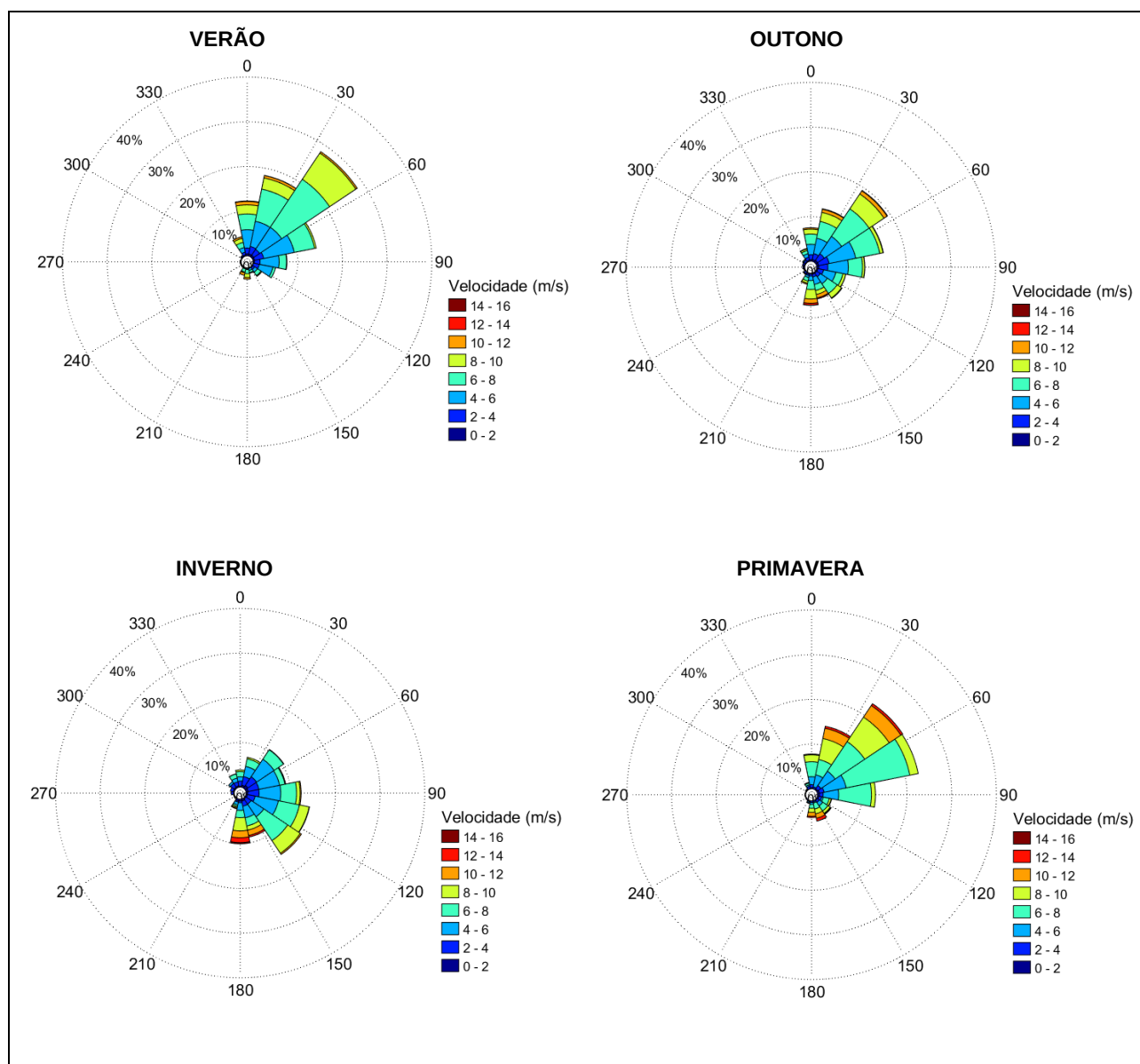


Figura 5 - Rosas dos ventos sazonais segundo dados da reanálise CFSv2 no período de modelagem.

2.2 MARÉ

2.2.1 FEMAR

Para identificar o padrão da elevação de superfície do mar na região de estudo, foram realizadas análises com os dados da estação maregráfica de Conceição da Barra, obtidos

da FEMAR². Os conjuntos de dados FEMAR oferecem informações sobre as constantes harmônicas e médias de sizígia e quadratura, conforme apresentado na Figura 6.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

Nome da Estação :		CONCEIÇÃO DA BARRA – ES			
Localização :		No trapiche da Colônia de Pescadores			
Organ. Responsável :		DHN			
Latitude :		18° 37,2' S	Longitude :		39 ° 40,1' W
Período Analisado :		23/02/64 a 25/03/64		Nº de Componentes : 36	
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		IV H 16 min	Nível Médio (Zo):		82 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		151 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		115 cm acima do NR
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		13 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		49 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	2,9	228
Ssa	-	-	N ₂	8,6	118
Mm	9,1	007	NU ₂	1,7	118
Mf	-	-	M ₂	51,0	112
MTM	-	-	L ₂	1,8	037
Msf	10,4	047	T ₂	1,1	125
Q ₁	-	-	S ₂	17,9	125
O ₁	5,5	123	K ₂	4,9	125
M ₁	0,9	040	MO ₃	0,9	184
P ₁	0,4	087	M ₃	0,9	131
K ₁	1,2	087	MK ₃	1,6	285
J ₁	0,5	343	MN ₄	2,9	192
OO ₁	0,9	323	M ₄	6,4	196
MNS ₂	-	-	SN ₄	2,5	157
2N ₂	1,1	124	MS ₄	4,9	179
Referências de Nível: RN junto ao armazem de madeiras.					
Obs: Outros períodos : 28/08/92 a 29/09/92; 24/10/93 a 15/12/93					

Código BNDO: 40209

Figura 6 - Tabela das componentes de maré com os valores de amplitude, fase e nível de referência para a Estação Conceição da Barra – ES.

²Fundação Estudos do Mar. Disponível em: <<http://www.fundacaofemar.org.br/>>. Último acesso em: 22 de junho de 2016.

A maré na área de estudo foi classificada de acordo com a razão entre as duas maiores amplitudes das componentes diurnas e semidiurnas, conforme apresentado na equação abaixo:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{S_2 + M_2}$$

Os valores de F foram próximos de zero (de 0,09) para todas as estações, indicando domínio das amplitudes das componentes semidiurnas S_2 e M_2 . Portanto, a maré da região da área de estudo é classificada como semidiurna.

A obtenção das alturas da oscilação de maré astronômica foi realizada através do método de análise e previsão harmônica, baseada na análise de Fourier e desenvolvida por Schureman (1958). Este método considera as componentes de maré com ciclos mais curtos e com maiores amplitudes (Q_1 , P_1 , O_1 , K_1 , S_2 , M_2 , N_2 , K_2 , M_3 , MN_4 , M_4 , MS_4). A análise harmônica de maré é realizada admitindo-se que as variações do nível do mar próximo à costa podem ser expressas matematicamente pela soma de séries harmônicas relacionadas a condições astronômicas. Uma função harmônica simples é uma quantidade que varia com o cosseno de um ângulo, que progride uniformemente no tempo. Sua formulação é dada genericamente por $y = A \cos(at)$, onde y é a função harmônica do ângulo (at), a é uma constante e t representa o tempo decorrido a partir de uma data inicial.

A equação geral para uma altura h de maré a qualquer instante de tempo t pode ser escrita como:

$$h = Z_0 + A \cos(at + \alpha) + B \cos(bt + \beta) + C \cos(ct + \gamma) + etc ...$$

Onde Z_0 é a altura do nível médio do mar acima do *datum* usado, e os termos com cossenos são conhecidos como constituintes ou componentes harmônicos. Os coeficientes A , B , C , etc., são as amplitudes de cada constituinte. Estes coeficientes são constantes, sendo obtidos através de observações de maré em cada localidade. A expressão entre parênteses nos constituintes harmônicos é um ângulo que varia uniformemente e seu valor é chamado de fase.

A previsão harmônica de maré foi gerada para os períodos correspondentes àqueles utilizados na avaliação da simulação hidrodinâmica, de janeiro à dezembro de 2017. A série de previsão harmônica de maré é apresentada na Figura 7.

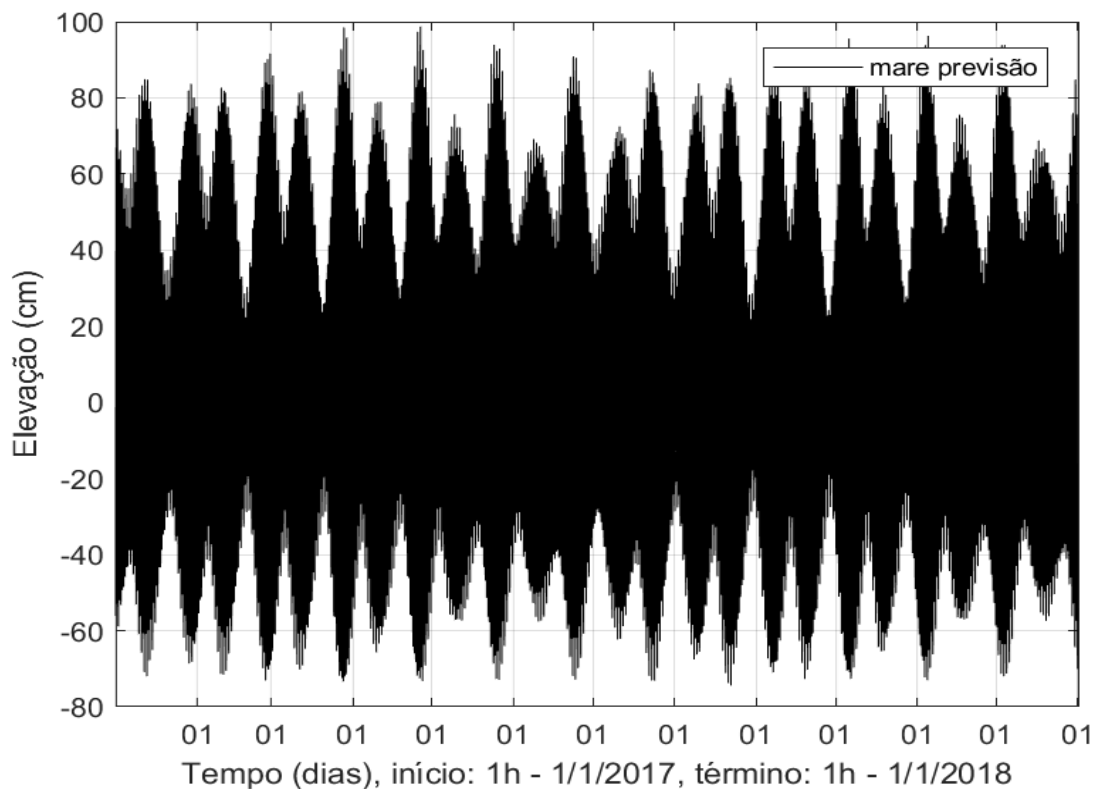


Figura 7 - Previsão harmônica de maré obtida para estação maregráfica de Conceição da Barra (ES) para o período de janeiro a dezembro de 2017, a partir das constantes harmônicas disponibilizadas pela FEMAR.

O nível médio (Z_0) de 85 cm, conforme apresentado na Figura 6, foi somado às previsões harmônicas. A análise dos dados demonstrou que a maré astronômica apresenta oscilações máximas da ordem de 1,6 m na maré de sizígia.

2.4 ONDAS

As ondas são manifestações de forças atuantes em um fluído, tendendo a deformá-lo contra a ação da gravidade e a tensão superficial, que juntas agem para manter o nível da superfície do meio (DEAN & DALRYMPLE, 1991). Essa deformação requer alguma força para gerá-la, podendo ser vento, perturbações meteorológicas, terremotos, atração planetária, entre outras coisas. Uma vez que as ondas são criadas, a força gravitacional e a tensão superficial permitem que elas se propaguem.

A variação no tempo dos mecanismos forçantes das ondas (direção, intensidade e duração do vento) são variáveis aleatórias, e é por isso que os estudos relacionados a este tema requerem uma série de análises que representem os regimes médios escalares e direcionais dos parâmetros dos estados de mar: altura significativa de onda (H_s), direção média (D_m) e período de pico (T_p).

Segundo Candella (1997), as principais ondas presentes no Atlântico Sul são geradas nas médias e altas latitudes, por tempestades originadas nos centros de baixa pressão que vêm da Antártica, associados às frentes frias. As condições atmosféricas no Atlântico Sul, especialmente nas latitudes menores que 40° S, não são tão severas quanto no mar do Norte ou mesmo no Pacífico, onde ocorrem grandes tempestades e furacões.

O que caracteriza o clima de ondas em uma região são os ventos originados no oceano. No Atlântico Sul estes ventos são controlados por sistemas atmosféricos, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), localizada próximo ao Equador e responsável pelos ventos alísios; a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), centro de alta pressão semipermanente sobre o oceano com circulação anti-ciclônica; ciclones migratórios e, próximo à costa, por fenômenos de menor escala como a circulação de brisas.

A caracterização do clima das ondas e o padrão de sazonalidade para o período de 01 de janeiro de 2017 e 01 de dezembro de 2017 encontra-se na Figura 8. Esta figura apresenta as séries temporais dos parâmetros comumente utilizados para caracterização dos padrões de propagação de ondas: altura significativa de onda (H_s), direção média (D_m) e período de pico (T_p).

Observa-se que a maior altura significativa medida foi de, aproximadamente, 3,0 metros. No entanto, na maior parte do tempo, os valores ficam próximos de 1,5 metros.

A direção média indica que a incidência de ondas fica praticamente entre as direções de 45° e 180°, condizente com a orientação da linha de costa da área de estudo. O período de pico, por sua vez, tem uma variação significativa apresentando, na maior parte do tempo, valores próximos de 10 segundos, com valores alcançando os 19 s.

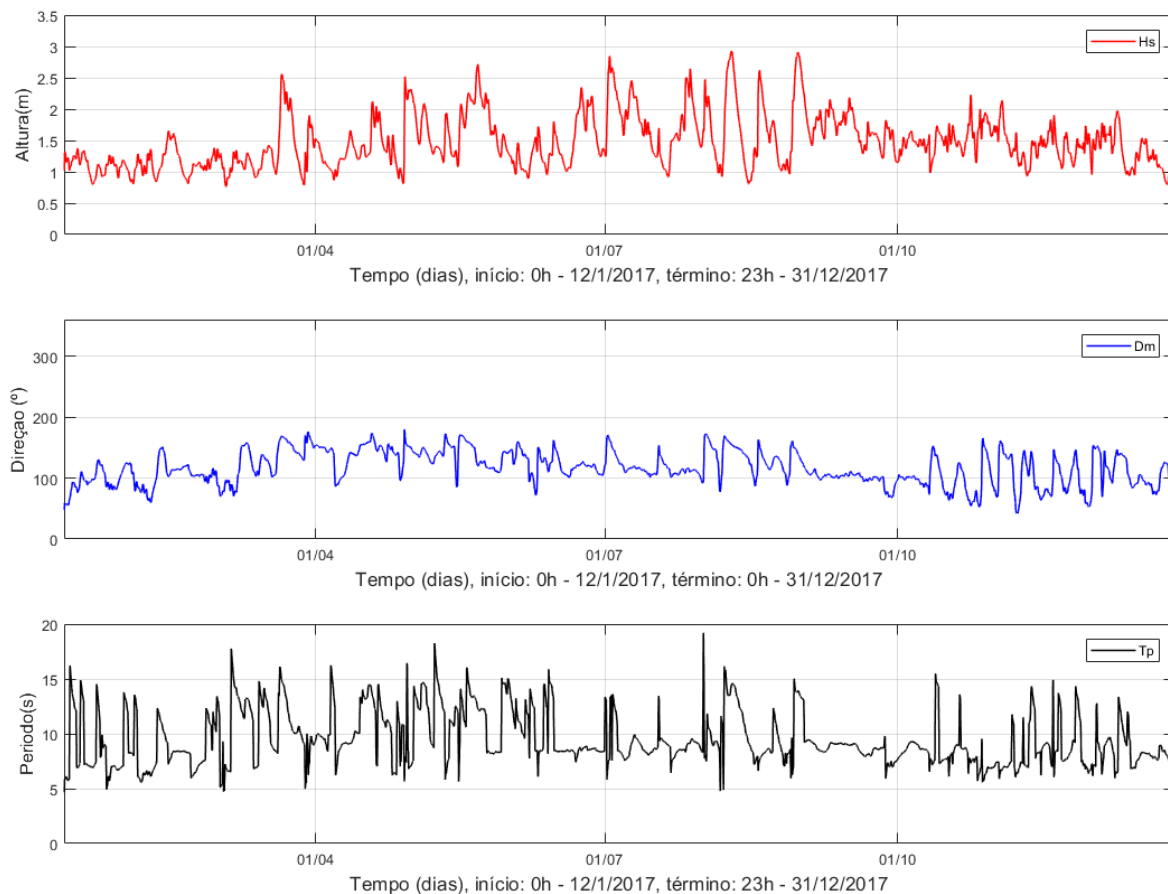


Figura 8 - Série temporal de altura significativa (H_s), 1/10 das maiores alturas ($H_{1/10}$), direção de pico (D_p) e direção média (D_m), período de pico (T_p), e período médio (T_m).

As Figura 9 e a Figura 10 apresentam a rosa direcional de altura significativa e período de pico, respectivamente, onde as direções referem-se à incidência das ondas (segundo a convenção meteorológica, portanto indicando a direção de origem da onda), a distância radial representa a frequência de ocorrência (%) e a escala de cores indica a magnitude da altura significativa em metros e do período de pico em segundos.

A Tabela 2 mostra a distribuição de ocorrência conjunta de altura significativa e direção das ondas e a Tabela 3 a distribuição de ocorrência conjunta do período e direção das ondas, sendo que todas englobam o período de janeiro a dezembro de 2017.

Em todo o período, as ondas de ESE (33,3%) e SE (21,5%) foram as ondas mais frequentes que incidiram sobre o ponto de análise, e isto ocorre em concordância com a orientação das linhas batimétricas locais e, principalmente quanto à orientação da linha de costa. Em todo o levantamento 68,5% das ondas tinham alturas significativas entre 1,0 metros e 1,8 metros. Já os períodos mais frequentes foram os de 6 segundos a 10 segundos (66,5%). Tais características corroboram que os mares de vento, também conhecidos como vagas, são predominantes na região. Para todo o período, a altura máxima de onda observada foi de 2,9 m, proveniente das direções SE e SSE.

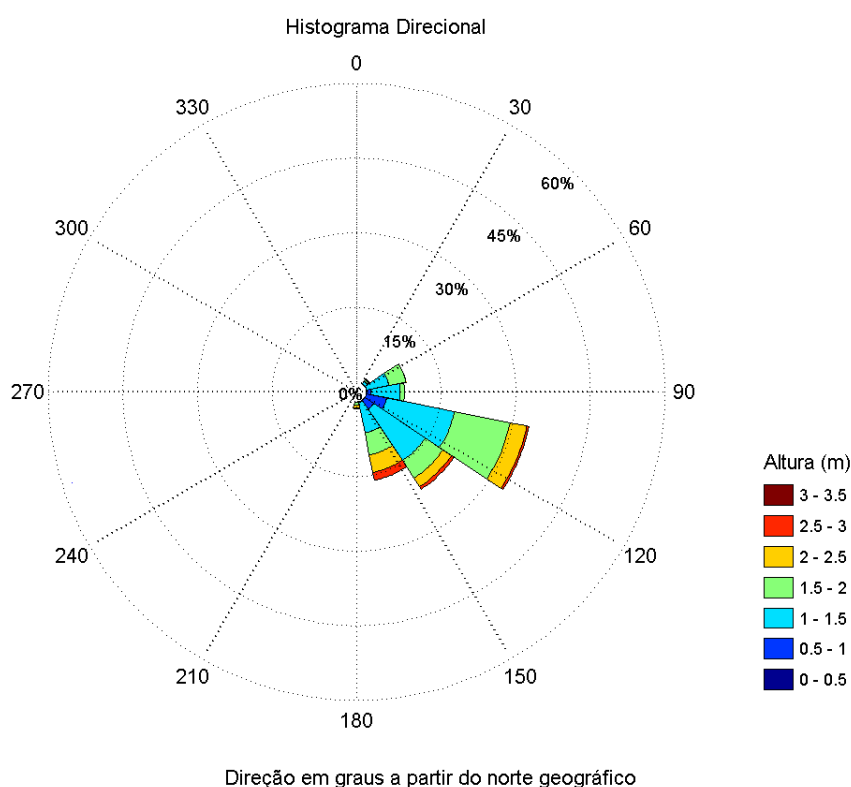


Figura 9 - Histograma direcional de altura significativa (m) – convenção meteorológica.

Tabela 2 - Diagrama de ocorrência conjunta de altura significativa das ondas (m) e direção de propagação entre 01 de Janeiro de 2017 a 31 de Dezembro de 2017.

Hs (m)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	%
0.0- 0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3- 0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5- 0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8- 1.0	0	0	0	3	217	347	179	9	0	0	0	0	0	0	0	0	9
1.0- 1.3	0	0	23	169	532	655	468	236	2	0	0	0	0	0	0	0	24,9
1.3- 1.5	0	0	29	216	506	507	577	290	6	0	0	0	0	0	0	0	25,4
1.5- 1.8	0	0	28	243	234	604	208	197	10	0	0	0	0	0	0	0	18,2
1.8- 2.0	0	0	5	49	51	354	147	183	36	0	0	0	0	0	0	0	9,8
2.0- 2.3	0	0	13	1	5	214	111	205	42	0	0	0	0	0	0	0	7,1
2.3- 2.5	0	0	0	0	0	72	61	95	10	0	0	0	0	0	0	0	2,8
2.5- 2.8	0	0	0	0	0	34	24	87	6	0	0	0	0	0	0	0	1,8
2.8- 3.0	0	0	0	0	0	0	28	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9
%	0	0	1,2	8,1	18,4	33,3	21,5	16,1	1,3	0	0	0	0	0	0	0	
Hs Med.	0	0	1,5	1,4	1,3	1,5	1,4	1,7	2	0	0	0	0	0	0	0	
Hs Máx.	0	0	2,2	2	2	2,7	2,9	2,9	2,6	0	0	0	0	0	0	0	

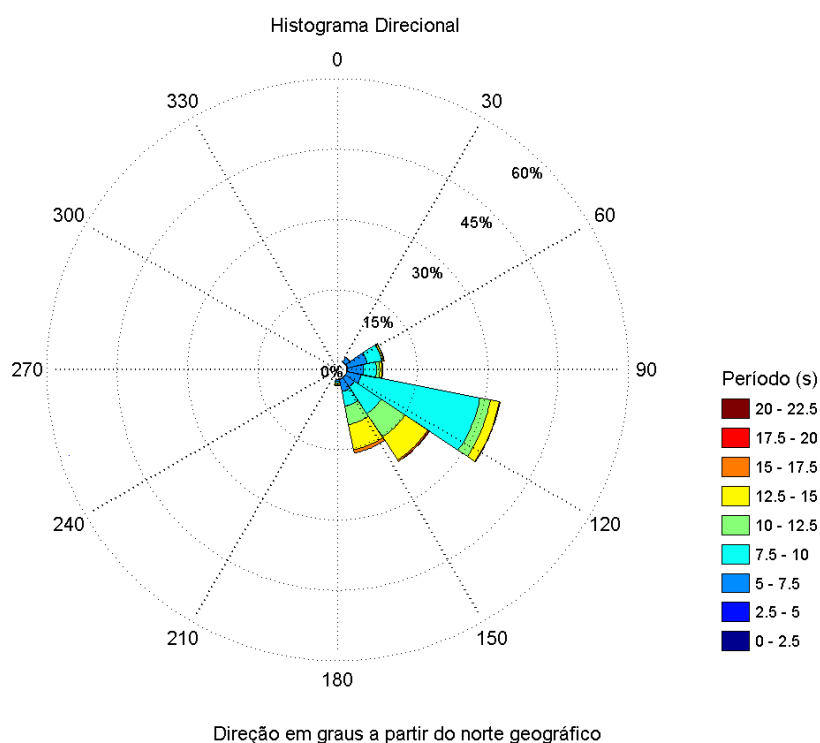


Figura 10 - Histograma direcional de período de pico (s) – convenção meteorológica.

Tabela 3 - Diagrama de ocorrência conjunta de período de pico das ondas (s) e direção de propagação entre 01 de Janeiro de 2017 a 31 de Dezembro de 2017.

Tp (s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	%
0.0- 2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0- 4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0- 6.0	0	0	27	95	48	4	4	50	10	0	0	0	0	0	0	0	2,8
6.0- 8.0	0	0	71	419	654	458	216	231	40	0	0	0	0	0	0	0	24,9
8.0- 10.0	0	0	0	123	619	1962	552	213	16	0	0	0	0	0	0	0	41,6
10.0- 12.0	0	0	0	9	46	139	332	273	5	0	0	0	0	0	0	0	9,6
12.0- 14.0	0	0	0	4	135	179	500	366	30	0	0	0	0	0	0	0	14,5
14.0- 16.0	0	0	0	27	24	43	183	192	10	0	0	0	0	0	0	0	5,7
16.0- 18.0	0	0	0	4	13	2	12	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0,7
18.0- 20.0	0	0	0	0	6	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
%	0	0	1,2	8,1	18,4	33,3	21,5	16,1	1,3	0	0	0	0	0	0	0	
Tp Méd.	0	0	6,4	7,6	8,5	8,9	10,7	11	9,8	0	0	0	0	0	0	0	
Tp Máx.	0	0	7,5	16,4	19,4	16,1	18,6	16,8	16,1	0	0	0	0	0	0	0	

Na Figura 11 para os dados do WW3 observa-se que o padrão das ondas nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) ocorre predominantemente de E à SE, enquanto nos meses de inverno (junho, julho e agosto) a direção de incidência predominante é de ESE a SSE, sendo estes influenciados pelas passagens de frentes na região.

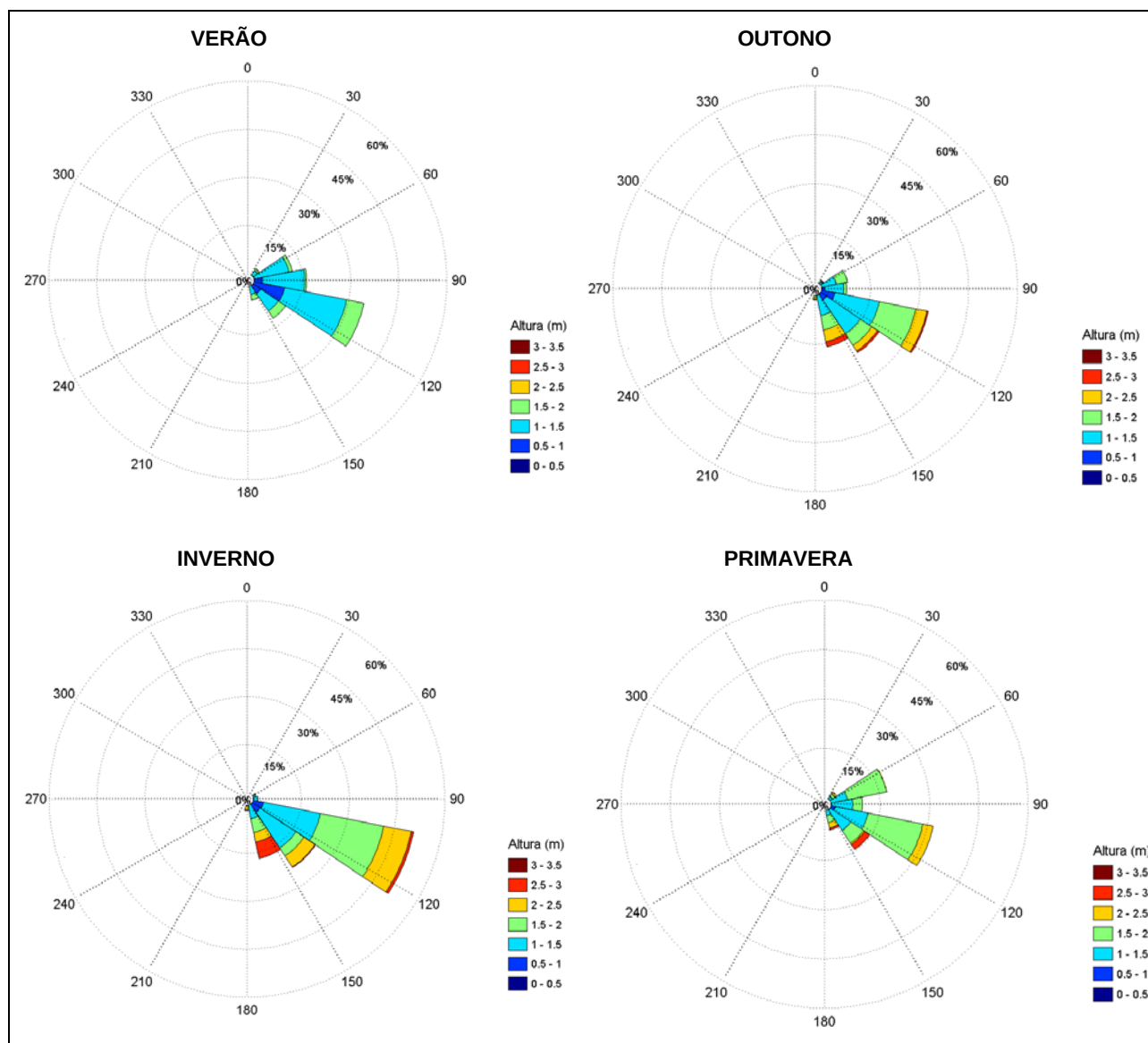


Figura 11 - Rosas das ondas sazonais segundo dados do modelo WW3 no período de modelagem entre janeiro e dezembro de 2017.

2.5 ANÁLISE DE ALTERAÇÃO DE LINHA DE COSTA

A análise da alteração da linha de costa do município de São Mateus (ES) foi realizada através do *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), desenvolvido pelo USGS³. O DSAS é um sistema de análise que calcula estatisticamente a taxa de alteração de múltiplas posições de linhas de costa armazenadas em um SIG (THIELER *et al.*, 2009).

Para a realização desta análise são necessárias séries históricas de linhas de costa, obtidas por levantamento de campo, ou por imagens obtidas através de sensores remotos. Para este estudo, devido à indisponibilidade destas séries históricas, foi realizado um levantamento por imagens provenientes de vários satélites, e com baixa cobertura de nuvens, que pudessem fornecer subsídios para estas análises.

2.5.1 Levantamento das Imagens de Satélite

Para este estudo foram utilizadas imagens adquiridas no acervo de imagens do INPE⁴, sendo escolhidas imagens com baixa nebulosidade para melhor visualização da linha de costa. As imagens adquiridas recobrem o período de 1985 a 2018, com periodicidade quinquenal.

A maior parte das imagens fornecidas pertenciam ao satélite LANDSAT 5, à exceção do ano de 2005, cujo satélite utilizado foi o CBERS 2B. Para os anos de 2015 e 2018, foi utilizado o satélite LANDSAT 8. Ressalta-se que o ano de 1990 não foi analisado, já que a imagem disponível no acervo do INPE se encontrava em baixa qualidade.

No período de 1985 até 2010, as imagens apresentavam referências geográficas díspares da utilizada como padrão para a análise da linha de costa (WGS 84 UTM 24S), sendo feito o georreferenciamento destas imagens a partir de pontos de referência determinados no software Google Earth e georreferenciados no software Global Mapper, através da ferramenta Rectify. As características das imagens utilizadas encontram-se na Tabela 4 e na Figura 12.

³ U.S. Geological Survey

⁴ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Tabela 4 - Data de obtenção, fonte, tipo, sensor e resolução espacial das imagens obtidas.

IDENTIFICADOR	DATA	FONTE	TIPO	SENSOR	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m)
1	17/04/1985	INPE	Satélite Landsat 5	TM	30
2	31/05/1995	INPE	Satélite Landsat 5	TM	30
3	29/06/2000	INPE	Satélite Landsat 5	TM	30
4	18/07/2005	INPE	Satélite CBERS 2	CCD	20
5	22/06/2009	INPE	Satélite Landsat 5	TM	30
6	30/11/2015	INPE	Satélite Landsat 8	OLI	30
7	22/01/2018	INPE	Satélite Landsat 8	OLI	30

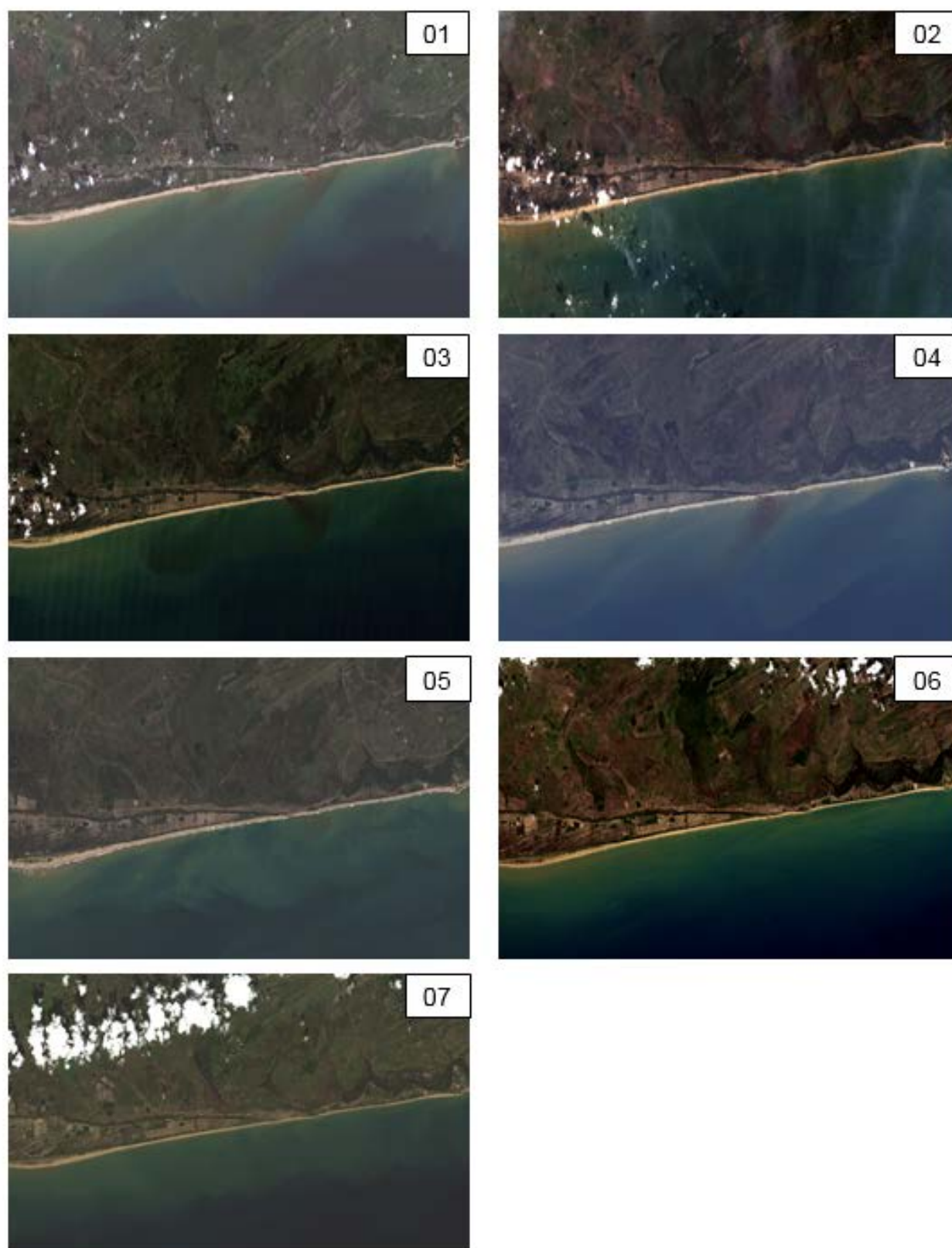


Figura 12 - Imagens de satélite obtidas para a região de São Mateus. O número indicado em cada imagem corresponde ao Identificador assinalado na Tabela 4.

2.5.2 Digitalização da Linha de Costa

Após georreferenciar as imagens de satélite foram digitalizadas as linhas de costa, sendo traçada uma linha no encontro entre a vegetação e a área da praia, também conhecida como o limite da restinga. Este processo se repetiu para todos os anos estudados (i.e., de 1985 a 2018), resultando na Figura 13, visualizada a seguir.

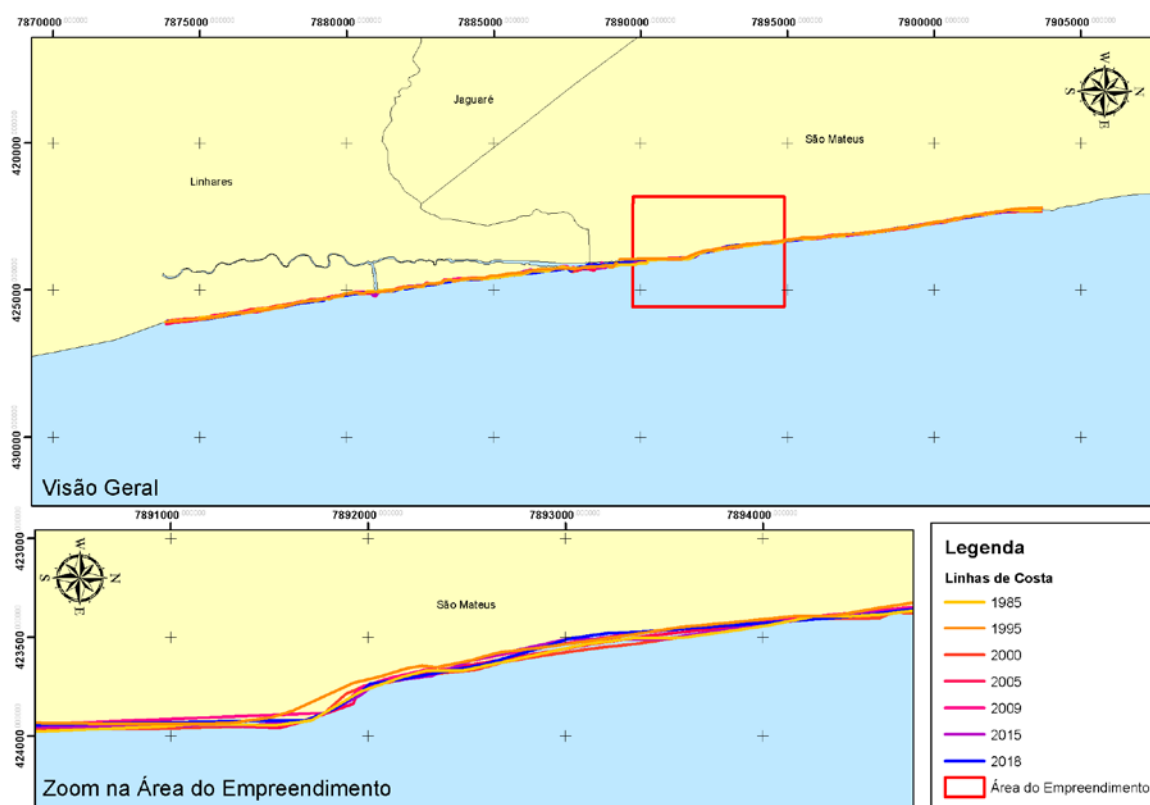


Figura 13 - Linhas de costa digitalizadas à partir das imagens de satélite obtidas, com detalhe na zona de costa da área do empreendimento.

Entre as linhas de costa analisadas, a área que compreende a região da desembocadura do Rio Ipiranga foi a que apresentou uma maior variação ao longo do período estudado (Figura 14). Esta variação, comum quando se trata de dinâmica de desembocaduras em litorais com deriva litorânea significativa em relação aos demais processos de alteração de linhas de costa, não foi considerada nas análises a seguir, uma vez que a desembocadura se encontra a 2,5 km do empreendimento.



Figura 14 - Mudança da zona de desembocadura do Rio Ipiranga.

2.5.2 Simulação da Variação da Linha de Costa

Para o estudo da taxa de variação da linha de costa, ao longo do período de 33 anos (i.e., de 1985 a 2018), a costa foi considerada como uma única entidade, englobando todas as linhas de costa digitalizadas. A partir das linhas de costa digitalizadas, foram criados transectos com 250 metros de espaçamento, baseando-se na linha de base criada a 150 metros, em direção ao continente, da média das linhas de costa. A Figura 15 apresenta a linha de costa de referência com a linha de base e os transectos traçados.



Figura 15 - Localização dos transectos criados na linha de costa.

Nestas análises, obtiveram-se, para o período de tempo estudado, os valores correspondentes à:

1. Evolução da linha de costa (compreendendo a distância entre as linhas de costa mais próximas e mais distantes, a interceptar cada transecto);
2. Regressão linear ponderada (fornece a taxa anual de variação através do ajuste da intersecção das linhas de costa com cada transecto, ponderados pela incerteza inerente à cada linha de costa).

Ressalta-se que no caso da regressão linear ponderada, os valores relativos aos erros de posicionamento das imagens de satélite foram considerados como os valores de

incerteza na ponderação. A incerteza considerada na modelagem do DSAS figura em 30 m.

As Figura 16 e Figura 17 apresentam os resultados da modelagem da linha de costa, sendo analisadas a Evolução da Linha de Costa e a Taxa Anual de Variação Ponderada, ambas com zoom na área do empreendimento.

Desta forma, verifica-se ao longo da área de estudo, que o valor médio da evolução da linha de costa (a desconsiderar a zona de desembocadura do Rio Ipiranga) figurou em 53,52 m, com uma variação entre 17,91 m e 99,85 m.

Enfim, a taxa anual de variação ponderada, calculado pela regressão linear ponderada, variou entre -2,57 m/ano a 1,86 m/ano, com média em 0,07 m/ano.

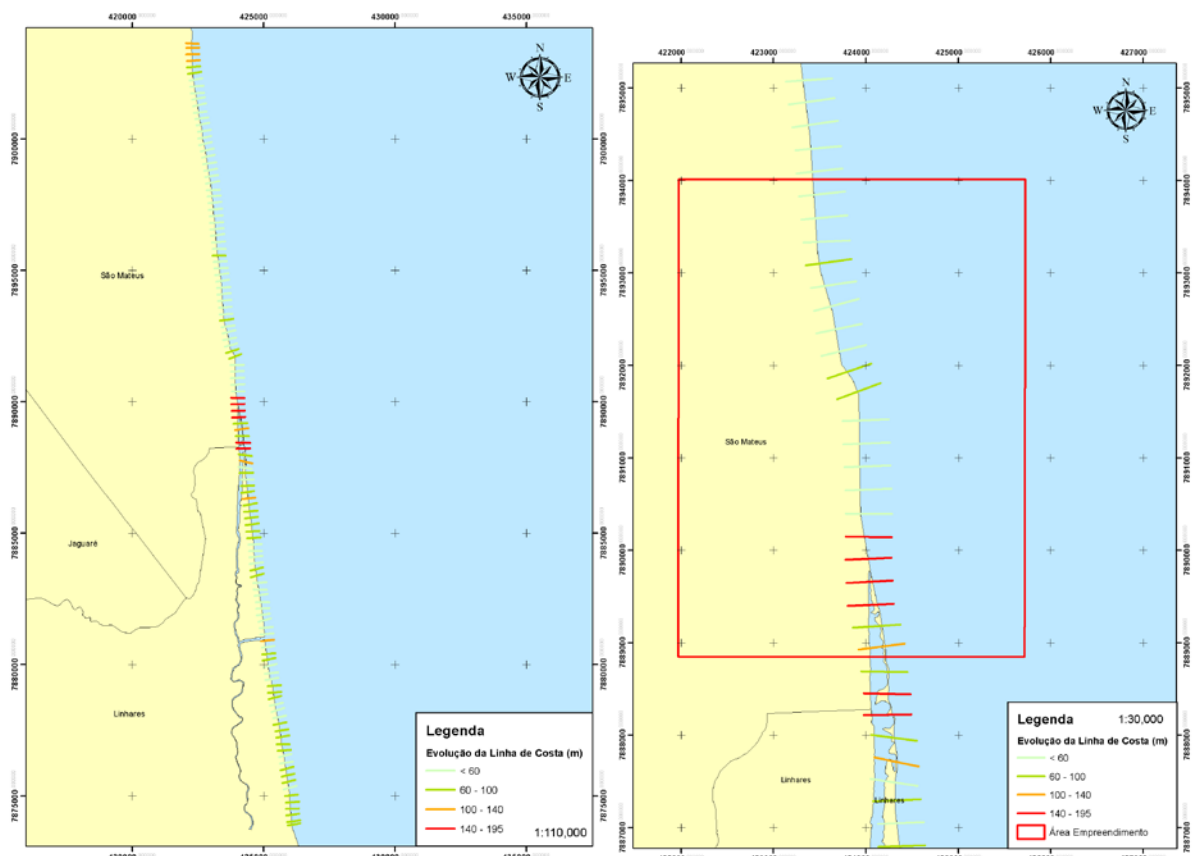


Figura 16 - Resultado DSAS – Evolução da Linha de Costa (m) entre 1985 e 2018 (painel à direita), e Zoom na Área do Empreendimento (painel à esquerda).

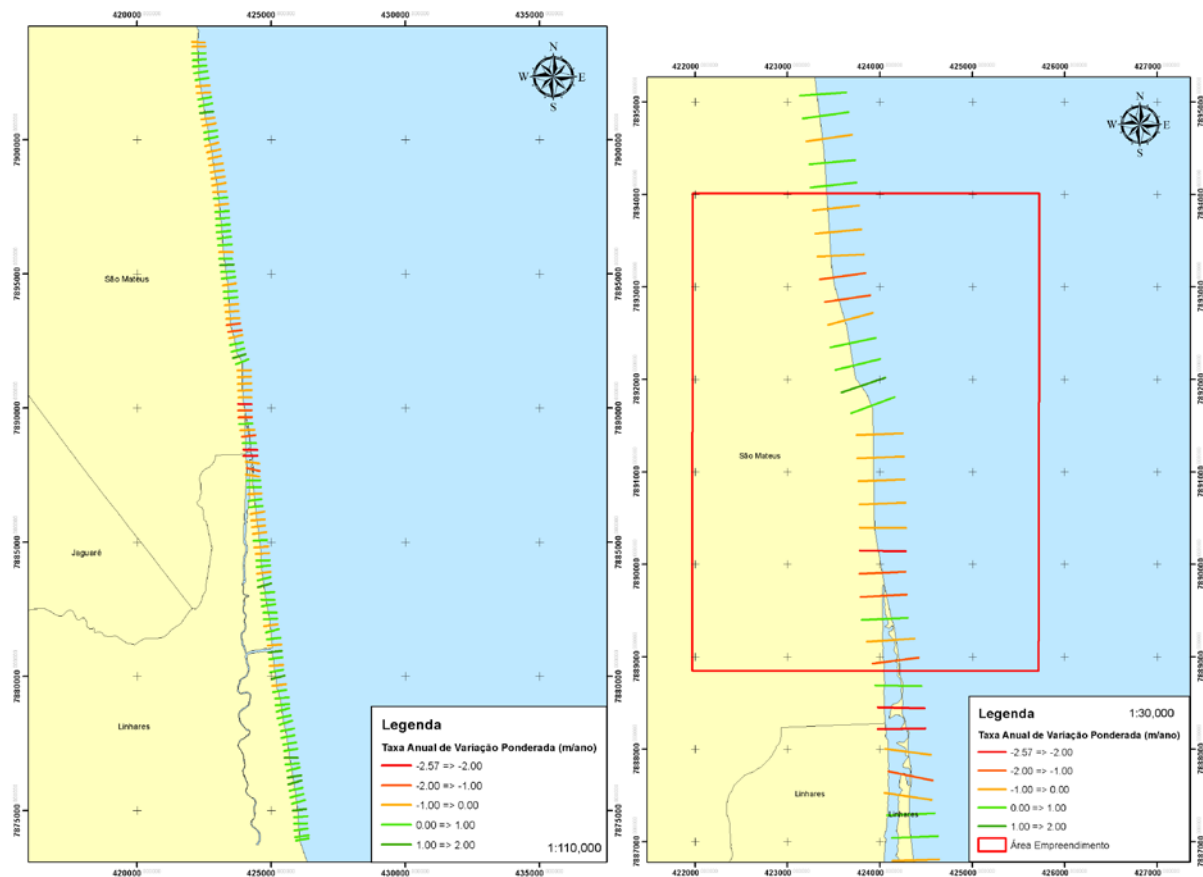


Figura 17 - Resultado DSAS – Taxa Anual de Variação Ponderada (m/ano) – Zoom na Área do Empreendimento (painel à direita), e Zoom na Área do Empreendimento (painel à esquerda).

A análise da variação da linha de costa observada no período de 1985 a 2018, obtida através da comparação de imagens de diferentes períodos, indicou um segmento costeiro de pequena variabilidade espacial, apresentando fenômenos de avanço e recuo justapostos lateralmente ao longo de todo o período.

Quando comparada com outros segmentos costeiros do litoral leste do Brasil, verifica-se que a variação da linha de costa no litoral norte capixaba, particularmente no trecho de implantação do empreendimento, apresenta uma relativa estabilidade espacial de sua linha de costa, com fenômenos de recuo e avanço fortemente relacionados aos ciclos climáticos sazonais.

O livro *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro* (MMA, 2006), no seu capítulo que abrange o litoral do estado do Espírito Santo (ALBINO *et. al*, 2006), indicam que o litoral mais ao nordeste do estado, no trecho compreendido entre Conceição da Barra e a proximidade da barra do Rio Doce, encontra-se de maneira geral em progradação e/ou

estabilidade da linha de costa, com desenvolvimento de planícies de cordões litorâneos e contínuo aporte fluvial dos rios São Mateus, Mariricu, Barra Seca, Doce e Riacho.

Na área do empreendimento, e nas planícies costeiras de seu entorno, conforme evidenciado pela análise de variação temporal da posição de linha de costa, observa-se que apenas em restritos segmentos deste litoral, os processos de recuo da costa são preponderantes. Estas áreas de fenômenos mais pronunciados, erosão mais intensa, tem associada uma forte componente dinâmica costeira vinculada aos processos de deslocamento lateral de desembocaduras fluviais.

“Situada na margem sul do rio São Mateus e, portanto, associada ao evento erosivo de Bugia, Conceição da Barra, a praia de Meleiras apresenta evidências de alcance das ondas durante o espraiamento sobre o cordão litorâneo vegetado. Estas evidências são representadas por *overwash* sobre a vegetação de restinga e pela abundância de raízes suspensas na base do cordão. Por se tratar de uma praia com pequena declividade da antepraia é esperado que este alcance seja comum em situações de maré alta e/ou de maior intensidade de ondas e ventos” (ALBINO, et.al., 2006).

“Desta forma, o espraiamento das ondas sobre estes pode indicar comportamento morfodinâmico sazonal da praia e não tendência erosiva. Rumo ao sul, há poucos quilômetros de Barra Seca, a praia de Pontal do Ipiranga apresenta-se em progradação com expansão da vegetação sobre dunas frontais embrionárias” (ALBINO et.al., 2006).

No segmento costeiro diretamente associado a área do empreendimento, tendo como referência a localidade denominada de Barra Seca, a alta exposição deste litoral às ondas incidentes, a tipologia dissipativa da praia e a presença do rio à retaguarda do cordão litorâneo favorecem que, por ocasião de aumento relativo do nível do mar junto à costa, esta elevação seja por entrada de frentes frias e/ou aumento nos índices pluviométricos, com as ondas alcançando os cordões litorâneos mais interiores.

3.0 MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE ONDAS

O sistema de modelos numéricos Delft3D®, através de seu módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW e de seu módulo de ondas Delft3D-WAVE, foram selecionados como ferramentas para se atingir os objetivos propostos neste estudo.

O Delft3D-FLOW é capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, assim como a transferência de *momentum* ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. O Delft3D-WAVE é capaz de simular o comportamento da superfície do mar em resposta à atuação do vento, associado à geração e propagação das ondas de gravidade. As principais características desses módulos são descritas no Anexo A (Delft3D-WAVE) deste relatório.

Os resultados obtidos com a modelagem numérica foram, então, comparados com os dados de campo disponíveis (dados correntes, ondas e marés) para avaliação dos modelos numéricos e aplicação nas modelagens de transporte.

3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO

A grade implementada representa um compromisso entre a descrição dos processos hidrodinâmicos presentes na região de interesse (escala temporal e espacial), dos recursos computacionais disponíveis no período de execução da simulação e do tempo de processamento necessário.

A grade numérica implementada compreende parte da costa do Estado do Espírito Santo, abrangendo os municípios de Linhares e São Mateus (Figura 18). As características dessa grade são apresentadas na Tabela 5. Para o modelo de transporte (sedimentos) a mesma grade será implementada, e forçada com os resultados hidrodinâmicos e de ondas obtidos neste estudo.

Tabela 5 - Características das grades numéricas.

DIMENSÃO HORIZONTAL	ESPAÇAMENTO MÍNIMO	ESPAÇAMENTO MÁXIMO
278x215	30 m	450 m

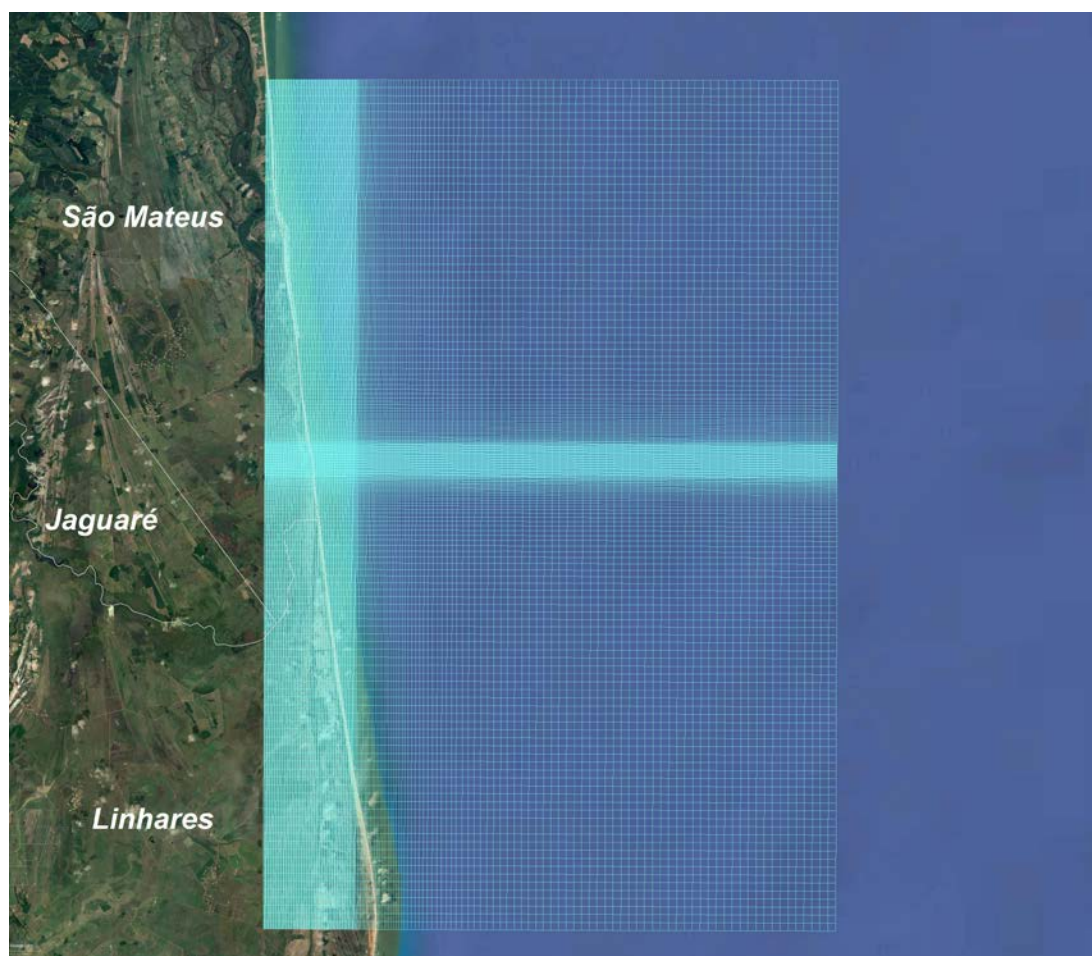


Figura 18 - Grade numérica do modelo hidrodinâmico.

Os dados de profundidade local foram obtidos através da digitalização dos valores batimétricos das cartas náuticas da DHN⁵, entre os n^{os} 1.300 e 1.400, bem como de informações batimétricas do banco de dados da TETRA TECH e do banco de dados global GEBCO⁶.

Visando o ajuste fino da batimetria com a linha de costa para a área de interesse, foram utilizadas, também, informações provenientes de imagens de satélite. Os resultados finais da projeção da batimetria para a região de estudo estão ilustrados na Figura 19.

⁵ Diretoria de Navegação e Hidrografia da Marinha.

⁶ General Bathymetric Chart of the Oceans. Obtido em: <http://www.gebco.net/>. Data de último acesso: abril de 2018.

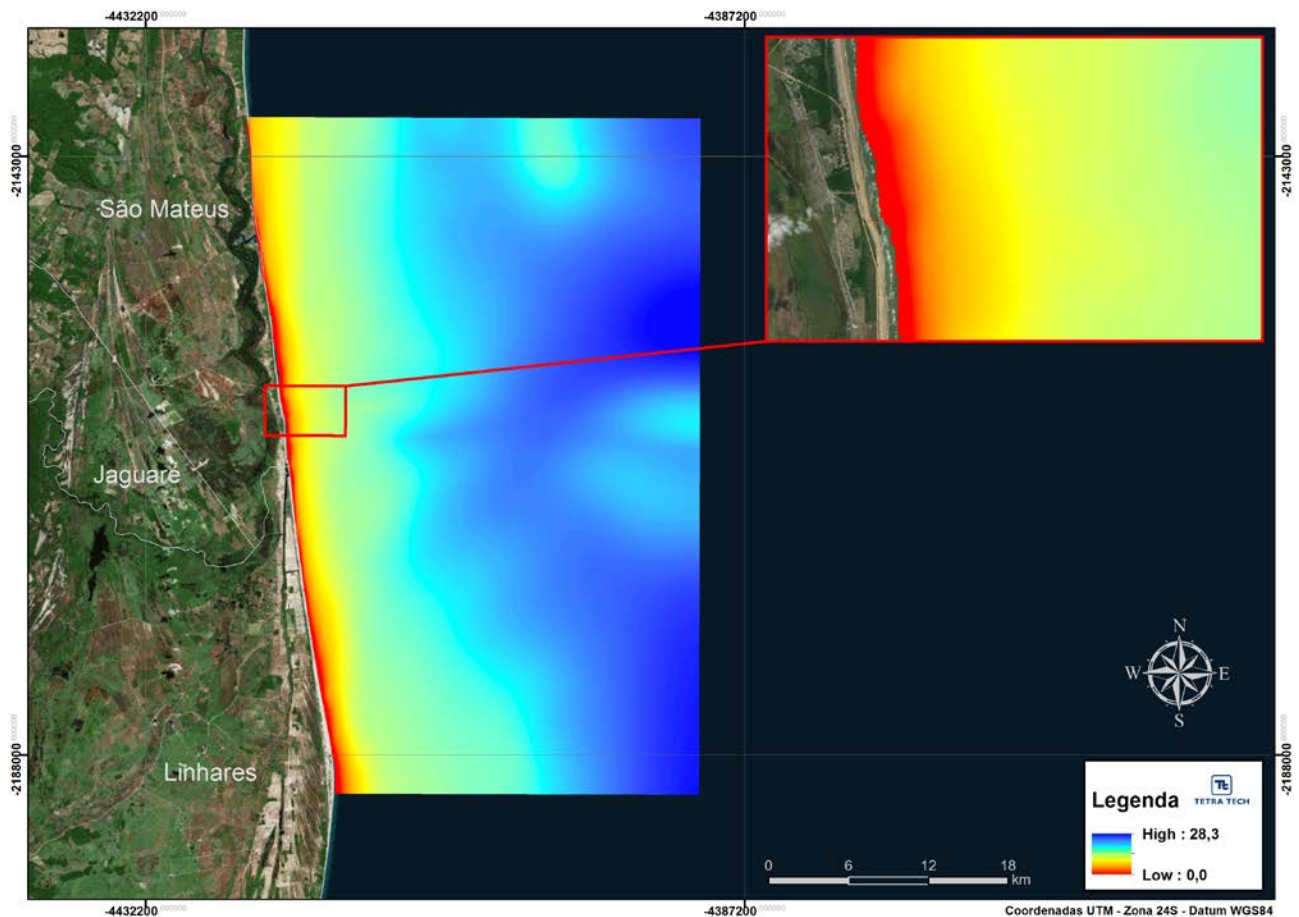


Figura 19 - Batimetria associada à grade numérica, o zoom representa a localização do empreendimento. As cores apresentam a profundidade local (em metros).

Também são apresentadas a seguir as batimetrias finais compostas dos empreendimentos *offshore* (leia-se layout 1) e *onshore* (leia-se layout 2) que serão simulados a seguir.

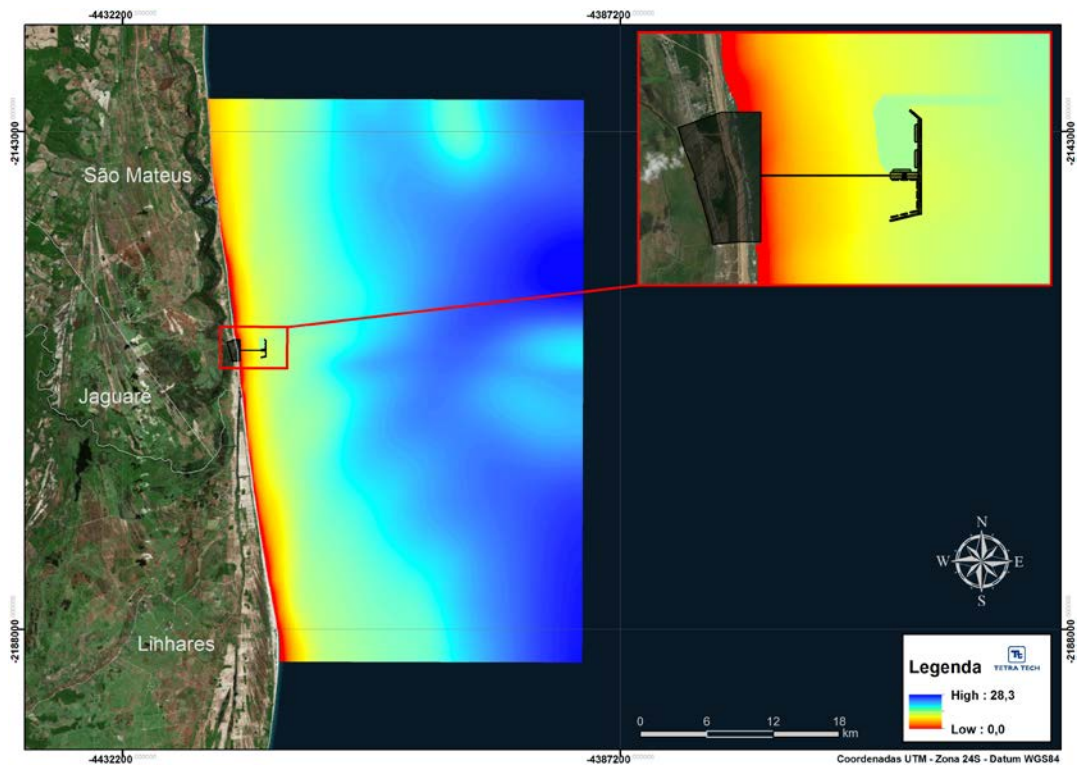


Figura 20 - Batimetria associada à grade numérica para o layout 1, offshore. As cores apresentam a profundidade local (em metros).

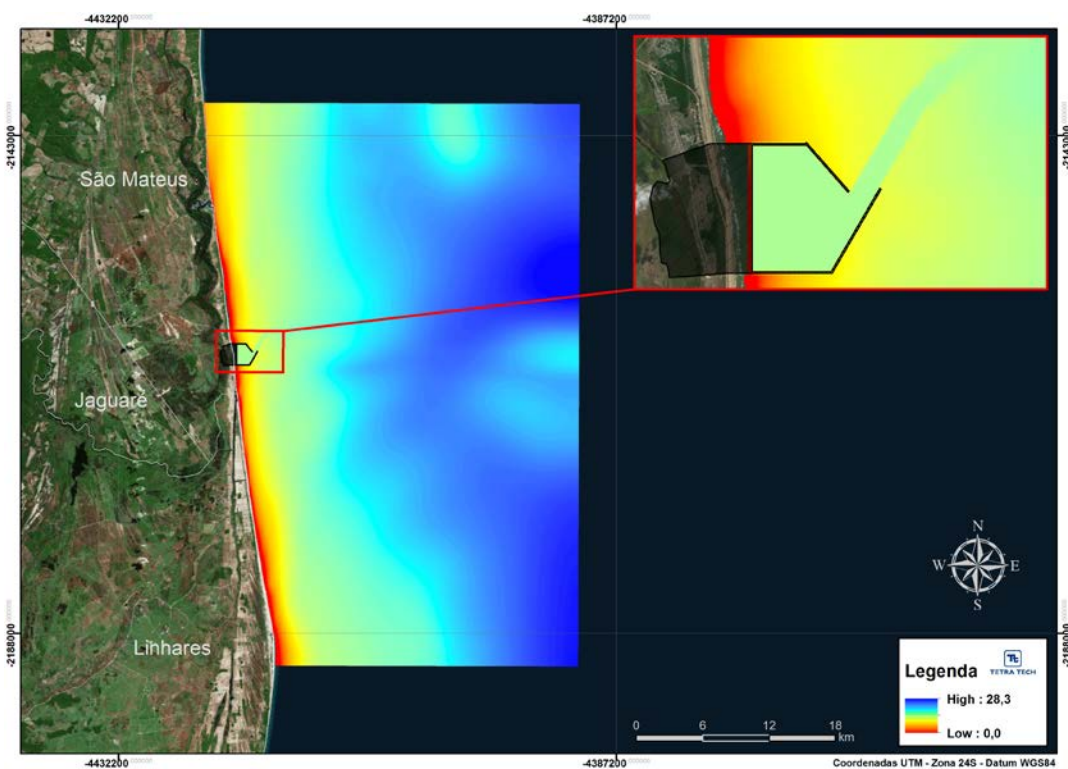


Figura 21 - Batimetria associada à grade numérica para o layout 2, onshore. As cores apresentam a profundidade local (em metros).

3.1.1 Condições de Contorno Adotadas

As condições de contorno naturais do modelo são dadas pela velocidade normal nula nos contornos terrestres. Na superfície livre, além das condições dinâmicas locais (MELLOR & YAMADA, 1982), é também considerada a tensão de cisalhamento do vento. Opcionalmente, fluxos de calor e sal (evaporação) podem ser incluídos. No fundo, são aplicadas as condições dinâmicas descritas em Mellor & Yamada (op. cit.). A velocidade de arrasto é calculada como uma função empírica da energia cinética turbulenta, por sua vez decorrente do fechamento turbulento de segunda ordem.

Nos contornos artificiais são aplicadas, ao modelo, condições de contorno para a definição do comportamento das propriedades modeladas nos limites oceânicos do domínio estudado. Essas condições de contorno são definidas para elevação da superfície do mar, velocidades do modo externo (2D), velocidades do modo interno (3D), temperatura, salinidade, velocidade vertical e energia cinética turbulenta.

Nas componentes perpendiculares à fronteira são aplicadas condições radiacionais em função da elevação, do tipo $H\bar{U} \pm C_e \eta = BC^2$, onde $C_e = \sqrt{gH}$ é a velocidade de fase da onda que chega ao sistema, η é a elevação do nível do mar e B é um coeficiente empírico. Nos casos da temperatura e da salinidade, utiliza-se esquema que permita advecção através da fronteira, condição está descrita por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (\text{condição análoga aplicada à salinidade})$$

O sistema de modelos Delft3D® possibilita a utilização de contornos abertos. Nesses contornos abertos (ou bordas abertas) podem ser atribuídas condições forçantes (ativas) ou condições radiacionais (passivas). Quando são aplicadas forçantes nas bordas abertas, pode se utilizar séries temporais ou valores constantes para diferentes variáveis pertinentes ao sistema estudado.

Para as simulações numéricas foi considerado um conjunto de 3 bordas abertas. Foram utilizados (1) dados de elevação da superfície do mar, oriundos do modelo global de maré TPXO⁷.

A base de dados atmosféricos utilizados para forçar o modelo hidrodinâmico e de ondas foi proveniente do produto de reanálise CFSRv2, conforme descrito no Item 2.1.

Na modelagem de ondas utilizaram-se como forçantes nas fronteiras os estados de mar do modelo WW3, implementado para o Oceano Atlântico Sul pela equipe da TETRA TECH. Foram considerados os parâmetros: altura significativa, período e direção nas bordas abertas da grade. Os resultados foram comparados com dados medidos e disponibilizados pela contratante para verificar a capacidade do modelo em reproduzir os fenômenos simulados.

3.2 PERÍODOS SIMULADOS

A modelagem numérica foi inicialmente conduzida para o período dos dados disponibilizados pela contratante, nas proximidades da região de maior interesse deste estudo. O modelo foi implementado de forma a representar todo o período dos dados medidos (janeiro a dezembro de 2013).

A partir do modelo calibrado e verificado, através dos ajustes realizados e comparação com os dados medidos na região, foram conduzidas novas simulações numéricas. Estas buscaram representar a sazonalidade da hidrodinâmica na região de interesse, sendo conduzidas de janeiro a dezembro de 2017.

Todas as simulações realizadas contam com um período de aquecimento de aproximadamente 15 dias para estabilização do modelo. Assume-se condição nula para os parâmetros iniciais do modelo (elevação, correntes e ondas).

⁷ <http://volkov.oce.orst.edu/tides/>

3.3 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE ONDAS

A metodologia de validação utilizada fundamenta-se na avaliação da modelagem quanto à sua capacidade de reprodução da circulação hidrodinâmica e de ondas na região em estudo. Com este intuito são apresentadas comparações entre resultados da modelagem hidrodinâmica e de ondas com dados pretéritos coletados nas adjacências da região de interesse.

As Figura 22 apresenta a comparação entre os dados medidos e o modelo numérico. Conforme é possível observar, o modelo numérico representa de forma satisfatória o padrão de deslocamento das correntes na direção NNW-SSE, influenciadas principalmente pelo padrão de ventos descrito no item 2.1 e pela orientação da costa. Correntes na direção perpendicular são bem mais raras e suas intensidades são bastantes reduzidas quando comparadas às observadas na direção paralela à linha de costa.

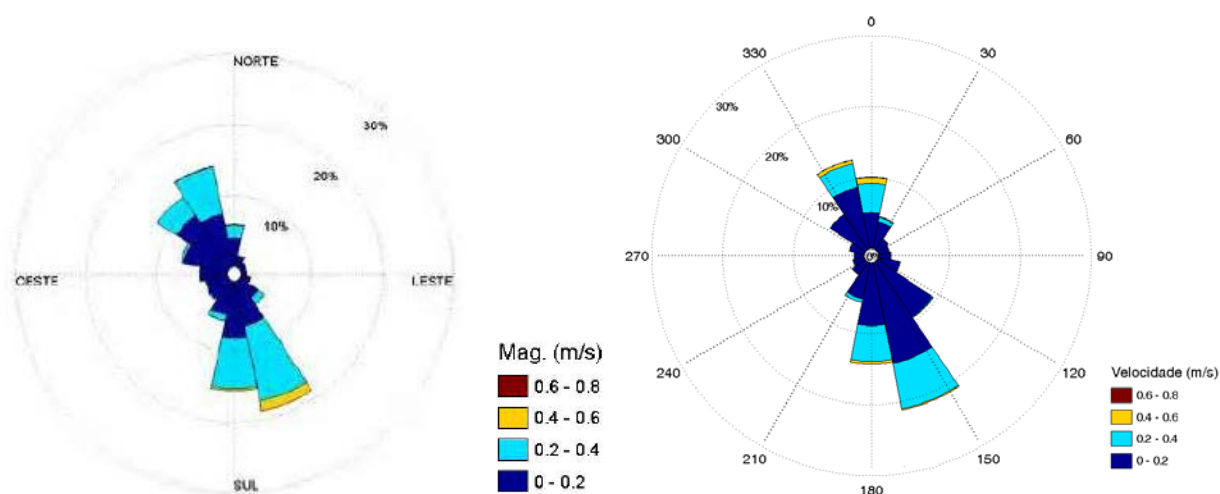


Figura 22 - Histogramas direcionais da corrente medida (painel à esquerda) e do modelo hidrodinâmico (painel à direita) para o período de 2013.

No processo de validação das ondas, a altura significativa e a direção média modeladas pelo Delft3D-WAVE foram comparados com os dados pretéritos existentes. A partir do modelo rodado, foram extraídas séries temporais do modelo na mesma posição dos dados medidos. A Figura 23 apresenta o resultado das ondas medidas (painel à esquerda) e geradas pelo modelo Delft3D® (painel à direita). Os resultados apresentados

ênfatizam que o modelo representa a altura significativa e a direção média das ondas nas proximidades da região de estudo de forma satisfatória, condizente com a realidade. De maneira geral os processos estão bem representados, e o modelo se mostrou capaz de reproduzir as variações relacionadas a energia das ondas, e a direção.

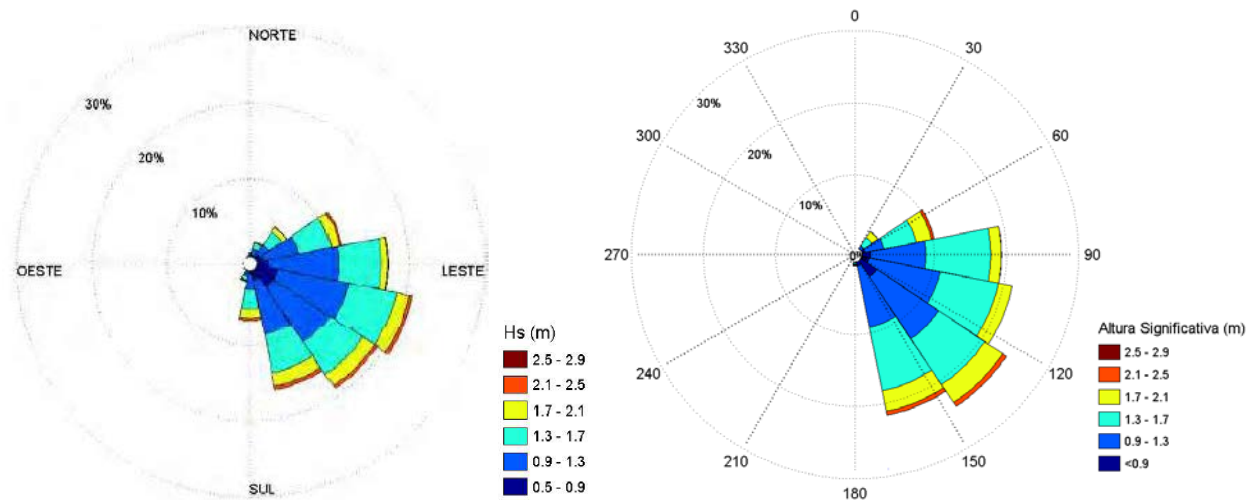


Figura 23 - Histogramas direcionais das alturas significativas de onda (m) obtidas a partir dos dados medidos (painel à esquerda) e do modelo de ondas (painel à direita) para o período de 2013.

A Figura 24 apresenta as séries temporais de elevação do nível do mar coletadas (painel superior) na plataforma continental nas adjacências da área de implantação do Complexo Petrocity, entre os meses de dezembro de 2012 e janeiro de 2014. A série temporal referente ao modelo numérico Figura 24 (painel inferior) apresenta os resultados gerados pelo Delft3D® para o período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2013. Observa-se que o modelo implementado representa o comportamento da maré de forma extremamente satisfatória na área de interesse, tanto em amplitude quanto em fase.

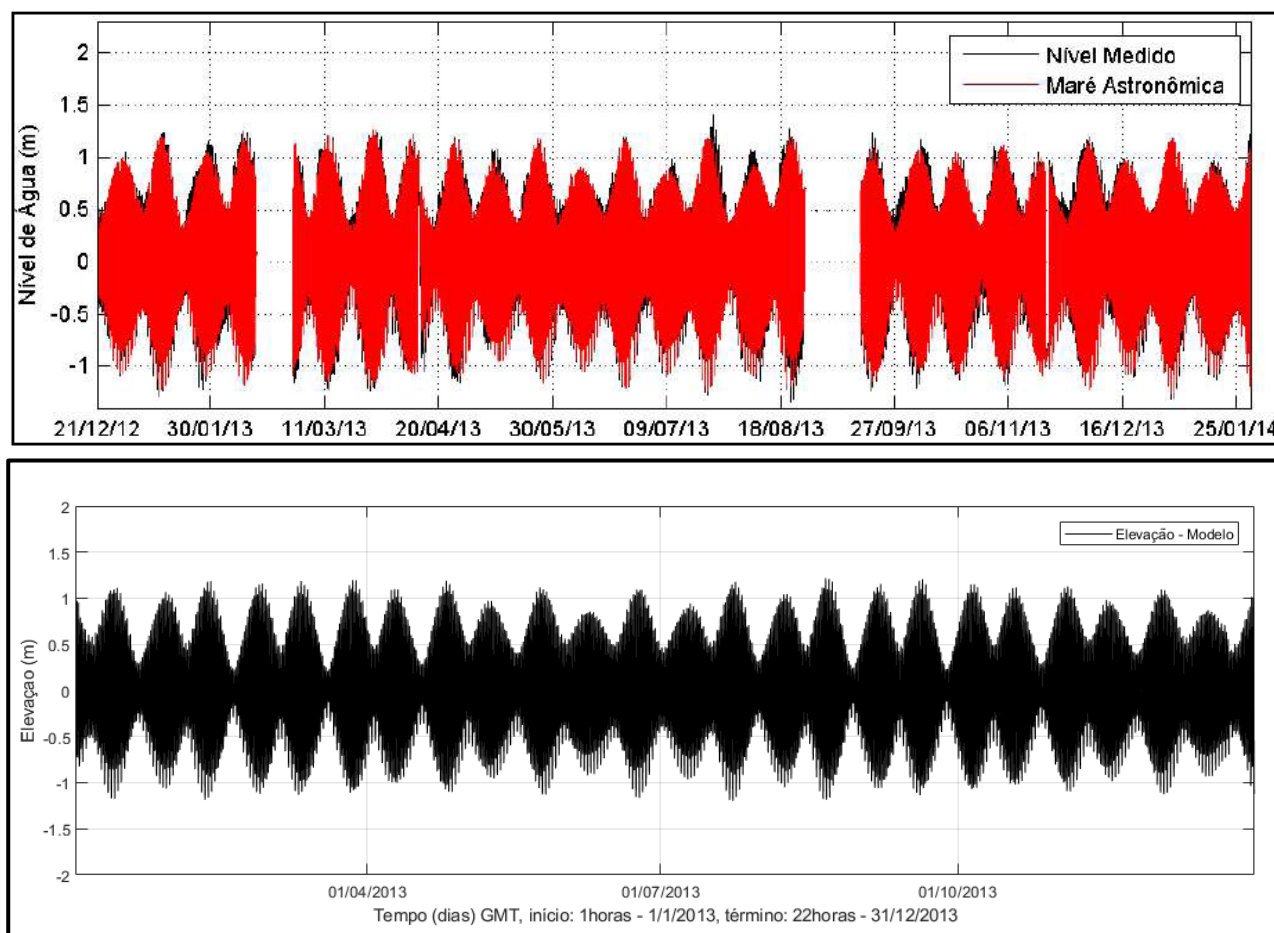


Figura 24 - Comparação da elevação do nível do mar (m) dos dados medidos (painel superior) com os resultados do modelo numérico (painel inferior), ambos englobam o ano de 2013;

3.4 RESULTADOS MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A seguir são apresentados resultados de velocidade da corrente gerados pelos modelos, para as condições atual e de implantação do Complexo Portuário Petrocity. Os resultados a seguir apresentam as simulações de duas alternativas uma estrutura *offshore* (layout 1) e *onshore* (layout 2). Os resultados a seguir têm o intuito de avaliar as possíveis alterações decorrentes da implantação de cada um dos empreendimentos

Foram selecionados diferentes instantes representativos de condições de verão (24 de Janeiro de 2017) e inverno (13 de agosto de 2017), que foram combinadas a partir de mapas vetoriais antes (vetores vermelhos) e após (vetores pretos) a implantação de cada estrutura. A escala de cores ilustra a diferença em m/s e, nas regiões em branco a diferença na velocidade da corrente é quase nula.

De forma geral, as alterações propostas pelo empreendimento resultam em uma redução e um redirecionamento na velocidade e direção das correntes nas regiões de aprofundamento do canal e nas áreas de construção dos empreendimentos, tanto para o layout 1 (*offshore*), Figura 25, como para o layout 2 (*onshore*), Figura 26.

Em todos os cenários avaliados observa-se este mesmo comportamento: redução da intensidade das correntes considerando as alterações propostas. No entanto, observa-se que na região do empreendimento do layout 2 (Figura 25 e Figura 26, painel à direita), as correntes são redirecionadas uma vez que encontram o quebra-mar. Já no layout 1 (Figura 25 e Figura 26, painel à esquerda) as variações são locais na região dos berços de atracação.

Conforme pode ser visto, é o layout 2 ((Figura 25 e Figura 26, painel à direita) que provoca as maiores alterações nas correntes costeiras, uma vez que são implantadas estruturas que barram o sentido do fluxo, tanto nas condições de verão, quanto na de inverno.

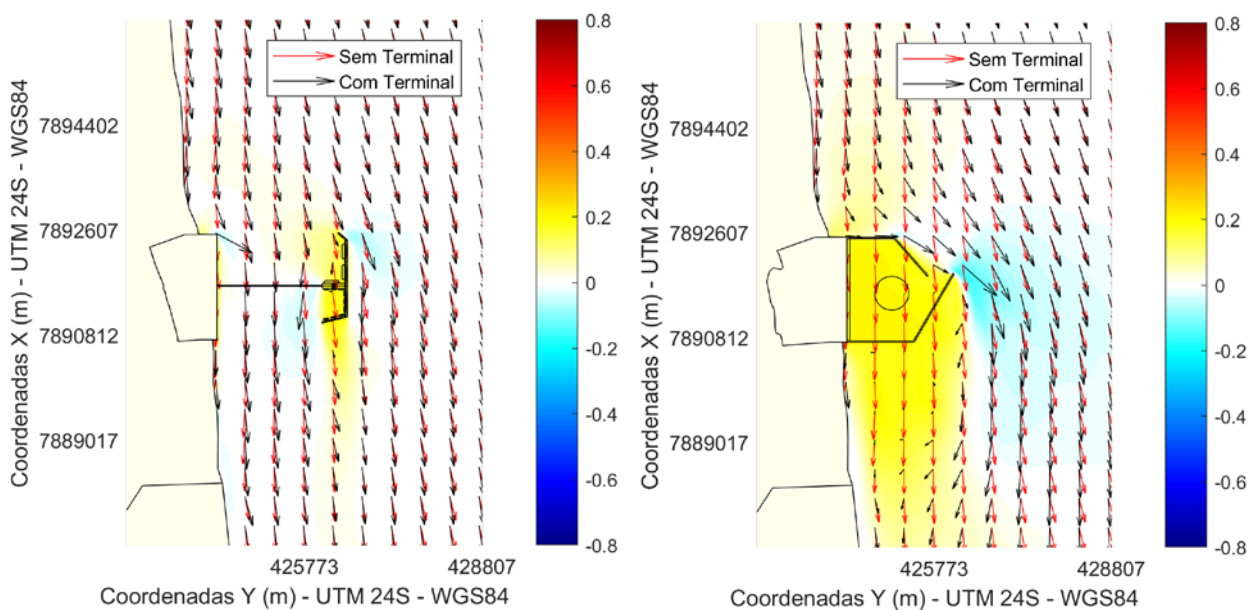


Figura 25 - Campo instantâneo das diferenças velocidade das correntes antes (vetores vermelhos) e após (vetores pretos) a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar representativo do período de verão (24 de Janeiro de 2017 às 18h). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em m/s.

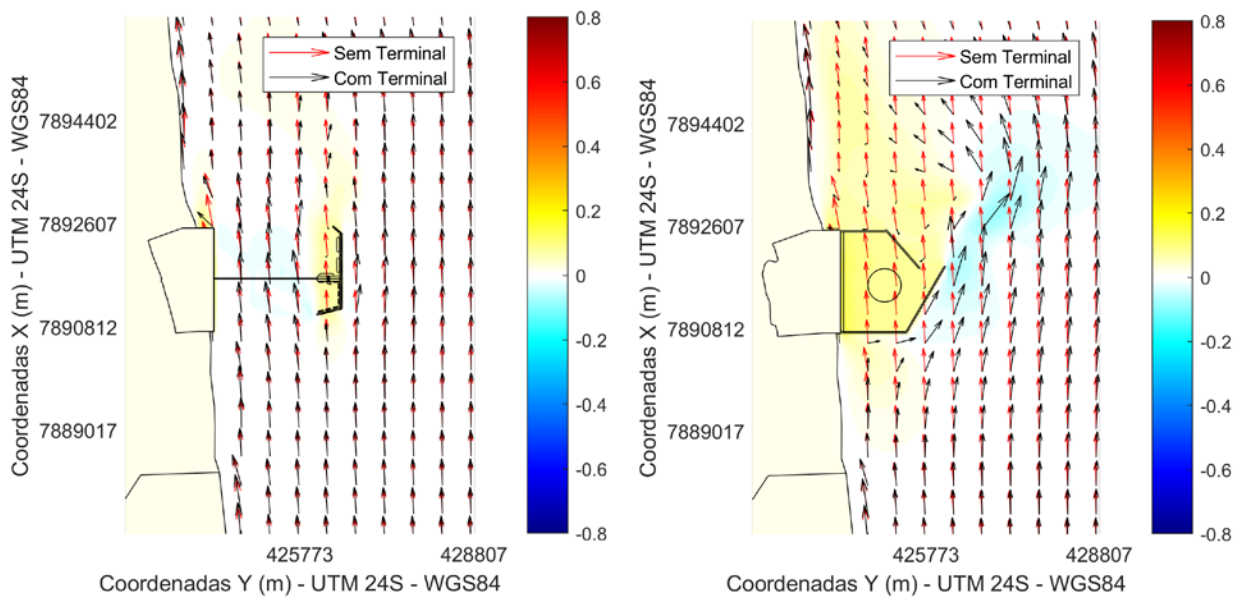


Figura 26 - Campo instantâneo das diferenças velocidade das correntes antes (vetores vermelhos) e após (vetores pretos) a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar representativo do período de inverno (13 de Agosto de 2017 às 16h). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em m/s.

3.5 RESULTADOS MODELAGEM DE ONDAS

As ondas, ao se propagarem desde águas profundas até a costa, experimentam uma série de fenômenos que ocorrem através da transformação de sua energia. Estes fenômenos têm sua origem no local onde as ondas são geradas pelos ventos e vão, desde aí, sofrendo os seguintes processos: empinamento (aumento na altura de onda através de uma diminuição do seu comprimento); refração (giro devido a uma diferença entre celeridades que ocorre por mudanças de profundidades); difração (aporte lateral de energia perpendicular à direção de propagação entre a zona de incidência e uma zona de sombra); reflexão (que ocorre pela presença de obstáculos); dissipação de energia pelo fundo (indução por forças tangenciais que são produzidas na camada limite perto do fundo); quebra da onda (quando a altura de onda coincide aproximadamente com a profundidade), etc.

Com o objetivo de caracterizar os processos que as ondas sofrem em sua propagação, e de representar possíveis impactos nas ondas após a implantação do Complexo Portuário Petrocity, os resultados a seguir apresentam as simulações de duas alternativas uma estrutura *offshore* (layout 1) e *onshore* (layout 2), para as condições de

verão (altura significativa (H_s) =0,94m., período de pico (T_p) =9s., direção média (Dir) =106°), inverno (altura significativa (H_s) =2,92m., período de pico (T_p) =14,4s., direção média (Dir) =155°) e para a condição mais crítica de operação dos futuros empreendimentos, as ondas de nordeste (altura significativa (H_s) =1,47m., período de pico (T_p) = 6,5s., direção média (Dir) =43°).

Os resultados da modelagem de ondas estão apresentados a seguir a partir da comparação da propagação das ondas entre os empreendimentos.

A Figura 27 apresenta os campos instantâneos comparativos para o período de verão. Os resultados mostram que as ondas ao incidirem do quadrante E sobre os empreendimentos, tanto para o layout 1 (Figura 27, painel à esquerda) como para o layout 2 (Figura 27, painel à direita), sofrem processos de difração-refração uma vez que incidem sobre as estruturas portuárias, estando as maiores diferenças de alturas nas áreas portuárias abrigadas. Vale destacar que no layout 1, por ser uma estrutura *offshore*, as diferenças na altura significativa da onda entre a situação atual e a com empreendimento englobam uma área maior, quando comparados ao layout 2, *onshore*. Tal diferença ocorre pelas estruturas do layout 2 serem confinadas por dois quebra-mares, o que restringe as variações de altura e direção localmente.

A Figura 28 apresenta os campos instantâneos comparativos para o período de inverno, onde as ondas são mais intensas e passam a incidir do quadrante S. Os resultados mostram que as ondas uma vez que propagam sobre os empreendimentos, tanto para o layout 1 (Figura 28, painel à esquerda) como para o layout 2 (Figura 28, painel à direita), sofrem processos de difração-refração uma vez que incidem sobre as estruturas portuárias, estando as maiores diferenças de alturas nas áreas portuárias abrigadas, e logo à norte dos empreendimentos. Vale destacar que no layout 1, por ser uma estrutura *offshore*, as diferenças entre a situação atual e a com empreendimento englobam uma área maior em direção à norte, quando comparados ao layout 2, *onshore*.

A Figura 29 apresenta a propagação das ondas de NE/ENE, que apesar da baixa ocorrência conforme visto no Item 3.4, são as ondas que incidem diretamente sobre o canal de aproximação do porto no layout 2 (Figura 29, painel à direita). A partir dos resultados da Figura 29, é possível notar que a presença das estruturas gera as maiores diferenças de altura significativa de onda e direção da propagação nas áreas de implantação e à sul do empreendimento. Conforme comentado anteriormente, é no layout

1 que ocorrem as maiores diferenças entre a situação atual e a com empreendimento, quando comparados ao layout 2, *onshore*.

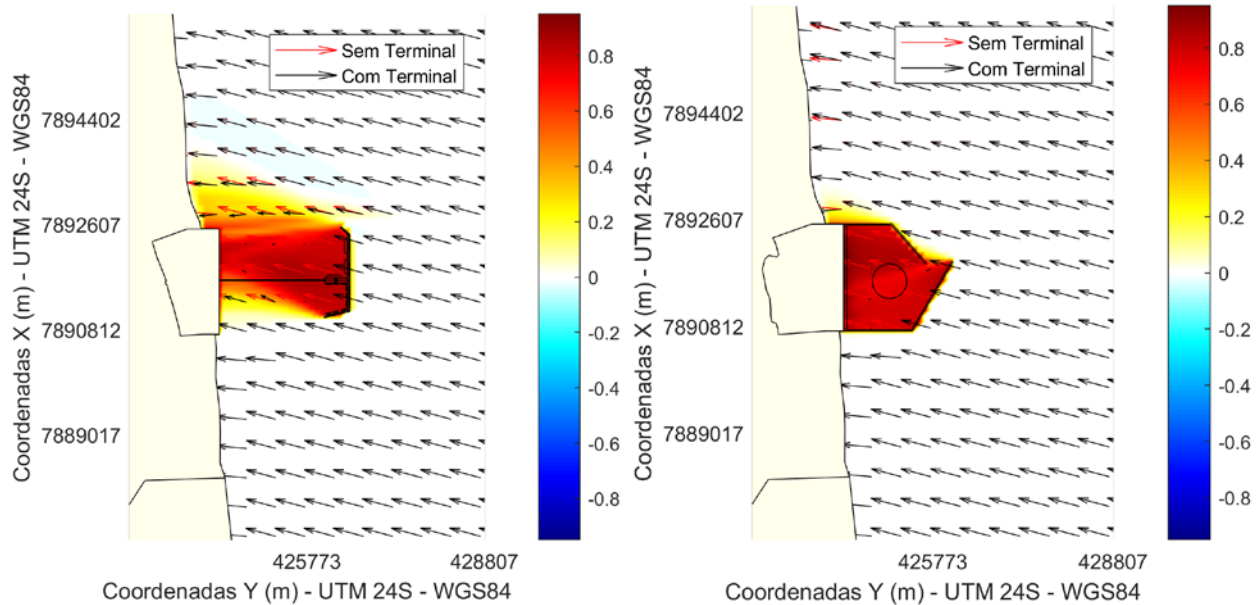


Figura 27 – Campo instantâneo das diferenças de altura significativa (H_s) e direção das ondas (Dir) antes (vetores vermelhos) e após (vetores pretos) a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar representativo do período de verão ($H_s=0,94m.$, $T_p=9s.$, $Dir=106^\circ$). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em metros.

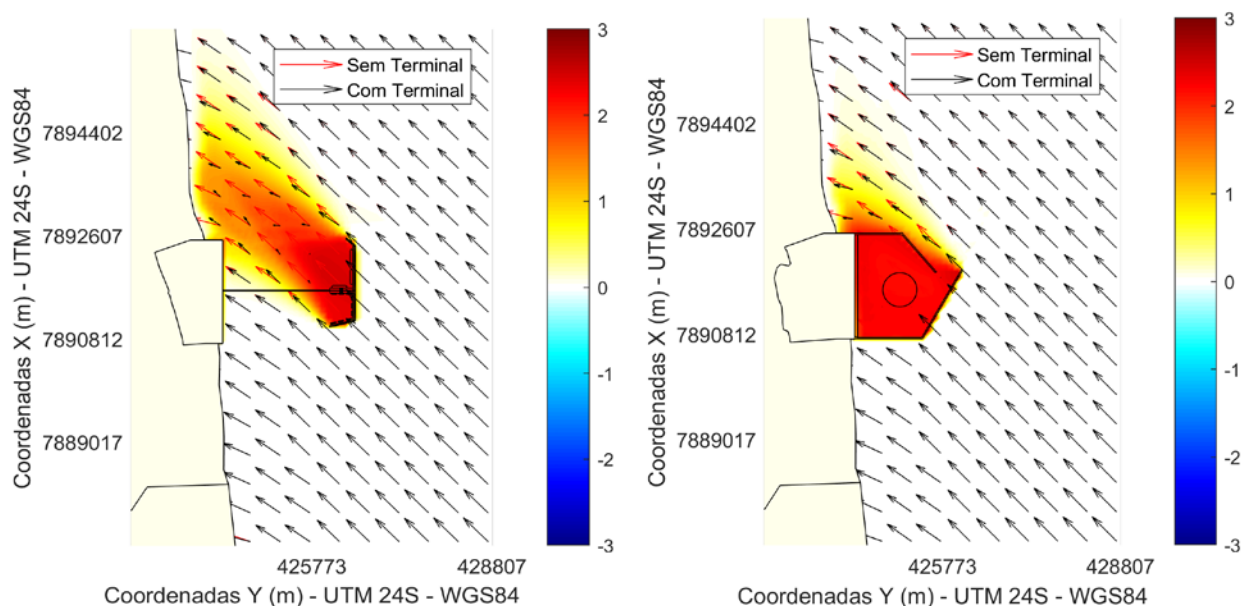


Figura 28 - Campo instantâneo das diferenças de altura significativa (H_s) e direção das ondas (Dir) antes e após a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar representativo do período de inverno ($H_s=2,92m$., $T_p=14,4s$., $Dir=155^\circ$). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em metros.

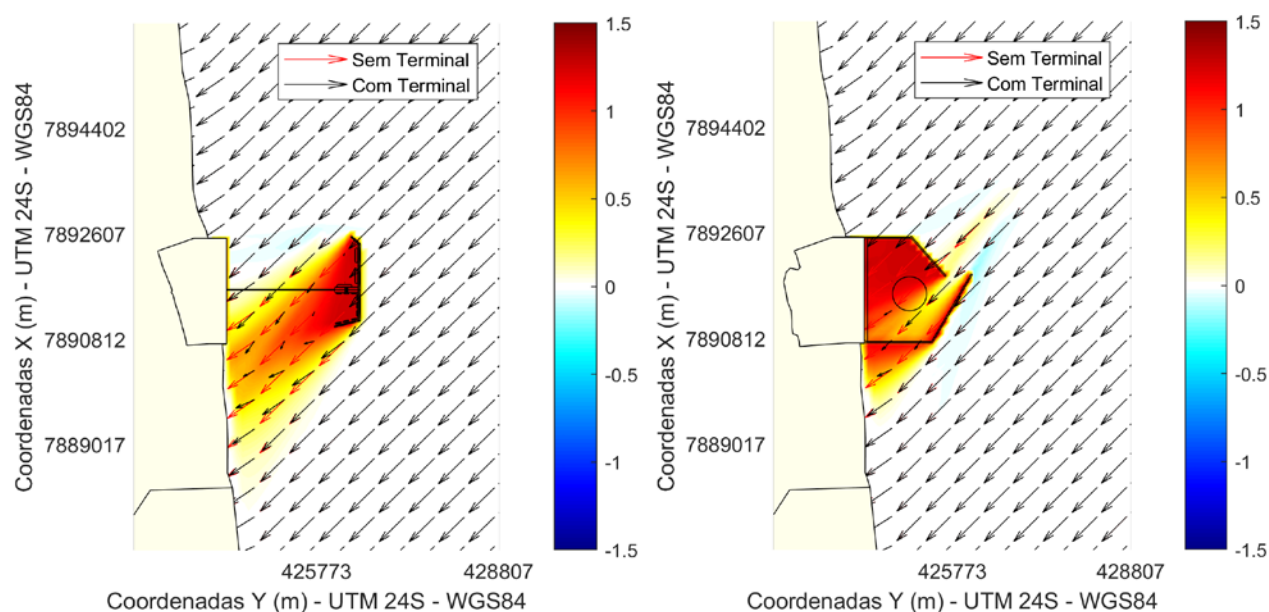


Figura 29 - Campo instantâneo das diferenças de altura significativa (H_s) e direção das ondas (Dir) antes e após a construção dos empreendimentos (layout 1, painel à esquerda e layout 2, painel à direita), para um estado de mar exposto às condições de NE ($H_s=1,47m$., $T_p=6,5s$., $Dir=43^\circ$). A escala de cores apresenta a diferença de magnitude, em metros.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos através da técnica de interpolação conhecida como *Radial Basis Functions* (RBF), adequada para dados de alta dimensão e não distribuídos uniformemente (FRANKE, 1982). O objetivo da interpolação RBF é proporcionar a série completa, de estados de mar (altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção de média (D_m)) em pontos de interesse, tomando como base a série de casos selecionados e propagados desde águas profundas até a região de interesse.

A Figura 32 apresenta a localização dos 4 pontos de ondas que foram estudados no ano de 2017, sem os empreendimentos, com o layout 1 e layout 2. Os pontos selecionados representam o estados de mar na região, e caracterizam o padrão das ondas na isóbata 12 metros.



Figura 30 - Localização dos pontos de cálculo do fluxo de energia.

As Figura 31 a Figura 35 representam as ondas que incidem nos ponto P1 a P4 num ambiente sem os empreendimentos. As ondas não apresentam muita variação entre os pontos, sendo principalmente ondas de ESE, E, SE e com menor intensidade, as ondas de ENE. A altura significativa ficam em torno de 1 m a 1,5 m, período mínimo de 5 s e máximo de 20 s.

Os resultados das ondas da região na presença do layout 1 (Figura 36 a Figura 40) mostraram que os pontos localizados mais afastados da construção (P1 e P4) não sofreram nenhuma alteração. Já os pontos mais próximos do empreendimento (P2 e P3) sofreram alterações na sua intensidade e direção. Com o layout 1, o P2 só recebe ondas de ESE e SE, onde as ondas de ESE chegam com menor intensidade (no máximo 1,5 m) e ondas mais intensas de SE, podendo chegar até 2,5 metros. O P3 não consegue mais receber as ondas de ESE, E, e SE, tendo somente a entrada das ondas de ENE com uma forte atenuação em sua intensidade, com ondas de no máximo 1 m de altura significativa. Os períodos nos 4 pontos foram semelhantes ao apresentado nas condições sem as construções.

Os resultados das ondas da região na presença do layout 2 (Figura 41 a Figura 45) só apresentaram diferenças significativas no P3, onde as únicas ondas que conseguem chegar no local são as de ENE e E mais atenuadas, com altura significativa de no máximo 1,5 m. Os outros pontos apresentaram valores similares em altura significativa, período e direção com o que foi apresentado nas condições sem as construções.

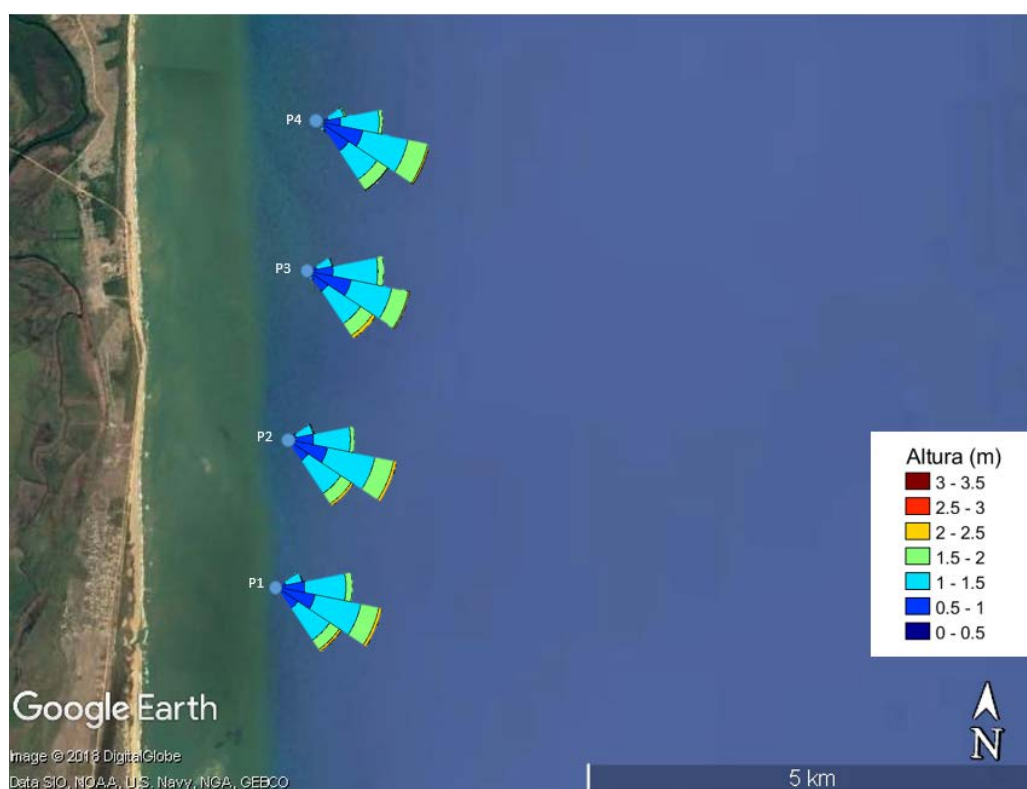


Figura 31 - Histograma direcional da altura significativa (m) para o ano de 2017 sem os empreendimentos na região de estudo.

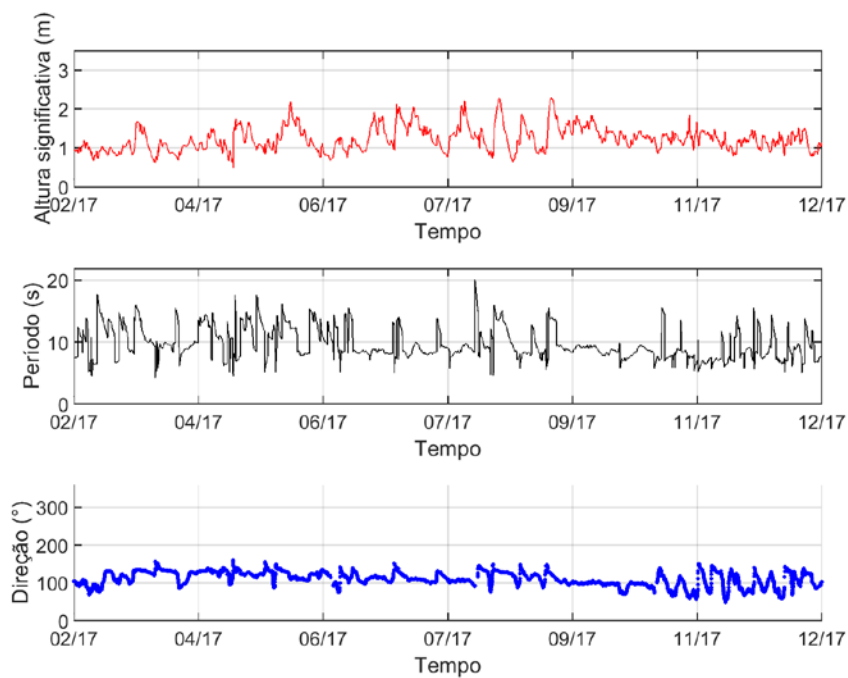


Figura 32 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P1 sem os empreendimentos.

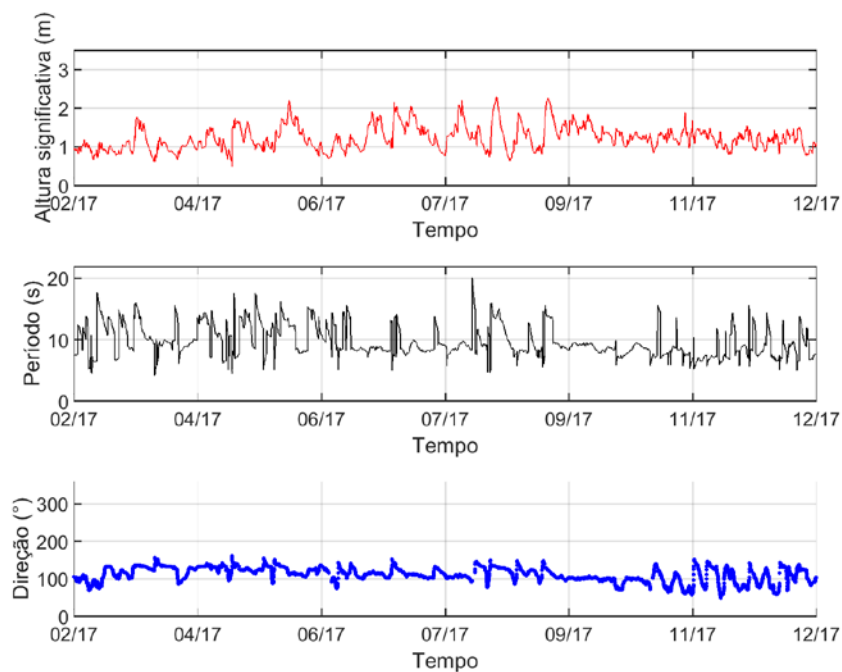


Figura 33 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P2 sem os empreendimentos.

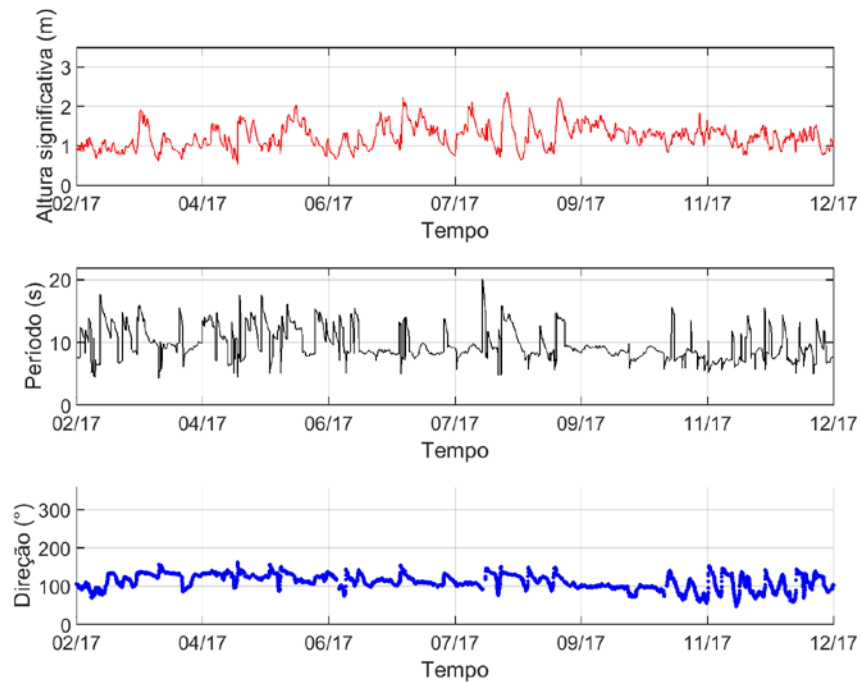


Figura 34 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P3 sem os empreendimentos.

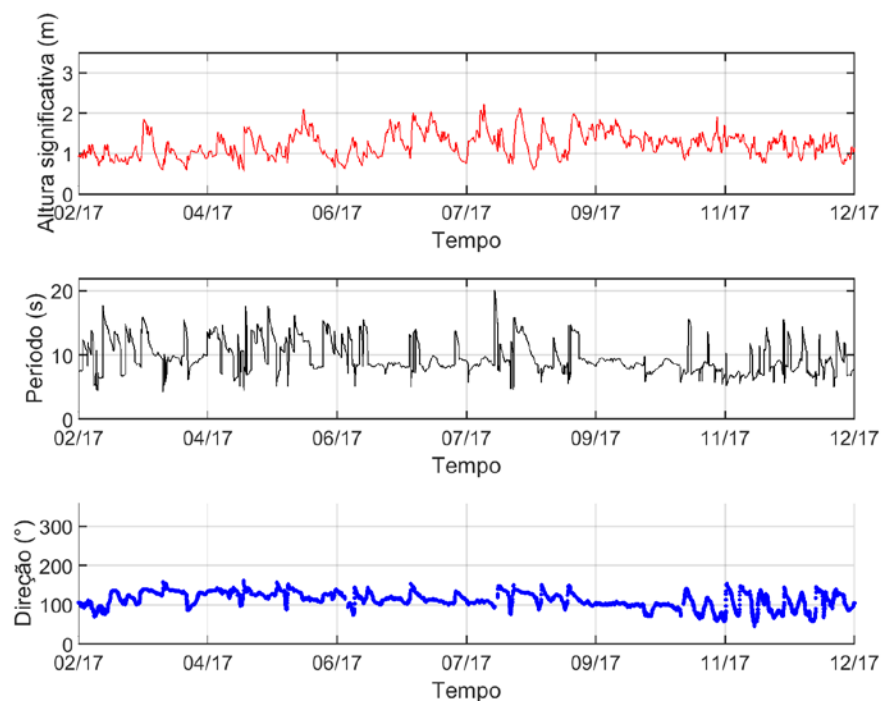


Figura 35 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P4 sem os empreendimentos.

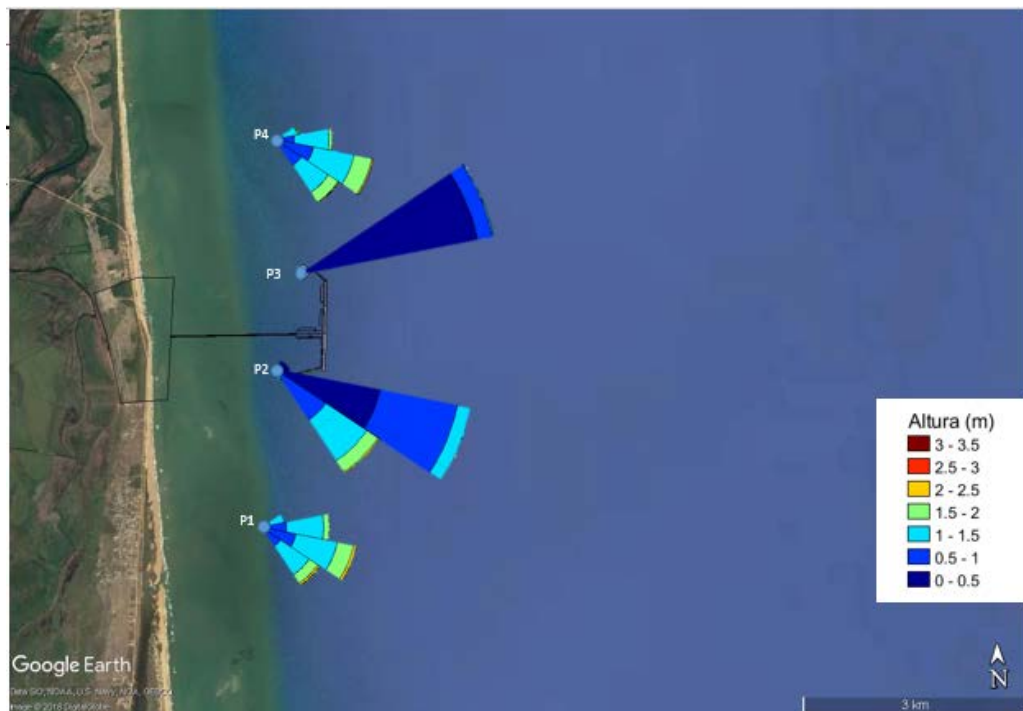


Figura 36 - Histograma direcional da altura significativa (m) para o ano de 2017 com o empreendimento 1 na região de estudo.

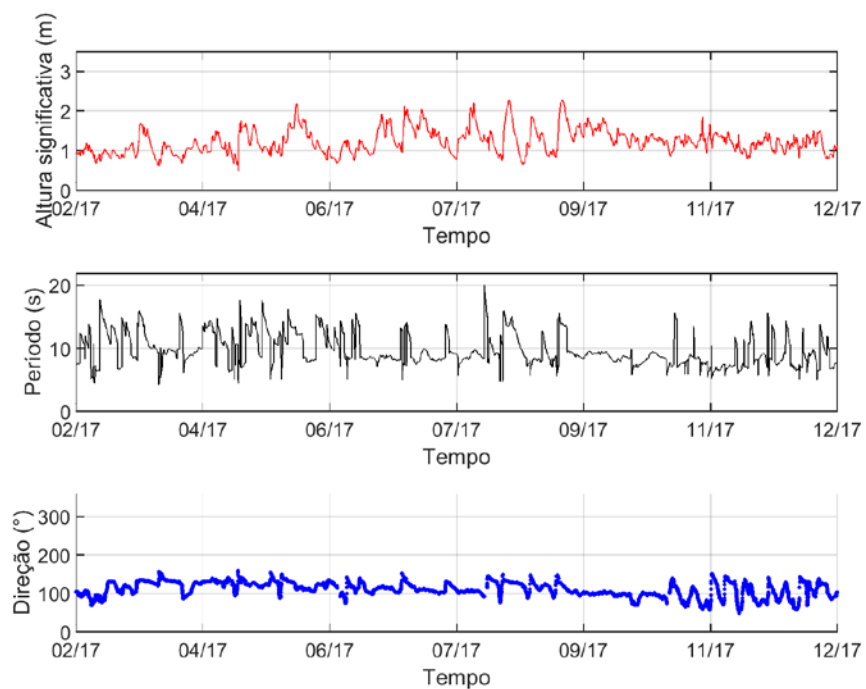


Figura 37 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P1 com o empreendimento 1.

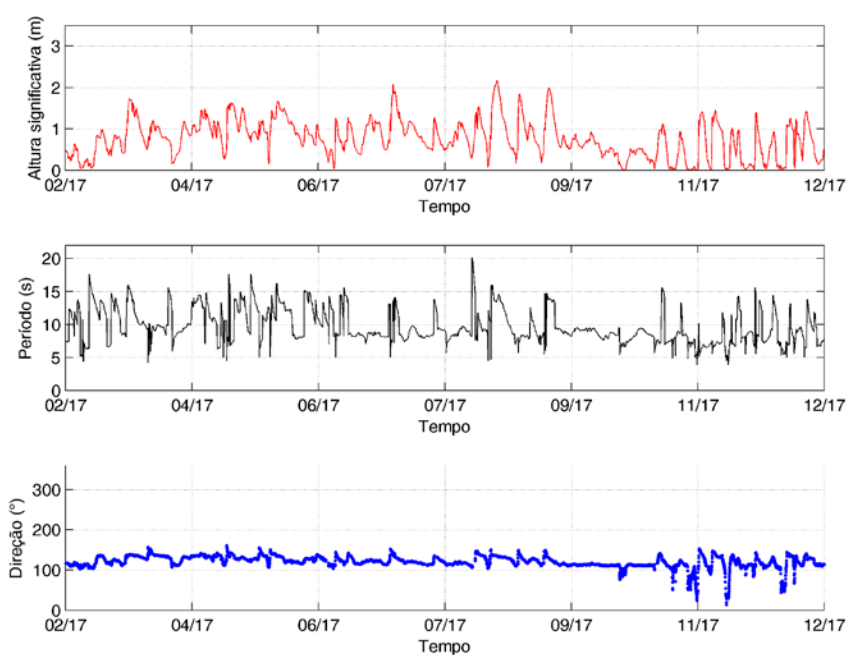


Figura 38 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P2 com o empreendimento 1.

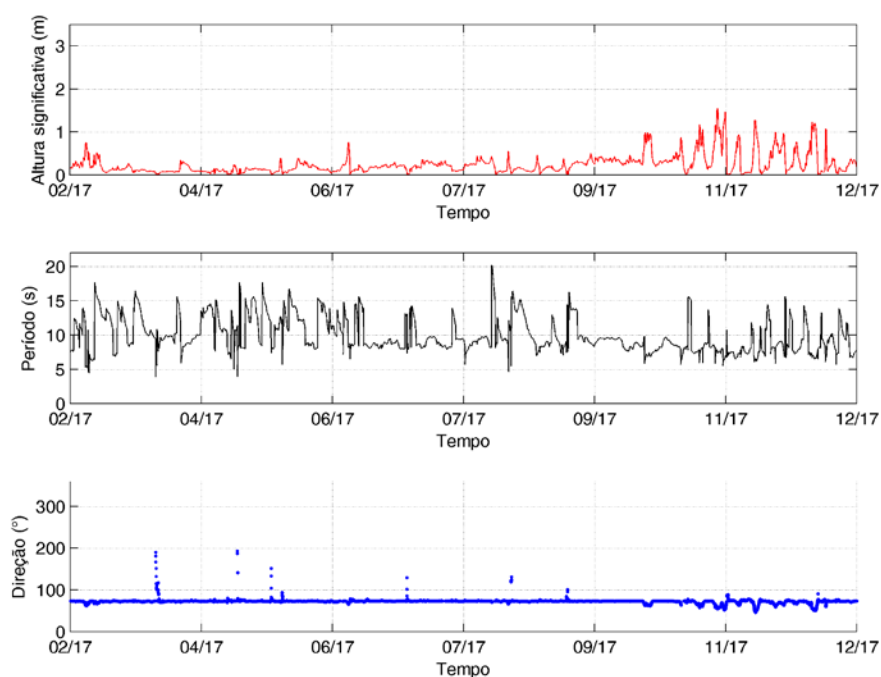


Figura 39 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P3 com o empreendimento 1.

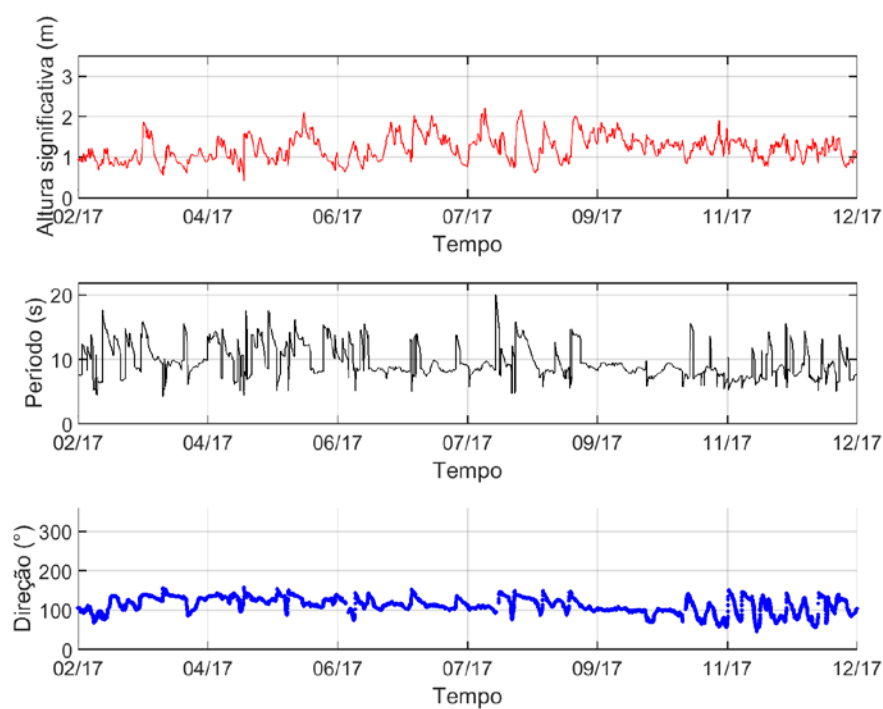


Figura 40 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P4 com o empreendimento 1.



Figura 41 - Histograma direcional da altura significativa (m) para o ano de 2017 com o empreendimento 2 na região de estudo.

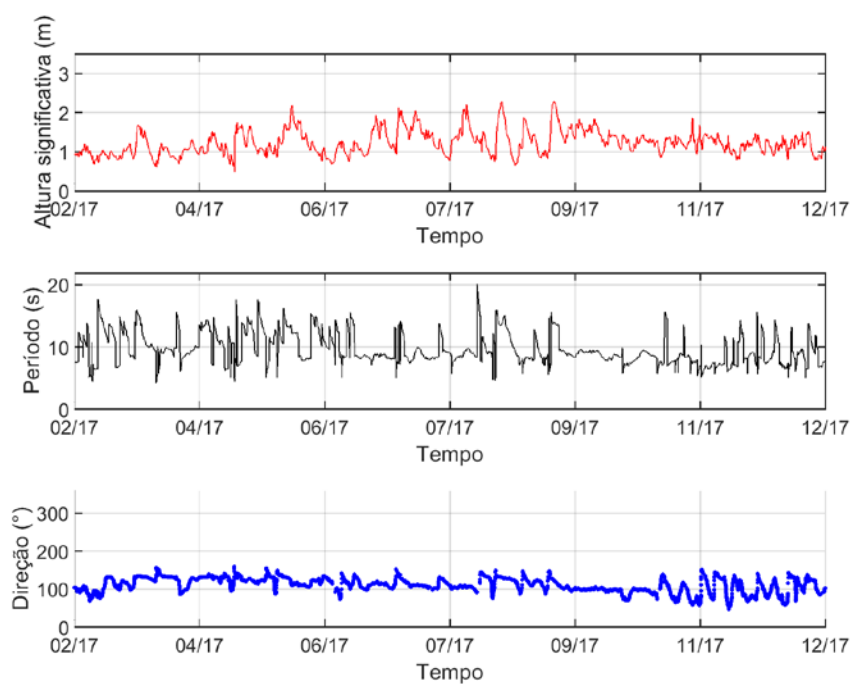


Figura 42 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P1 com o empreendimento 2.

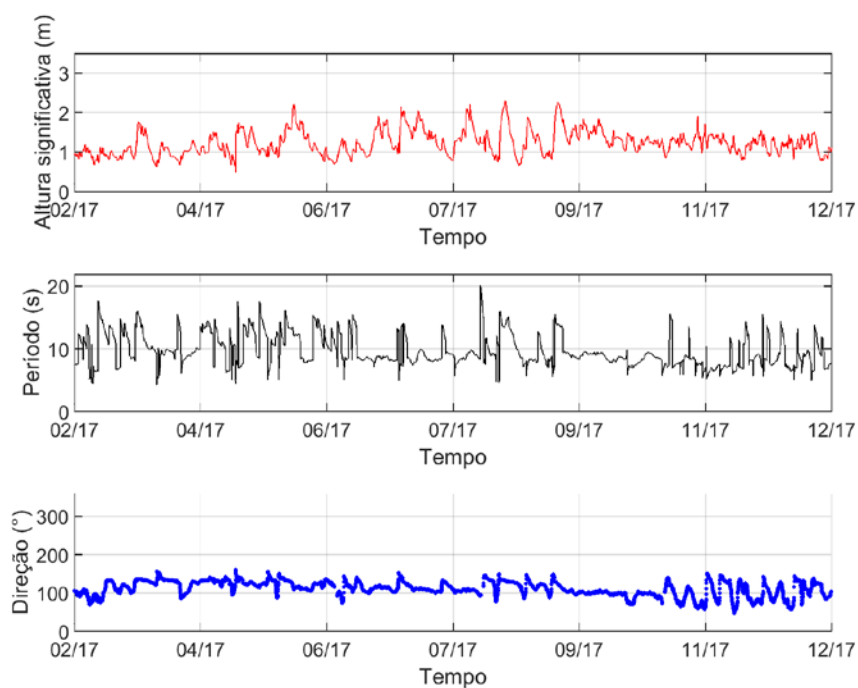


Figura 43 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P2 com o empreendimento 2.

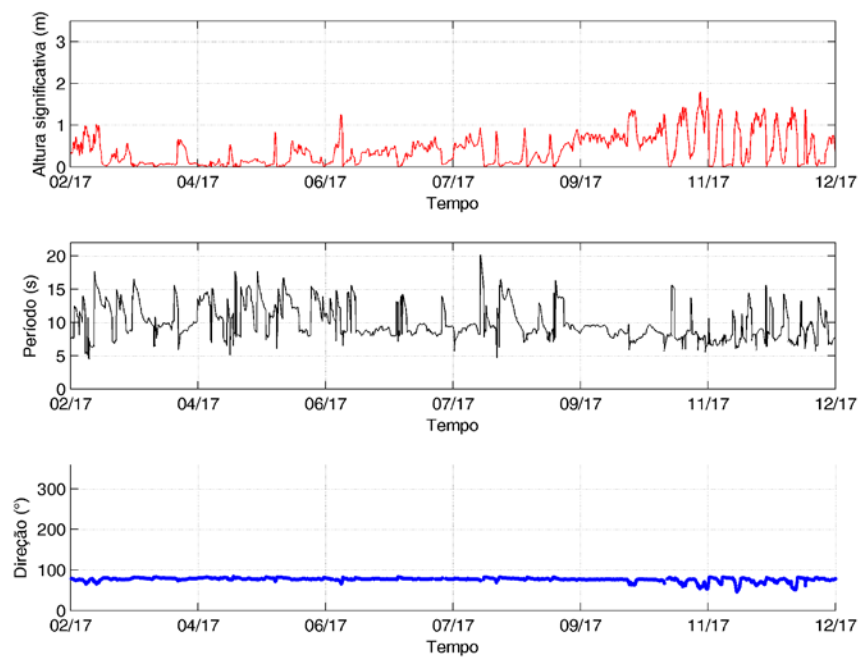


Figura 44 - Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P3 com o empreendimento 2.

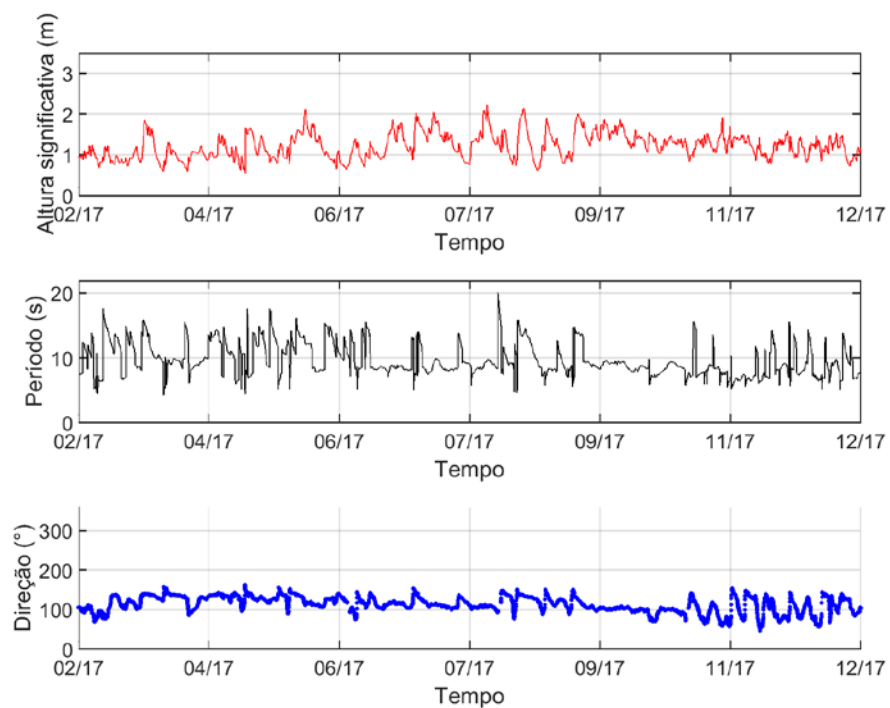


Figura 45- Altura significativa (m), direção média (°) e período de pico (s) segundo o RBF para o P4 com o empreendimento 2..

4.0 **MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

A região costeira está submetida a impactos constantes das ondas, nos quais esse fluxo de energia ocasiona diversos campos de correntes que, predominantemente, são longitudinais à costa. Estas correntes são os fluxos que colocam em movimento o sedimento existente na costa. No entanto, para esta ação das correntes é muito importante somar o evento de suspensão do material como consequência da quebra das ondas, o que gera efeitos nas taxas de transporte.

O transporte longitudinal ocorre principalmente na zona de arrebentação (*surf zone*), logo depois da quebra das ondas e antes que as correntes longitudinais sejam máximas, que é o momento quando uma grande parte dos sedimentos entra em suspensão. Isso não quer dizer que o transporte não ocorra em outros trechos, e sim que estes são de menor relevância, como, por exemplo, o transporte que ocorre na zona de espraiamento (*swash*), onde os movimentos são, predominantemente, transversais à costa.

Três são os elementos que controlam este fenômeno: as correntes longitudinais, a morfologia da praia (fundamentalmente sua declividade) e, por último, as características do sedimento. As correntes longitudinais são o mecanismo que força o transporte ao longo do arco praial, sendo que os outros parâmetros por si só não geram transporte, mas sim alteram sua ordem de magnitude. Por isso, muitas fórmulas estão estruturadas em função deste parâmetro.

As correntes longitudinais podem ser geradas a partir de dois mecanismos: devido às variações longitudinais dos fundos e devido à incidência oblíqua das ondas. O primeiro é responsável pela presença das correntes de retorno concentradas (*rip currents*), formando-se correntes longitudinais em pontos de maior profundidade, devido à maior altura de onda, em direção a pontos de menor profundidade, em que as ondas são menores (BOWEN, 1969). A segunda forma de gerar correntes surge como consequência de uma variação longitudinal do tensor de radiação, como demonstrou Longuet-Higgins em 1970.

A morfologia da praia influi diretamente na magnitude das correntes longitudinais, por estas serem dependentes da declividade da praia, que por sua vez altera a taxa de

transporte, a qual depende do tipo de arrebentação, que é também função da declividade da praia.

O sedimento, da mesma forma que a morfologia da praia, também condiciona o valor das correntes longitudinais devido ao seu coeficiente de atrito. Mas, seu principal efeito no transporte longitudinal está relacionado ao tamanho do grão. Autores como CERC (1984), Kamphuis (1991) e Del Valle *et al.* (1993) encontraram relações que mostram que o aumento do tamanho de grão implica em uma redução nas taxas de transporte.

O sistema de modelos numéricos Delft3D®, através de seu módulo de transporte de sedimentos e morfológico (DELTARES, 2013), foi selecionado como ferramenta para se atingir os objetivos propostos neste estudo.

Com base nos levantamentos, nas características dos sedimentos, localização do empreendimento, etapas de obras, entre outros aspectos relevantes percorridos, foram definidos os parâmetros da modelagem a serem utilizados.

Geralmente, materiais mais grossos possuem velocidades de deposição maiores que os mais finos, que permanecem por mais tempo na coluna d'água. Além disso, os materiais mais finos costumam ser remobilizados com maior facilidade. As características básicas de deposição podem ser determinadas através da análise das classes granulométricas do sedimento a ser modelado.

Todas as simulações realizadas contam com um período de aquecimento, e as alterações morfológicas iniciam apenas depois de cinco dias de rodada, para estabilização do modelo hidrodinâmico e de ondas. Assume-se condição nula para os parâmetros iniciais do modelo (elevação, correntes, ondas e maré).

As simulações foram conduzidas a partir dos resultados obtidos na caracterização do sedimento da dragagem, que foi executado pela TETRA TECH.

4.1 ESTUDO DE SEDIMENTAÇÃO E EROÇÃO

As simulações morfológicas apresentadas nesse estudo foram realizadas para ambas alternativas de layout apresentadas. Foram contempladas as condições hidrodinâmicas e de ondas para o período de 2017, conforme apresentado nos itens anteriores. A classe de sedimento utilizada nas simulações teve como base os levantamentos de campo

realizados em julho de 2018 pela equipe da Tetra Tech. As análises preliminares indicam a predominância de areia média e silte, as quais foram inseridas no modelo morfológico. O período de simulação compreende as estações de verão e inverno do ano de 2017.

Os resultados obtidos a partir das simulações mostram de maneira geral, processos erosivos tendem a ocorrer em regiões em que a intensidade do fluxo hidrodinâmico sofre acréscimo e, processos deposicionais, em regiões onde há decréscimo do fluxo hidrodinâmico. Essas alterações hidrodinâmicas podem se refletir em processos erosivos e em processos deposicionais.

Na região de estudo o transporte de sedimentos ao longo da costa dá-se predominantemente pela ação das ondas e seus efeitos na hidrodinâmica local. Uma vez que o padrão de ondas é proveniente do quadrante SE, o transporte de sedimentos ocorre em direção ao N. Esse transporte é intensificado quando a energia de onda incidente aumenta (ondas de maior altura) e à medida que ondulação incidente é menos paralela à linha de costa. O efeito dessas duas características ocorrendo simultaneamente acarreta nas maiores taxas de transporte, as quais ocorrem durante a passagem de frentes frias.

Na Figura 46 é apresentado o cenário final de deposição e erosão para o período simulado. As feições apresentadas são a diferença resultante entre o cenário na situação atual e o cenário após a implementação do terminal considerando o layout 1, *offshore*. As feições apresentadas devem ser avaliadas como tendências de transporte, uma vez que representam um curto período (verão/inverno). De maneira geral pode-se observar a tendência de deposição de sedimentos à S do empreendimento, e também à N na área abrigada dos quebra-mares, por esta estar abrigada na maior parte do tempo das ondulações de SE. É também na porção norte que ocorrem processos erosivos ocasionados pela interrupção do padrão de transporte de sedimentos no sentido S-N pelo aterro. Também se espera a deposição de sedimentos na área protegida pelo quebra-mar, pois, com a atenuação da ondulação incidente a capacidade de transporte diminui. Para o período de um ano (verão/inverno) são esperadas feições na ordem de 0,8 metros. De forma complementar, esperam-se alterações de aproximadamente 10 cm nos taludes do canal de acesso e próximos à estrutura criada. Esse efeito é gerado devido a tendência de o ambiente tentar recompor o seu estado natural e criar feições mais suaves.

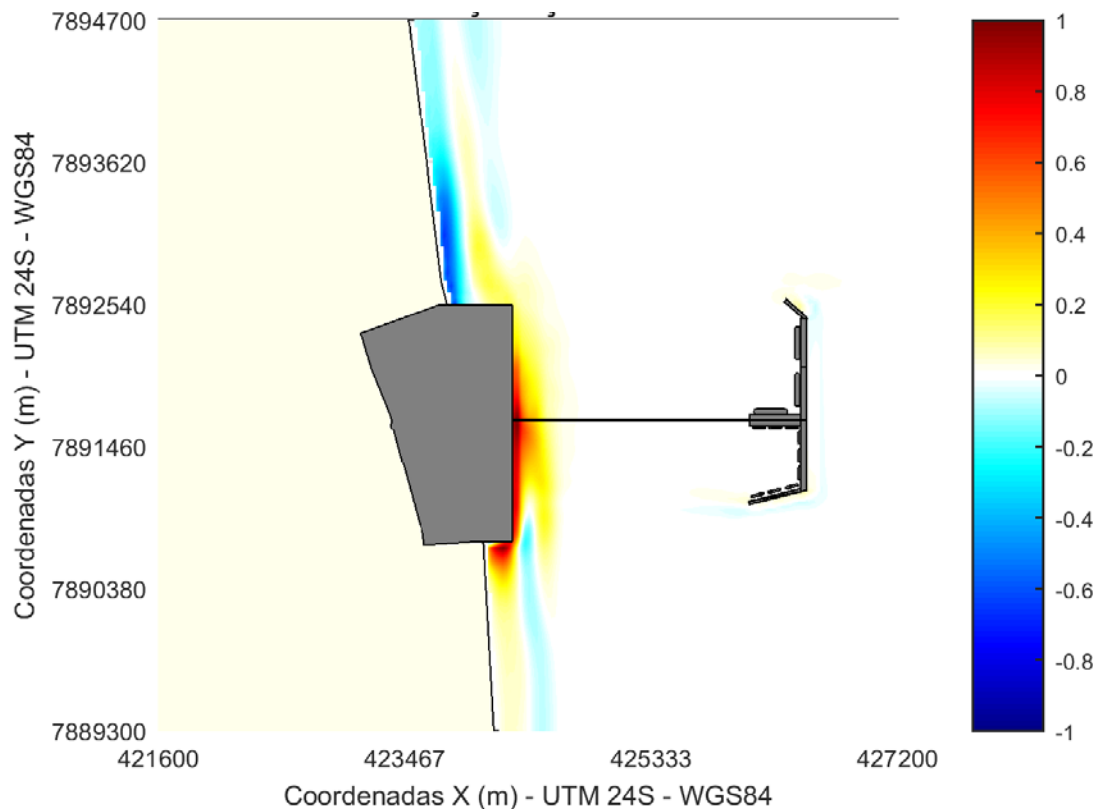


Figura 46. Resultante da feição de fundo para o período simulado comparando os cenários nas condições atuais e o cenário com o layout 1, offshore.

Para o layout 2, *onshore*, as condições de transporte do ambiente permanecem as mesmas ao apresentado anteriormente (Figura 47). O transporte de S para N é bloqueado devido à presença da estrutura. Dessa maneira, tem-se o acúmulo de sedimento ao S da estrutura e também à N na área abrigada dos quebra-mares, por esta estar abrigada na maior parte do tempo das ondulações de SE. É também na porção norte que ocorrem processos erosivos ocasionados pela interrupção do padrão de transporte de sedimentos no sentido S-N, os quais acumulam-se na porção S do empreendimento. O efeito dessa alternativa mostra-se em feições aparentemente mais suaves, entretanto estendendo-se por áreas maiores. Para o período simulados também são esperadas feições na ordem de 0,5 metros e da ordem de 0,1 metros nas áreas de talude e próximo a estrutura. Com exceção da porção sul da estrutura próxima à praia, onde esperam-se o maior acúmulo de sedimentos, podendo gerar feições na ordem 1 metro. Períodos maiores de simulação indicariam de forma mais acentuada os processos de erosão/sedimentação para esta alternativa, uma vez que ela bloqueia o fluxo de sedimento.

Nessa alternativa não foi considerada a deposição de material em suspensão no interior da dársena criada, uma vez que sua magnitude é de poucos centímetros.

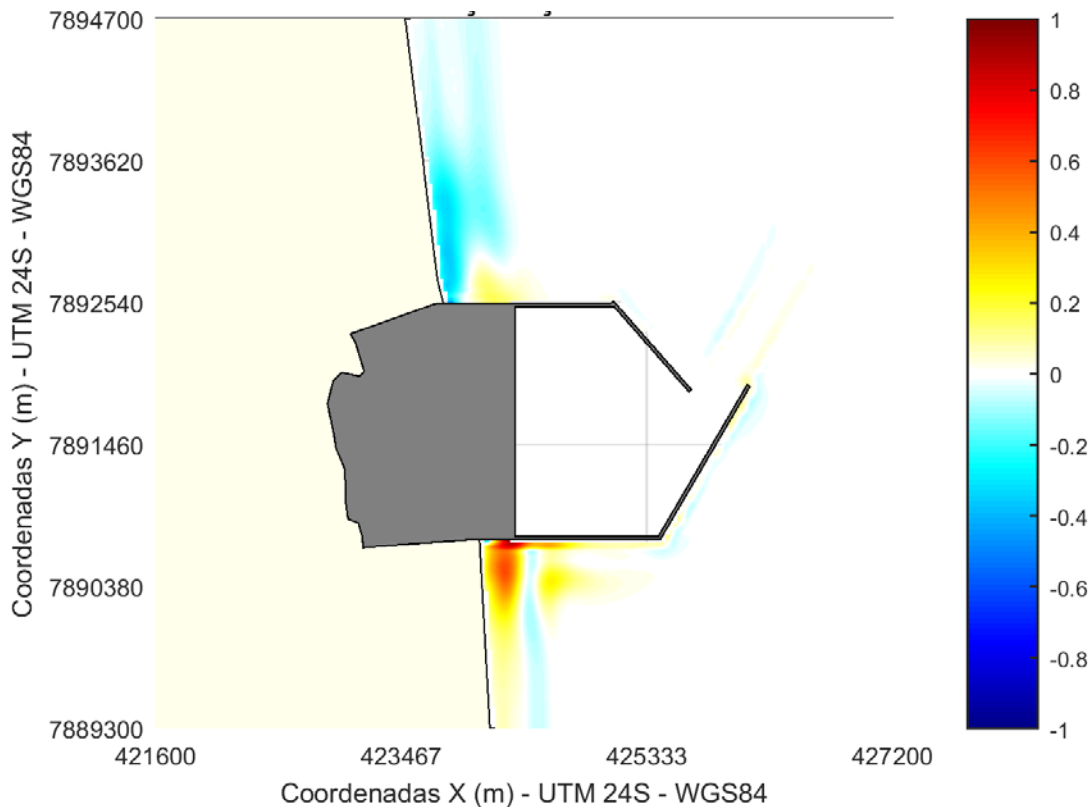


Figura 47 - Resultante da feição de fundo para o período simulado comparando os cenários nas condições atuais e o cenário com o layout 2, onshore.

4.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE A LONGO PRAZO

Nesta etapa do estudo procurou-se caracterizar a morfologia e estabilidade da linha de costa em relação aos empreendimentos e seus possíveis impactos. Para o estudo da forma em planta, além de assumir uma hipótese sobre a complexidade dos processos litorais e seu estado de equilíbrio, se assume como ponto de partida que o perfil da praia sempre alcança sua posição de equilíbrio. A partir das condições de contorno e as características médias das ondas, a forma em planta de equilíbrio pode ser prevista através da utilização de modelos semi-empíricos, onde o transporte líquido longitudinal em cada seção da praia é nulo.

Dentro dos diferentes modelos existentes na bibliografia para definir a forma em planta de equilíbrio de uma praia, a parábola de Hsu & Evans (1989) é a mais utilizada por que permite o ajuste da forma em planta das praias. Segundos os autores, a expressão que define a parábola é a seguinte:

$$\left(\frac{R}{R_0}\right) = C_0 + C_1\left(\frac{\beta}{\theta}\right) + C_2\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2$$

onde,

R: raio vetor, medido desde o ponto de difração, que define a forma da praia,

R₀: raio vetor, medido desde o ponto de difração, que corresponde ao extremo abrigado da praia,

C₀, C₁, C₂ : coeficientes em função de β,

β: ângulo (fixo) formado entre a direção das ondas e o raio vetor R₀,

θ: ângulo (variável) entre a direção das ondas e o raio vetor R.

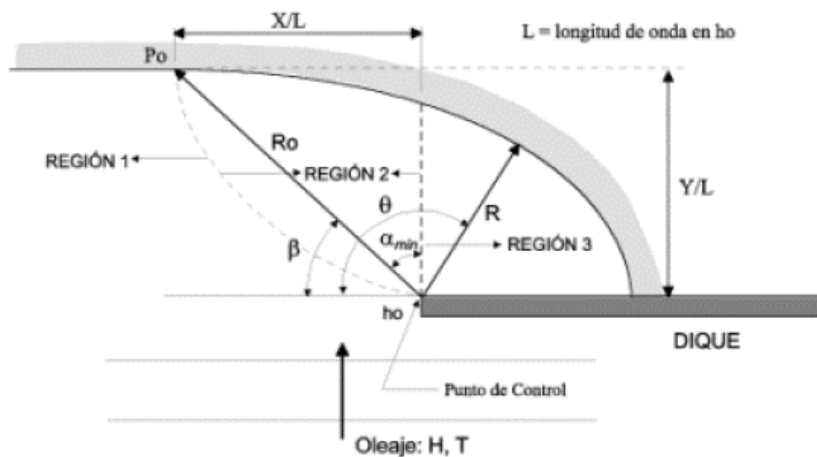


Figura 48 - Diagrama para a definição das variáveis da forma em planta de equilíbrio. Fonte: “Documento temático: Regeneración de Playas”, GIOC (Universidad de Cantabria) e Dirección General de Costas (MMA).

A partir dessa fórmula, González & Medina (2001) desenvolveram uma metodologia que permite a previsão e o desenho da forma em planta de praias de enseada, onde o ângulo $\beta = 90^\circ - \alpha_{min}$ é função de:

- O número de comprimentos de onda ou distância adimensional que exista até a linha de costa (Y/L), sendo Y a distância até a linha de costa e L comprimento de onda.
- A direção de onda, que corresponde à direção do fluxo médio de energia na zona do ponto de difração (ponto de controle).
- Desde o ponto de vista da incidência das ondas, se define neste tipo de modelo três tipos de regiões:
- Região 1: não existe efeito do dique sobre as ondas e o gradiente de altura de onda na quebra é nulo.
- Região 2: as ondas não são modificadas em sua direção de propagação, mas a difração no dique cria um gradiente longitudinal de altura de onda.
- Região 3: alteração da direção de propagação e da altura das ondas na quebra por efeito combinado da refração e da difração.

Essa metodologia preditiva da forma em planta de equilíbrio está incluída no Sistema de Modelado Costeiro –, do Grupo de Engenharia Oceanográfica e de Costas (GIOC) da Universidade de Cantábria, cujas ferramentas foram utilizadas para o desenvolvimento desse estudo.

A aplicação na íntegra da metodologia González & Medina (2001) à Praia da Barra Seca requer a obtenção da direção do fluxo de energia médio no ponto de interesse, o que definirá a direção das frentes de onda médias e o ajuste da parábola de Hsu e Evans ao arco praial.

Com o intuito de obter os fluxos de energia ao longo da Praia da Barra Seca para o ajuste da praia de equilíbrio, foram transferidos 1 ano de dados em 4 pontos em frente ao arco praial. Os resultados de fluxo de energia foram obtidos por meio de uma soma vetorial do valor do fluxo médio de energia das ondas geradas por cada um dos estados de mar. A obtenção deste valor de energia representa as ondas dominantes na zona de estudo, sendo esse parâmetro um modelador do estado de equilíbrio de uma praia. As expressões das quais se obtém esse parâmetro são as seguintes:

$$F_i = \frac{1}{8} \rho g H_i^2$$

$$F_{x,i} = F_i \cos(\theta_i); F_{y,i} = F_i \sin(\theta_i)$$

$$\bar{\theta} = \arctan\left(\frac{\sum_i F_{y,i}}{\sum_i F_{x,i}}\right)$$

Com isso, se calcula o fluxo médio de energia para os 4 pontos representados na Figura 49 para as três situações, sem empreendimento, com o layout 1, *offshore* e com o layout, *onshore*.



Figura 49 - Localização dos pontos de cálculo do fluxo de energia.

Os resultados de magnitude e a direção dos mesmos estão apresentados nas Figura 50, Figura 51 e Figura 52, para as situações: sem empreendimento, layout 1 *offshore* e layout 2 *onshore*, respectivamente.

Como é possível observar na Figura 50, sem o empreendimento não existe uma variabilidade na direção do fluxo médio de energia entre os 4 pontos, sendo o padrão de direção das ondas na região proveniente da direção de $101^\circ \sim \text{SSE}$.

Uma vez que o layout 1, *offshore*, é implantado, as ondas ao incidirem sobre as estruturas são modificadas, o que geram uma variação local no fluxo de energia nos pontos P2 (130°) e P3 (65°) (Figura 51). Tais modificações acarretarão na mudança do padrão das ondas que incidem sobre a praia da Barra Seca, e por consequência, no seu padrão da dinâmica sedimentar.

Por fim, foram analisados os fluxos de energia uma vez implantado o layout 2, *onshore*. A maior diferença ocorreu no P3 por consequência da presença dos quebra-mares, devido ao processo de difração-refração que sofrem as ondas incidentes. Neste ponto, as ondas que incidiam com direções de SSE (101°) passam a incidir com direções de aproximadamente ENE (70°). Com isso, tais diferenças também acarretarão em modificações no padrão da dinâmica costeira da região.



Figura 50- Direção e magnitude do fluxo médio de energia analisado para os 4 pontos (P1 a P4 da esquerda para a direita) ao longo da Praia da Barra Seca para a situação sem empreendimento.



Figura 51 - Direção e magnitude do fluxo médio de energia analisado para os 4 pontos (P1 a P4 da esquerda para a direita) ao longo da Praia da Barra Seca para o layout 1, offshore.



Figura 52 - Direção e magnitude do fluxo médio de energia analisado para os 4 pontos (P1 a P4 da esquerda para a direita) ao longo da Praia da Barra Seca para o layout 2, onshore.

Seguindo a metodologia já indicada, for analisada a forma em planta da Praia da Enseada utilizando o módulo de Modelado de Terreno do SMC, o qual incorpora diversas formulações empíricas para se determinar a forma em planta de uma praia seguindo a metodologia de Gonzalez & Medina (2001).

Devido o significado de “praia de enseada” estar associado a uma forma, cujas configurações em planta e perfil se encontram confinados lateralmente por contornos impermeáveis, naturais ou artificiais, e o fundo está coberto em sua maior parte por areia, pode-se considerar a Praia da Barra Seca, após a implantação das estruturas layouts 1 e 2, como uma praia que se inicia na área dos empreendimentos, e que lhe confere uma forma de meia parábola.

Portanto, as formas em planta da Praia da Barra Seca ficam definidas através de parábolas de Hsu & Evans (1989), associada ao elemento difrator na incidência das ondas, definidas pelas estruturas do layout 1 e layout 2.

A forma em planta ajustada apresenta uma tendência de onde a linha de costa tende a posicionar-se em função da construção das estruturas. Na Figura 53 está representada em azul a forma em planta de equilíbrio média da região após a construção do layout 1. Já a Figura 54 representa em azul a forma da planta de equilíbrio média da região após a construção do layout 2. O ajuste da forma em planta de equilíbrio para a situação após a construção dos dois layouts na região da Praia da Barra Seca apresenta uma tendência de acúmulo de sedimentos, tanto à sul quanto à norte do empreendimento, devido aos processos de difração-refração que sofrem as ondas ao incidirem sobre as estruturas. O maior acúmulo de sedimentos ocorre à norte do layout 1, offshore, por ser uma região mais abrigada das ondulações predominantes, conforme pode ser visto na Figura 27.

Vale ressaltar que os resultados de posição de equilíbrio da linha de costa aqui apresentados correspondem ao resultado final do padrão das ondulações que incidem sobre a região de Barra Seca a partir da presença das estruturas. Tais resultados não podem ser interpretados como instantâneos de transporte de sedimentos.



Figura 53 - Forma em planta de equilíbrio da Praia da Barra Seca após a construção do layout 1, offshore, e a localização dos Pontos de Difração responsáveis pela dinâmica costeira.



Figura 54 - Forma em planta de equilíbrio da Praia da Barra Seca após a construção do layout 2, onshore, e a localização dos Pontos de Difração responsáveis pela dinâmica costeira.

5.0 **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Para dar suporte à Odebrecht Engenharia & Construção na elaboração de estudos de morfodinâmica costeira, para suporte à implantação do Complexo Portuário Petrocity, a TETRA TECH apresentou este estudo de modelagem numérica hidrodinâmica, de ondas e transporte de sedimentos.

Para o presente trabalho, utilizou-se o que há de mais moderno em termos de ferramentas computacionais e conhecimento científico/tecnológico, bem como as mais robustas bases de dados ambientais.

A caracterização dos padrões atmosféricos e oceânicos locais foi realizada a partir de bases de dados globais e, também, dados medidos localmente.

Para obtenção da dinâmica em toda a região, utilizou-se o sistema de modelos Delft3D®, através de seus módulos Delft3D-FLOW (nível do mar, maré e correntes) e Delft3D-WAVE (propagação de ondas) e Delft3D-SED (transporte de sedimentos).

Este relatório descreveu o modelo numérico implementado e as configurações utilizadas nas modelagens hidrodinâmica e de ondas, além de apresentar uma caracterização da área de estudo, com o objetivo de demonstrar a capacidade da base hidrodinâmica em representar as condições ambientais locais.

A metodologia de validação utilizada fundamentou-se na avaliação da modelagem quanto à sua capacidade de reprodução da circulação hidrodinâmica na região em estudo. Com este intuito foram apresentadas comparações entre resultados da modelagem hidrodinâmica e de ondas a partir de dados pretéritos.

Os resultados apresentados enfatizaram que o modelo hidrodinâmico, ondas e de marés representou as condições oceanográficas locais forma satisfatória, condizente com a realidade. De maneira geral os processos estão bem representados, e o modelo se mostrou capaz de reproduzir as variações relacionadas a energia das ondas, e a direção.

De forma geral, as alterações propostas pelo empreendimento resultam em uma redução e um redirecionamento na velocidade e direção das correntes nas regiões de aprofundamento do canal e nas áreas de construção dos empreendimentos, tanto para o layout 1 (*offshore*) como para o layout 2 (*onshore*).

Já para as ondas, os resultados obtidos a partir dos campos instantâneos comparativos para o período de verão e inverno mostraram que as ondas ao incidirem do

sobre os empreendimentos, tanto para o layout 1 como para o layout 2, sofrem processos de difração-refração uma vez que incidem sobre as estruturas portuárias, estando as maiores diferenças de alturas nas áreas portuárias abrigadas. Vale destacar que no layout 1, por ser uma estrutura *offshore*, as diferenças nas alturas significativas das ondas entre a situação atual e a com empreendimento englobam uma área maior, quando comparados ao layout 2, *onshore*.

Em relação ao transporte de sedimentos, os resultados mostraram zonas de sedimentação onde a hidrodinâmica foi consideravelmente reduzida por consequência dos empreendimentos que fizeram uma zona de sombra, protegendo certas áreas da influência das ondas, aumentando o assoreamento no local.

O transporte de sedimentos na região para o período simulado (verão/inverno de 2017) é predominantemente no S-N.

Ambas alternativas apresentam alterações na ordem de 10 cm no talude do canal e próximo às estruturas. Esse efeito é devido a tendência do ambiente a buscar condições de equilíbrio com feições mais suaves.

A estrutura proposta para o layout 1, *offshore*, apresenta alterações no transporte, interrompendo parcialmente o transporte S-N. Com tendências de deposição onde o transporte é reduzido (sul da estrutura) e na porção abrigada pelo quebra-mar (próximo ao aterro e ao N da estrutura.). Entretanto, a N da estrutura também é possível observar os efeitos da redução de aporte sedimentar vindo de S na forma de áreas de erosão próximo à costa.

De forma análoga, a estrutura proposta para o layout 2, *onshore*, apresenta padrões semelhantes. Entretanto, essa estrutura acarreta na interrupção total do transporte no sentido S-N, gerando feições de erosão/deposição que abrangem áreas maiores.

A partir da análise de estabilidade a longo prazo foi visto que com a construção dos empreendimentos haverá deposição na praia tanto ao Norte quanto ao Sul das estruturas. Sendo que o maior acúmulo de sedimentos ocorre à norte do layout 1, *offshore*, por ser uma região mais abrigada das ondulações predominantes, conforme pode ser visto no padrão de ondas que incidem sobre a região.

Considerando todos os aspectos apresentados nesse relatório e a comparação das alternativas pode-se afirmar que:

- As alterações no campo de correntes nas condições do layout 1 são restritas a área adjacente ao terminal, apresentando pouca influência próximo à costa. Enquanto o layout 2 gera uma área de sombra mais abrangente, além de restringir a circulação em todo o perímetro do empreendimento.
- O padrão de atenuação de energia de onda é semelhante para as duas alternativas. Entretanto, o layout 1 gera alteração apenas na sombra gerada no sentido de propagação das ondas. Para o layout 2, além da zona de sombra gerada pela estrutura, todo o perímetro da dársena fica isolado da ondulação incidente.
- Ambas alternativas apresentam alterações significativas no padrão de transporte de sedimentos. Porém, enquanto a alternativa de layout 1 modifica o transporte costeiro devido à presença do aterro, a alternativa de layout 2 bloqueia completamente o transporte de sedimentos ao longo da linha de costa, pois, cria uma barreira que se estende desde a área emersa até além da profundidade de fechamento.

Portanto, a alternativa de layout 1, offshore, mostra-se mais viável para o empreendimento, pois apresenta, de maneira geral, menor impacto ambiental e permite atingir os critérios de segurança e eficiência para as operações. Ressalta-se que é importante considerar outros aspectos para a execução da obra na escolha da alternativa, bem como a dragagem (área, volume, tipo de material), custo de construção e impacto na biota.

6.0 **BIBLIOGRAFIA**

- ANDRADE, K.M. 2005.** Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 285 p. São José dos Campos.
- ALBINO, J.; GIRARDI, G.; NASCIMENTO, K.A. 2006.** Erosão e progradação do litoral brasileiro/ Espírito Santo. In: Dieter Muehe (org.), Erosão e Progradação do litoral Brasileiro. 2006. Ministério do Meio Ambiente, 1ª ed., Brasília.
- BASTOS, C.; FERREIRA, N., 2000.** Análise climatológica da Alta subtropical do Atlântico Sul. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Anais, p. 612-619. Rio de Janeiro.
- BOEBEL, O., DAVIS, R.E., OLLITRAUT, M., PETERSON, R.G., RICHARD, P.L., SCHMID, C., ZENK, W., 1999.** The intermediate depth circulation of the Western South Atlantic. *Geophys. Res. Letters*, 26(21), 3329-3332.
- BOWEN, A. J. (1969).** Rip currents I. Theoretical investigations, *J. Geophysical Research*, vole 74, pp. 5467-5478.
- CANDELLA, R.N., 1997.** Estudo de Casos de Ondas no Atlântico Sul Através de Modelagem Numérica. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. XIII, 80 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Oceânica).
- DEAN, R.G.; DALRYMPLE, R.A. 1991.** Water wave mechanics for engineers and scientists. 371 p. *World Scientific*, Singapore.
- DEL VALLE, R., MEDINA, R., AND LOSADA, M. A. 1993.** Dependence of coefficient K on grain size. Technical Note No. 3062, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 119 (5), 568-574.

- DELTARES, 2013.** User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.
- EVANS, D.; SIGNORINI, S.R., 1985.** *Vertical structure of the Brazil Current. Nature*, 315, 48-50.
- FERREIRA, A. G. & MELLO, N. G. S., 2005.** Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 1, p. 15-28.
- FRAGOSO, M. D. R. 2004.** Um modelo numérico da circulação oceânica para as bacias leste e sudeste do Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 173p.
- FRANKE, R., 1982.** Scattered data interpolation: test of some methods. *Math. Comp.*, 38, 181-200.
- GAETA, S. A., LORENZZETTI, J.A., MIRANDA, L.B., SUSINI-RIBEIRO, S. M. M., POMPEU, M., ARAUJO, C. E. 1999.** The Vitória Eddy and its relation to the phytoplankton biomass and primary productivity during de austral fall of 1995. *Arch. Fish and Mar. Res.* 47 (2/3), 253-270.
- GONZÁLEZ, E. M. Y R. MEDINA, 2001.** On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. Coastal Engineering, Ed. Elsevier.
- HSU, J. R. C. AND C. EVANS, 1989.** Parabolic Bay Shapes and Applications. Proc., Institution of Civil Engineers, London, England, vol. 87 (Part 2), 556-570.
- KAMPHUIS, J.W. 1991.** Alongshore sediment transport rate. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 117, 624-640

- LONGUET-HIGGINS, M. S. (1970).** Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, *J. Geophysical Research*, vol. 75, pp 6778-6790.
- MATA, M. M. & GARCIA, C. A. E. 1996.** Variabilidade da topografia oceânica superficial no Atlântico Sul Ocidental observada pela altimetria TOPEX/POSEIDON. *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 67.
- MELLOR, G. L. & T. YAMADA, 1982.** Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Review of Geophysics and Space Physics*, vol. 20 (4), p. 851-875.
- MILL, G.N., COSTA, V.S. da, LIMA, N.D., GABIOUX, M., GUERRA, L.A., PAIVA, A.M., 2015.** Northward migration of Cape São Tomé rings, Brazil. *Cont.Shelf.Res.*, 106(2015) 27-37.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 2006.** Erosão e progradação do litoral brasileiro. Ministério do Meio Ambiente, 1ª ed., 2006. Brasília.
- MUNK, W., 1950.** On the wind driven ocean circulation. *J. Meteorology*. Vol. 7. 70-73pp.
- RODRIGUES, R. R.; ROTHSTEIN, L. M. & WIMBUSH, M. 2007.** Seasonal Variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A Numerical Study. *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 37, p. 16-30.
- SAHA, S. ;S. MOORTHY, X. WU, J. WANG, and COAUTHORS, 2014.** The NCEP Climate Forecast System Version 2. *J.Clim.*, 27, 2185–2208, doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.
- SATYAMURTY P & MATTOS LF. 1989.** Climatological Lower Tropospheric Frontogenesis in the Midlatitudes Due to Horizontal Deformation and Divergence. *Monthly Weather Review*, 117: 1355-1364.

- SCHMID, C.; SCHAFER, H.; PODESTÁ, G.; ZENK, W. 1995.** The Vitoria Eddy and its relation to the Brazil Current. *J. Phys. Oceanogr.*, v.25, pp. 2532-2546.
- SCHUREMAN, P. 1958.** Manual of harmonic analysis and prediction of tides, Sp. Pub. N° 98, *Coast and Geodetic Survey, U.S. Govt. Printing Office*, Washington.
- SHORE PROTECTION MANUAL, 1984.** CERC, Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.
- SILVEIRA, I.C.; MIRANDA, L.B. & BROWN, W.S. 1994.** On the origins of the North Brazil Current. *J. Geophys. Res.: Oceans* (1978–2012), 99(C11), 22501-22512.
- SOUTELINO, R.G. 2008.** A origem da Corrente do Brasil. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de Oceanografia Física) – IOUSP, Universidade de São Paulo. 101 p, São Paulo.
- SOUTELINO, R. G., & MIRANDA, J. A. 2013.** Um estudo semi-idealizado para avaliar o papel da topografia no processo de ressurgência costeira em Cabo Frio, RJ. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, 7(1), 101-114.
- STECH JL & LORENZZETTI JA. 1992.** The response of the South Brazil Bight to the Passage of Wintertime Cold Fronts. *J. Geophys. Res.*, 97, C6, 9507-9520.
- STOMMEL, H., 1948.** The Westward intensification of Wind-Driven ocean currents. *Trans. Amer. Geophys. Union*. 29(2): 202-206.
- STRAMMA, L. & ENGLAND, M. 1999.** On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 104(C9): 20863-20883.
- STRAMMA, L.; FISCHER, J.; REPPIN, J. 1995.** The north Brazil undercurrent. *Deep Sea Research Part I: Oceanogr. Res. Pap.*, 42(5), 773-795.

THIELER, E.R.; HIMMELSTOSS, E.A.; ZICHICHI, J.L. & ERGUL, A., 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey. Open-File Report 2008-1278.

TOMCZAK, M. & GODFREY, S. J. 1994. Regional Oceanography: an Introduction. Pergamon Press, New York, 422 p.

7.0 **EQUIPE TÉCNICA**

GABRIEL CLAUZET	Físico / Dr. Oceanografia Física Coordenação
CLARISSA DE LUCA MENIN	Oceanógrafa / Ma. Engenharia de Costas e Portos Responsável por todos os capítulos
EDUARDO A. YASSUDA	Engenheiro Mecânico / Dr. Engenharia Oceânica Responsável por todos os capítulos
JONAS OLIVEIRA	Oceanógrafo Responsável por todos os capítulos
MARIA FERNANDA M. FIEDLER	Oceanógrafa / Ma. Oceanografia Geológica Responsável por todos os capítulos
MARIANA LINO GOUVÊA	Meteorologista / Ma Meteorologia Responsável pelas análises de dados meteorológicos

ANEXO A - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D

O sistema de modelos Delft3D (DELTARES, 2013) é capaz de simular a circulação hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, bem como a transferência de quantidade de movimento ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. Além disso, este sistema tem a possibilidade de atualizar a cada passo de tempo as cotas batimétricas decorrentes de alterações geomorfológicas de fundo (erosão e deposição de sedimentos), além do transporte de sedimentos (de fundo e em suspensão na coluna d'água).

A seguir, são descritas as principais características do modelo, através de seu módulo hidrodinâmico (Delft3D-FLOW).

A.1 -DESCRIÇÃO DO MODELO DELFT3D-FLOW

Para resolver o problema de hidrodinâmica em escala espacial e temporal adequada para as aplicações finais (determinação do campo de correntes e elevação de nível da superfície d'água) e, simultaneamente, manter os custos computacionais em níveis razoáveis, optou-se pela utilização do modelo Delft3D.

A possibilidade de se trabalhar com grades altamente ajustáveis aos contornos foi uma característica determinante para a escolha deste modelo. A acomodação da grade numérica à linha de costa permite uma apurada representação do corpo d'água em estudo. Para a solução do problema dinâmico são consideradas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, além da utilização das aproximações hidrostáticas e de Boussinesq.

A solução do esquema numérico é iniciada pelo mapeamento da geometria do domínio no espaço matemático, a partir da discretização da área no espaço físico. No espaço matemático (regular) são resolvidas as equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento. A estrutura vertical, quando ativada na formulação, é determinada por procedimentos explícitos com a especificação dos termos de difusão horizontal.

A grade a ser implementada representa um compromisso entre os objetivos do projeto e a descrição dos processos dinâmicos na região de interesse, bem como entre os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário.

A.1.1 - Processos Físicos

A implementação do modelo hidrodinâmico foi baseada em um sistema de equações de águas rasas tridimensionais. O sistema de equações consiste nas equações horizontais da quantidade de movimento, na equação de continuidade e nas equações de transporte para constituintes conservativos. Tal conjunto de equações é derivado das equações tridimensionais de Navier-Stokes para um fluido incompressível. A seguir, são descritas as considerações e aproximações do modelo:

- ✓ É adotado o sistema de coordenadas sigma (σ) no eixo vertical. A profundidade é assumida como sendo muito menor do que a escala horizontal. Então, devido à reduzida razão de aspecto, as aproximações para o sistema de águas rasas tornam-se válidas e, por conseguinte, a equação vertical do movimento reduz-se à equação hidrostática;
- ✓ O efeito da densidade é considerado somente através de seu efeito na pressão (aproximação de Boussinesq);
- ✓ Utiliza-se o sistema de coordenadas cartesianas, não considerando o efeito da curvatura da Terra. Além disso, o parâmetro de Coriolis é assumido como uniforme;
- ✓ Assume-se uma condição de deslizamento no fundo (*slip boundary condition*) e é aplicada uma formulação de segunda ordem (quadrática) ao cisalhamento no fundo;
- ✓ A formulação para a tensão de cisalhamento no fundo devido à ação conjunta das ondas e correntes é baseada num campo de fluxo 2D, gerado a partir da velocidade próxima ao fundo, utilizando uma aproximação logarítmica;
- ✓ As equações do Delft3D-FLOW são capazes de resolver as escalas turbulentas (*large eddy simulation*). No entanto, as grades são geralmente muito grosseiras para resolver estas flutuações. Desta forma, as equações utilizadas são baseadas nas tensões de Reynolds;

- ✓ No Delft3D-FLOW os vórtices turbulentos são definidos pela profundidade da água. Sua contribuição à troca vertical da quantidade de movimento horizontal e da massa é modelada através de um coeficiente de viscosidade vertical turbulenta e difusividade turbulenta. Assume-se que os coeficientes são proporcionais à escala de velocidade e comprimento. Os coeficientes devem ser especificados (valor constante) ou computados por modelos algébricos, de turbulência k-L ou k- ϵ , onde k representa a energia cinética turbulenta, L é o máximo comprimento e ϵ , a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta;
- ✓ Em concordância com a razão de aspecto para consideração da formulação de águas rasas, a geração de turbulência é baseada no gradiente vertical do fluxo horizontal;
- ✓ A velocidade em um ponto de grade assume magnitude zero quando a altura da coluna d'água atinge cotas inferiores à metade daquela definida pelo usuário⁸. A velocidade pode retornar a magnitudes diferentes de zero quando a altura da coluna d'água atingir valores acima da metade do valor de corte;
- ✓ Uma célula é considerada “seca” quando os quatro pontos de velocidade nas extremidades da célula secarem, ou quando a profundidade da água no centro da célula for menor que zero (volume negativo);
- ✓ O fluxo de massa através dos contornos laterais e de fundo é nulo;
- ✓ Quando não é especificado o campo de temperaturas, a troca de calor com a atmosfera é anulada. A troca de calor através do fundo é nula.
- ✓ Se a troca de calor com a superfície da água é computada, utilizando um modelo de temperatura, o coeficiente de troca é função da temperatura e da velocidade do vento e, é determinado de acordo com Sweers (1976). Assume-se que a temperatura do ambiente é constante no espaço e pode variar no tempo. Em outras formulações de troca de calor, os fluxos devido à radiação solar, atmosférica e radiação de fundo, convecção e perdas de calor devido à evaporação são modelados separadamente;
- ✓ O efeito da precipitação na temperatura da água é representado.

⁸Em geral são utilizadas cotas referenciadas às médias das baixa-mares de sizígia.

No próximo subitem, são apresentadas as equações básicas que governam o modelo implementado.

A.1.2 - Equações Básicas

O modelo adotado resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, sob a aproximação de águas rasas e de Boussinesq. A aceleração vertical é desprezada na equação da quantidade de movimento vertical, resultando na aproximação hidrostática. Desse modo, a velocidade vertical é calculada através da equação da continuidade.

O Sistema de Coordenadas Sigma (σ)

O sistema de coordenadas sigma (σ) foi introduzido em modelos atmosféricos (PHILLIPS, 1957). O eixo vertical consiste em camadas limitadas por planos σ , não exatamente horizontais, que acompanham as variações da batimetria e do nível d'água. Através dessa representação para o eixo vertical, obtém-se uma feição suavizada para a batimetria (Figura A1).

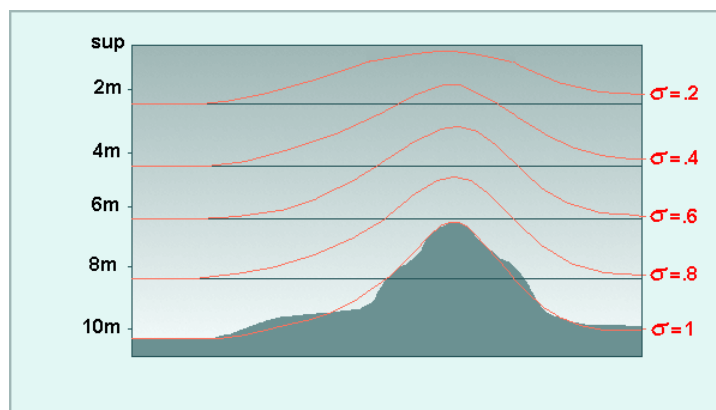


Figura A1 - Exemplo de uma aplicação de coordenadas σ .

O número de camadas é constante em todo o domínio, independentemente da profundidade local. A distribuição da espessura relativa de cada camada σ é usualmente não uniforme. Esta propriedade permite maior resolução nas áreas de interesse, como em regiões superficiais (importante para fluxos devido ao vento e trocas de calor com a atmosfera) e áreas próximas ao fundo (para cálculos de transporte de sedimentos).

O sistema de coordenadas σ é definido como:

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H} \quad \text{A.1.2-1}$$

onde:

- z a coordenada vertical no espaço físico;
- ζ a elevação do nível d'água, acima do plano de referência ($z = 0$);
- d profundidade abaixo do plano de referência;
- H profundidade local total ($H = d + \zeta$).

No sistema de coordenadas σ , a coordenada vertical no fundo é definida como $\sigma = -1$, e na superfície como $\sigma = 0$ (Figura B1). As derivadas parciais no sistema de coordenadas cartesianas são expressas em coordenadas σ após modificações ("regra da cadeia") e termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994).

O domínio de modelagem tridimensional para o fluxo consiste em um plano horizontal de uma área restrita (limitada) composta de contornos abertos e fechados (terra) e vertical (número de camadas). No sistema de coordenadas σ o número de camadas é constante em todos os locais do plano horizontal. Para cada camada vertical, um sistema de equações conservativas é resolvido.

Equação da Continuidade

A equação da continuidade (homogênea verticalmente) é dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad \text{A.1.2-2}$$

onde:

- $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;
- $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ coeficiente utilizado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;
- ξ, η coordenadas no sistema cartesiano;
- U, V velocidades médias (na vertical) nas direções ξ, η

Q representa as contribuições por unidade de área devido à fonte ou sumidouro de água, precipitação e evaporação:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad A.1.2-3$$

onde:

q_{in}	fonte de água por unidade de volume;
q_{out}	sumidouro de água por unidade de volume;
P	precipitação;
E	evaporação.

A tomada d'água de uma usina, por exemplo, deve ser modelada como um sumidouro. Na superfície pode haver uma fonte devido à precipitação ou um sumidouro devido à evaporação.

Equações da Quantidade de Movimento na Direção Horizontal

As equações da quantidade de movimento, nas direções ξ e η , são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \\ \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad A.1.2-4$$

e,

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \\ \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad A.1.2-5$$

As variações de densidade são negligenciadas, exceto nos termos que expressam os gradientes de pressões baroclínicas (P_ξ e P_η). As forças F_ξ e F_η , nas equações acima, representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds, enquanto M_ξ e M_η representam as contribuições externas (fontes ou sumidouros).

Velocidades Verticais

A velocidade vertical (ω) é calculada através de uma adaptação da equação da continuidade no sistema de coordenadas σ :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial[(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial[(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) \quad A.1.2-6$$

Na superfície o efeito da precipitação e evaporação é levado em conta. A velocidade vertical ω é definida nas superfícies σ . A velocidade vertical (ω) é referente ao movimento em σ , e pode ser interpretada como a velocidade associada aos movimentos de subida e descida. As velocidades verticais w (em sua “concepção física”), no sistema de coordenadas cartesianas, não são consideradas nas equações do modelo e são computadas apenas para fins de pós-processamento. Estas velocidades podem ser expressas em função das velocidades horizontais (u e v), profundidade da coluna d’água (H), elevação do nível d’água (ζ) e velocidade vertical (ω), de acordo com:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u\sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v\sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad A.1.2-7$$

Pressão hidrostática

Ao se adotar a aproximação das equações de águas rasas para o sistema em estudo, a equação vertical para a quantidade de movimento é reduzida à equação de pressão hidrostática. As acelerações verticais devido aos efeitos de flutuabilidade, assim como aquelas devidas às rápidas variações da topografia de fundo (batimetria) não são consideradas. Portanto,

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad A.1.2-8$$

Após a integração da equação acima, a pressão hidrostática é dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma' \quad B.1.2-9$$

Ao adotar a densidade da água como sendo constante e, considerando-se a pressão atmosférica, para o gradiente de pressão (gradiente de pressão barotrópico) têm-se:

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad A.1.2-10$$

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad A.1.2-11$$

Parâmetro de Coriolis

O parâmetro de Coriolis (f) depende da latitude geográfica (Φ) e da velocidade angular de rotação da Terra (Ω). Portanto,

$$f = 2\Omega \sin \phi \quad A.1.2-12$$

Tensões de Reynolds

As forças F_{ξ} e F_{η} nas equações da quantidade de movimento representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds. As tensões de Reynolds são determinadas usando o conceito de viscosidade turbulenta, e pode ser observada em maiores detalhes em Rodi (1984). Dento deste conceito, as componentes (em cada direção) das tensões de Reynolds são o produto entre o fluxo dependente do coeficiente de viscosidade turbulenta e sua correspondente componente média devido ao tensor raio de deformação.

Considerando águas rasas, o tensor de Reynolds é anisotrópico. O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta (ν_H) é muito maior de que sua contra parte vertical (ν_V). O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta é assumido como sendo a superposição de três partes:

- ✓ uma parte devido a “turbulência de escala subgrade”;
- ✓ uma parte devido a “turbulência tridimensional (3D)”;
- ✓ uma parte devido a dispersão, para simulações representando médias na coluna d’água.

Em simulações onde as equações de quantidade de movimento e transporte são médias na coluna d’água, a distribuição da quantidade de movimento e material devido à variação vertical da velocidade horizontal, é denominada dispersão. Como o perfil vertical da velocidade horizontal não é resolvido nas simulações 2D, a dispersão não é simulada.

O efeito dispersivo pode ser modelado como o produto do coeficiente de viscosidade e o gradiente de velocidade. O termo dispersivo pode ser estimado pela formulação de Elder.

Se o perfil vertical da velocidade horizontal não se aproximar de um perfil logarítmico (devido à estratificação ou a forçante do vento), recomenda-se utilizar um modelo 3D para o transporte de materiais.

A viscosidade turbulenta na horizontal é principalmente associada à contribuição dos movimentos turbulentos na horizontal e forçantes não resolvíveis na malha horizontal (“turbulência de escala subgrade”) ou por equações de águas rasas com médias de Reynolds. É introduzida a viscosidade turbulenta na horizontal na escala de subgrade (ν_{SGS}) e a viscosidade turbulenta na horizontal (ν_H^{amb}). O Delft3D-FLOW simula os movimentos turbulentos na horizontal (em larga escala) através da metodologia denominada Horizontal Large Eddy Simulation (HLES). O ν_{SGS} será computado por um modelo de turbulência.

A viscosidade horizontal do meio, definida pelo usuário é representada pela ν_H^{amb} . Consequentemente, no Delft3D-FLOW o coeficiente de viscosidade turbulento na horizontal é definido por:

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_V + \nu_H^{amb} \quad A.1.2-13$$

A parte ν_V se refere à turbulência tridimensional e, nas simulações 3D, é computada a partir de um modelo de fechamento turbulento 3D.

Para modelos de fechamento turbulento que respondem apenas ao cisalhamento gerado, é conveniente especificar um coeficiente de mistura vertical de forma a contabilizar outras formas de mistura não resolvíveis, (ν_V^{amb}). Por isso, além de todos os modelos de fechamento turbulento, no Delft3D-FLOW deve-se especificar uma constante (no espaço e no tempo) que represente o coeficiente de mistura do ambiente (valor referente à viscosidade turbulenta na vertical das equações de quantidade de movimento). Consequentemente, o coeficiente de viscosidade turbulenta na vertical é definido por:

$$\nu_V = \nu_{mol} + \max(\nu_{3D}, \nu_V^{amb}) \quad A.1.2-14$$

Onde ν_{mol} é a viscosidade cinemática da água. A parte ν_{3D} é computada através de um modelo de fechamento turbulento.

A fim de modelar o fluxo secundário em simulações 2D em curvas de rios, o Delft3D-FLOW contém uma formulação para levar em conta o efeito do movimento espiral. Assim, a tensão de cisalhamento na horizontal é estendida considerando um termo adicional.

O sistema de coordenadas σ rotaciona o tensor de cisalhamento em relação ao sistema de coordenadas cartesiano, o que implica na adição de termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, 1994). Além disso, o tensor de cisalhamento é redefinido assumindo-se que a escala horizontal é muito maior do que a profundidade (BLUMBERG & MELLOR, 1985). Então, as forças F_ξ e F_η são utilizadas na forma:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} \quad \text{A.1.2-15}$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} \quad \text{A.1.2-16}$$

Para fluxos em pequena escala, quando o cisalhamento nos contornos fechados precisar ser levado em conta, os tensores de cisalhamento $\tau_{\xi\xi}, \tau_{\xi\eta}, \tau_{\eta\xi}, \tau_{\eta\eta}$ são determinados de acordo com as seguintes equações:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \quad \text{A.1.2-17}$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \nu_H \left\{ \frac{1}{G_{\eta\eta}} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\} \quad \text{A.1.2-18}$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) \quad \text{A.1.2-19}$$

Para simular fluxos em larga escala, com grades horizontais grosseiras, quando o cisalhamento nos contornos fechados puder ser negligenciado, as forças F_ξ e F_η são simplificadas. Os termos de viscosidade horizontal, no Delft-FLOW, são então reduzidos para o operador de Laplace ao longo das linhas da grade:

$$F_\xi = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad \text{A.1.2-20}$$

$$F_{\eta} = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad \text{A.1.2-21}$$

Onde se assume que a viscosidade turbulenta é constante.

Equação de Estado

A densidade da água (ρ) é uma função da salinidade (s) e da temperatura (t). O modelo Delft3D utiliza uma relação empírica (ECKART, 1958):

$$\rho = \frac{1000P_o}{\lambda + \alpha_o P_o} \quad \text{A.1.2-22}$$

onde:

$$\lambda = 1779,5 + 11,25t - 0,0745t^2 - (3,80 + 0,01t)s$$

$$\alpha_o = 0,6980$$

$$P_o = 5890 + 38t - 0,375t^2 + 3s$$

com a salinidade (s) em ‰ e a temperatura da água (t) em °C.

A.2 - BIBLIOGRAFIA

BLUMBERG, A. F. & G. L. MELLOR, 1985. Modelling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review*, Vol. 113, No. 8.

BLUMBERG, A.F. & G.L. MELLOR, 1985. Modelling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review*, Vol. 113, Nº. 8.

DELTARES, 2013. User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 702pp.

ECKART, C., 1958. Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. *American Journal of Science*, 256, 225-240.

PHILLIPS, N.A., 1957. A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *J. of Meteorology*, vol. 14.

RODI, W., 1984. "Turbulence models and their application in Hydraulics, State-of-the-art paper article sur l'etat de connaissance." IAHR Paper presented by the IAHR-Section on Fundamentals of Division II: Experimental and Mathematical Fluid Dynamics, The Netherlands.

STELLING, G.S. & J.A.TH.M. VAN KESTER, 1994. On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol. 18, 915-955.