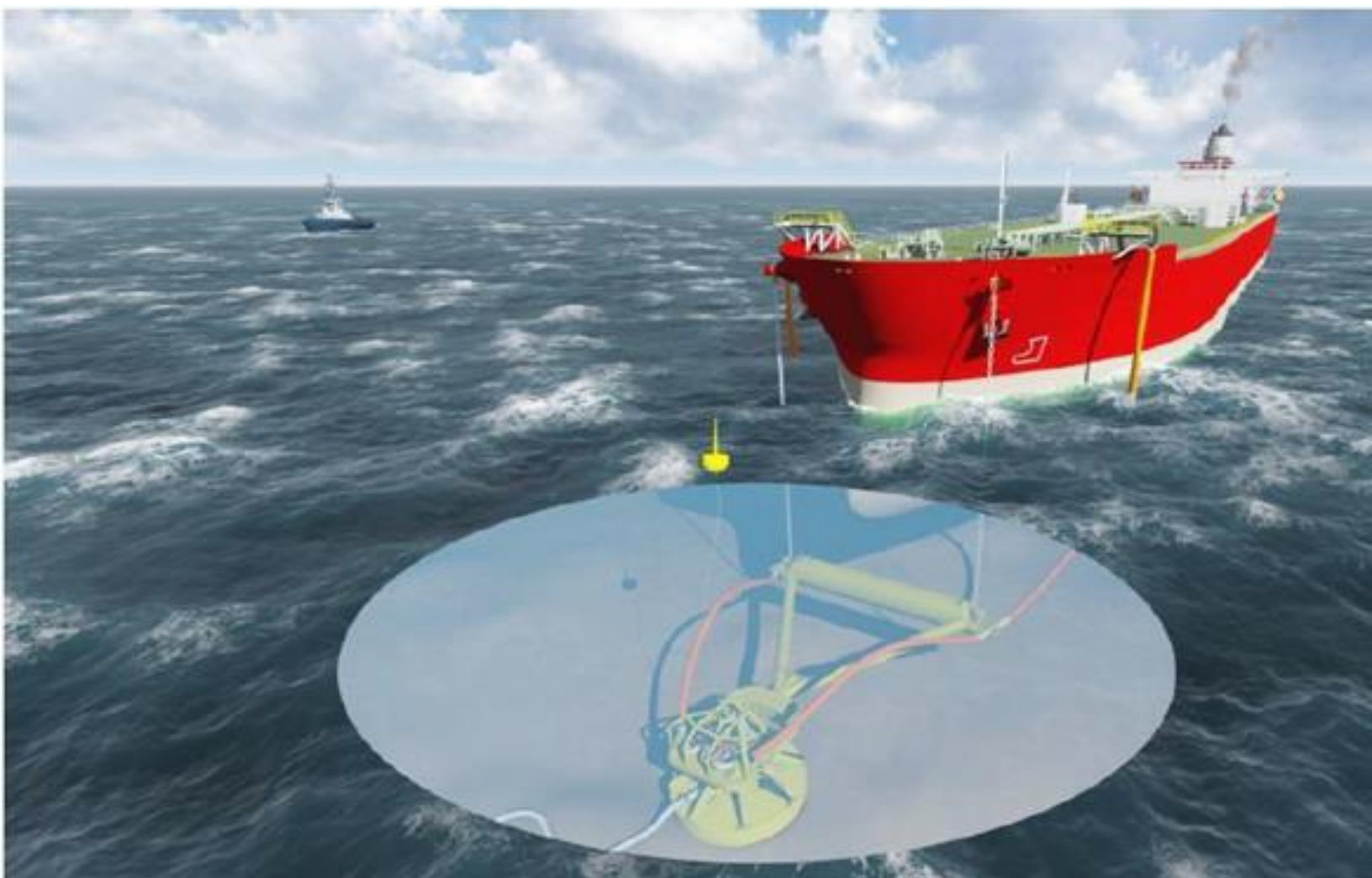


Agrupamento de Informações no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) das Instalações *Offshore* de Gás Natural, Adutora, Emissário Submarino e Estação de Bombeamento

Volume 8



Anexo 7.1-5

Modelagem Atmosférica da FSRU

Estimativa de Emissões e Estudo de Dispersão Atmosféricas para Operação do FSRU, Offshore a Barra dos Coqueiros (SE)

Revisão 01

Agosto/2017



TETRA TECH

complex world

CLEAR SOLUTIONS™



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, 2017. Estimativa de Emissões e Estudo de Dispersão Atmosféricas para Operação da FSRU, Offshore a Barra dos Coqueiros (SE). Relatório Técnico, Revisão 01 (28 de agosto de 2017). 21pp + Anexo.

CONTROLE DE REVISÕES

REV.	DESCRIÇÃO	DATA
00	Documento Original	11/08/2017
01	Revisões solicitadas pelo cliente	28/08/2017

ÍNDICE GERAL

CONTROLE DE REVISÕES	1
ÍNDICE GERAL	3
LISTA DE TABELAS	5
RESUMO.....	7
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Legislação.....	9
2. CARACTERÍSTICAS DAS FONTES EMISSORAS	11
3. MODELAGEM DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	15
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	17
5. BIBLIOGRAFIA	19
6. EQUIPE TÉCNICA.....	20
ANEXO A – MAPAS DE CONCENTRAÇÃO	1

LISTA DE TABELAS

TABELA	PAG.
Tabela 1 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos na Resolução CONAMA 03/90.....	10
Tabela 2 – Parâmetros das fontes fixas de emissão do FSRU.....	11
Tabela 3 – Localização das fontes fixas de emissão do FSRU.....	12
Tabela 4 – Taxas de emissão de poluentes atmosféricos do sistema de motores e da GCU.	12
Tabela 5 – Emissões do sistema de motores Warstila 8L50DF de acordo com a carga de operação.....	13
Tabela 6 – Resultados das máximas concentrações de NO ₂	16
Tabela 7 – Resultados das oitavas máximas concentrações de NO ₂	16
Tabela 8 – Resultados das máximas concentrações de CO.....	16
Tabela 9 – Resultados das oitavas máximas concentrações de CO.....	16

RESUMO

O presente relatório técnico apresenta a metodologia e resultados referentes à estimativa das emissões e estudo de dispersão atmosférica associados à operação da FSRU (*Floating Storage and Regaseification Unit*), localizada a aproximadamente 6,5 km da costa na região do município de Barra dos Coqueiros, estado de Sergipe.

Foram avaliados os impactos relativos a dióxido de nitrogênio (NO₂) e monóxido de carbono (CO), que têm como principais fontes a combustão de gás natural decorrente da geração de energia para operação da embarcação, a partir dos motores do navio, e também a Unidade de Combustão de Gás (GCU – *Gas Combustion Unit*), utilizado para gerar vapor para a utilidades do navio.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o estudo de estimativa de emissões e estudo de dispersão atmosférica (EDA) oriundos da operação da Unidade de Armazenamento e Regasificação Flutuante – FSRU (*Floating Storage and Reagaseification Unit*), que será localizada em região offshore a aproximadamente 6,5 km da costa do município de Barra dos Coqueiros, estado de Sergipe. A FSRU atenderá inicialmente a UTE Porto de Sergipe I.

O presente estudo visa complementar o EDA previamente realizado para a UTE Porto Sergipe I, com vistas a apresentar as emissões decorrentes da operação da FSRU e considerar seu impacto sobre a qualidade do ar.

Neste estudo são apresentadas as taxas de emissão para Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e Monóxido de Carbono (CO), considerando dados de projeto e informações de performance dos fabricantes dos componentes do FSRU. Em seguida estas emissões são incorporadas ao cenário de dispersão atmosférica da UTE Porto Sergipe I (CELSE, 2016a; CELSE, 2016b) para simulação do impacto integrado na qualidade do ar, visando a verificação de enquadramento nos padrões da Resolução CONAMA 03/90.

1.1. Legislação

A Resolução Conama no 03/90 define no Art. 1º que “são padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral”.

Neste mesmo documento, o Art. 2º estabelece os conceitos de padrões primários de qualidade do ar como “as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população”, e padrões secundários de qualidade do ar como “as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral”.

O padrão de qualidade do ar vigente no Estado de Sergipe é o padrão primário de qualidade do ar estabelecido na Resolução CONAMA 03/90, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Padrões de qualidade do ar estabelecidos na Resolução CONAMA 03/90.

Poluentes	Padrão Primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão Secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tempo de Amostragem
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	240 80	150 60	24h anual
Partículas Inaláveis (MP10)	150 50	150 50	24h anual
Fumaça	150 60	100 40	24h anual
Dióxido de Enxofre (SO_2)	365 80	100 40	24h anual
Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	320 100	190 100	1h anual
Monóxido de Carbono (CO)	40.000 10.000	40.000 10.000	1h 8h
Ozônio (O_3)	160	160	1h

2. CARACTERÍSTICAS DAS FONTES EMISSORAS

Foram identificadas como fontes fixas de emissão de poluentes atmosféricos na FSRU o sistema de motores, responsável pela geração de energia para as operações do navio, e a unidade de combustão de gases (GCU – *Gas Combustion Unit*), utilizado para gerar vapor para as utilidades do navio.

O sistema de motores é composto por 4 unidades do modelo Warstila 8L50DF, com potência de 7800 kW, utilizando gás natural como combustível (apesar deste modelo ter capacidade para operação com diesel, na operação da FSRU esta opção não tem previsão de utilização), sendo que cada um possui uma chaminé de exaustão. Os motores e suas respectivas chaminés de exaustão são identificados neste estudo como W1, W2, W3 e W4. A GCU é do modelo SHI H2189, da Alfa Laval.

A Tabela 2 apresenta as características das fontes da FSRU, necessárias à modelagem de dispersão atmosférica. Estas características são referentes às chaminés de exaustão dos motores (W1 a W4) e da GCU, e foram obtidas através dos documentos técnicos descritivos destes equipamentos bem como da planta de arranjo geral do FSRU. Note-se que a altura apresentada para as chaminés é referente ao nível médio do mar.

Tabela 2 – Parâmetros das fontes fixas de emissão do FSRU.

	GCU	W1 a W4
Altura (m)	24,1	24,1
Diâmetro (m)	3,6	1,0
Vazão (m ³ /s)	126,67	23,47
Temperatura de saída (°C)	535	378
Velocidade de saída (m/s)	12,44	29,88

Uma vez que a FSRU possui ancoragem por sistema submerso *Soft-Yoke*, portanto com posicionamento variável em torno do ponto de ancoragem, para definição da localização das chaminés de exaustão foi considerado o posicionamento do navio de forma que as chaminés tenham a menor distância do continente, sendo esta considerada a condição de pior cenário para impacto na qualidade do ar. Nesta condição, as coordenadas de localização das chaminés de exaustão são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Localização das fontes fixas de emissão do FSRU.

	Latitude	Longitude
GCU	10° 51' 25,3989" S	36° 53' 0,5053" W
W1	10° 51' 25,2563" S	36° 53' 0,5285" W
W2	10° 51' 25,2978" S	36° 53' 0,5698" W
W3	10° 51' 25,3534" S	36° 53' 0,6253" W
W4	10° 51' 25,3834" S	36° 53' 0,6648" W

Finalmente, são apresentadas na Tabela 4 as taxas de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e material particulado (MP) decorrentes da operação do sistema de motores e da GCU. As taxas são apresentadas em unidades de kg/h e, complementarmente, em g/s, sendo esta última a unidade de input no modelo de dispersão atmosférica AERMOD.

As informações acerca dos fatores de emissão, tanto dos motores quanto da GCU, foram fornecidas pela Golar Power Latam Ltda., com base em testes realizados pelos respectivos fabricantes sob diferentes condições operacionais. As informações fornecidas foram aplicadas às condições operacionais previstas para a FSRU, adotando-se a condição de pior cenário para as emissões atmosféricas. Desta forma, a condição selecionada para representar a emissão dos motores foi com operação dos mesmo a 50% da carga, conforme reproduzido na Tabela 5. Para a GCU foi considerada a sua utilização todo o tempo.

Tabela 4 – Taxas de emissão de poluentes atmosféricos do sistema de motores e da GCU.

	TAXA DE EMISSÃO			
	Motores (W1 a W4)		GCU	
	(kg/h)	(g/s)	(kg/h)	(g/s)
NO _x	3,2955	0,9154	1,0611	0,2948
CO	7,0980	1,9717	0,1871	0,0520
MP	0,2789	0,0775	x	X

Tabela 5 – Emissões do sistema de motores Warstila 8L50DF de acordo com a carga de operação.

	Emissões (g/kWh)		
	Carga 100%	Carga 75%	Carga 50%
NO _x	1,56	1,56	1,69
CO	1,17	1,43	3,64
MP	0,083	0,087	0,143

Conforme as especificações técnicas tanto dos motores quanto da GCU não há emissão de SO_x, devido à utilização do gás natural como combustível. Além disso, devido à baixa emissão de material particulado pela FSRU (Tabela 4), este material não será considerado no estudo de modelagem de dispersão, uma vez que não é esperado impacto significativo.

3. MODELAGEM DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

A ferramenta para avaliação dos impactos na qualidade do ar é o modelo de dispersão atmosférica AERMOD (*AMS/EPA Regulatory Model*), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA – *United States Environmental Protection Agency*). No AERMOD a concentração dos poluentes segue uma distribuição Gaussiana, onde o comprimento da pluma é determinado pelos coeficientes de dispersão, sendo recomendado para a estimativa do impacto de novas ou já existentes fontes poluidoras do ar cuja distância aos receptores seja inferior a 50 km.

Em vista do caráter deste estudo como sendo complementar à modelagem de dispersão atmosférica já realizada para a UTE Porto Sergipe I, a fim de verificar o impacto de integrado da UTE e FSRU, todas as configurações e dados de entrada do modelo AERMOD foram mantidas, incluindo:

- Receptores;
- Dados meteorológicos
- Fontes da UTE;
- Prédios (*building downwash*);

Desta forma, as configurações numéricas e dados de entrada listados acima podem ser verificados em CELSE (2016a, 2016b), e suas características não serão replicadas no presente relatório.

Para o presente estudo foram incluídas no cenário de modelagem as fontes da FSRU, com as características descritas no capítulo anterior. Os resultados das máximas concentrações obtidas para NO₂ e CO são apresentados a seguir.

A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam as máximas concentrações obtidas para NO₂, sua coordenada de ocorrência e o comparativo com a legislação aplicável. Confrontado nestas tabelas, o cenário integrado incluindo as fontes emissoras da UTE e da FSRU não ultrapassa os limiares estabelecidos para NO₂.

Tabela 6 – Resultados das máximas concentrações de NO₂.

	Concentração (µg/m ³)	Coordenada de localização (UTM WGS84)		Padrão CONAMA (µg/m ³)
		X	Y	
1 hora	63,6	713000,00	8825000,00	320
Anual	7,0	724500,00	8804000,00	100

Tabela 7 – Resultados das oitavas máximas concentrações de NO₂.

	Concentração (µg/m ³)	Coordenada de localização (UTM WGS84)		Padrão IFC Guideline (µg/m ³)
		X	Y	
1 hora	53,2	725000,00	8804000,00	80

A Tabela 8 e a Tabela 9 apresentam as máximas concentrações obtidas para CO, sua coordenada de ocorrência e o comparativo com a legislação aplicável. Conforme contatado nestas tabelas, o cenário integrado incluindo as fontes emissoras da UTE e da FSRU não ultrapassa os limiares estabelecidos para CO.

Tabela 8 – Resultados das máximas concentrações de CO.

	Concentração (µg/m ³)	Coordenada de localização (UTM WGS84)		Padrão CONAMA (µg/m ³)
		X	Y	
1 hora	55,9	731000,00	8799000,00	10.000
8 horas	50,1	731000,00	8799000,00	40.000

Tabela 9 – Resultados das oitavas máximas concentrações de CO.

	Concentração (µg/m ³)	Coordenada de localização (UTM WGS84)		Padrão IFC Guideline (µg/m ³)
		X	Y	
1 hora	55,6	731000,00	8799000,00	-

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo foram estimadas as emissões decorrentes da operação da FSRU e foi realizada modelagem numérica para avaliação da qualidade do ar no cenário em que esta atenderá à UTE Porto Sergipe I.

Os resultados obtidos apontam conformidade com a legislação vigente no estado de Sergipe para os compostos NO₂ e CO.

5. BIBLIOGRAFIA

CELSE, 2016a. Estudo de dispersão atmosférica do complexo termelétrico. Relatório Técnico do Estudo Celse 03-2017, Março/2016, 104 p.

CELSE, 2016b. Estudo de dispersão de NOx da UTE Porto Sergipe I. Relatório Técnico do Estudo Porto Sergipe I 06-2017, Junho/2016, 54 p.

6. EQUIPE TÉCNICA

Equipe da Empresa Consultora Tetra Tech Consultoria Ltda.

Profissional	Ana Carolina R. Lammardo
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Oceanógrafa / Ma. Oceanografia Geológica
Registro no Conselho de Classe	1.609 (AOCEANO)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	Não aplicavel (CPF 216.695.528-29)
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Eduardo Yassuda
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Engenheiro Mecânico / Dr. Engenharia Oceanográfica
Registro no Conselho de Classe	0601847385 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	94066
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Gabriel Clauzet
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Físico / Dr. Oceanografia Física
Registro no Conselho de Classe	Não aplicavel
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	Não aplicavel (CPF 188.764.658-20)
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	TODOS
Assinatura	_____

Profissional	Mariana Lino Gouvêa
Empresa	Tetra Tech Engenharia e Consultoria Ltda.
Formação	Meteorologista
Registro no Conselho de Classe	5069291950 (CREA-SP)
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental	5489811
Responsável pelo(s) Capítulo(s)	Item 2.2 e Anexo A
Assinatura	_____

ANEXO A – MAPAS DE CONCENTRAÇÃO

A seguir são apresentados os mapas de concentração resultantes das simulações numéricas com o AERMOD, no cenário em que a FSRU atenderá a UTE, para os compostos NO_2 e CO .

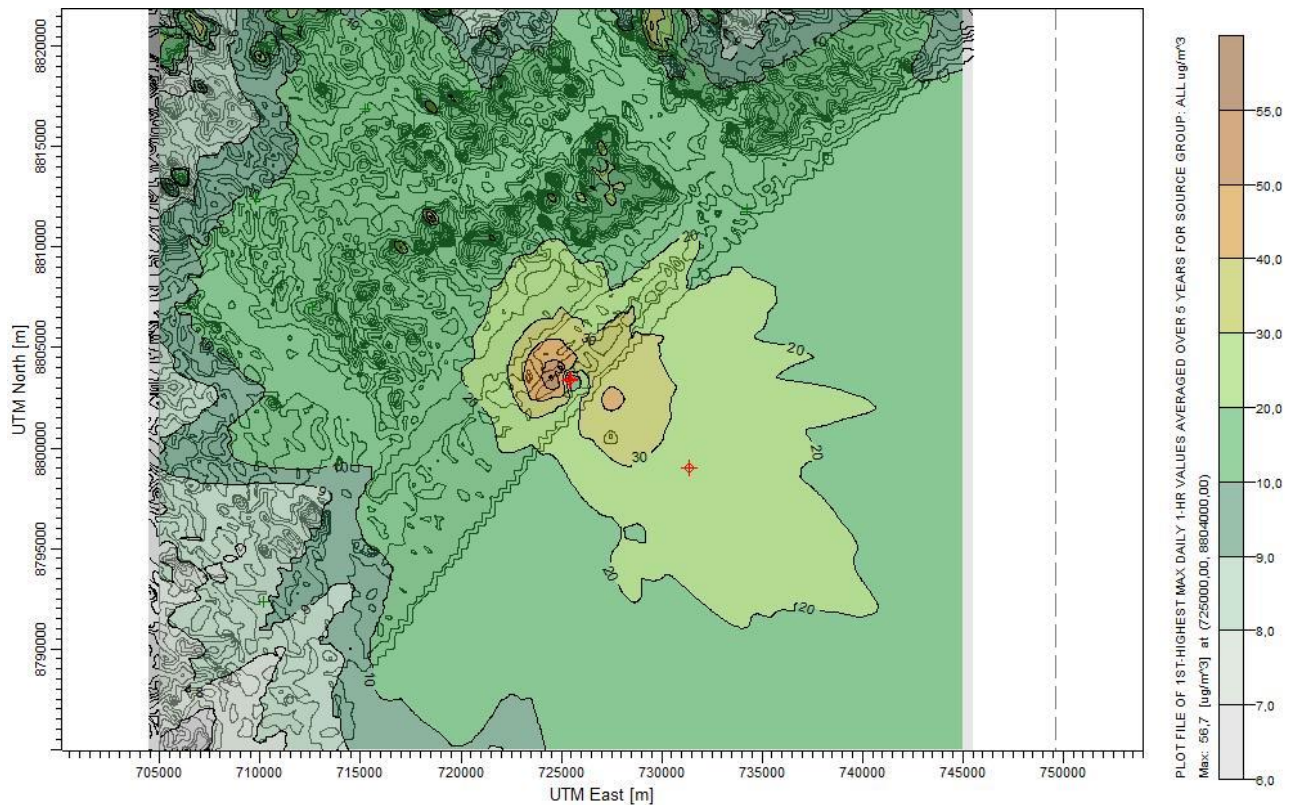


Figura A-1 – Isolinhas de máxima concentração de NO_2 em 1 hora.

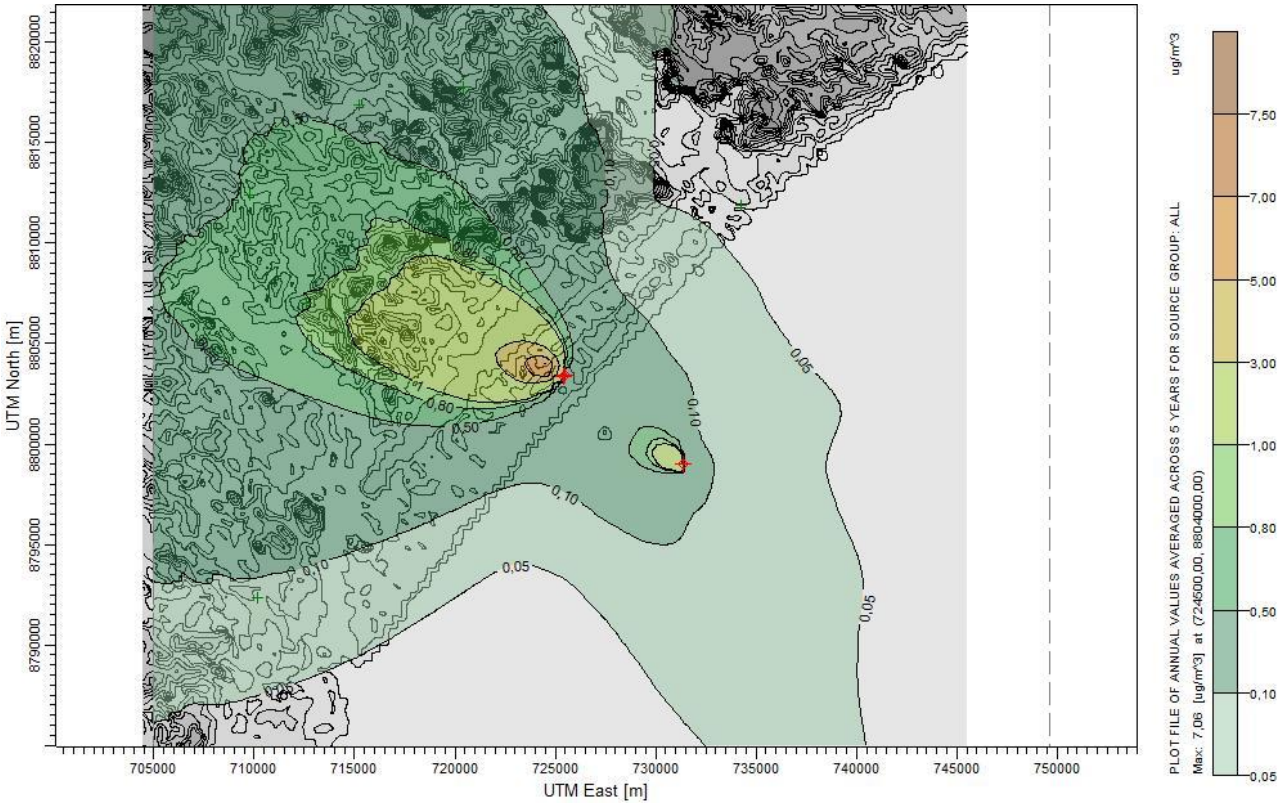


Figura A-2 – Isolinhas de máxima concetração anual de NO₂.

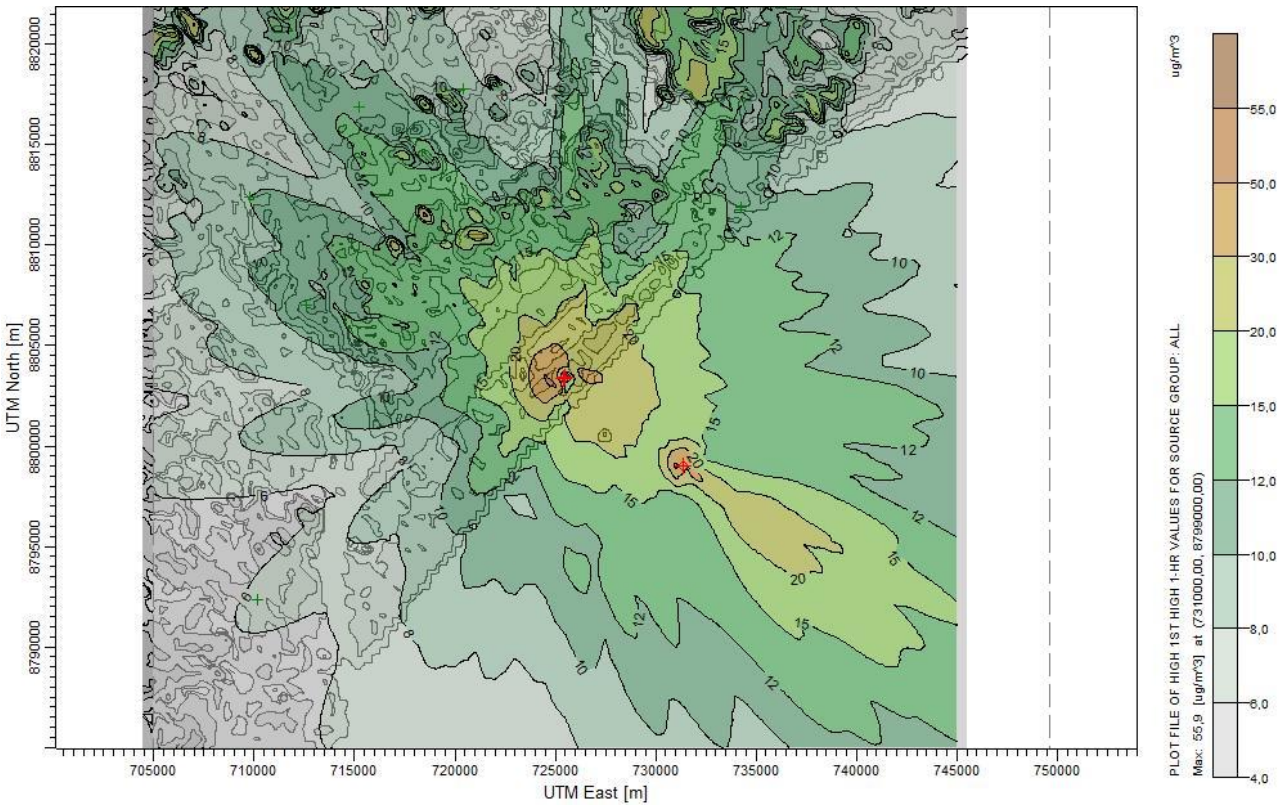


Figura A-3 – Isolinhas de máxima concetração de CO em 1 hora.

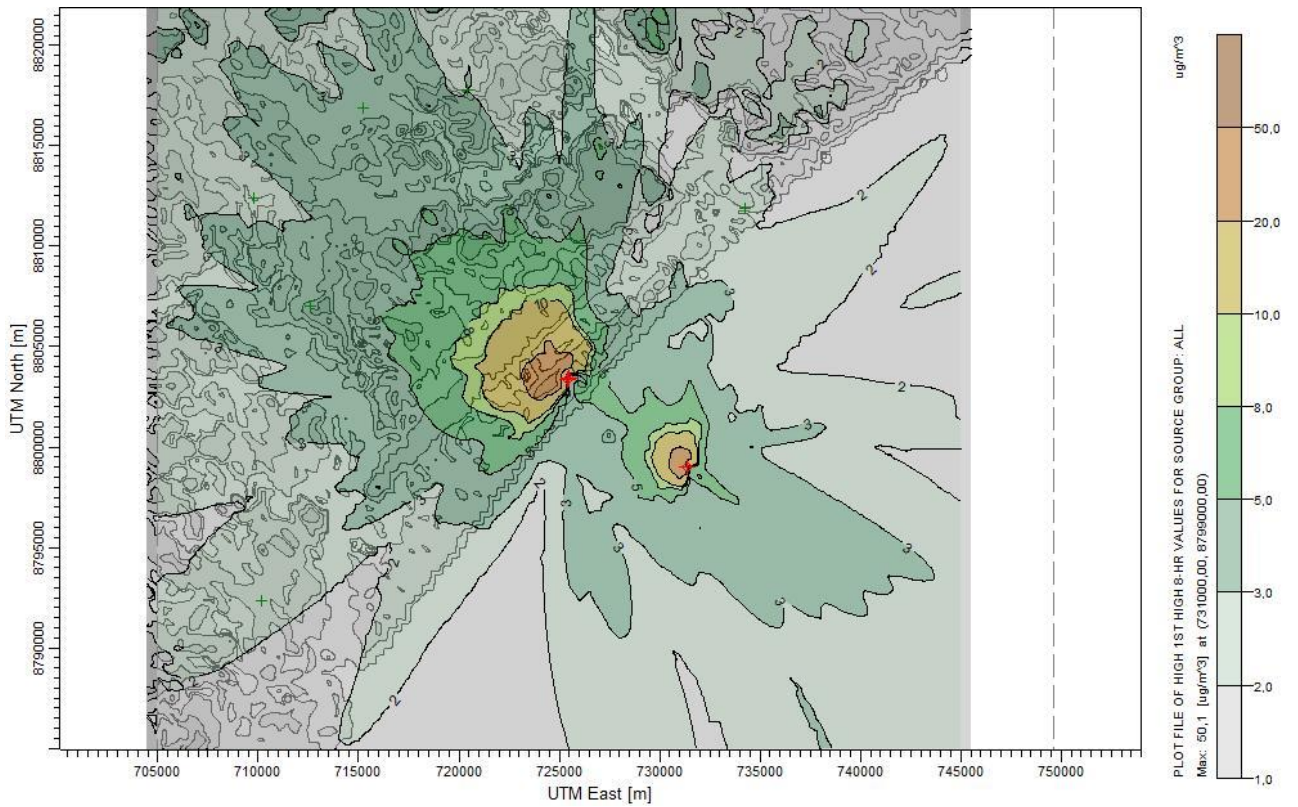


Figura A-4 – Isolinhas de máxima concentração de CO em 8 horas.

Anexo 7.1-6

Modelagem de dispersão da pluma
salina do Emissário

MODELAGEM DE Dispersão do Emissário

**Revisão 05
SETEMBRO/2017**

I. INTRODUÇÃO

Este documento contempla o estudo da Modelagem da Dispersão do emissário de Aracajú/SE na fase de licenciamento prévio do empreendimento.

O objetivo principal deste estudo é verificar, por meio de modelagem numérica computacional, como ocorre a dispersão das águas super salinas do emissário na região costeira adjacente.

Inicialmente é feita uma introdução sobre os processos físicos que envolvem a dispersão de efluentes em meio aquoso e uma breve descrição da caracterização do comportamento oceanográfico regional envolvendo os parâmetros pertinentes a esta análise. Em sequência são apresentadas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento do estudo, bem como os cenários computacionais simulados. Os resultados e as discussões destes cenários computacionais finalizam o documento, conjuntamente com as conclusões..

Para o completo entendimento sobre a metodologia empregada e os resultados obtidos em estudos de dispersão de efluentes em meio aquoso, é necessária a explanação sobre os conceitos físicos que envolvem este processo.

Inicialmente os processos físicos advecção, difusão e dispersão devem ser apresentados. A advecção é o mecanismo de transporte de um soluto, ou uma propriedade, em um fluido em movimento. Em Miranda *et al.* (2002), o processo advectivo de mistura é definido como os movimentos médios os macroscópicos.

Já a difusão é um transporte passivo envolvendo o movimento de moléculas do soluto de regiões de alta concentração para baixa concentração. Segundo Miranda *et al.* (2002), a difusão é o movimento aleatório das partículas, em escala microscópica.

Ou seja, a advecção é um movimento em escala macroscópica, caracterizada pela variação de posição do soluto no espaço, enquanto que a difusão ocorre em nível molecular, caracterizando uma variação da concentração do soluto. A dispersão é o resultado da soma destes dois processos: difusão e advecção. A **Figura I-1** apresenta um esquema simplificado destes processos.

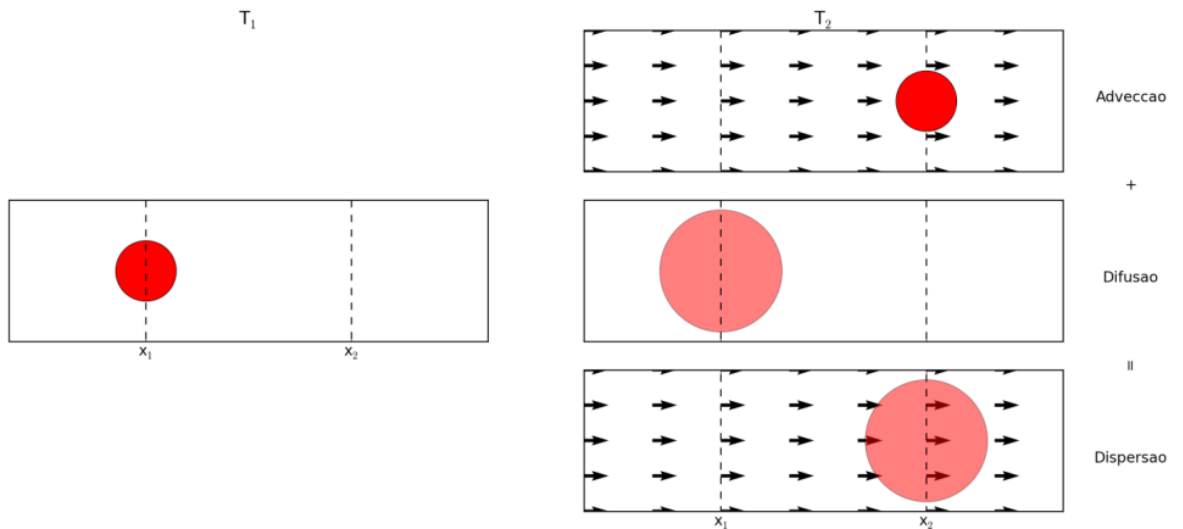


Figura I-1 - Esquema simplificado mostrando o efeito da difusão (painel central), da advecção (painel superior) e da dispersão (painel inferior) em uma determinada substância (representado pelas circunferências). A cor escura representa concentração superior à cor clara. T_1 representa um instante de tempo qualquer, e T_2 um instante posterior ao instante T_1 ($T_2 > T_1$).

Fonte: Gregório (2009).

Os processos de mistura de descargas de efluentes em um corpo receptor podem ser divididos em três zonas, de acordo com suas respectivas escalas de tamanho e tempo (**Figura I-2**).

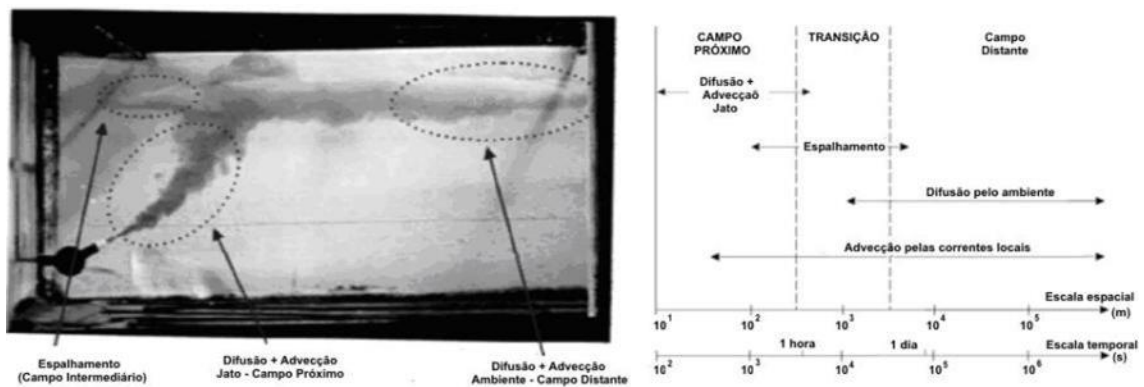


Figura I-2 - No painel da esquerda, ensaio laboratorial de uma descarga em um corpo aquoso. No painel da direita, escalas espaciais e temporais dos processos envolvidos.

Fonte: Modificado JIRKA et al. (1976) apud Gregório (2009).

No painel da esquerda apresentado na **Figura I-2**, na vizinhança imediata da descarga, é possível notar que o efluente penetra no ambiente na forma de jato. Neste momento, a trajetória e a mistura do efluente são governadas pela velocidade de injeção, pelo empuxo e pela geometria do emissário (difusores). Esta zona de

mistura inicial é chamada de campo próximo (“*near-field*”). O campo próximo tem escala espacial da ordem de 10 a 100 metros e escala temporal entre segundos e minutos (painel da direita da **Figura I-2**). Inicialmente, a diluição no campo próximo é regida pela difusão e advecção causada pela injeção do efluente no meio. As características dos difusores podem afetar diretamente esta mistura inicial.

Os limites verticais do oceano são o fundo e a superfície livre. Em alguns casos, pode haver limites internos, como a pycnoclina (região de abrupta alteração da densidade). Dependendo das características dinâmicas e geométricas do campo próximo, variados processos de interação com os limites podem ocorrer. Um exemplo é o processo decorrente da descarga de um efluente próximo ao fundo, comparado com um efluente que se desloca livremente (**Figura I-3**). Esse processo de interação com o fundo promove uma transição entre a mistura provocada pelo empuxo positivo do jato no campo próximo e dispersão característica do campo distante. Esta transição pode ser gradual ou abrupta, podendo diminuir o tamanho do campo próximo.

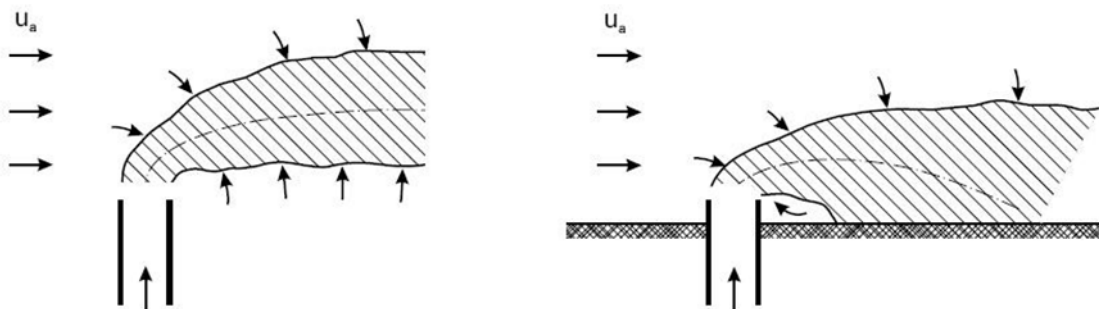


Figura I-3 - No painel da esquerda, efluente que se desloca livremente sem interação com o fundo. No painel da direita, efluente interagindo com o fundo.

Fonte: Modificado JIRKA et al. (1976).

A influência dos processos físicos do campo próximo decresce conforme o efluente se afasta do ponto de lançamento, e as correntes marinhas gradualmente defletem o jato em sua direção predominante. Ou seja, o efluente começa a ser adveccionado pelas correntes marinhas. Progressivamente, o jato perde a quantidade de movimento inicial e aproxima-se de um nível de equilíbrio hidrostático. Esse nível pode ser a superfície livre ou alguma profundidade intermediária, dependendo da diferença de densidade entre o efluente e o meio ambiente. Neste ponto, a

aproximação hidrostática pode ser assumida e o efluente comporta-se como uma pluma, tendo sua dispersão controlada pela advecção e pela difusão das correntes locais (pode ser observado no painel da esquerda da **Figura I-2**). Esta zona é classificada como campo distante (*“far-field”*).

Comparativamente ao campo próximo, no campo distante a diluição é muito menor. A escala espacial do fenômeno é de quilômetros a dezenas de quilômetros e sua escala temporal é da ordem de horas a dias (painel da direita da **Figura I-2**). Os processos no campo distante são causados principalmente pela advecção horizontal do efluente, devida à velocidade das correntes, e pela difusão gerada pela turbulência do corpo de água.

Difusão passiva causa, em geral, aumento da largura e da espessura da pluma até que ela interaja com algum contorno (lateral ou vertical). A taxa de difusão ambiental depende principalmente das características dinâmicas e do grau de estratificação do ambiente. Entre essas duas regiões existe uma região de estabilização (painel da esquerda da **Figura I-2**). A dinâmica desta região intermediária depende tanto do momento e do empuxo da descarga quanto das correntes presentes no local.

II. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo são descritas as características da região, relevantes para este estudo, englobando primeiramente a Plataforma Continental da Bacia Sergipe-Alagoas, seguindo para a região do emissário. Na sequência, são apresentados os padrões atmosféricos que influenciam a circulação nesta região. Por fim, são detalhadas as características físicas dos emissário em questão.

II.1 A PLATAFORMA CONTINENTAL DA BACIA SERGIPE ALAGOAS

A Bacia Sergipe-Alagoas (SEAL) está centrada em 11°S e se localiza na porção norte da Margem Continental Leste-Nordeste Brasileira na borda oeste do Oceano Atlântico Tropical.

A Plataforma Continental da SEAL (PCSEAL) se estende por cerca de 370 km, com uma orientação aproximadamente 40° no sentido horário em relação ao norte geográfico. Define-se a PCSEAL como uma plataforma continental estreita, com largura de cerca de 18 km no extremo sul e 42 km no extremo norte. A maior parte da sua região não ultrapassa os 40 m de profundidade, com topografia significativamente acidentada (SUMMERHAYES *et al*, 1976 *apud* PARENTE, 2016).

Na porção do Atlântico Sudoeste Tropical, onde está inserida a PCSEAL, encontra-se, em geral, uma estrutura de massas de águas formada pelo empilhamento, da superfície até o fundo, das massas de água: Água tropical, Água Central do Atlântico Sul, Água Intermediária Antártica, Água Circumpolar Superior, Água Profunda do Atlântico Norte, Água Circumpolar Inferior e Água de Fundo Antártica (MÉMERY *et al*, 200, REID, 1989). Contudo, Parente (2016) analisando dados de hidrografia coletados no ano de 2014 (duas campanhas – maio e novembro) na PCSEAL observou águas praticamente homogêneas – tanto para a temperatura quanto para a salinidade, em ambas campanhas, com valores médios de 27 °C para a temperatura e 37 para a salinidade - **Figura II-2**.

Em campanha realizada em 16/05/2017 na região de lançamento do emissário, também foram obtidos dados homogêneos de temperatura e salinidade ao longo da coluna d'água. Os valores para temperatura oscilaram entre 27,9 °C e 28,7°C e a salinidade entre 32,5 e 33,4. Na **Tabela II.1-1** são indicados os resultados para

os pontos PT1 local de atracação do navio de gás e TP4 local da saída do emissário.

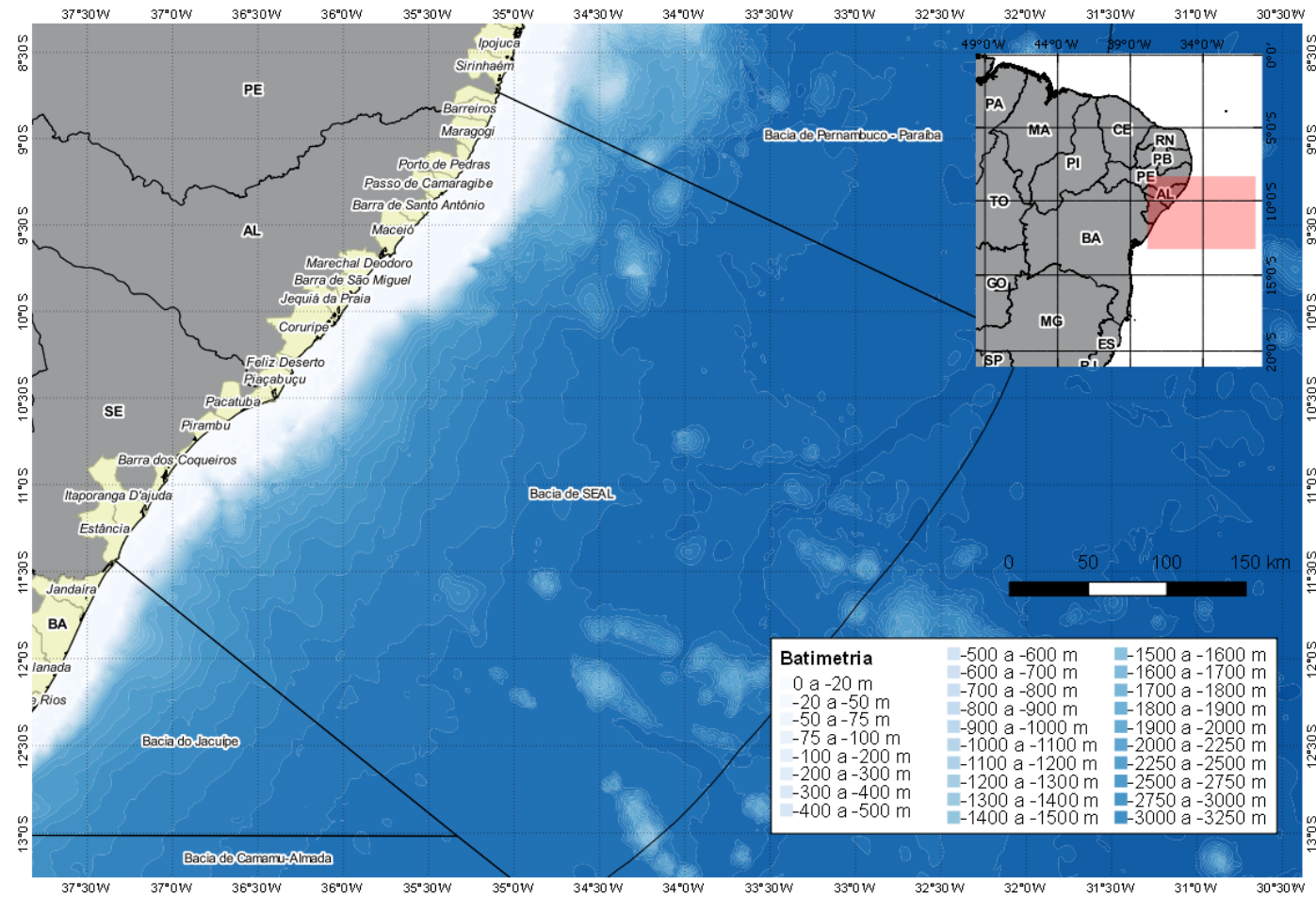
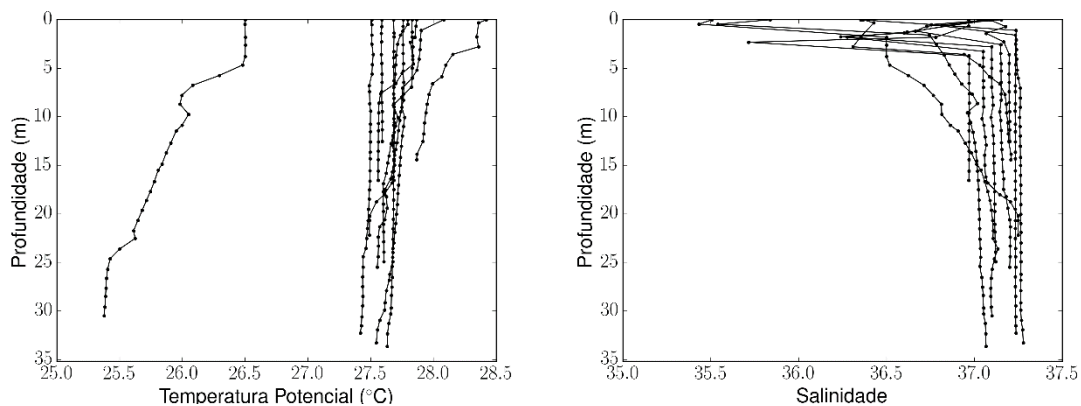


Figura II-1 – Localização da Bacia Sergipe-Alagoas (SEAL).

Maio/2014



Novembro/2014

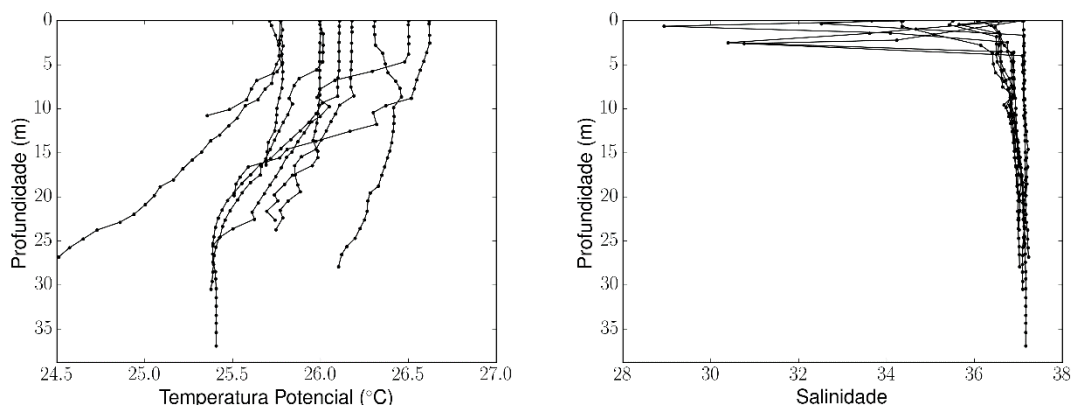


Figura II-2 – Dados de temperatura (esquerda) e salinidade (direita) em maio (superior) e novembro (inferior) de 2014 ao longo da Plataforma Continental de SEAL.

Fonte: modificado de Parente (2016).

Tabela II.1-1 – Temperatura e salinidade medidos na região do emissário em 16/05/2017.

	Profundidade (m)	Temperatura (°C)	Salinidade
Pt1	16,25	27,9	33,4
	10,83	27,9	33,2
	5,41	28,1	32,7
	0,44	28,4	32,7
Tp4	3,83	28,6	32,5
	1,91	28,7	33,4
	0,44	28,7	32,8

Com relação as correntes, Parente (2019) analisou o conjunto de dados de três fundeios instalados na PCSEAL, com destaque para o fundeio intitulado PCM-9, que coletou dados entre 19/03/2012 e 17/06/2015 em região nas proximidades de

Aracajú. Os outros dois conjuntos de correntógrafos foram instalados em região mais ao sul.

O fundeio PCM-9 foi fundeado a uma profundidade de 23 m, com medições a 10 m de profundidade. O autor cita que para este fundeio as correntes apresentaram intensidade média de 0,20 m/s, com desvio padrão de 0,12 m/s, com direção preferencial das correntes paralela a costa e sentido preferencial SSW. Direções perpendiculares à costa foram observadas de forma escassa.

II.1.1 Padrões atmosféricos sobre a Bacia Sergipe Alagoas

Como mencionado anteriormente, a SEAL situa-se na região Nordeste do Brasil (NEB) aproximadamente entre os paralelos 10 e 12°S e os meridianos 35,5 e 37,5° W, numa região equatorial oceânica adjacente ao estado de Sergipe, abrangendo também o sul do Estado de Alagoas.

Três tipos de clima podem ser identificados na região Nordeste: um clima litorâneo úmido (que se estende do litoral da Bahia ao do Rio Grande do Norte), um clima tropical (em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí) e um clima tropical semiárido (em todo o sertão nordestino). Essa diversidade de climas deve-se à atuação de diversos mecanismos físicos que interagem e são responsáveis pela distribuição das chuvas, pelas variações da nebulosidade e do vento na região (PETROBRAS, 2016).

Os principais fatores dinâmicos de larga escala que determinam o clima no Nordeste (NEB) são (i) o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que depende (ii) da intensidade e do posicionamento do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e do Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte (ASAN), conseqüentemente, modificando o padrão de ocorrência (iii) dos ventos alísios e das precipitações na região. Somam-se a estes os sistemas sinóticos e de mesoescala, causadores de perturbações no padrão climático ditado pela ZCIT que podem ser externos ou internos à região e agir de forma isolada ou sinérgica, causando eventos extremos na região de estudo (PETROBRAS, 2016).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e as normais climatológicas para a estação de Aracaju (estação código 83096), a temperatura média anual, o mês mais quente é o de março (27,1 °C 1961-1990 e 26,9 °C 1931-1960), e o mais frio julho (23,8 °C 1961-1990) ou agosto (23,7 °C 1931-1960).

Assim, é possível concluir que a amplitude térmica na região é de aproximadamente 3,5 °C, que é relativamente baixa.

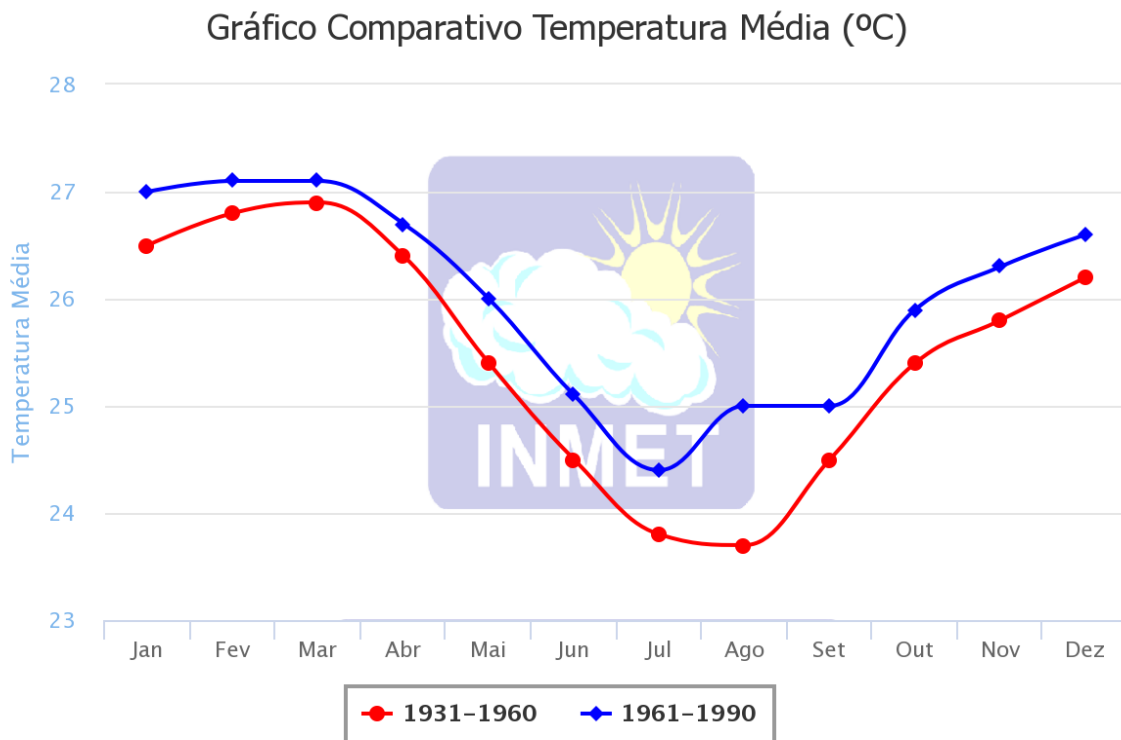


Figura II-3 – Variação climatológica da temperatura para o município de Aracajú, entre 1931 e 1990.

Fonte: INMET.

Entretanto, de acordo com o INMET na mesma estação, a pluviosidade varia desde os valores mínimos em dezembro (38,3 mm – 1931-1960; 56,3 mm 1960-1991) e valores máximos maio (262,70 mm – 1931-1960; 333,80 mm – 1960-1991), tendo amplitudes máximas anuais de 277,5 mm (1960-1991). Assim, é possível identificar duas estações extremas e uma intermediária:

- Seca: outubro, novembro e dezembro
- Chuvosa: abril, maio e junho
- Transição: janeiro, fevereiro e março; julho, agosto e setembro.

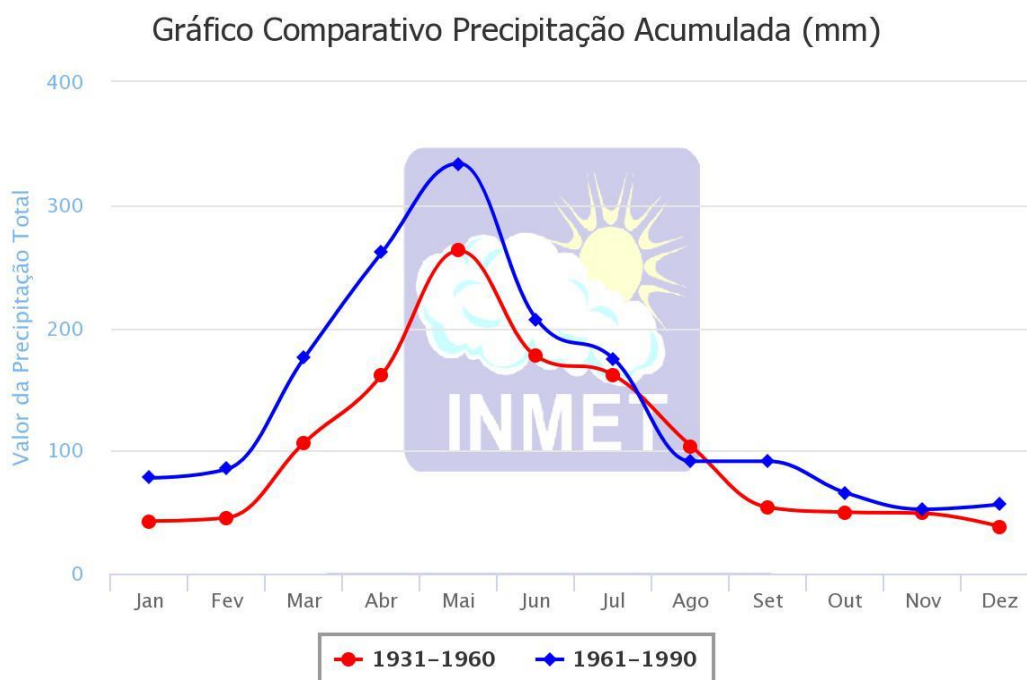


Figura II-4 – Variação climatológica da pluviosidade acumulada para o município de Aracajú, entre 1931 e 1990.

Fonte: INMET.

Para analisar a variação dos ventos nestas estações, foram obtidos dados de vento do aeroporto de Aracaju (METAR), do período entre 1997 e 2016, com medições horárias. O aeroporto de Aracajú está localizado na latitude: 10° 59'S, longitude: 37° 04'W a uma altura: 8 m. As rosas dos ventos para os períodos de transição e estações seca e chuvosas estão dispostas na **Figura II-5** e na **Figura II-6**.

Nestas figuras é possível notar que na época chuvosa os ventos provenientes de leste são os mais frequentes, com influências de sudoeste e nordeste significativas. Já para a época de seca, os ventos de nordeste são os mais frequentes, com pouca frequência de ocorrência dos ventos do quadrante sudoeste. Nota-se também que no período de seca os ventos possuem maiores intensidades que no período chuvoso.

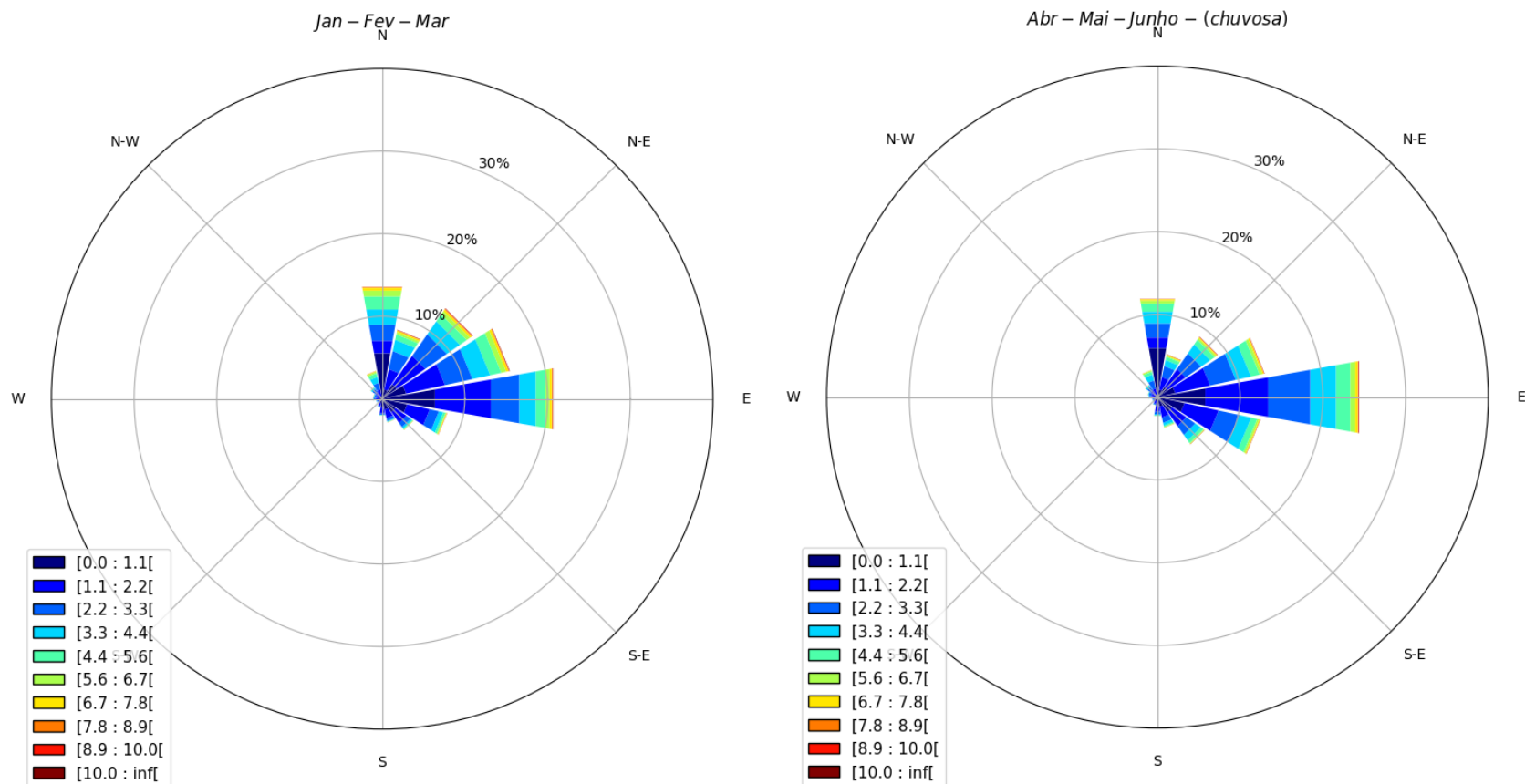


Figura II-5 – Rosa dos ventos para os meses de janeiro, fevereiro e março (esquerda) e abril, maio e junho (direita), para o aeroporto de Aracajú entre 1996 e 2016.

Fonte: Metar.

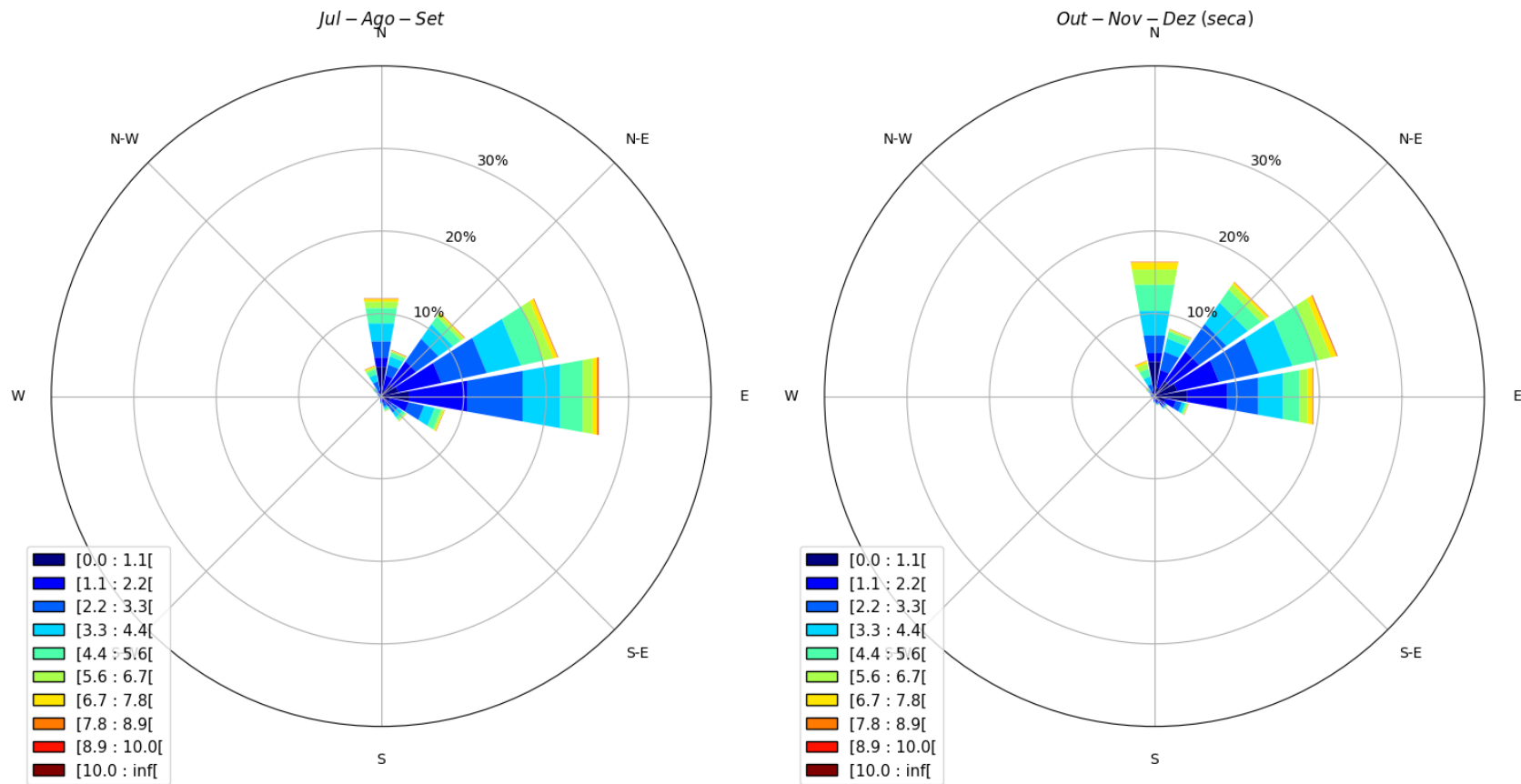


Figura II-6 – Rosa dos ventos para os meses de julho, agosto e setembro (esquerda) e outubro, novembro e dezembro (direita), para o aeroporto de Aracajú entre 1996 e 2016.

Fonte: Metar.

II.2 O EMISSÁRIO DA TERMOELETRICA

O emissário previsto tem cerca de 1200 metros de comprimento mar adentro, com suas seções mais próximas à costa enterradas no solo marinho e seções sobre o leito marinho nas áreas mais profundas. O emissário apresenta seis difusores (**Figura II-7**) em sua extremidade, com diâmetro de cerca de 30 centímetros cada. Todo o efluente do emissário será liberado para o oceano por meio dos seus 6 difusores.

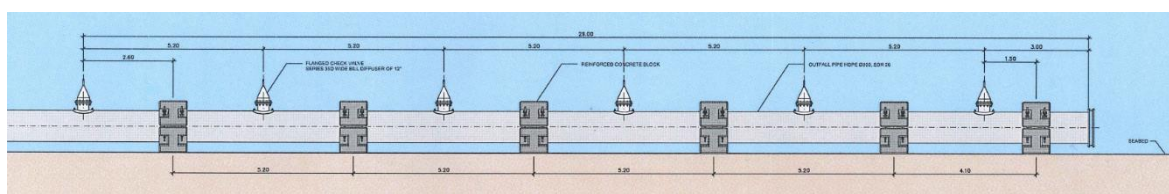


Figura II-8 Desenho esquemático dos difusores no final do duto.

A **Tabela II.2-1** mostra as principais características do emissário de Aracajú e algumas características das simulações consideradas.

Tabela II.2-1 – Características consideradas para o emissário e para os lançamentos nas simulações numéricas.

Parâmetro	Valor
Diâmetro do difusor (m)	0,3048 m
Elevação do difusor (m)	1,3 m
Profundidade do difusor (m)	5,0 m
Ângulo vertical (°)	90° (apontado para cima)
Ângulo horizontal (°)	0°
Número de difusores	6
Espaçamento entre os difusores	5,2 m
Vazão Máxima total (m ³ /h)	5.600
Vazão Por Difusor (m ³ /h)	933
Salinidade do efluente	48
Temperatura média do efluente (°C)	27 °C
Densidade do efluente (kg/m ³)	1032,5
Temperatura da água do mar (°C)	27 °C
Salinidade da água mar	33
Densidade da água do mar (kg/m ³)	1021,2

III.METODOLOGIA ADOTADA

Nesta Seção é apresentada a metodologia adotada no estudo da dispersão do emissário por meio de modelagem numérica.

III.1 A MODELAGEM NUMÉRICA DA MISTURA DE EFLUENTES EM MEIO AQUOSO

A técnica que foi utilizada, para o estudo da dinâmica de regiões costeiras e de plumas de efluentes, é a aplicação de métodos numéricos para a solução de equações governantes, constituindo uma importante ferramenta para diagnósticos e prognósticos. Modelos computacionais permitem simular e prever impactos ambientais para ambos os domínios vizinhos da descarga no campo próximo e campo distante (GREGÓRIO, 2009).

Os modelos numéricos computacionais, na maioria das vezes, precisam ter suas equações governantes simplificadas para serem encontradas soluções. Estas simplificações acabam inibindo e muitas vezes direcionando o uso e a aplicabilidade de cada ferramenta.

Conforme descrito anteriormente, a física envolvida nos campos próximo e distante são muito diferentes, sendo que as escalas espaciais e temporais de ambas são discrepantes. Deste modo, a grande maioria dos modelos que simulam a física dos processos condizentes ao campo distante não é capaz de resolver os problemas impostos pela física do campo próximo (GREGÓRIO, 2009).

Além das discrepâncias, já citadas, nas escalas espaciais e temporais e partindo do pressuposto que as escalas de movimentos horizontais no oceano são muito maiores que as verticais, muitos modelos de campo distante consideram que as acelerações verticais são pequenas comparadas aos outros termos da equação de conservação da quantidade de movimento na direção vertical, tornando essa equação a própria equação hidrostática (aproximação hidrostática). Contudo, esta aceleração é extremamente importante para os fenômenos decorrentes no campo próximo, ou seja, o movimento é não hidrostático. Deste modo, não é adequado simular um fenômeno não hidrostático com equações que utilizem a aproximação hidrostática (GREGÓRIO, 2009).

Com isto, atualmente, se empregar dois modelos, um para o campo próximo e um para o campo distante, é a forma mais usual para se modelar com precisão a mistura de efluentes em meio aquoso. Um dos maiores desafios desta técnica é o acoplamento destes dois modelos. Zhang & Adams (1999), Hillerbrand (2003), Bleninger & Jirka (2004) e Gregório (2009) são alguns trabalhos que desenvolveram esta metodologia, e será descrito na próxima seção.

III.2 ETAPAS DA MODELAGEM NUMÉRICA

Na **Figura III-1** é observado um esquema simplificado das etapas de modelagem numérica da mistura de efluentes em meio aquoso, segundo Gregório (2009).

Primeiramente, é realizada a modelagem hidrodinâmica da região. A modelagem hidrodinâmica simula as correntes na região, como estas variam com o tempo e com as forçantes envolvidas. Utilizando o modelo de campo próximo, onde são associados os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico e as características de lançamento e dos efluentes, são obtidas as características de diluição, tamanho e profundidade do jato. Por fim, os resultados hidrodinâmicos e de campo próximo servem de forçantes para o modelo de campo distante, que gera o campo de dispersão de efluentes nesta zona.

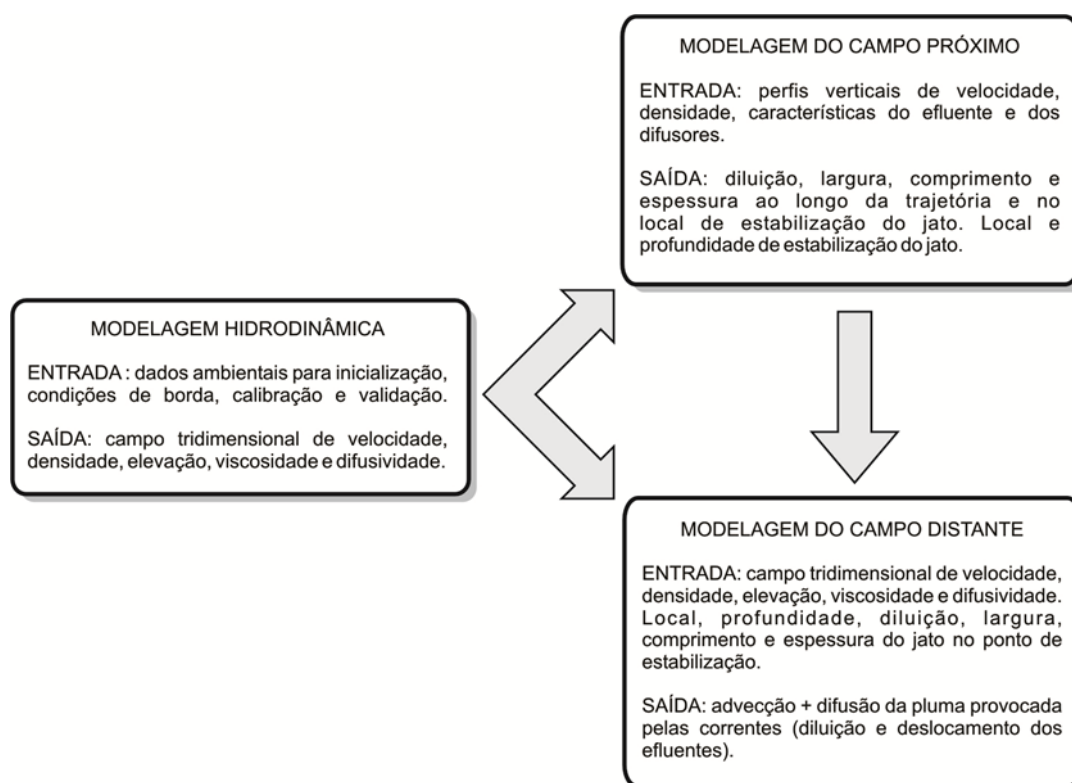


Figura III-1 - Processos envolvidos na modelagem numérica da diluição de efluentes de emissários submarinos.

Fonte: Gregório (2009).

III.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Para o estudo hidrodinâmico da região de interesse foi empregada a suíte computacional DELFT3D totalmente modular desenvolvida pela WL | Delft Hydraulics, Holanda (DELTARES, 2010). Além do módulo hidrodinâmico, é possível acoplar um modelo de qualidade de água, utilizado para simular o campo distante.

O modelo hidrodinâmico, denominado DELFT3D – FLOW é um modelo de simulação multidimensional que calcula escoamentos e transportes não estacionários, forçados por descargas fluviais, marés e processos meteorológicos em regiões costeiras, estuarinas, lagunas, rios, represas e lagos. Emprega uma grade horizontal curvilínea, facilmente ajustada aos contornos sólidos da região modelada, facilitando a representação de margens de rios, por exemplo. Suporta, como coordenadas verticais, a transformação conhecida na literatura por sigma (σ)

introduzida por Phillips (1957), resultando numa representação suave da topografia de fundo.

Os fluxos calculados pelo DELFT3D-FLOW podem ser forçados por marés, gradientes de densidade, tensão de cisalhamento do vento e gradientes de pressão atmosférica. Fontes e sorvedouros são incluídos na equação do movimento, simulando algum tipo de descarga como, por exemplo, rios.

O modelo DELFT3D-FLOW resolve as equações hidrodinâmicas aproximadas para águas rasas. Essa aproximação sugere que a profundidade é assumida muito menor que a escala horizontal do movimento. Pela razão de aspecto ser pequena, a aproximação de águas rasas é válida, e a equação do movimento em sua componente vertical é resumida ao equilíbrio hidrostático. Com isto, é assumido que a aceleração vertical é muito pequena comparada com a gravidade reduzida e esta é desprezada nas equações. Além disso, o DELFT3D-FLOW apresenta as seguintes características:

- Na camada de fundo, o efeito do atrito é parametrizado em ordem quadrática;
- A formulação que assume a tensão de cisalhamento provocada pelo fundo em combinação com as correntes é baseada num campo bidimensional de fluxos, gerada a partir de velocidades próximas ao fundo usando uma aproximação logarítmica;
- Os pontos de grade podem ser assumidos como sendo secos quando a profundidade é menor que o descrito para a batimetria. Neste caso, a velocidade neste ponto de grade é considerada como sendo zero. Em instantes de tempo posteriores esta célula pode voltar a ser considerado ponto de grade úmido, de acordo com o nível em relação à batimetria.

As principais equações utilizadas pelo DELFT3D-FLOW são apresentadas no ANEXO A.

III.3.1 Grade numérica

A correta confecção da grade numérica para o modelo numérico hidrodinâmico é detalhe fundamental para atingir os objetivos propostos.

Os principais detalhes que devem ser atentados para uma grade numérica são:

- Abrangência espacial: deve ser suficiente para que todos os fenômenos que atuam significativamente sobre os movimentos da região sejam representados;
- Linhas de costa e batimetria: é necessária a perfeita identificação da região costeira, bem como a disponibilidade de batimetria com resolução acordante com a da grade numérica proposta;
- Resolução espacial: indica o tamanho dos elementos de grade e deve considerar a relação: escala dos movimentos X tempo computacional. Quanto maior a resolução, maior será o detalhamento dos fenômenos, contudo, maior tempo computacional é requerido. A resolução espacial deve atender a resolução dos fenômenos que atuem significativamente sobre a região;
- Ortogonalidade: indica a perpendicularidade da grade ao longo da direção horizontal (direções x e y), definida como o cosseno do ângulo fechado. Para a eficiência computacional, a ortogonalidade da grade deve ser suficientemente alta (valores próximos à zero).

A linha de costa foi obtida por meio de imagens de satélite provenientes de MapLink/TeleAtlas®, Digital Globe®, Geo Eye®, Data Sio®, NGA® e GEBCO® distribuídas pelo Google Earth® Pro.

Para a batimetria, foram digitalizadas cartas náuticas provenientes da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil. As cartas náuticas utilizadas, bem como sua data de atualização, estão listadas na **Tabela III.3-1**.

Tabela III.3-1 - Cartas náuticas da DHN utilizadas para obtenção da batimetria da área de estudo.

Carta Náutica	Data de atualização
1000 - DE MACEIÓ AO RIO ITARIRI	25/11/2016
1001 - PORTO DE BARRA DOS COQUEIROS	25/11/2016

A grade numérica confeccionada para este estudo é curvilínea com resolução variável, desde 3.000 m nas regiões mais distantes do local do Emissário, até 13 m na região de lançamento do efluente. Sua representação gráfica aparece na **Figura III-2**.

A dimensão vertical adotada foi de 10 camadas sigma, com resolução variável. As camadas, com relação à porcentagem da profundidade da coluna de água, foram de: 5%, 7%, 9%, 13%, 16%, 16%, 13%, 9%, 7%, 5%.

De forma resumida, as propriedades de forma das Grades Externa e Interna estão listadas na **Tabela III.3-2**.

Tabela III.3-2 - Propriedades de forma da grade numérica confeccionada para as simulações hidrodinâmicas.

Propriedade	Valor
Pontos	158 x 55
Resolução horizontal mínima	3.000 m
Resolução horizontal máxima	13 m
Resolução vertical	10 camadas

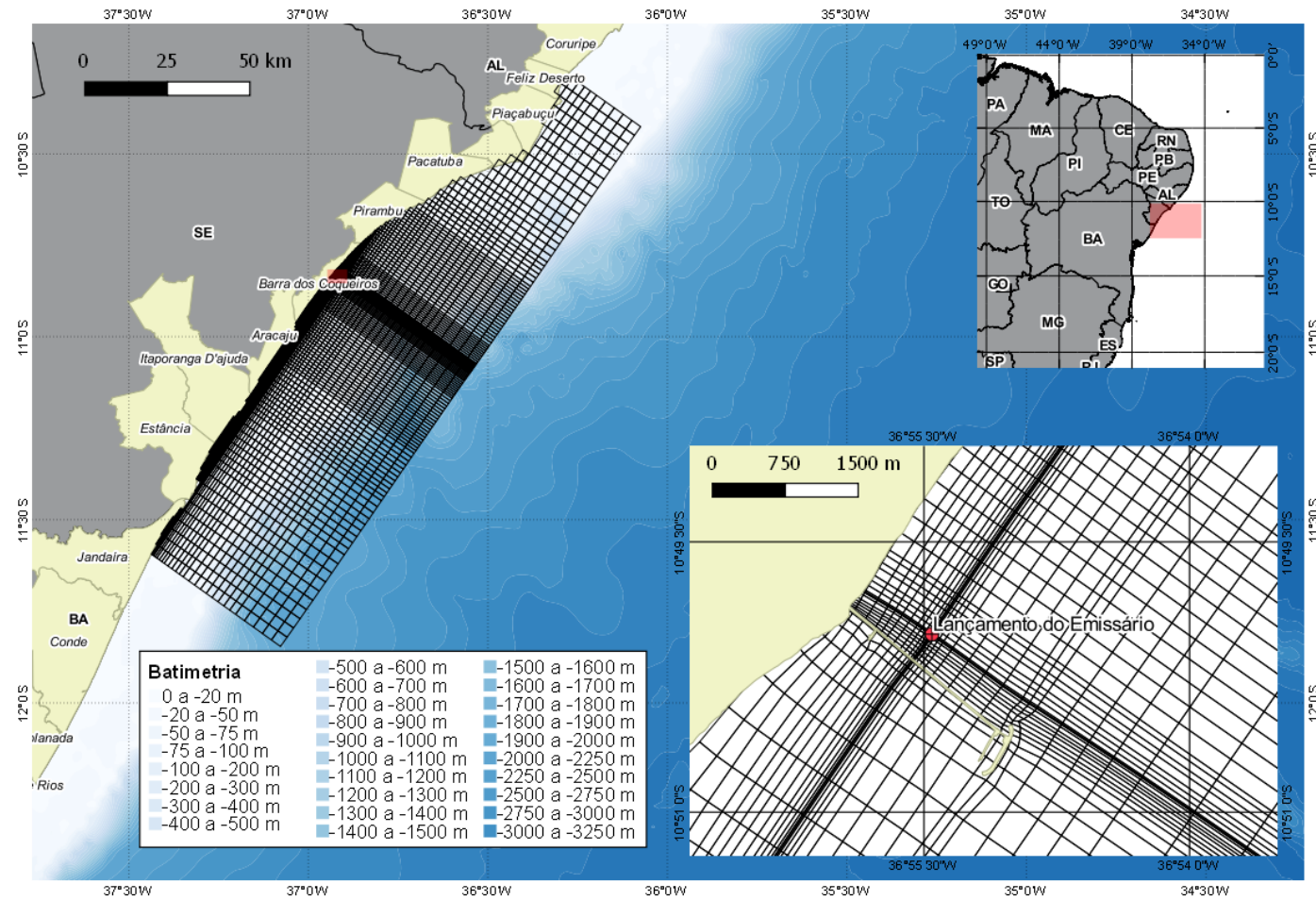


Figura III-2 - Grade numérica desenvolvida para as simulações hidrodinâmicas.

III.3.2 Condições iniciais

Para as condições iniciais de temperatura e salinidade foram utilizados os valores descritos na **Seção II.2**, onde uma compilação de autores mostra uma estratificação da coluna de água na região. Para ambas as simulações foram consideradas condições homogêneas do oceano, com salinidade 33 e temperatura de 27 °C.

As condições iniciais de velocidade e elevação da superfície livre foram nulas em todos os pontos de grade. Desta maneira, os instantes iniciais da modelagem em que o modelo se adaptou às condições de bordas impostas, comumente conhecida como período de aquecimento do modelo, foram descartados após análise destes campos. Para este estudo, o período inicial descartado das simulações foi de 2 dias.

III.3.3 Condições de borda

As bordas fechadas foram utilizadas de maneira a se representar a linha de costa, de forma impermeável, com velocidades perpendiculares nulas. Já as bordas abertas impostas às grades do modelo hidrodinâmico estão representadas na **Figura III-3**.

Para as bordas abertas, foram impostas elevações do nível do mar de acordo com as componentes de maré astronômicas mais significativas. As componentes de maré foram obtidas a partir do modelo global TPXO 7.2 (EGBERT & EROFEEVA, 2002) para os harmônicos M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, MF, MM, M4, MS4 e MN4. Em cada um dos vértices apresentados na **Figura III-3** foram impostos valores de amplitude e fase das componentes em questão (**Tabela III.3-3**), sendo que os valores impostos nos pontos intermediários representam resultado da interpolação linear entre os vértices.

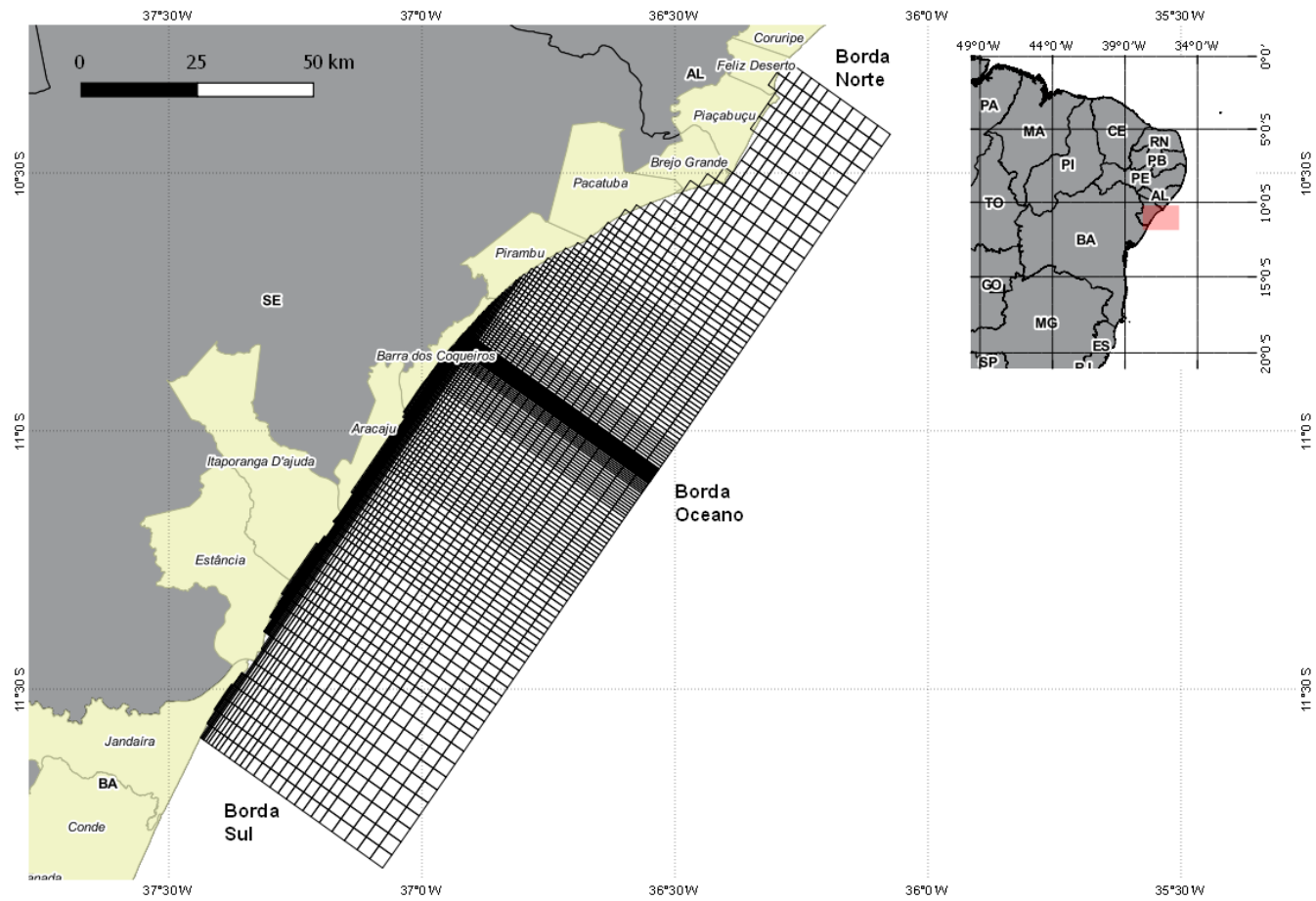


Figura III-3 - Configuração das bordas abertas da grade numérica utilizadas nas simulações hidrodinâmicas.

Tabela III.3-3 - Amplitude e fase das constantes harmônicas impostas nas bordas abertas da Grade Externa. A fase é relativa a Greenwich.

	Sul		Oceano		Norte	
	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)
M2	0,690	190,33	0,695	191,05	0,700	192,05
S2	0,260	207,2	0,260	208,05	0,260	209,23
N2	0,130	183,24	0,131	183,64	0,133	184,15
K2	0,076	203,11	0,075	204,04	0,075	205,25
K1	0,039	255,31	0,038	257,52	0,038	260,03
O1	0,060	161,98	0,059	162,95	0,058	164,71
P1	0,011	247,24	0,011	249,86	0,011	252,7
Q1	0,017	133,39	0,017	134,23	0,017	135,66
MF	0,015	357	0,015	357,16	0,015	357,45
MM	0,007	355,38	0,007	355,36	0,008	355,31

Fonte: TPXO 7.2.

Para as propriedades temperatura e salinidade, foram impostos valores nas bordas abertas referentes às condições iniciais apresentadas, de modo a não introduzir campo de massa diferente daquele estipulado no início das simulações.

Para a condição de borda atmosférica foi imposta o vento coletado na cidade de Aracajú. Maiores detalhes desta fonte de dados estão disponíveis no item **III.6 Cenário de Modelagem**.

III.3.3.1 Calibração e validação do modelo hidrodinâmico

A calibração do modelo hidrodinâmico foi realizada por meio de estudos de sensibilidade dos coeficientes, verticais e horizontais, de viscosidade e difusividade. Estes valores foram variados, dentro de níveis reais, e os resultados obtidos de nível do mar, velocidades e estratificação da coluna de água foram comparados com valores de referência (bibliográficos).

O modelo de fechamento turbulento utilizado nas simulações numéricas foi o $k-\epsilon$, cujo detalhamento matemático e numérico encontra-se no Anexo A. Este modelo de fechamento turbulento utiliza o número de Schmidt (σ_c) igual a:

$$\sigma_c = \frac{V_H}{D_H} = 0,7 \quad (1)$$

, onde VH é o coeficiente de viscosidade horizontal e DH é o coeficiente de difusividade horizontal.

Os coeficientes de viscosidade e difusividade não são calculados pelo modelo de fechamento turbulento, mas sim especificados pelo usuário. Desta maneira, os valores dos coeficientes horizontais de difusividade e viscosidade seguiram o preceito da Equação 1. De acordo com o manual do modelo DELFT3D-FLOW (DELTARES, 2011), para grades com resolução espacial horizontal da ordem de 10 m ou menos, os valores sugeridos, para ambos os coeficientes, estão no intervalo entre 1 e 10 m².s⁻¹. Após diversos testes de calibração, foram utilizados os coeficientes de viscosidade e difusividade iguais a 70 m².s⁻¹ e 100 m².s⁻¹, respectivamente.

O coeficiente de difusividade vertical (DV) é derivado da viscosidade turbulenta. Mesmo que os valores verticais são determinados pelo modelo de fechamento turbulento, o valor de background tem que ser especificado para amortecer as oscilações geradas por condições de fronteira, ventos, etc. (DELTARES, 2011). Ainda, seguindo as mesmas sugestões do manual, os coeficientes verticais para a viscosidade (VV) e difusividade são de 10⁻⁴ m².s⁻¹ e 1,43.10⁻⁴ m².s⁻¹, respectivamente. Estes valores se mostraram adequando dentro dos experimentos realizados.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo hidrodinâmico, foram realizadas comparações entre os níveis do mar computados pelo modelo e dados de previsão de maré para três locais na região, cujas constantes harmônicas são disponibilizadas pela Femar (2002). Foram selecionados os locais: Terminal Portuário de Sergipe, Cabeço e Plataforma PCM1 – as constantes harmônicas destes locais, utilizadas para confeccionar as previsões, estão apresentadas da **Figura III-4 a Figura III-6**.

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

Nome da Estação :		TERMINAL PORTUÁRIO DE SERGIPE - SE			
Localização :		Barra dos Coqueiros			
Organ. Responsável :		DHN / CVRD			
Latitude :		10° 50,0' S	Longitude :		36° 55,7' W
Período Analisado :		18/02/91 a 19/03/91	Nº de Componentes :		17
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)	III H 51 min	Nível Médio (Zo):		124 cm acima do NR.	
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :	225 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		170 cm acima do NR	
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :	22 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		77 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	-	-
Ssa	-	-	N ₂	14,6	097
Mm	3,3	200	NU ₂	2,8	098
Mf	-	-	M ₂	74,0	107
MTM	-	-	L ₂	2,4	144
Msf	3,1	344	T ₂	1,6	122
Q ₁	2,1	088	S ₂	27,4	122
O ₁	6,4	120	K ₂	7,4	123
M ₁	-	-	MO ₃	-	-
P ₁	1,1	224	M ₃	-	-
K ₁	3,2	233	MK ₃	-	-
J ₁	-	-	MN ₄	-	-
OO ₁	-	-	M ₄	1,1	160
MNS ₂	-	-	SN ₄	-	-
2N ₂	1,9	086	MS ₄	-	-
Referências de Nível: RN marco de concreto junto à balança rodoviária, no início da ponte de acesso ao cais. RN 1,2 e 3 d DHN localizadas próximo ao marégrafo, no cais da Sereia					
Obs: Outros Períodos: 01/02/91 a 14/02/91; 19/06/91 a 20/07/91 e 29/07/95 a 17/09/95. Consta das Tábuas das Marés					

Código BNDO: 30810

Figura III-4 – Constantes harmônicas para o terminal portuário de Sergipe.

Fonte: FEMAR (2002).

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

Nome da Estação :		CABEÇO – SE			
Localização :		Na Barra do Rio São Francisco, em frente ao Farol.			
Organ. Responsável :		INPH / DHN			
Latitude :		10° 30,2' S	Longitude :		36° 24,0' W
Período Analisado :		06/04/81 a 12/05/81	Nº de Componentes :		82
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco.			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		IV H 21 min	Nível Médio (Zo):		99 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		176 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		134 cm acima do NR
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		22 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		63 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	10,1	049
Ssa	-	-	N ₂	16,8	074
Mm	3,7	196	NU ₂	3,2	077
Mf	-	-	M ₂	56,2	102
MTM	3,2	050	L ₂	7,6	123
Msf	1,4	169	T ₂	1,2	127
Q ₁	1,3	021	S ₂	20,5	129
O ₁	9,4	125	K ₂	5,6	131
M ₁	2,1	200	MO ₃	3,3	140
P ₁	1,0	221	M ₃	1,6	264
K ₁	3,2	229	MK ₃	2,4	265
J ₁	1,8	074	MN ₄	1,8	115
OO ₁	2,4	320	M ₄	2,3	148
MNS ₂	1,9	113	SN ₄	1,0	051
2N ₂	2,2	045	MS ₄	1,5	158
Referências de Nível:		NR localizada no 9º degrau de baixo para cima da escada do farol São Francisco do Norte.			
Obs:		Não há referências a outros períodos.			

Código BNDO: 30800

Figura III-5 – Constantes harmônicas para Cabeço/SE.

Fonte: FEMAR (2002).

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

Nome da Estação :	PLATAFORMA PCM - 1 (OCEÂNICA)				
Localização :	Próximo a Aracaju - SE				
Organ. Responsável :	INPH / DHN				
Latitude :	11° 00,0' S		Longitude :	36 ° 59,6' W	
Período Analisado :	15/11/80 a 16/12/80		N° de Componentes :	72	
Análise Harmônica :	Método Almirante Santos Franco				
Classificação :	Maré Semidiurna.				
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)	III H 42 min		Nível Médio (Zo):	124 cm	acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :	221 cm		Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :	160 cm	acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :	26 cm		Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :	88 cm	acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) . graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) . graus (°)
Sa	-	-	MU2	0,4	125
Ssa	-	-	N2	17,5	064
Mm	3,8	014	NU2	3,3	068
Mf	-	-	M2	66,8	090
MTM	0,4	274	L2	3,6	195
Msf	6,4	215	T2	1,8	098
Q1	2,7	110	S2	30,9	098
O1	5,7	124	K2	8,4	099
M1	0,3	147	MO3	1,2	136
P1	1,4	197	M3	0,8	056
K1	4,1	203	MK3	0,5	129
J1	2,2	010	MN4	0,4	152
OO1	1,4	341	M4	0,9	120
MNS2	4,2	337	SN4	0,3	203
2N2	2,3	038	MS4	1,0	266
Referências de Nível: Não foram instaladas RNs.					
Obs: Plataforma da Petrobras - Campo marítimo de Aracaju (não está mais em posição).					

Código BNDO: 30823

Figura III-6 – Constantes harmônicas para a Plataforma PCM-1.

Fonte: FEMAR (2002).

Para avaliar a similaridade entre os dados previstos e os modelados foram utilizados o Coeficiente de Ajuste (NRMS) e o Skill (S).

O NRMS pode ser utilizado para qualquer série escalar (nível do mar e componentes de velocidade, por exemplo) e é baseado em Hess & Bosley (1992), cuja formulação é frequentemente utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries com periodicidades relativamente definidas. O coeficiente é definido pela normalização do erro quadrático médio (Equações 3 e 4) e o resultado aparece em percentagem (quanto maior a percentagem, maior o erro).

$$NRMS = \frac{RMS}{d_{mod \text{ (max)}} - d_{mod \text{ (min)}}} \quad (3)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{med} - d_{mod})^2}{n}} \quad (4)$$

, onde d_{med} representa o dado medido, d_{mod} o dado simulado, $d_{mod \text{ (max)}}$ é o valor máximo do dado medido, $d_{mod \text{ (min)}}$ é o valor mínimo do dado medido e n o número de medições.

O S é um método estatístico desenvolvido por Wilmott (1981) e descrito por Warner *et al.* (2005) e Li *et al.* (2005), que é expressa pela Equação 5. Este método estabelece comparação entre os dados medidos e os simulados (modelados), apresentando coeficientes finais que variam entre 0 e 1 (onde valores próximos de 1 representam um ajuste perfeito e 0 total discordância).

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |d_{mod} - d_{med}|^2}{\sum_{i=1}^n (|d_{mod} - \bar{d}_{med}| + |d_{med} - \bar{d}_{med}|)^2} \quad (5)$$

, onde d_{med} representa o dado medido, d_{mod} o dado simulado e n o número de medições.

III.4 MODELAGEM DO CAMPO PRÓXIMO

Alguns dos principais modelos matemáticos numéricos nos dias atuais para o campo próximo são: UM3, RSB (NRFIELD) e CORMIX. Segundo resultados obtidos por Carvalho *et al.* (2002) e Roberts & Tian (2004), UM3 e RSB apresentaram resultados melhores do que o CORMIX, para diluição, quando comparados a observações de campo. Além disto, o UM3 apresenta as seguintes características:

- Perfis verticais de velocidade, temperatura e salinidade variáveis no tempo: o UM3 varia seus campos tridimensionais, fazendo com que em regiões onde as propriedades variam consideravelmente com o tempo (regiões costeiras, por exemplo) sejam melhor caracterizadas;
- Profundidade local variável com o tempo: o UM3 varia a profundidade de acordo com o tempo, simulando desta forma oscilações do nível do mar, caracterizando regiões costeiras, influenciadas pela maré, de forma mais realista.

Neste trabalho foi utilizado o modelo, UM3. Este modelo é parte integrante do software Visual Plumes, recomendado pela Agência Ambiental Norte-Americana (EPA).

UM3 é um modelo lagrangeano e tridimensional. As equações de conservação de massa, momentum e energia são resolvidas em espaços de tempo, fornecendo a diluição ao longo da trajetória do jato. Para determinar o desenvolvimento de cada elemento, UM3 utiliza a hipótese do entranhamento de Taylor e a hipótese da área projetada por entranhamento (Frick, 1984). Os fluxos começam com jatos flutuantes circulares emitidos pelo difusor, podendo haver fusão de dois ou mais jatos. A saída do modelo consiste em características do jato ao longo de sua trajetória, tal como a diluição da linha central, a largura, e a altura da linha central. A descrição matemática dos processos envolvidos é apresentada no Anexo B.

As características do efluentes simulado estão apresentados no item **II.2**

III.5 MODELAGEM DO CAMPO DISTANTE

Para simular o campo distante, se utilizou o módulo de qualidade de água da suíte computacional desenvolvida pela WL | Delft Hydraulics, Holanda, denominado DELFT3D – WAQ.

O DELFT3D-WAQ resolve as equações de advecção-difusão incluindo termos de reações físicas, bioquímicas e de processos biológicos. Este módulo utiliza-se das condições hidrodinâmicas (velocidades, elevação da superfície livre, densidade, salinidade, temperatura, viscosidade e difusividade turbulentas) calculadas pelo módulo hidrodinâmico (DELFT3D-FLOW), utilizando-se inclusive a mesma grade numérica.

Um número amplo de substâncias pode ser modelado, incluindo:

- substâncias conservativas (salinidade, clorinidade e traçadores);
- substâncias com decaimentos (traçadores);
- sedimentos em suspensão;
- temperatura;
- nutrientes (amônia, nitrato, fosfato e silicato);
- material orgânico (subdividido em carbono, nitrogênio, fósforo e silicato);
- oxigênio dissolvido;
- demanda Biológica e Química de Oxigênio (DBO e DQO);
- algas;
- bactérias;
- metais pesados;
- micro poluentes orgânicos.

Os termos de reações físicas, bioquímicas e de processos biológicos inclusos nas bibliotecas do DELFT3D-WAQ são:

- sedimentação e ressuspensão;
- re-aeração do oxigênio;
- crescimento e mortalidade de algas;
- mineralização de substâncias orgânicas;
- (de)nitrificação;
- absorção de metais pesados;
- volatilização de micro poluentes orgânicos;
- entre outros.

As equações principais que descrevem este modelo estão disponíveis no Anexo C.

Para a interface entre os modelos de campo próximo e distante (seta vertical para baixo na **Figura III-1**), as principais dificuldades estão em acoplar os resultados pertinentes à carga e a geometria da pluma, previstos pelo modelo de campo próximo, à grade imposta para o modelo de campo distante, além dos efeitos dinâmicos gerados pela descarga de efluentes. A metodologia utilizada neste estudo é a descrita por Zhang & Adams (1999) e Gregório (2009).

Nesta metodologia a carga do poluente é imposta ao modelo de campo distante na profundidade de estabilização do jato (estimada pelo modelo de campo próximo). Efetivamente, esta opção assume que os efeitos dinâmicos associados ao campo próximo são negligenciados no domínio computacional do campo distante. Segundo Zhang & Adams (1999), este método subestima a propagação lateral devido à omissão da circulação gravitacional, contudo este fator é compensado, pois o espalhamento lateral é geralmente exagerado devido à difusão numérica provocada pela resolução da grade. Dentre diversas opções e hipóteses, esta foi a que simula com maior realidade este acoplamento de carga.

III.6 CENÁRIOS DE MODELAGEM

A escolha dos cenários ambientais e lançamentos nos quais foram realizadas as modelagens tiveram como premissa identificar o pior cenário real possível, adotando premissas conservativas.

De acordo com o estudo de Gregório (2009) para o emissário submarino de Santos, as diluições do efluente no corpo receptor foram diretamente proporcionais as intensidades das correntes: quanto maior a velocidade da corrente ambiente maior a diluição alcançada para os efluentes lançados. Isto ocorre, pois, os efluentes estão diluídos na água e, de acordo com as equações de difusão e advecção (ANEXO C), estas são proporcionais à velocidade da água, diferentemente de vazamentos de óleo por exemplo, que em contato direto com a superfície, as manchas são arrastadas pelo vento, podendo, em alguns casos, ventos extremos serem os cenários mais críticos (ventos extremos auxiliam também a evaporação de óleo).

Assim, para a Plataforma Continental da Bacia Sergipe Alagoas, os principais fenômenos que interferem nas intensidades das correntes são a maré e o vento. Na região, conforme apresentado na **Seção II.2**, a maré possui ciclo de duas marés

cheias e duas marés altas por dia, com ciclos periódicos de marés de quadratura e sizígia.

Como para o período de chuva e seca as propriedades de vento são distintas, conforme apresentado na **Seção II.2**, faz-se necessário simular estas duas estações extremas do ano, cada uma com suas características.

Para a componente vento, foram analisadas as intensidades médias do vento durante as estações do ano. A **Figura III-7** mostra as intensidades médias dos ventos em Aracajú entre 1997 e 2016 – conjunto de dados descritos na **Seção II.2**. Nesta figura é possível identificar que o ano de 2007 registrou os menores valores médios para o período chuvoso e seco. Assim, as simulações de período chuvoso e seco foram rodadas para este ano, proporcionando assim o pior cenário possível para a diluição dos efluentes do Emissário.

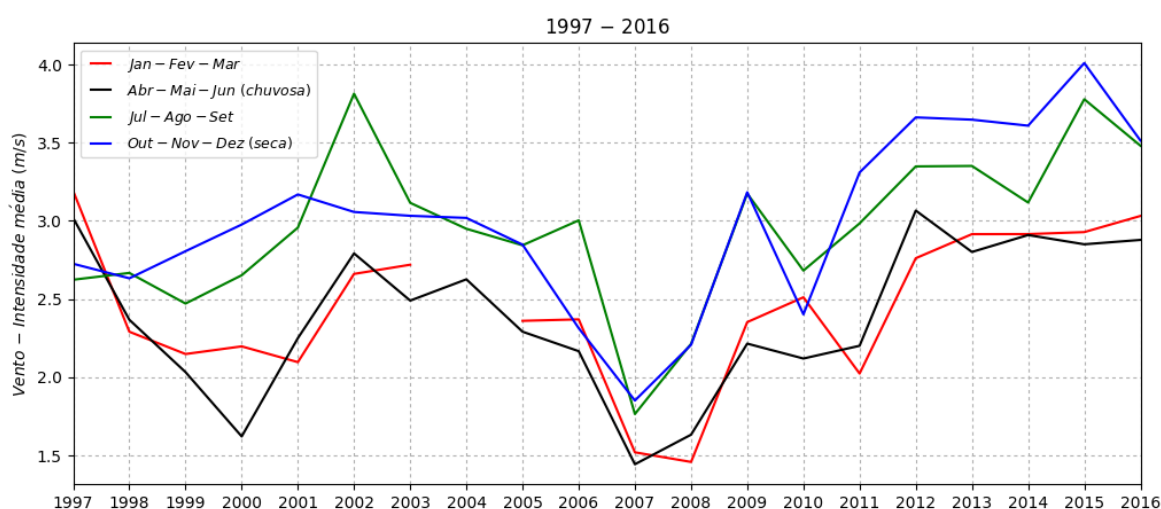


Figura III-7 - Intensidade média dos ventos entre 1997-2016 em Aracajú/SE.

Ventos - Aracaju - 2007

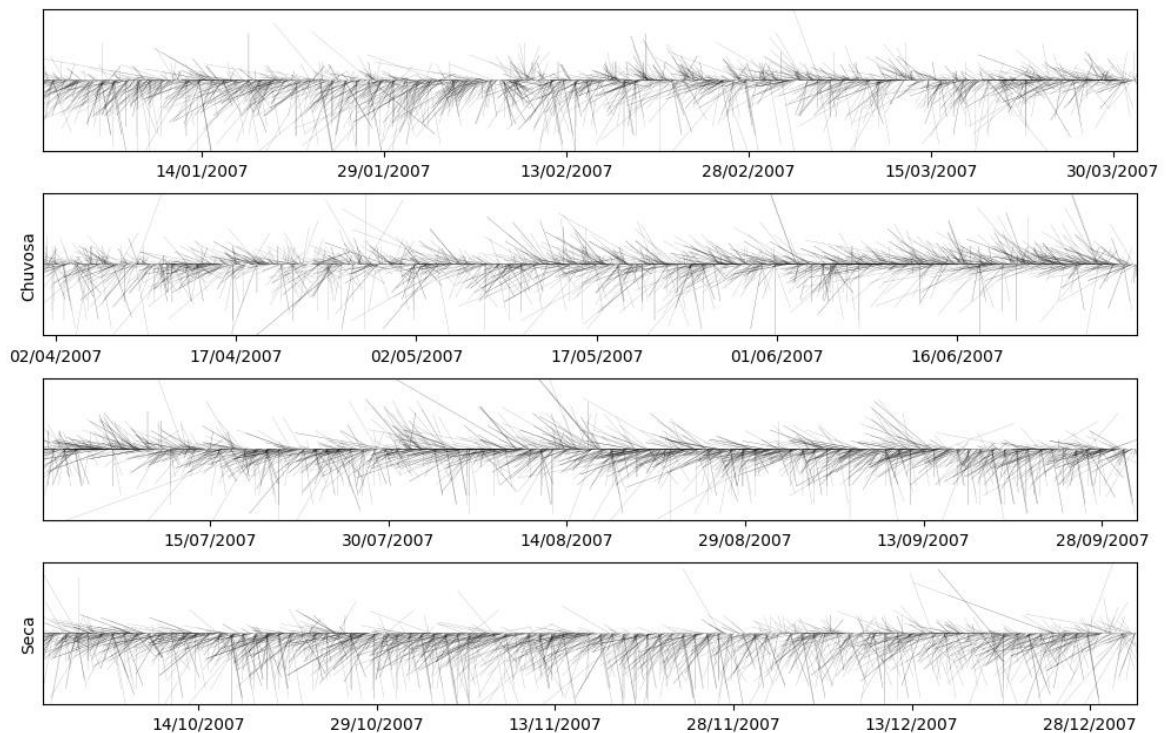


Figura III-8 – Ventos para o ano de 2007 em Aracajú, de acordo com o Metar. Os painéis representam os trimestres, sendo o segundo, de cima para baixo, o conjunto de dados utilizado para a simulação do período chuvoso e o painel inferior os dados utilizados para a simulação do período seco.

A **Tabela III.6-1** sintetiza as informações dos cenários dos períodos chuvoso e seco.

Tabela III.6-1 - Cenários de modelagem considerados representando os piores cenários reais possíveis para época chuvosa e seca.

Cenário	Intensidade do vento	Marés	Período considerado	Vazão do efluente	Forma de lançamento
Seca	Estação com a menor intensidade média histórica – proporcionando as menores intensidades de correntes e consequentemente menores diluições.	Ciclos completos de sizígia e quadratura	01/04/2007 a 30/06/2007	5600 m ³ /h	Contínua durante os 3 meses de simulação
Chuvosa			01/10/2007 a 31/12/2007		

IV.RESULTADOS

Neste capítulo inicialmente é avaliada a modelagem hidrodinâmica utilizada, validando os dados obtidos com medições reais. Na sequência são apresentados os resultados da diluição dos efluentes do emissário.

IV.1 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A **Figura IV-1** e a **Figura IV-2** mostram os resultados hidrodinâmicos para as simulações dos cenários de estação chuvosa e seca, respectivamente.

Em ambos os cenários é possível identificar a variação do nível do mar, com amplitude máxima aproximada de 2,3 m, com períodos bem demarcados de sizígia e quadratura, além de duas baixa-mares e preamares num período de 24h, o que caracteriza a região com regime de maré semi-diurna, conforme descrito no **item II.2** deste estudo. As correntes apresentaram baixa intensidade, na ordem de 10 cm/s, com maiores intensidades registradas na simulação seca – condizentes com valores obtidos por Parente (2016). As direções das correntes foram predominantemente dirigidas pelo vento, com alterações das intensidades de acordo com os ciclos de maré. Assim como o esperado, as variações foram maiores nos períodos de maré de sizígia (maiores amplitudes de maré) e as correntes mais intensas na simulação de estação seca devido às maiores intensidades dos ventos. A **Tabela IV.1-1** abaixo mostra as estatísticas básicas das propriedades hidrodinâmicas obtidas.

Tabela IV.1-1 – Estatísticas básicas das propriedades hidrodinâmicas obtidas nas simulações.

Cenário		Intensidade do Vento (m/s)	Nível do mar (m)	Corrente verticalmente integrada (cm/s)
Seca	Mínimo	0,00	-1,12	0,25
	Médio	1,79	0,00	4,21
	Máximo	15,5	1,16	40,65
Chuvosa	Mínimo	0,00	-1,15	0,05
	Médio	1,41	0,00	2,76
	Máximo	10,28	1,21	7,86

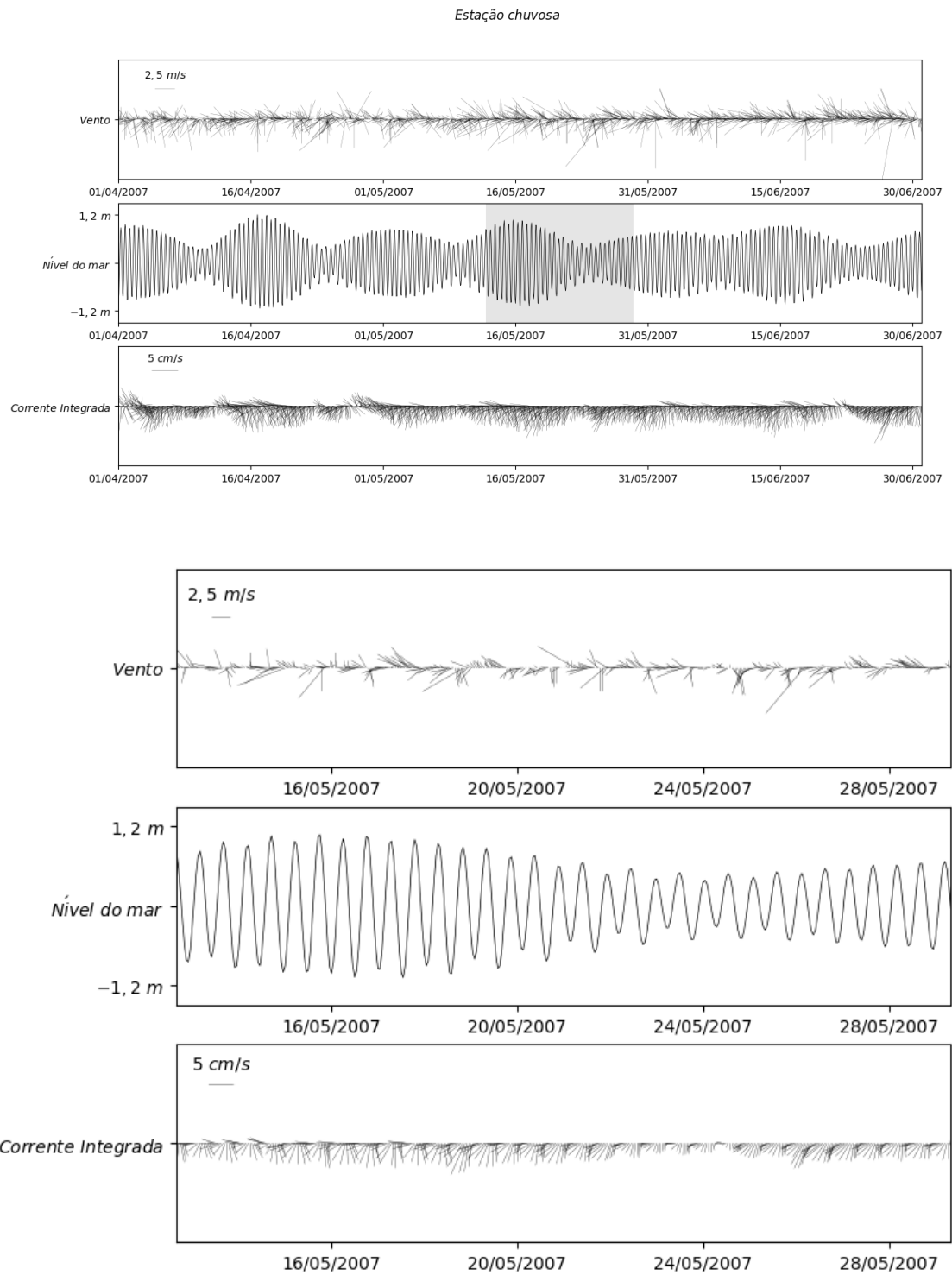


Figura IV-1 – Resultados hidrodinâmicos para a simulação do período chuvoso no local de lançamento do emissário. Nos painéis superiores, séries completas modeladas, com ventos, nível do mar e correntes verticalmente integrada. Os painéis inferiores mostram detalhe no período destacado em cinza no segundo painel, de cima para baixo.

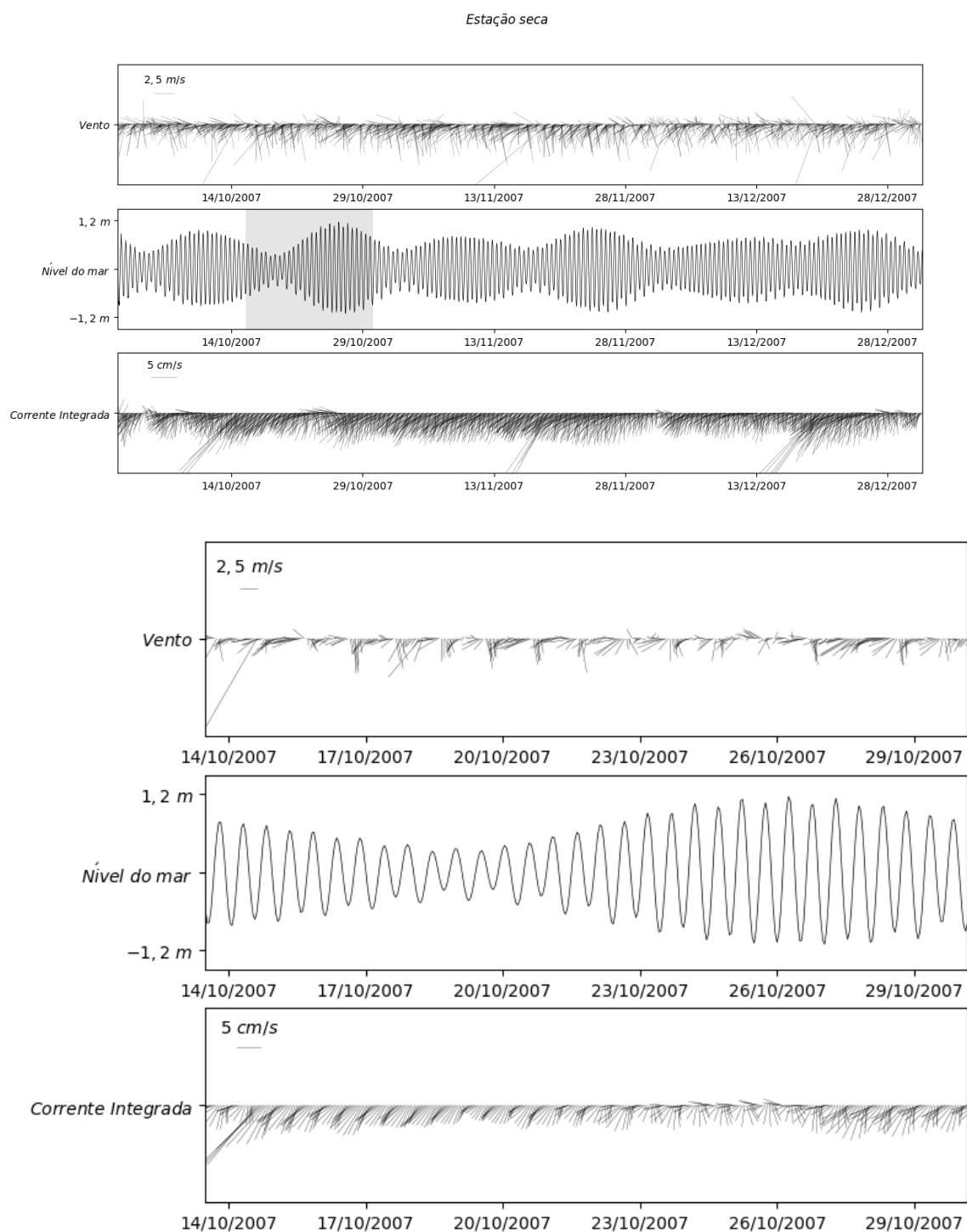


Figura IV-2 – Resultados hidrodinâmicos para a simulação do período seco no local de lançamento do emissário. Nos painéis superiores, séries completas modeladas, com ventos, nível do mar e correntes verticalmente integrada. Os painéis inferiores mostram detalhe no período destacado em cinza no segundo painel, de cima para baixo.

Para analisar o desempenho do modelo hidrodinâmico são comparados os níveis do mar modelados nas simulações da estação chuvosa e seca. Assim, a **Figura IV-3** e a **Figura IV-4** mostram, comparativamente, os níveis modelados e previstos para as simulações de estação seca e chuvosa, respectivamente.

A análise comparativa visual dos níveis modelado e previstos indica uma boa correlação entre as duas séries. De modo a quantificar esta semelhança, foram aplicados os parâmetros estatísticos NRMS e Skill, descritos na **Seção II.3.4**. Os valores obtidos estão apresentados na **Tabela IV.1-2** abaixo.

Tabela IV.1-2 - Parâmetros estatístico de comparação entre o nível do mar modelado e o previsto.

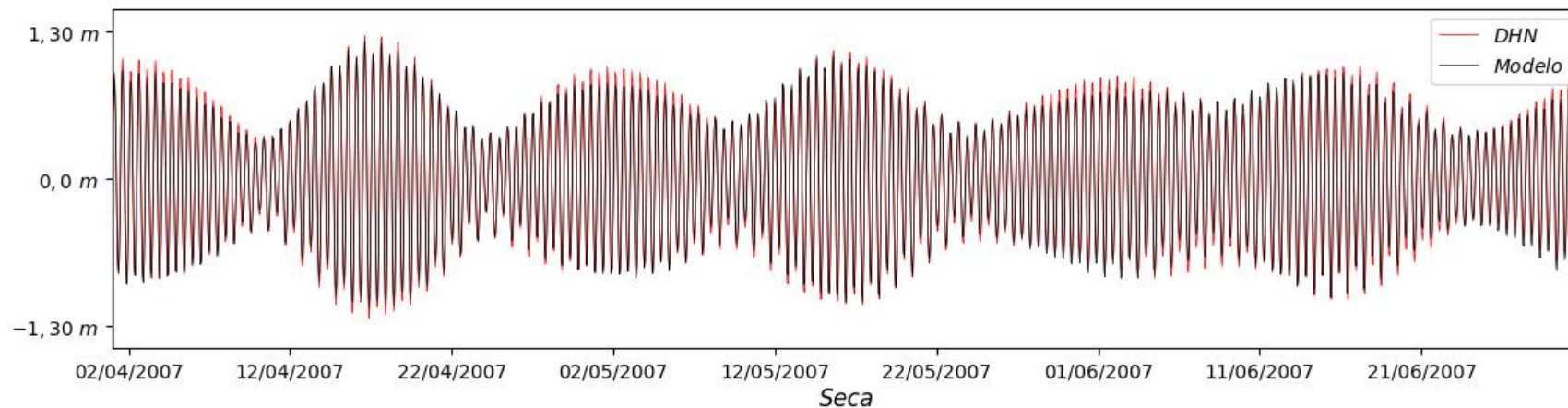
Local	Estação Seca	Estação chuvosa
Skill		
Terminal Portuário de Sergipe	0,996	0,996
Cabeço	0,976	0,976
Plataforma PCM-1	0,972	0,971
NRMS		
Terminal Portuário de Sergipe	0,030	0,029
Cabeço	0,065	0,063
Plataforma PCM-1	0,077	0,076

Os valores de Skill, tanto para estação seca quanto chuvosa, foram extremamente elevados, com valor mínimo de 0,971 (estação chuvosa na Plataforma PCM-1) e máximo de 0,996 (estações seca e chuvosa no Terminal Portuário de Sergipe), indicando uma ótima correlação entre as séries – a correlação total é indicada pelo valor 1. Os valores de NRMS, que indicam o erro médio, também mostraram excelentes qualificações, com valor mínimo de 2,9% na estação chuvosa no Terminal Portuário de Sergipe e valor máximo de 7,7% na estação seca na Plataforma PCM-1.

Autores como NOAA (2011), Medeiros *et al.* (2013), Huang (2011) que tiveram valores de Skill para o nível do mar desde 0,7 a 0,9 e valores de NRMS de 0,1 (10%) a 0,2 (20%), classificaram os resultados como plenamente aceitáveis, podendo desta forma atestar os valores aqui obtido como sendo excelentes.

Terminal Portuário de Sergipe

Chuvosa



Seca

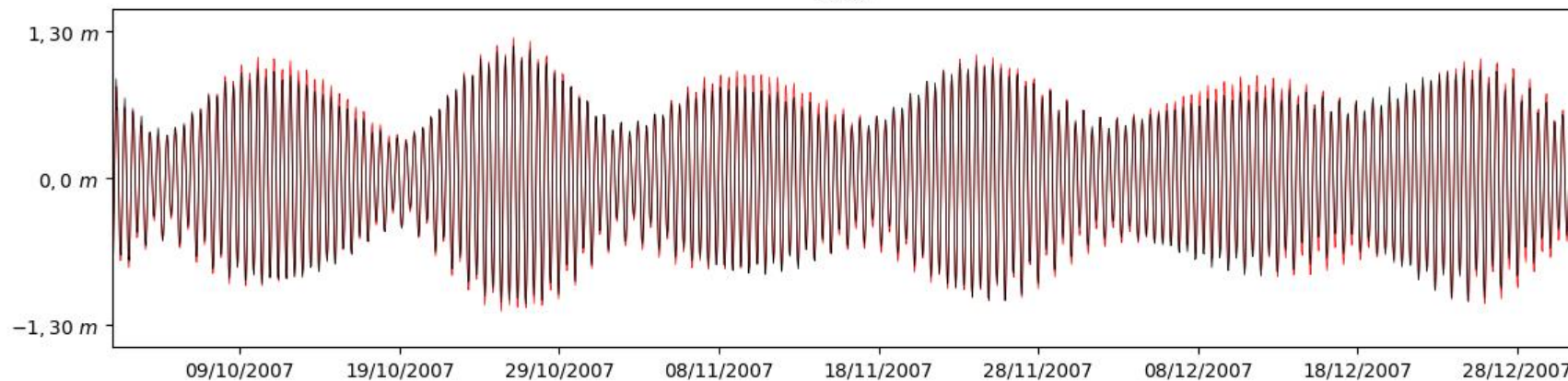


Figura IV-3 - Comparação do nível do mar modelado com a previsão para o Terminal Portuário de Sergipe. O painel superior mostra a comparação para a simulação do período chuvoso e o painel inferior para a simulação do período de seca.

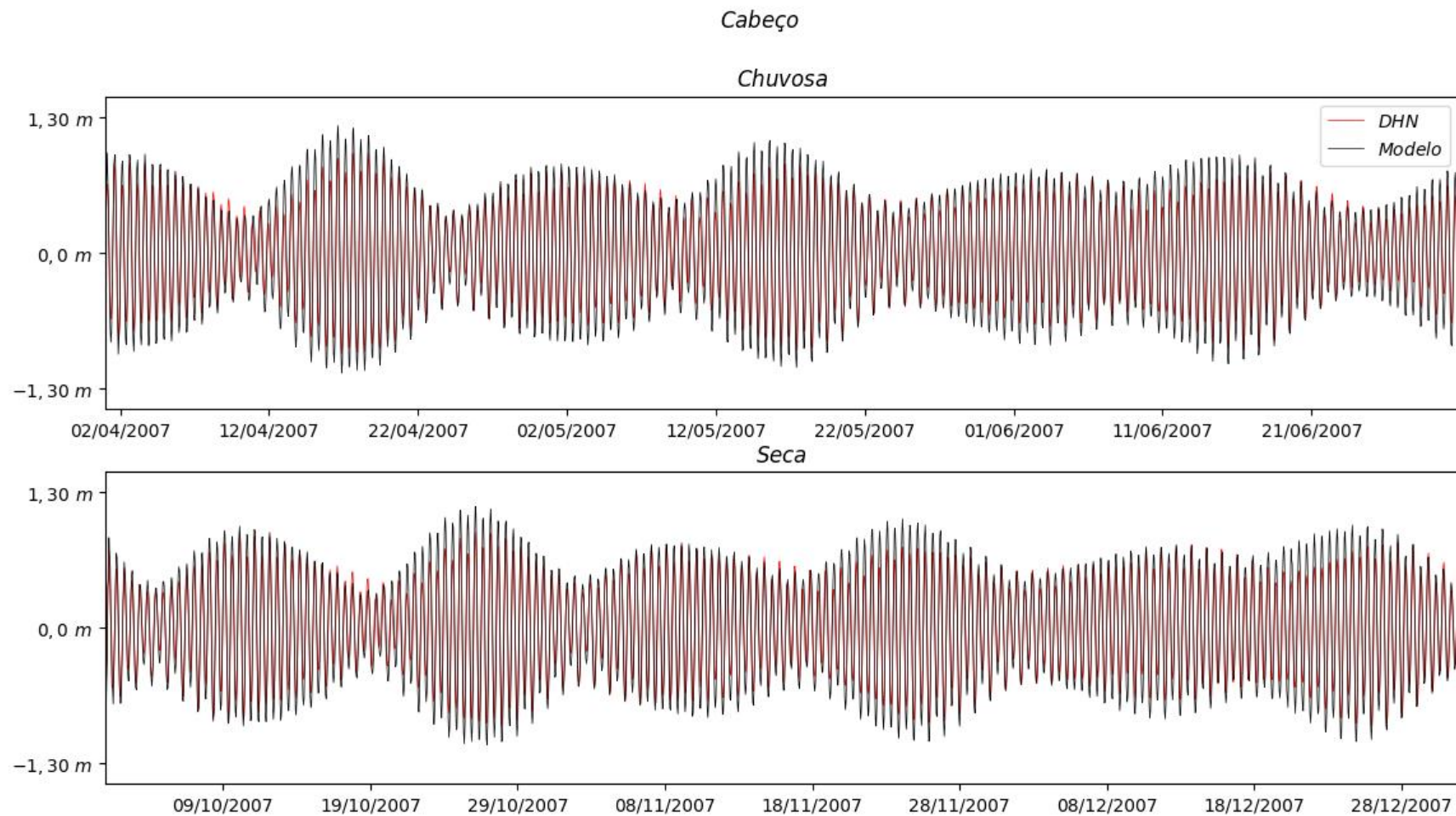


Figura IV-4 - Comparação do nível do mar modelado com a previsão para o Cabeço. O painel superior mostra a comparação para a simulação do período chuvoso e o painel inferior para a simulação do período de seca.

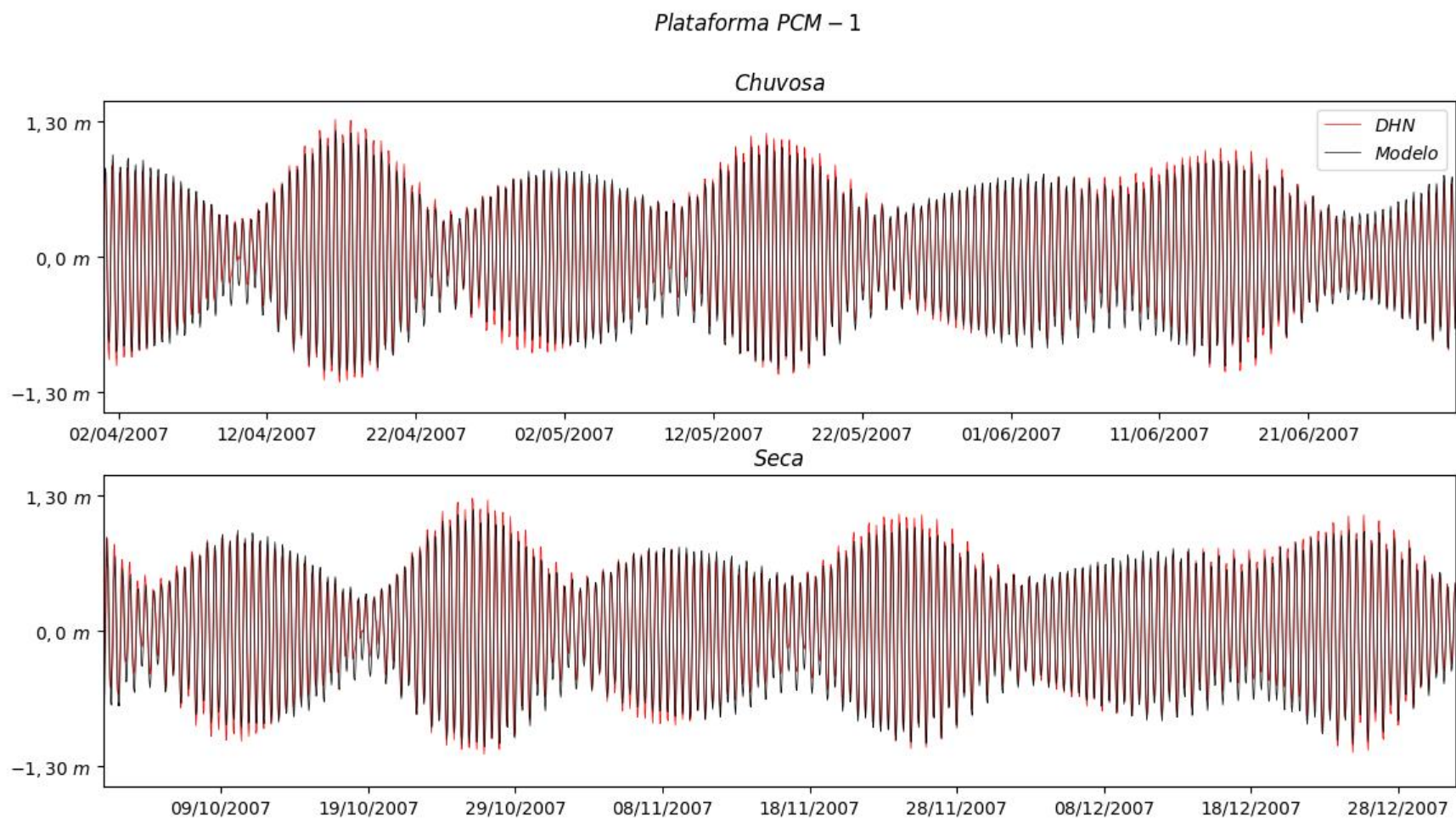


Figura IV-5 - Comparação do nível do mar modelado com a previsão para a Plataforma PCM-1. O painel superior mostra a comparação para a simulação do período chuvoso e o painel inferior para a simulação do período de seca.

IV.2 MODELAGEM DA DISPERSÃO DOS EFLUENTES – CAMPO PRÓXIMO

IV.2.1 Estação Seca

A **Figura 6** mostra os perfis verticais do diâmetro e salinidade dos jatos gerados ao longo da simulação para o período de seca – para um difusor. Foram plotados perfis horários, com total de 2208 perfis para os três meses de simulação. Nota-se que o diâmetro do jato variou praticamente de forma linear com profundidade. Devido a variação de maré no local, o diâmetro mínimo do jato se encontra entre as profundidades de 2,5 e 4,8 m. Os diâmetros máximos foram obtidos na superfície, variando de 1,38 m a 3,12 m. Já para a salinidade, a maior variação ocorre entre os 2 e 5 m de profundidade, onde podem ser encontrados valores entre 37 e 48. Na superfície os valores variaram entre 34,1 a 36,6. Os jatos modelados praticamente não tiveram deslocamento horizontal, apresentando forma cônica no ponto de lançamento. A **Figura 7** mostra as variações da salinidade e do diâmetro do jato ao final do campo próximo.

Estação Seca

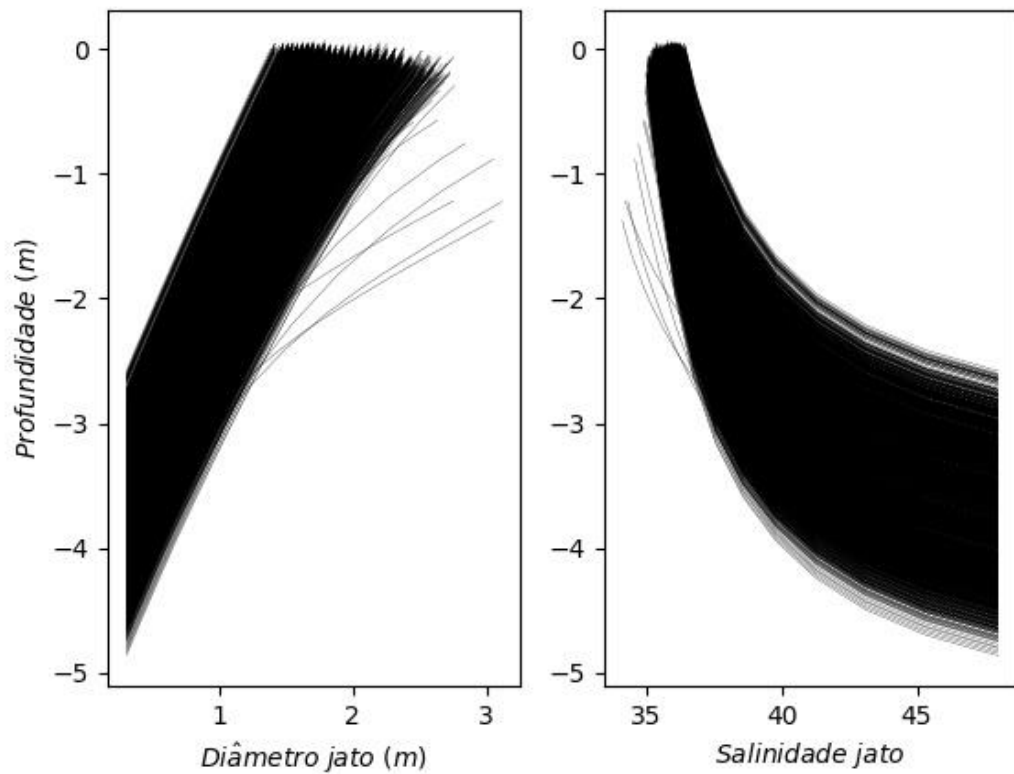


Figura 6 – Perfis verticais do diâmetro (esquerda) e da salinidade do jato (direita) de cada difusor, para as simulações da estação seca.

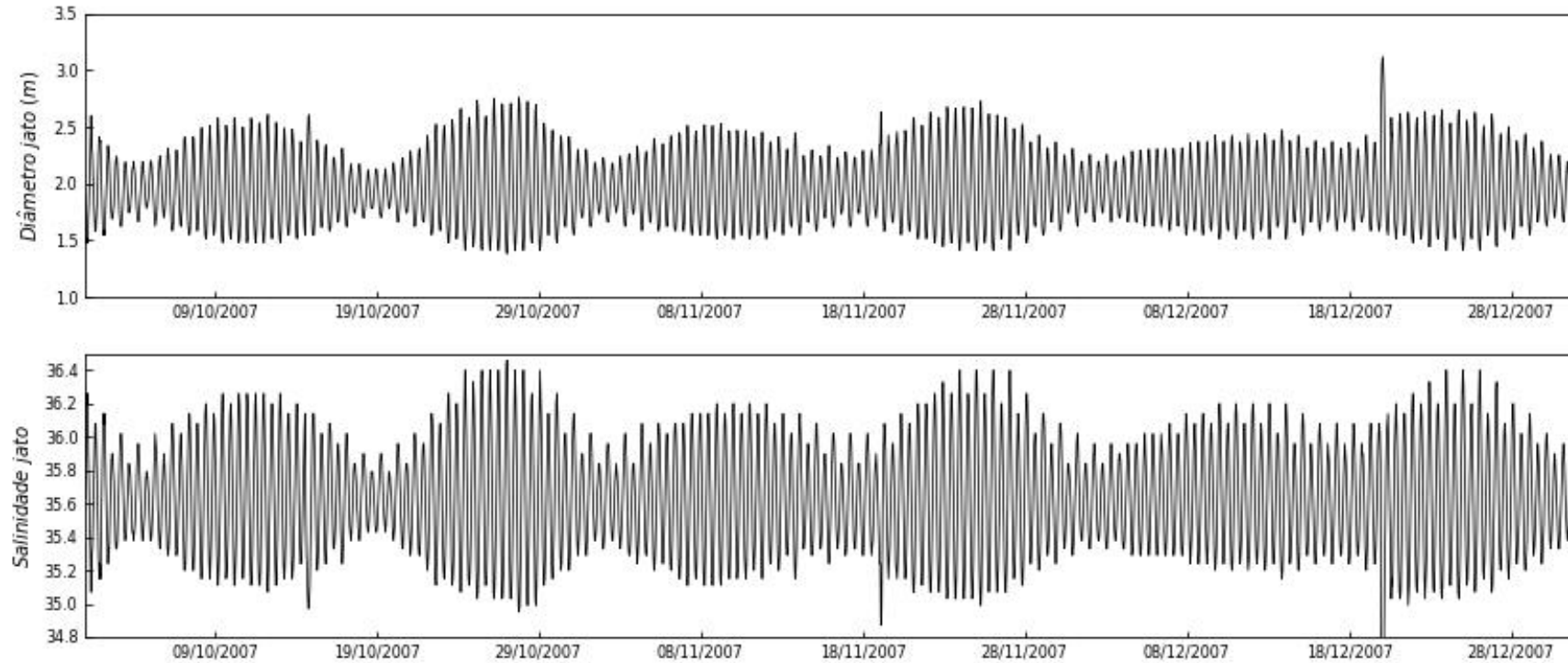
Estação Seca

Figura 7 – O painel superior mostra a variação do diâmetro do jato ao final do campo próximo – para cada difusor. O painel inferior mostra a variação da salinidade do jato ao final do campo próximo – para cada difusor. Variação ao longo dos três meses de simulação da estação seca.

De forma mostrar tridimensionalmente o jato gerado do ponto de lançamento até o final do campo próximo, nas **Figura 8** a **Figura 10** são apresentadas as plumas, na simulação da estação seca, no instante em que o jato teve o maior diâmetro no final do campo próximo (3,12 m). Nesta Figura é possível identificar a formação de um jato por toda a coluna de água, com pouco deslocamento horizontal acima dos 3 m de profundidade.

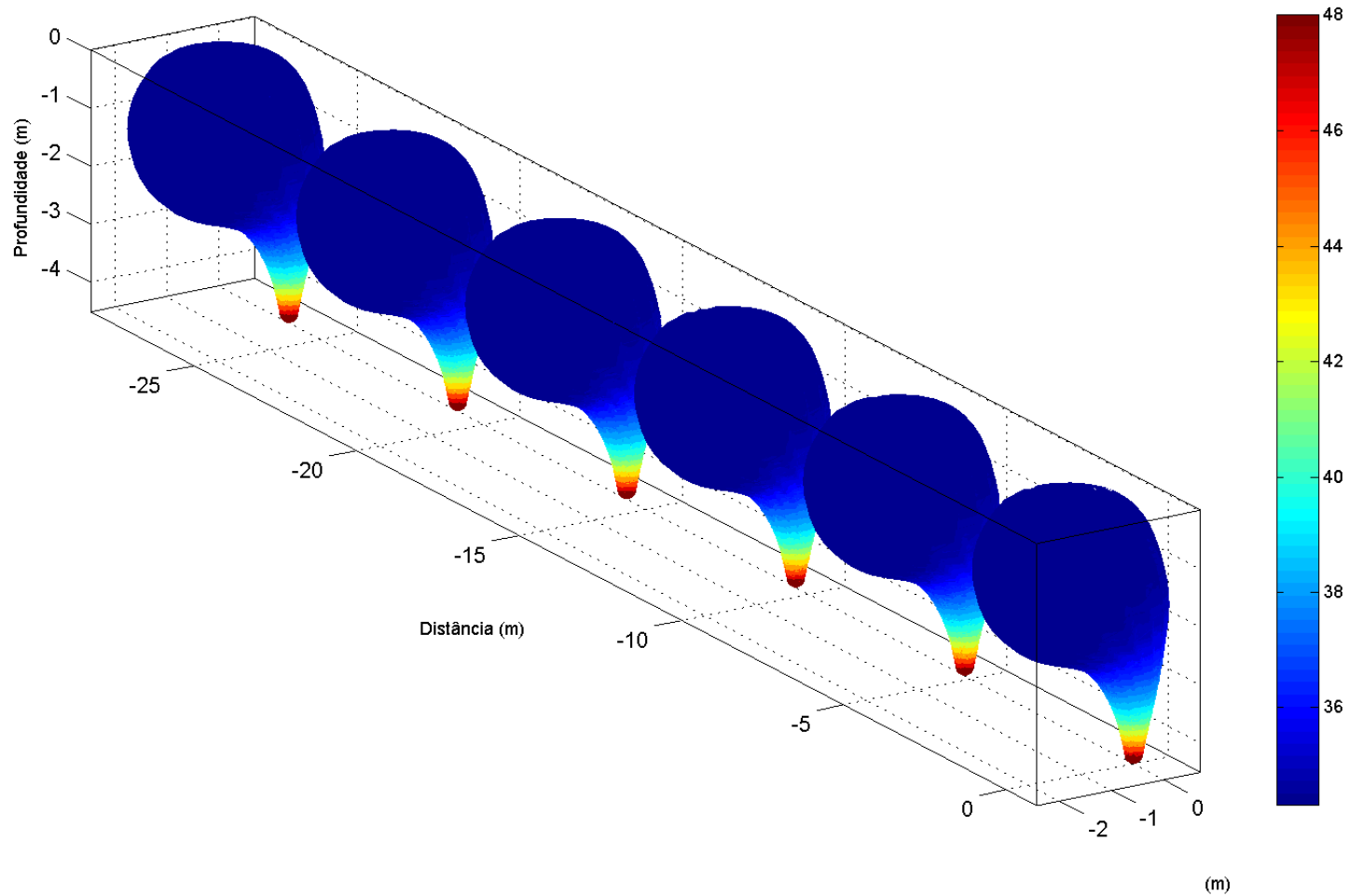


Figura 8 - Representação tridimensional do instante com maior diâmetro ao final do campo próximo obtido em período de seca. As cores representam a salinidade dos jatos.

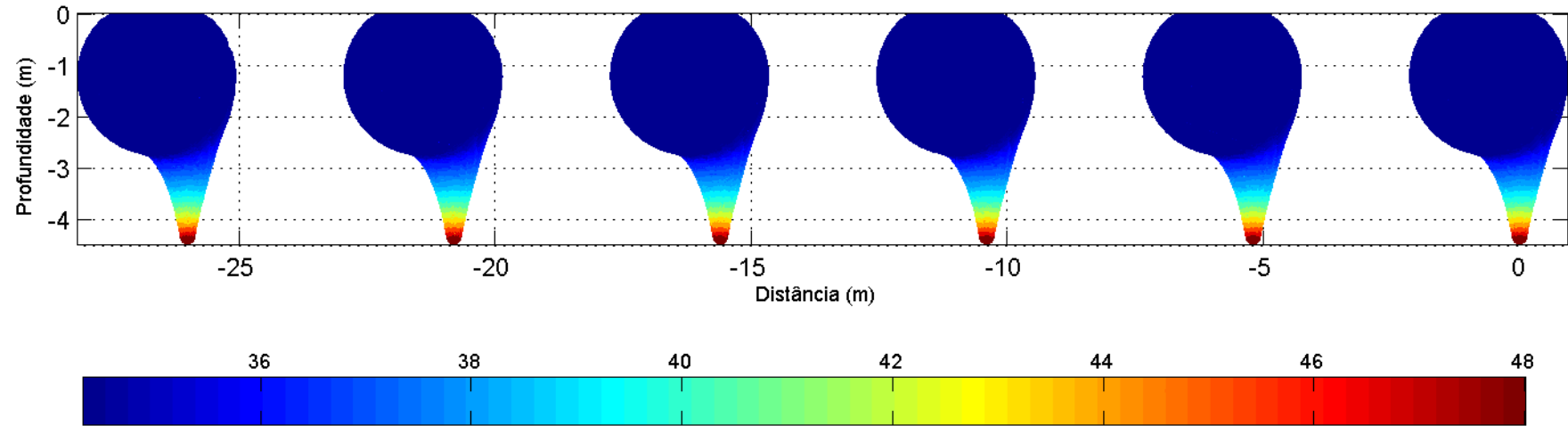


Figura 28 – Corte longitudinal do instante com maior diâmetro ao final do campo próximo obtido em período de seca. As cores representam a salinidade dos jatos.

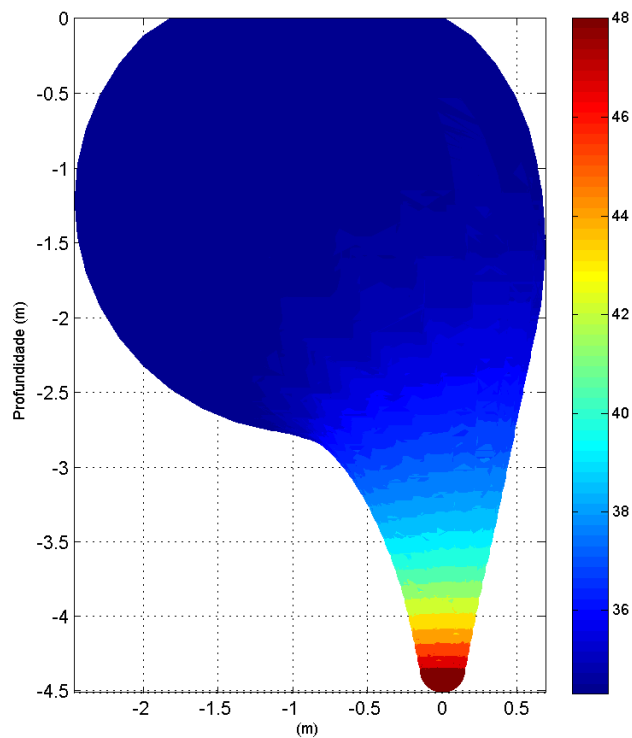


Figura 10 – Corte transversal do instante com maior diâmetro ao final do campo próximo obtido em período de seca. As cores representam a salinidade dos jatos.

IV.2.2 Estação Chuvosa

A **Figura 30** mostra os perfis verticais do diâmetro e salinidade dos jatos gerados ao longo da simulação para o período de chuva. Foram plotados perfis horários, com total de 2184 perfis para os três meses de simulação. Nota-se que o diâmetro dos jatos variaram praticamente de forma linear com profundidade. Devido a variação de maré no local, os diâmetros mínimos dos jatos (saida dos difusores) se encontram entre as profundidades de 2,5 e 4,8 m. Os diâmetros máximos foram obtidos na superfície, variando de 1,35 m a 2,68 m. Já para a salinidade, a maior variação ocorre entre os 3 e 6 m de profundidade, onde podem ser encontrados valores entre 35,6 e 48,0. Na superfície os valores variaram entre 34,9 a 36,6. Os jatos modelados praticamente não tiveram deslocamento vertical, apresentando forma cônica com origem no ponto de lançamento. A **Figura 31** mostra as variações da salinidade e do diâmetro do jato ao final do campo próximo.

Estação Chuvosa

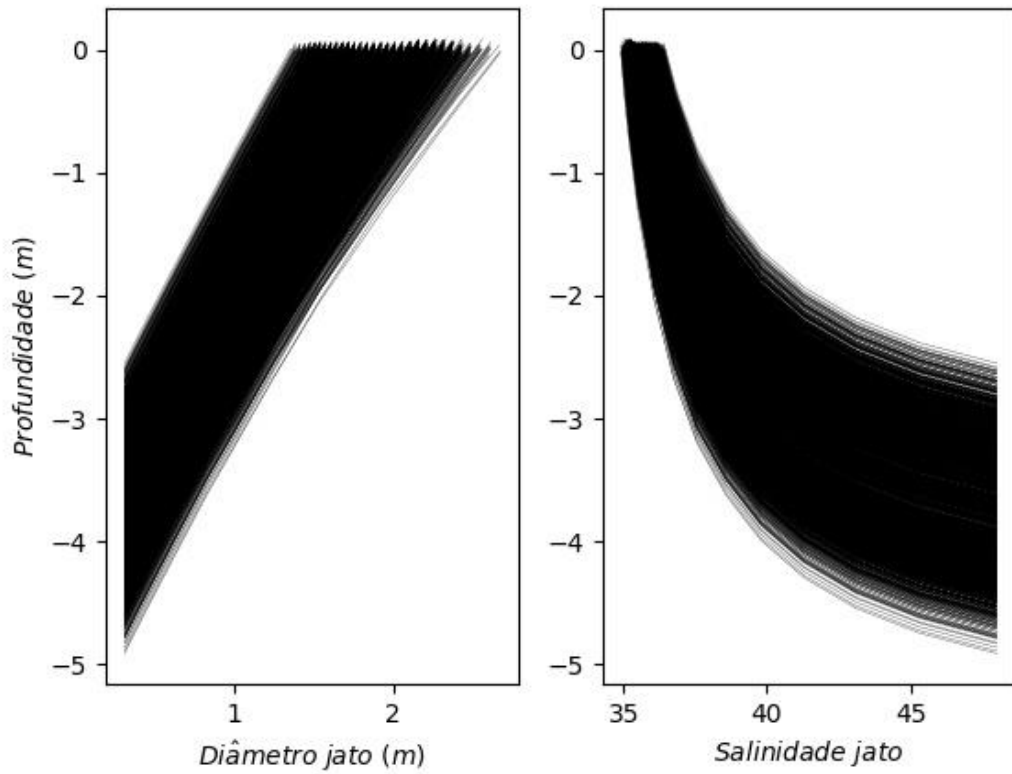


Figura 30 – Perfis verticais do diâmetro (esquerda) e da salinidade do jato (direita) para as simulações da estação chuvosa – para cada difusor.

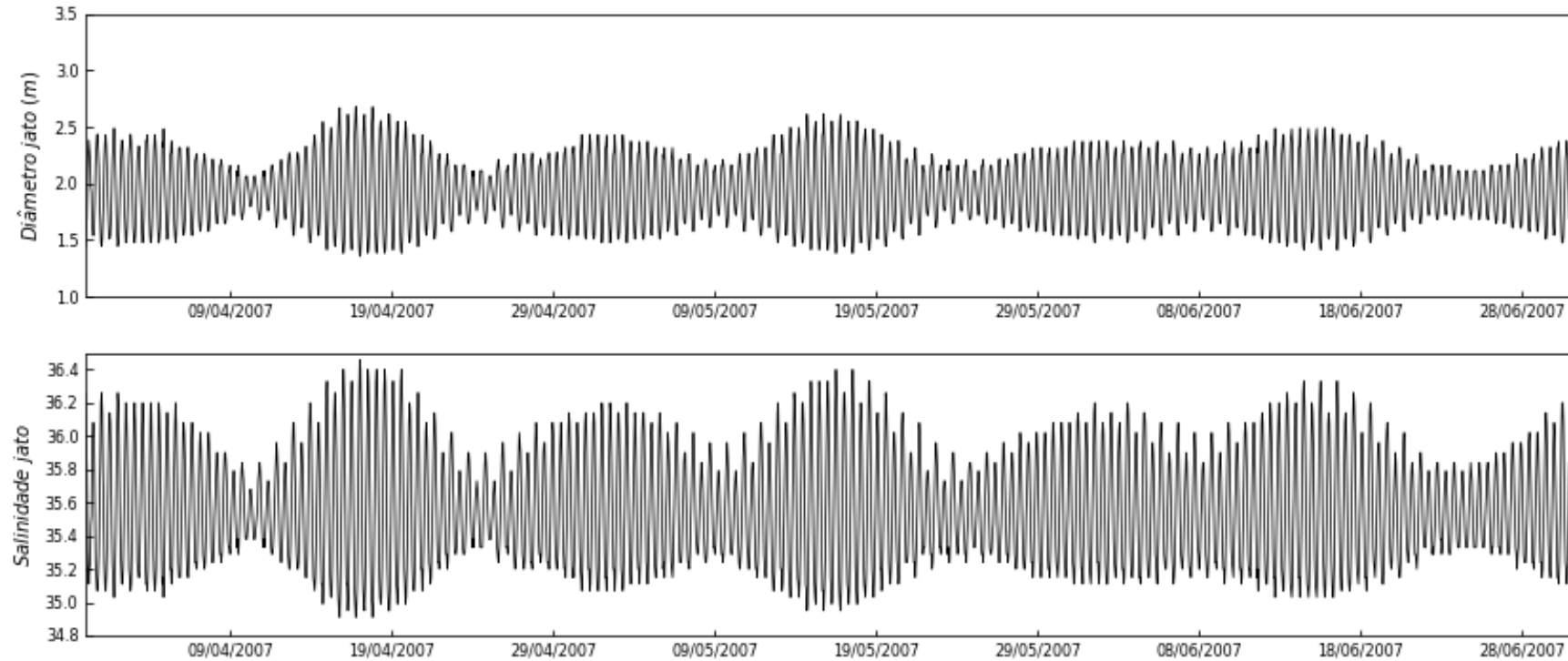
Estação Chuvosa

Figura 31 – O painel superior mostra a variação do diâmetro do jato ao final do campo próximo – para cada difusor. O painel inferior mostra a variação da salinidade do jato ao final do campo próximo. Variação ao longo dos três meses de simulação da estação chuvosa.

De forma a ilustrar tridimensionalmente o jato gerado no momento do lançamento até o final do campo próximo, da **Figura 32** a **Figura 34** é são apresentadas as plumas, na simulação da estação seca, no instante em que o jato teve o maior diâmetro no final do campo próximo (2,68 m). Nestas Figuras é possível identificar a formação de um jato por toda a coluna de água, sem deslocamento horizontal, que permanece nas proximidades do lançamento, característico de locais com baixa intensidade de corrente.

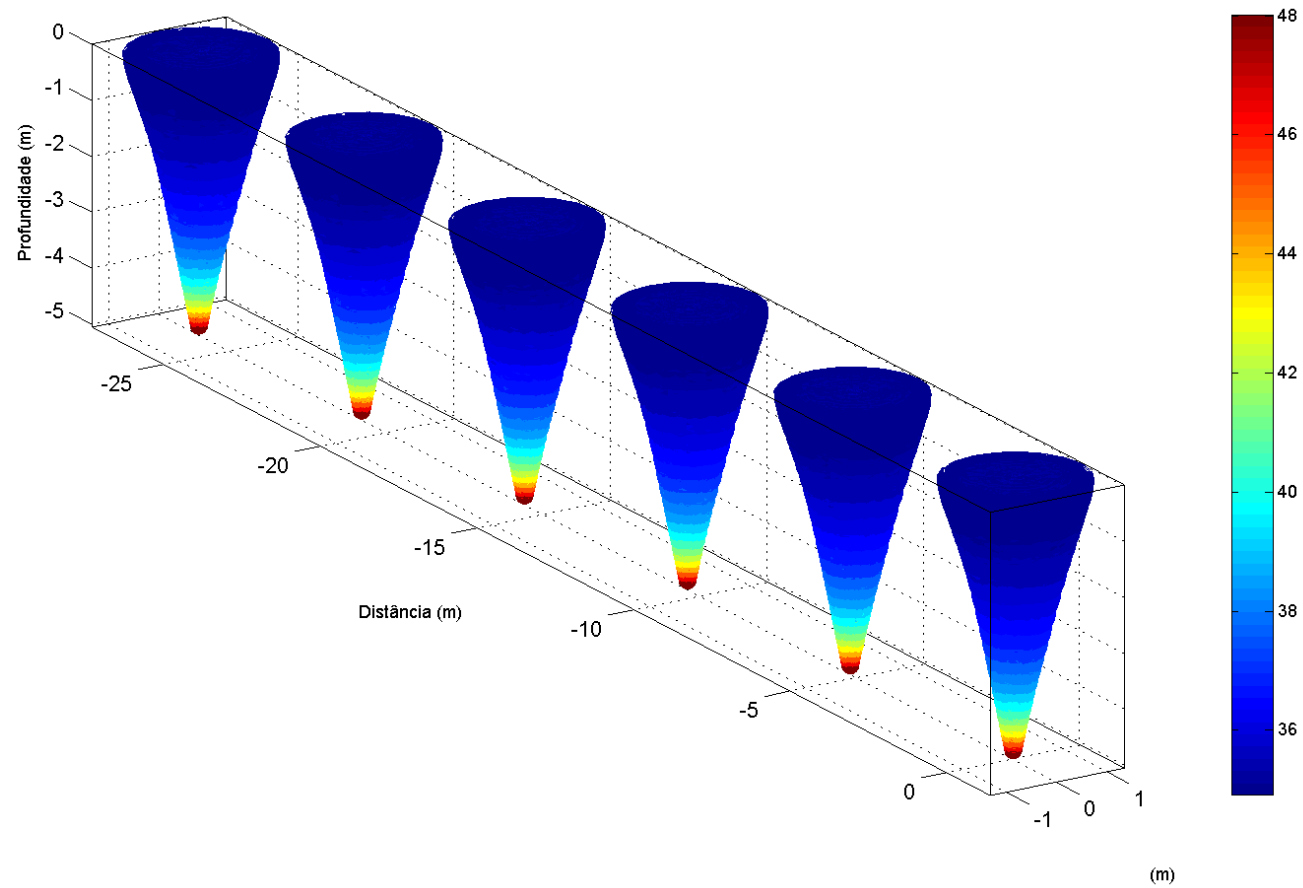


Figura 32 - Representação tridimensional do instante com maior diâmetro ao final do campo próximo obtido em período chuvoso. As cores representam a salinidade do jato.

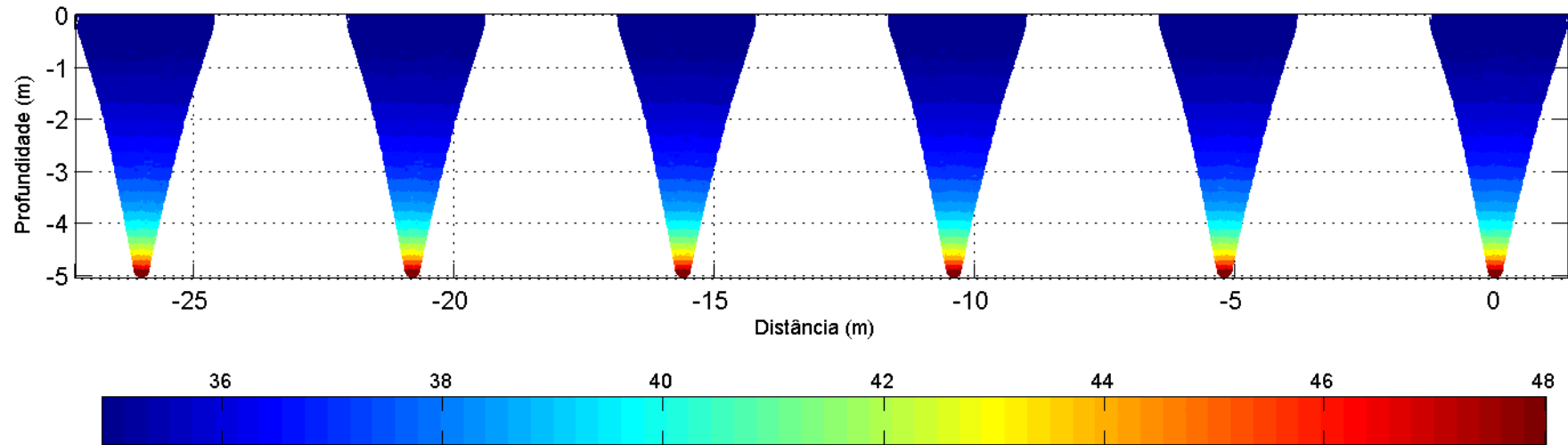


Figura 33 – Corte longitudinal do instante com maior diâmetro ao final do campo próximo obtido em período chuvoso. As cores representam a salinidade do jato.

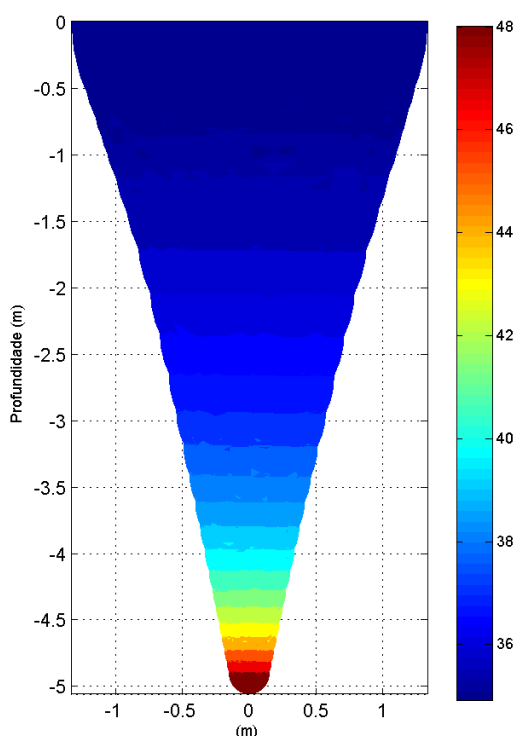


Figura 34 – Corte transversal do instante com maior diâmetro ao final do campo próximo obtido em período chuvoso. As cores representam a salinidade do jato.

IV-3. MODELAGEM DA DISPERSÃO DOS EFLUENTES – CAMPO DISTANTE

A seguir estão apresentados os resultados para a dispersão da salinidade no campo distante em ambas as simulações: período chuvoso e seco.

Os resultados são apresentados adotando-se as seguintes premissas:

- 1) Variação da salinidade ao longo do período de simulação, considerando a concentração máxima modelada ao longo da coluna d'água;
- 2) Salinidade máxima em todo o domínio modelado, considerando todo o tempo de simulação e toda a coluna de água.

A título de exemplo, esta metodologia de apresentação dos resultados é mostrada na **Figura 35**, de forma ilustrativa para um cenário fictício em outro local onde ocorre lançamento de efluentes no meio aquoso. Esta forma de apresentação dos resultados indica de forma conservativa quais as concentrações mais elevadas no corpo receptor modeladas durante todo o período de simulação.

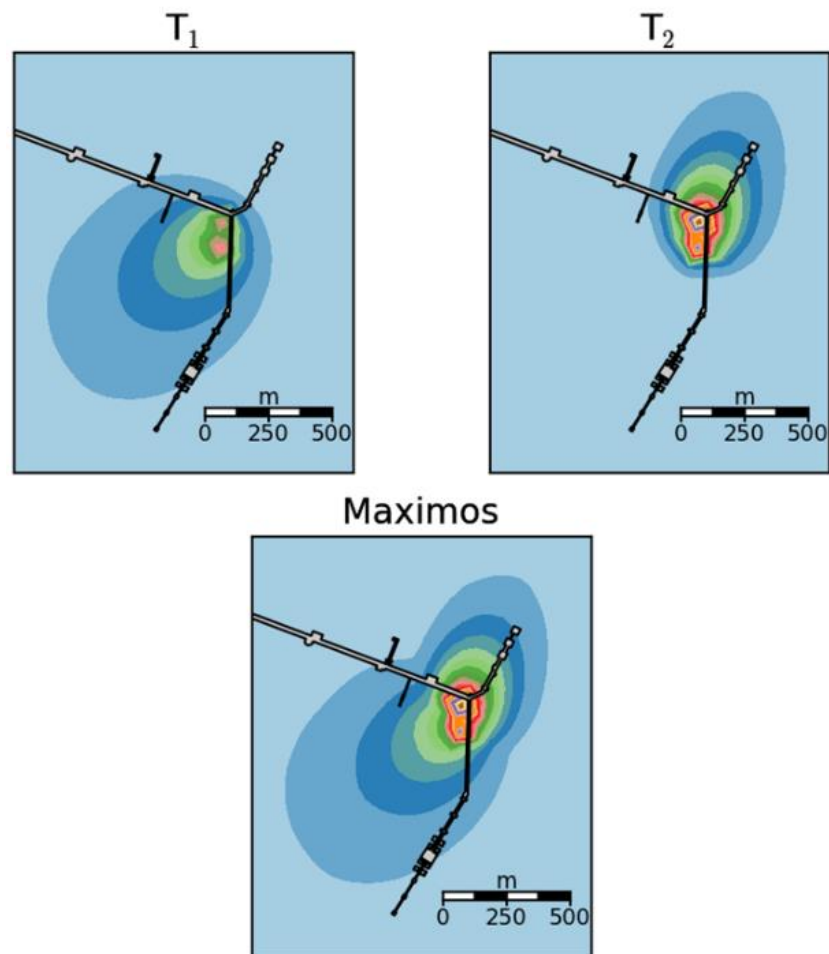


Figura 35 – Metodologia de apresentação dos resultados da salinidade no campo distante: os painéis superiores mostram a pluma de um efluente, integrada da superfície ao fundo, em dois instantes de tempo (T_1 e T_2). No painel inferior são integrados os valores máximos dos dois instantes de tempo em questão, obtendo-se desta forma a concentração máxima de efluente no corpo receptor no intervalo entre os instantes T_1 e T_2 .

IV-4.1 Estação Seca

A **Figura 36** mostra a salinidade máxima no campo distante durante a simulação para o período seco.

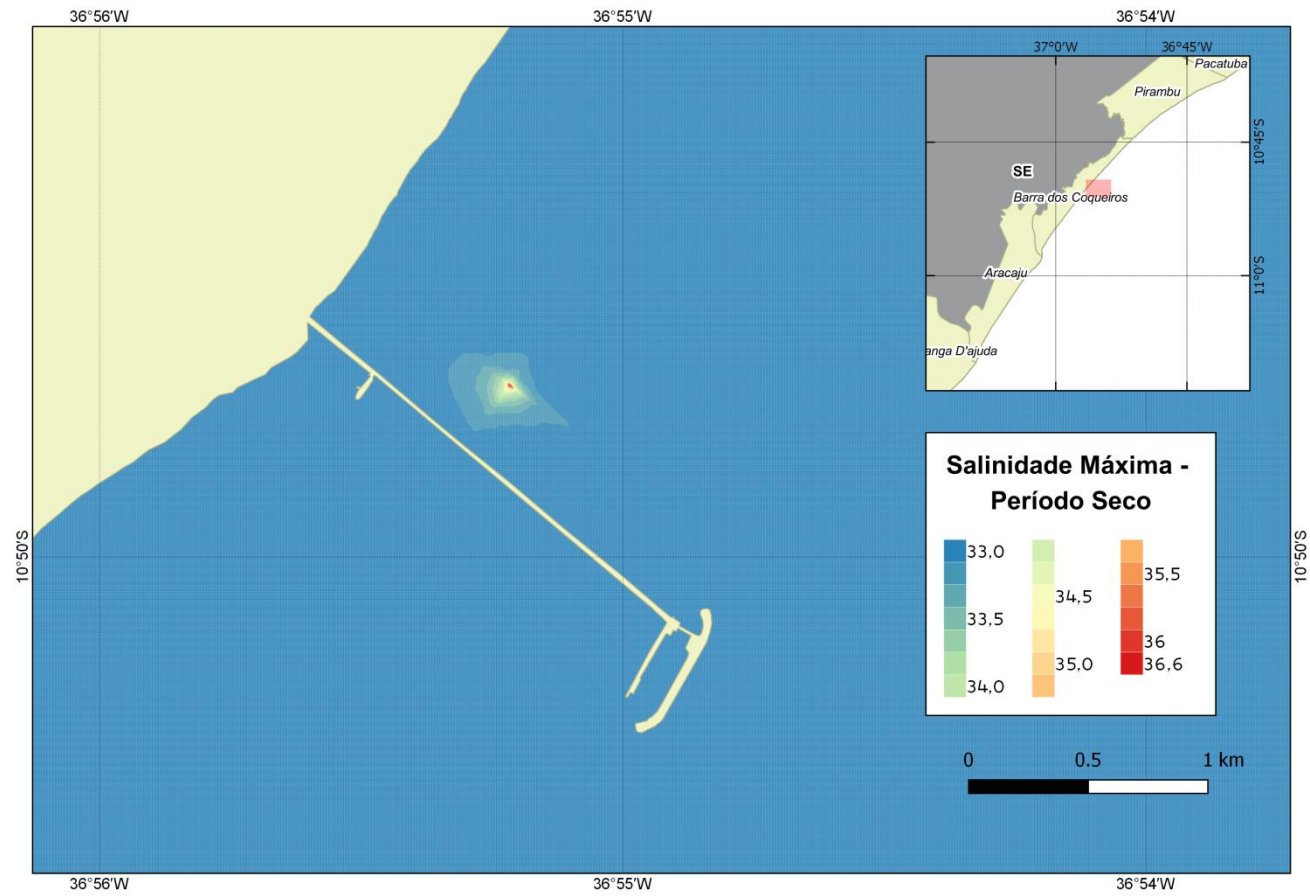


Figura 36 – Salinidade máxima modelada na coluna d'água, no campo distante, ao longo dos 3 meses de simulação para o período seco.

Para o período seco, é possível notar que a área com salinidade acima do ambiente marinho local (33) se apresenta transversalmente a linha de costa, com deslocamento para sudoeste, devido as correntes preferenciais modeladas para a região. A salinidade máxima no campo distante é a mínima apresentada para o campo próximo, de aproximadamente 36,6. Esta salinidade máxima decai rapidamente conforme se afasta do local de lançamento, atingindo valores de 34 a cerca de 30 m da boca do emissário..

IV-4.2 Estação Chuvosa

A **Figura 37** mostra a salinidade máxima no campo distante durante a simulação para o período chuvoso.

Assim como para o período seco, no período chuvoso é possível notar que a área com salinidade acima da ambiente (33) se apresenta transversalmente a linha de costa. Porém nesta época do ano o deslocamento para sudoeste é menos evidente que no período seco, pois as correntes são menos intensas, devido ao vento menos intenso na região, sendo assim predominante os movimentos perpendiculares a linha de costa, atribuídos as correntes de maré. A salinidade máxima no campo distante é a mínima apresentada para o campo próximo, de aproximadamente 36,6. Esta salinidade máxima decai rapidamente conforme se afasta do local de lançamento, atingindo valores de 34 a cerca de 50 m da boca do emissario.

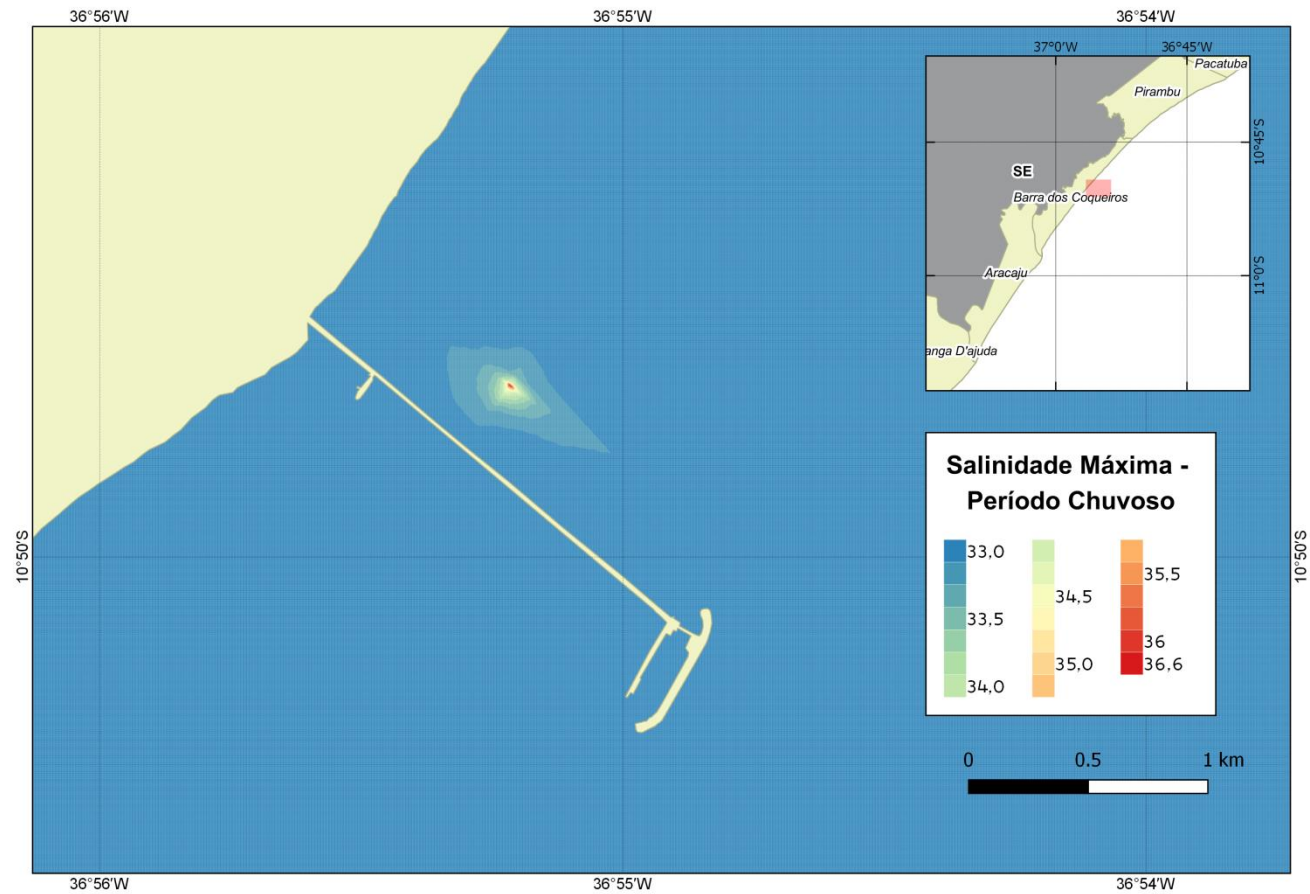


Figura 37 – Salinidade máxima modelada na coluna d'água, no campo distante, ao longo dos 3 meses de simulação para o período chuvoso.

V.RESULTADOS

Conforme indicado na introdução, os processos de mistura de descargas de efluentes em um corpo receptor podem ser divididos em três zonas, de acordo com suas respectivas escalas de tamanho e tempo: campo próximo, zona de transição e campo distante.

No estudo realizado, observou-se que a pluma supersalina (salinidade 48) do emissário atinge a superfície (final do campo próximo), com salinidade variando de 34,1 a 36,6 na estação seca e de 34,9 a 36,6 na estação chuvosa.

Estes resultados indicam que, praticamente, toda a diluição dos jatos ocorrem no campo próximo, pois na área a água do mar foi considerada homogênea com salinidade 33. O campo próximo possui uma eficiência de diluição muito superior ao campo distante.

No campo distante, conforme esperado, as diluições mostram um rápido decaimento conforme se afasta do local de lançamento, com valores de salinidade máxima decaindo a cerca de 34 a dezenas de metros de distância do difusor.

As figuras **Figura 44**, **Figura 45**, **Figura 46** e a **Figura 47** permitem a análise do inter relacionamento do diâmetro da pluma e da salinidade do jato ao final do campo próximo, conjuntamente com os dados de nível do mar e intensidade verticalmente integrada das correntes.

Nas figuras, é possível identificar que tanto a variação da salinidade quanto o diâmetro do jato, ao final do campo próximo, são diretamente correlacionados principalmente ao nível do mar na estação chuvosa e a intensidade da corrente na estação seca. Os diâmetros dos jatos são maiores em momentos de marés altas (principalmente em períodos de sizígia), enquanto que as salinidades são maiores em momentos de baixa-mar. Esse fenômeno ocorre devido a maior altura da coluna d'água durante os períodos de maré-cheia, que faz com que o jato tenha maior espaço de deslocamento, aumentando o seu raio e diminuindo a salinidade na superfície. Nota-se, também, que os menores valores de salinidade obtidos foram durante a estação seca, quando as correntes são mais intensas. Este resultado confirma o obtido por Gregório (2009) que cita que em momentos de correntes mais intensas, ocorre maior diluição dos efluentes e, em situações de correntes menos

intensas, a diluição é prejudicada, obtendo-se maiores concentrações dos efluentes (no caso salinidade) ao final do campo próximo.

O efeito das correntes mais intensas sobre as maiores diluições, também, é observada no campo distante. A **Figura 40** e a **Figura 43** mostram a porcentagem do tempo em que a salinidade foi superior a 33,03 (1% acima do valor de referência para a água do mar na região). Estas figuras mostram que no período seco as áreas com maiores ocorrências são menores que as modeladas para o período chuvoso. Com correntes mais intensas, a diluição é facilitada e o oposto é observado no período com correntes menos intensas.

No período chuvoso, uma área de cerca de 52.500 m², ao redor do ponto de lançamento, apresentou salinidades superiores a 70% de salinidade acima de 33,03, enquanto que no período seco este valor foi de 38.500 m².

Estação chuvosa

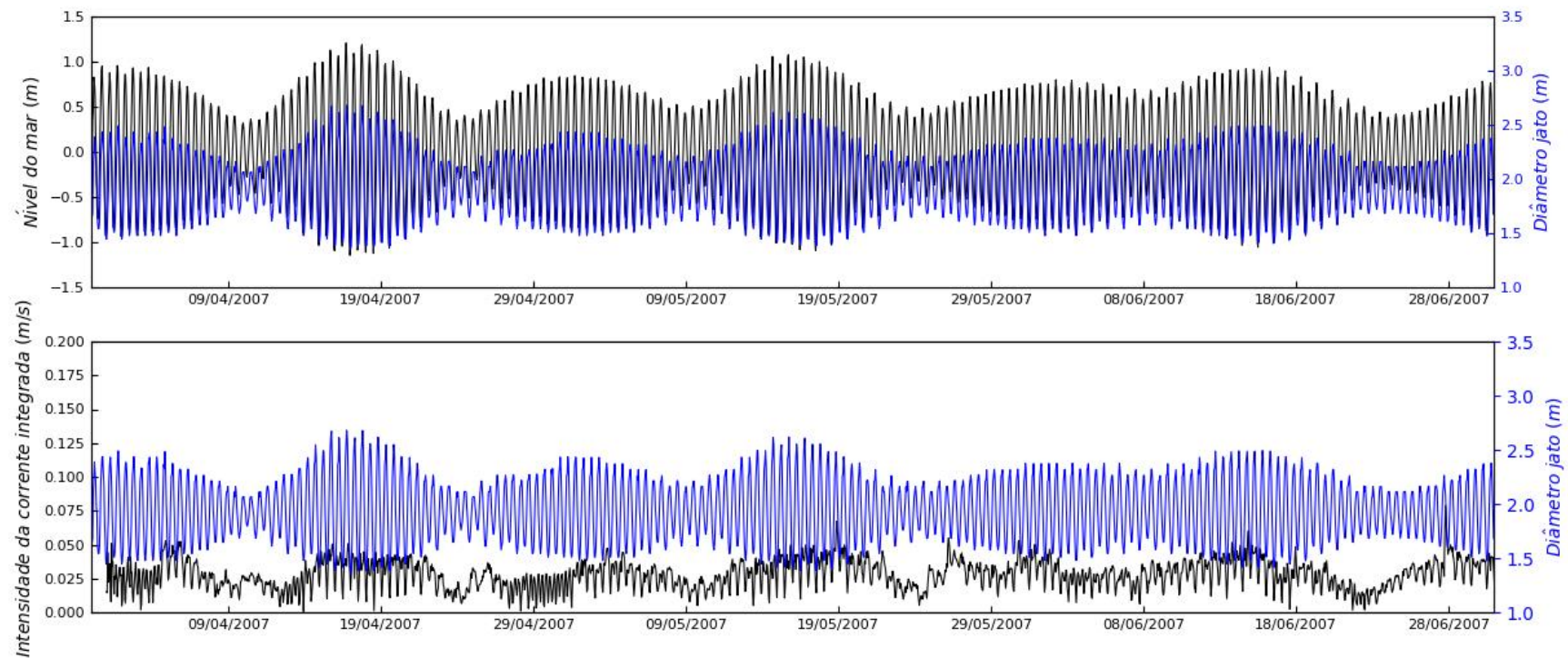


Figura 38 – Variação do diâmetro do jato ao final do campo próximo (linhas azuis) – para cada difusor - comparado à variação do nível do mar (painel superior) e corrente verticalmente integrada (painel inferior) no local do salmouroduto. Simulação para a estação chuvosa.

Estação chuvosa

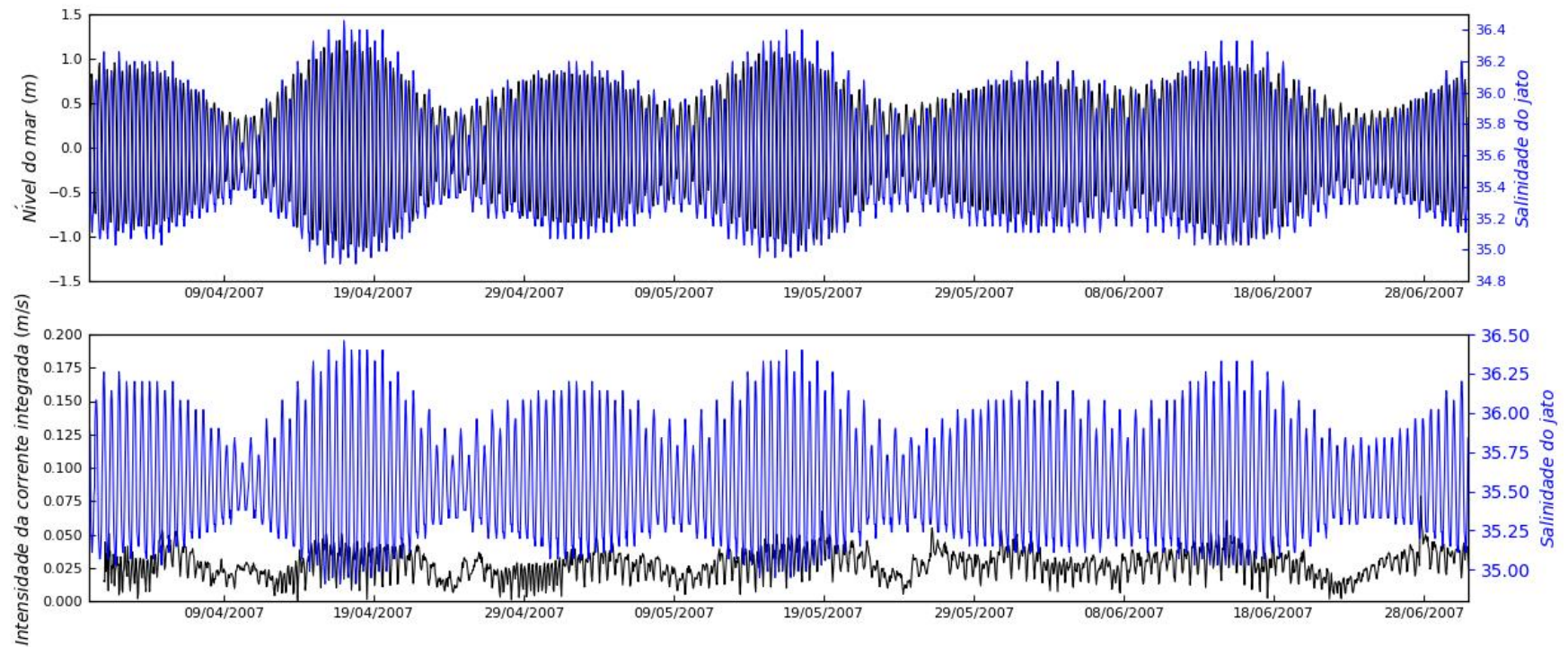


Figura 39 – Variação da salinidade do jato ao final do campo próximo (linhas azuis) – para cada difusor, comparado à variação do nível do mar (painel superior) e corrente verticalmente integrada (painel inferior) no local do salmouroduto. Simulação para a estação chuvosa.

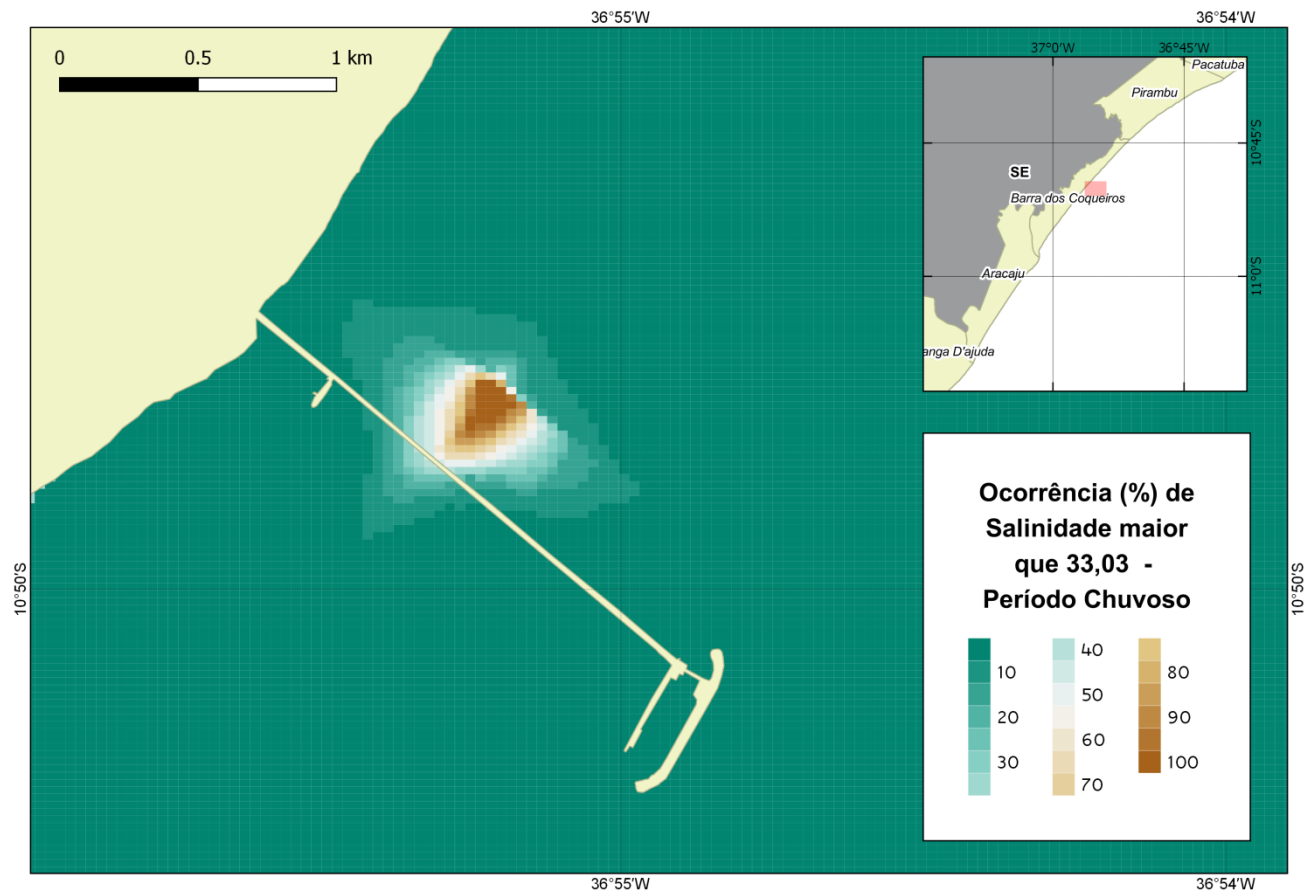


Figura 40 – Porcentagem de ocorrência de salinidade superior à 33,03, no campo distante, durante os 3 meses de simulação para a estação chuvosa.

Estação Seca

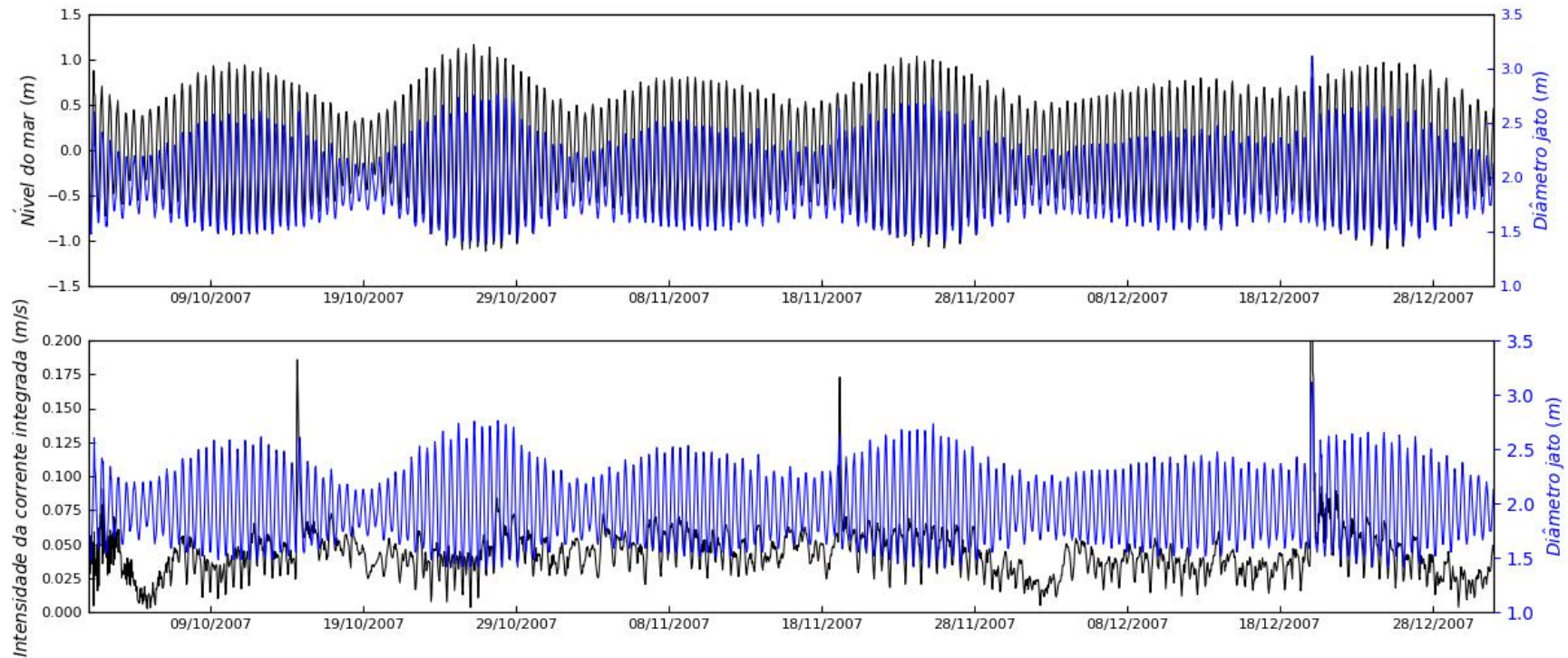


Figura 41 – Variação do diâmetro do jato ao final do campo próximo (linhas azuis) – para cada difusor, comparado à variação do nível do mar (painel superior) e corrente verticalmente integrada (painel inferior) no local do salmouroduto. Simulação para a estação seca.

Estação Seca

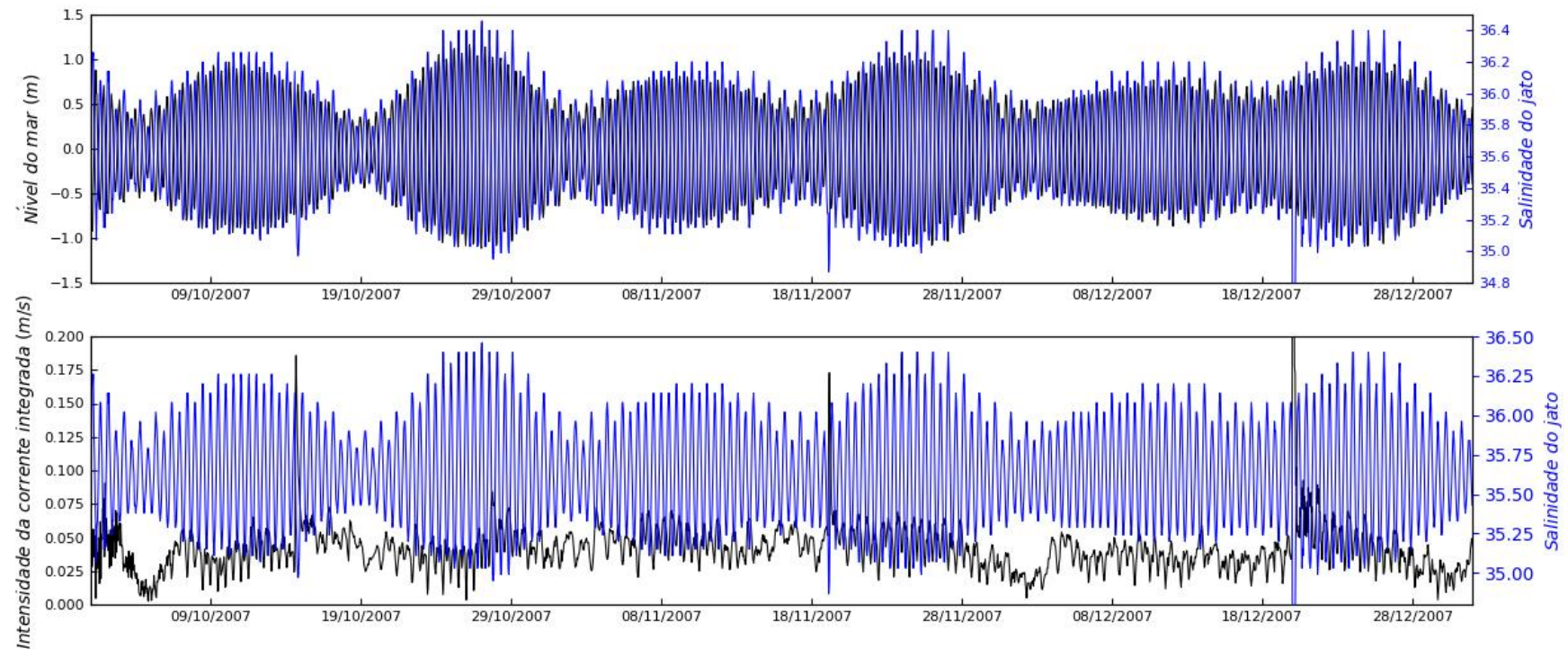


Figura 42 – Variação da salinidade do jato ao final do campo próximo (linhas azuis) – para cada difusor, comparado à variação do nível do mar (painel superior) e corrente verticalmente integrada (painel inferior) no local do salmouroduto. Simulação para a estação seca.

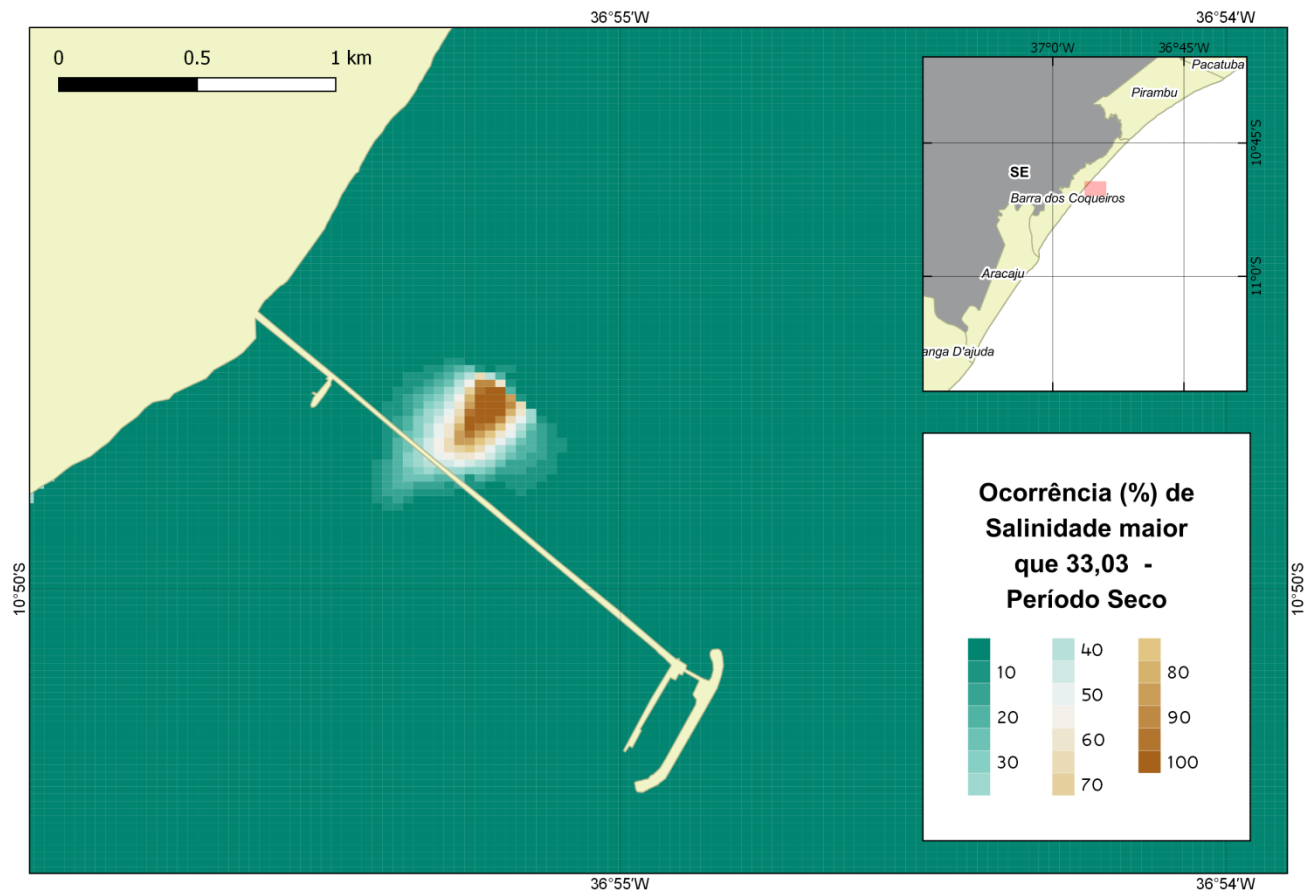


Figura 43 – Porcentagem de ocorrência de salinidade superior à 33,03, no campo distante, durante os 3 meses de simulação para a estação seca.

Estação chuvosa

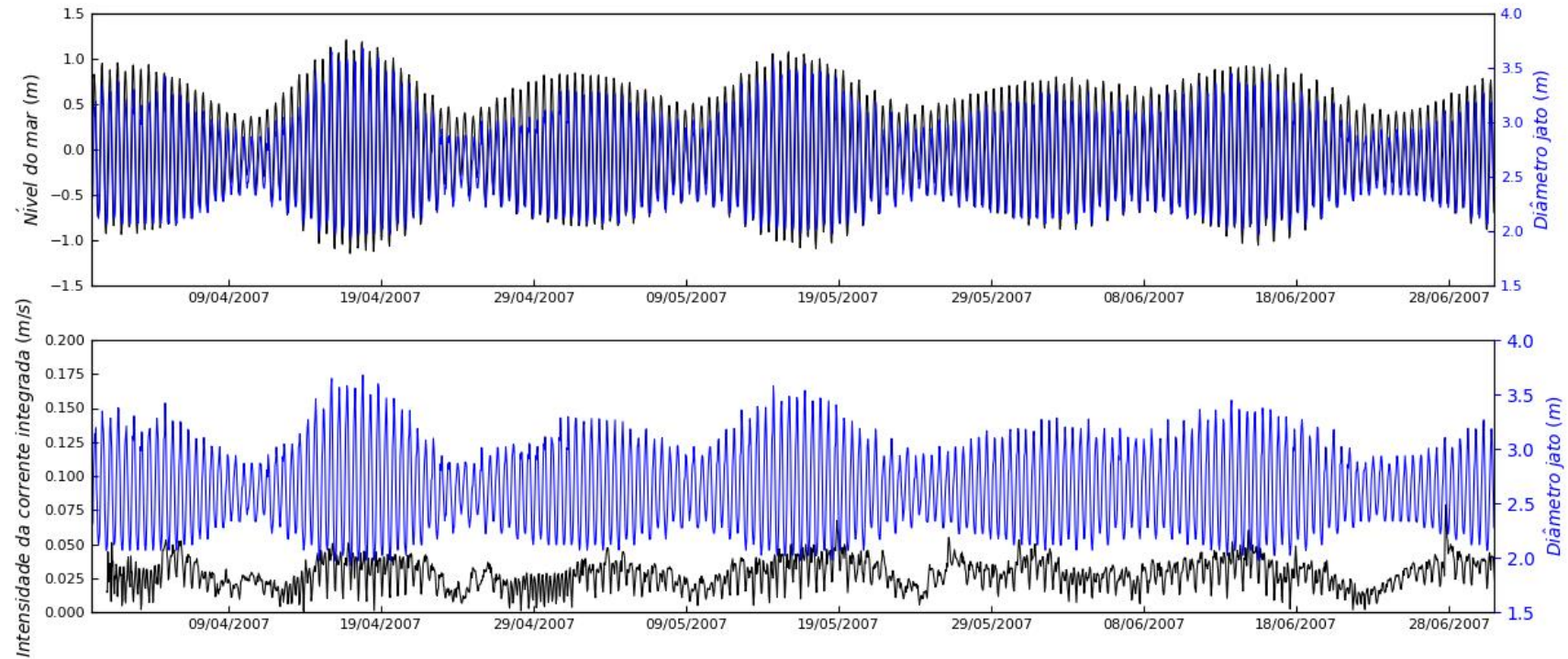


Figura 44 – Variação do diâmetro do jato ao final do campo próximo (linhas azuis) – para cada difusor - comparado à variação do nível do mar (painel superior) e corrente verticalmente integrada (painel inferior) no local do emissário. Simulação para a estação chuvosa.

Estação chuvosa

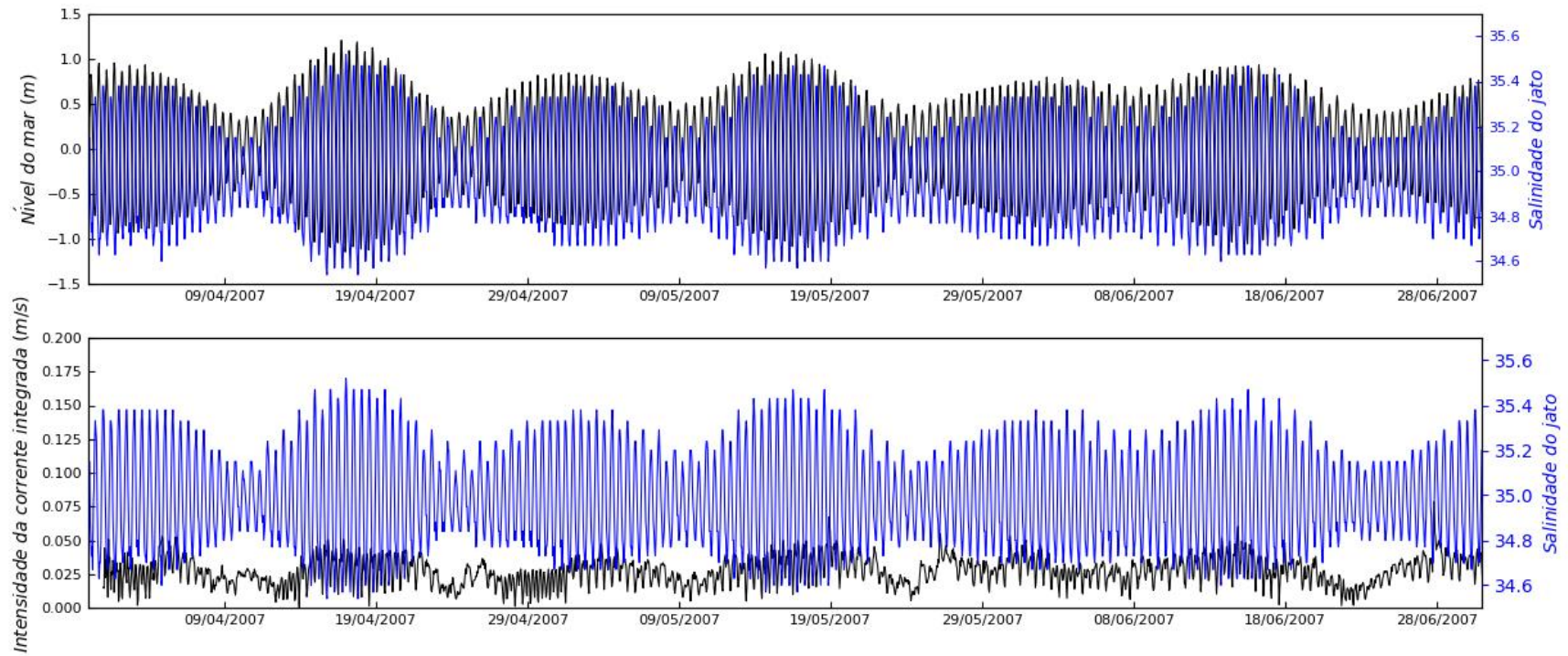


Figura 45 – Variação da salinidade do jato ao final do campo próximo (linhas azuis) – para cada difusor, comparado à variação do nível do mar (painel superior) e corrente verticalmente integrada (painel inferior) no local do emissário. Simulação para a estação chuvosa.

Estação Seca

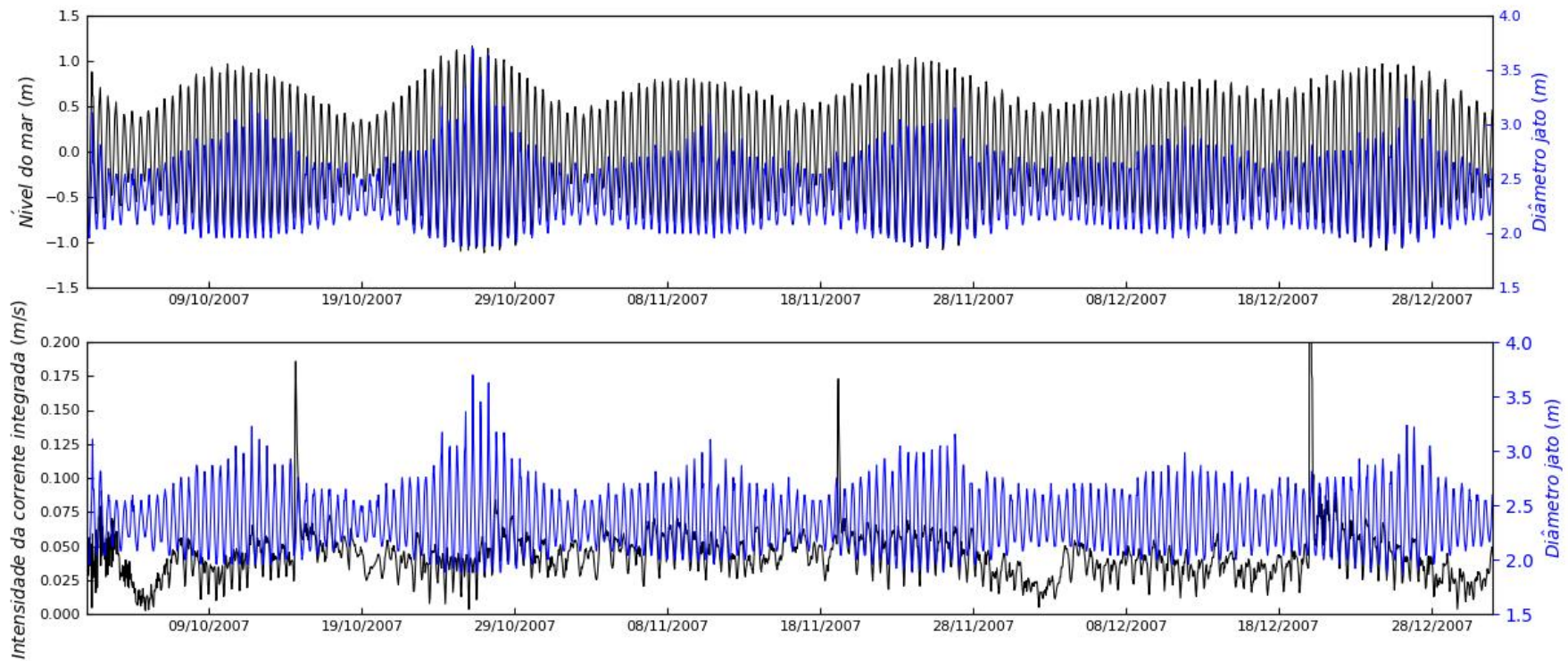


Figura 46 – Variação do diâmetro do jato ao final do campo próximo (linhas azuis) – para cada difusor, comparado à variação do nível do mar (painel superior) e corrente verticalmente integrada (painel inferior) no local do emissário. Simulação para a estação seca.

Estação Seca

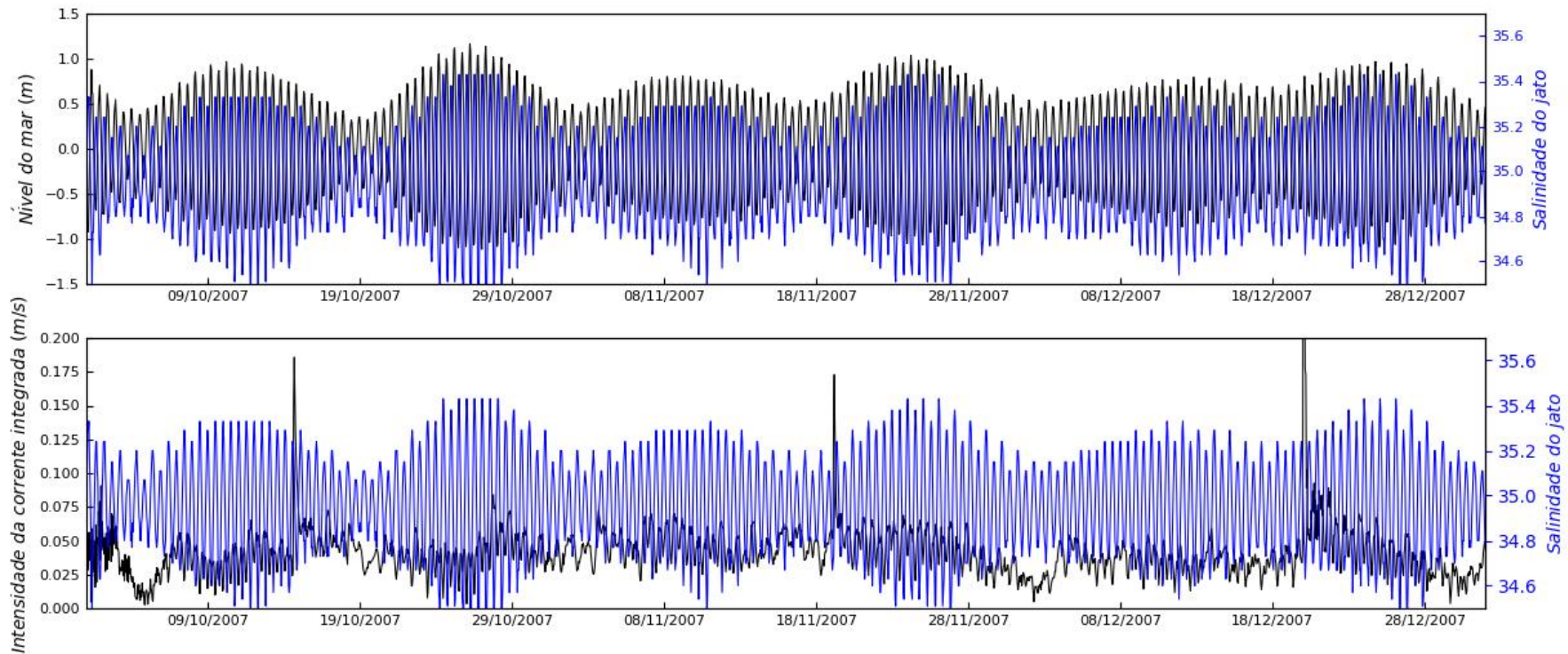


Figura 47 – Variação da salinidade do jato ao final do campo próximo (linhas azuis) – para cada difusor, comparado à variação do nível do mar (painel superior) e corrente verticalmente integrada (painel inferior) no local do emissário. Simulação para a estação seca.

VI.CONCLUSÕES

As principais conclusões são:

- Foi explorado um modelo hidrodinâmico com condições de pior cenário para diluição dos lançamentos do emissário em duas estações uma seca e outra chuvosa, validado a partir de dados medidos;
- Com os dados da fase hidrodinâmica, foram realizadas simulações de lançamento do emissário, com vazão máxima, de forma contínua, por três meses em cada simulação, de forma a simular o pior cenário possível;
- Os resultados no campo próximo mostraram que os jatos gerados praticamente não apresentam deslocamento horizontal e atingem a superfície, com diâmetro máximo de 3,1 m na estação seca e 2,7 m na estação chuvosa. O espaçamento entre as saídas dos bicos do difusor de 5,20 m são adequadas de modo que nas piores situações as plumas de cada um deles não interferem umas nas outras;
- Estes jatos, quando atingem a superfície, tem valores de salinidade variando de 34,1 a 36,6 na estação seca e de 34,9 a 36,6 na estação chuvosa contra a salinidade de 33 do meio local;
- No campo distante, a cerca de algumas dezenas de metros ao redor dos difusores a salinidade é de 34, muito próxima ao valor de 33 de referência da região;
- No período chuvoso, 52.500 m² aproximadamente de área ao redor dos difusores permanecem mais de 70% do tempo com salinidade acima de 33,03 (1% acima do valor de referência), enquanto que no período seco esta área é reduzida para 38.500 m² aproximadamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMANTE, C. & EAKINS, B. W. 2009, Etopo 1: 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis, Technical report, National Geophysical Data Center, NESDIS, NOAA, U. S. Department of Commerce, Boulder, CO.
- BLENINGER, T. & JIRKA, G. H., 2004, Near and far field model coupling methodology for wastewater discharges, International Association of Hydraulic Engineering and Research, 4th International Symposium on Environmental Hydraulics and 14th Congress of Asia and Pacific Division, Hong Kong, China.
- CARVALHO, J., ROBERTS, P. J. W. & ROLDÃO, J. 2002. Field observations of Ipanema beach outfall, *Journal of Hydraulic Engineering* 2(1), 151-160.
- DELTARES, 2010, Delft3D-Flow, Simulation of Multidimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, Including Sediments, Manual Version 3.14, Rev.11214, Delft, The Netherlands.
- EGBERT, G. D., AND S. Y. EROFEEVA, 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 183– 204.
- FRICK, W. E., 1984, Nonempirical closure of the plume equations, *Atmospheric Environmental* 18(4), 653-662.
- HESS, K.W., BOSLEY, K.T., 1992. Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, Tampa, Florida, November 11-13, 83-94p.
- HILLERBRAND, G. 2003, Coupling of near- and far- field models for prediction of treated sewage discharges into the coastal ocean, Master's thesis, universitat Karlsruhe.
- HUANG, H., 2011. Finite volume coastal ocean model (fvcom) 3d hydrodynamic - model comparison, Technical report, Texas Water Development Board (TWDB).42 p.
- JIRKA, G. H., ABRAHAM, G. & HARLEMAN, D. R. F., 1976. An assessment of techniques for hydrothermal prediction, Department of Civil Engineering, MIT for U.S. Nuclear Regulatory Commission.

- LI, M., L. ZHONG, & W. C. BOICOURT. 2005. Simulations of Chesapeake Bay estuary: Sensitivity to turbulence mixing parameterizations and comparison with observations, *Journal of Geophysical Research*, 110
- MEDEIRO, S. C., HAGEN, S. C., CHAOUCH, N., FEYEN, J., TEMIMI, M., WEISHAMPEL, J. F., FUNAKOSHI, Y. & KHANBILVARDI, R., 2013, Assessing the performance of a northern gulf of Mexico tidal model using satellite imagery, *Remote Sens.* 5, 5662-5679.
- NOAA, 2011. The Tampa Bay operational forecast system (tbofs): Model development and skill assessment, Technical report, National Oceanic and Atmospheric Administration. 105 p.
- PARENTE, F. T. F. 2016. Hidrodinâmica da Plataforma Continental da Bacia de Sergipe-Alagoas. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 142p.
- PETROBRAS, 2016. Projeto de Caracterização regional da Bacia de Sergipe-Alagoas -Etapa III – Meteorologia e Oceanografia.
- PHILLIPS, N. A. 1957, A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *Journal of Meteorology* 14(1), 184-185.
- ROBERTS, P. J. W. & TIAN, X. 2004, New experimental techniques for validation of marine discharge models, *Environmental Modelling and Software* 19(1), 691-699.
- ROSSBY, C. G. 1941, U.S. Yearbook of Agriculture, Climate and Man, chapter The scientific basis of modern meteorology. 656-661.
- WALTERS, J. C. & HESTON, C. 1982, Removing the tidal-period variations from time-series data using low-pass digital filters, *Journal of Physical Oceanography* 12(1), 112-115.
- WARNER, J. C., GEYER, W. R. & LERCZAK, J. A. 2005, Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assessment, *Journal of geophysical Research* 110(1), 13.
- WILMOTT, C. J. 1981, On the validation models, *Physical Geography* 2(1), 184-194.
- ZHANG, X. Y. & ADAMS, E. E. 1999, Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model, *Journal of Hydraulics Engineering* 125(3), 233-241.

ANEXO A – O MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D-FLOW

No módulo hidrodinâmico DELFT3D-FLOW, as componentes da equação do movimento correspondem às equações do movimento segundo as direções x, y e são representadas pelas equações (1) e (2).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_x}} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{\sqrt{G_y}} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_y}}{\partial x} + \frac{uv}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_x}}{\partial y} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_x}} P_x + F_x + \frac{1}{H^2} \frac{\partial y}{\partial \sigma} \left(\vartheta_{mol} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_x}} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{\sqrt{G_y}} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_y}}{\partial x} + \frac{uv}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_x}}{\partial y} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_y}} P_y + F_y + \frac{1}{H^2} \frac{\partial y}{\partial \sigma} \left(\vartheta_{mol} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \frac{\partial [(d+w)u\sqrt{G_y}]}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \frac{\partial [(d+w)v\sqrt{G_x}]}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \\ = H (q_f - q_s) \end{aligned} \quad (3)$$

Nestas equações x, y e z são as três coordenadas espaciais e t é o tempo. u, v e w são as componentes de corrente segundo os eixos x, y e z (respectivamente) e a densidade é simbolizada por ρ . ϕ é a elevação da superfície livre, $\sqrt{G_x}$ e $\sqrt{G_y}$ são coeficientes de transformação de coordenadas curvilineares para retangulares (aproximação que não considera a esfericidade da Terra), f é o parâmetro de Coriolis, H significa a profundidade, σ é o sistema de coordenada vertical introduzida por PHILLIPS (1957), P_x e P_y são os gradientes de pressão hidrostática nas respectivas direções, F_x e F_y são os gradientes de tensão radiativa nas respectivas direções, ϑ_{mol} o coeficiente de viscosidade cinemática molecular, M_x e M_y são fontes ou sorvedouros de momento nas respectivas direções. q_f são as fontes e q_s os sorvedouros de água.

Sobre a aproximação de águas rasas, a componente vertical do movimento, na direção z , Equação (3), é reduzida à equação hidrostática:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g H \quad (4)$$

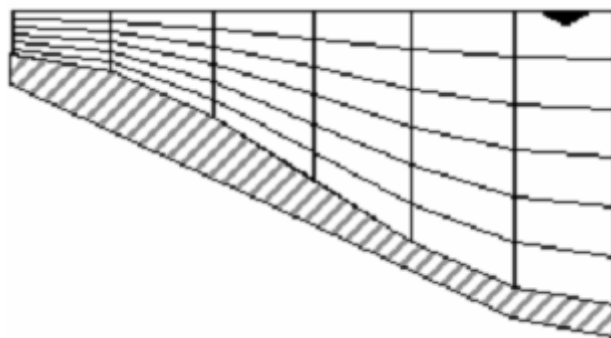
, onde g se refere à aceleração da gravidade.

O parâmetro de Coriolis (f) é dependente da latitude geográfica (Θ) e da velocidade angular de rotação da Terra (Ω) (Equação 5).

$$f = 2 \cdot \Omega \cdot \text{sen}(\Theta) \quad (5)$$

Na coordenada σ introduzida por PHILLIPS (1957) para modelos atmosféricos, as camadas verticais da grade numérica são consideradas como sendo planos sigma, onde não são limitadas horizontalmente, acompanhando a topografia de fundo e a superfície livre. Deste modo o número de camadas é constante, independentemente da profundidade local (Figura 1). Isto implica em maior detalhamento em regiões mais rasas, e a relação entre as camadas também pode ser irregular, dando-se preferência a zonas de interesses, como por exemplo camada de fundo e superfície. Algebricamente a coordenada σ é definida pela equação (6).

$$\sigma = \frac{z - \varphi}{H} \quad (6)$$



com coordenada horizontal σ .

Fonte: DELTARES (2010).

Derivadas da equação (4) podem ser obtidas as expressões que resolvem os gradientes horizontais de pressão:

$$\frac{1}{\rho\sqrt{G_x}}P_x = \frac{g}{\sqrt{G_x}}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + g\frac{H}{\rho\sqrt{G_x}}\int_{\sigma}^0\left(\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\partial\rho}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right)d\sigma \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho\sqrt{G_y}}P_y = \frac{g}{\sqrt{G_y}}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + g\frac{H}{\rho\sqrt{G_y}}\int_{\sigma}^0\left(\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\partial\rho}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y}\right)d\sigma \quad (8)$$

Nas equações (7) e (8), do lado direito da igualdade, o primeiro termo é referente ao gradiente de pressão barotrópico (variações da superfície livre), e o segundo ao gradiente de pressão baroclínico (variações laterais de densidade).

Os gradientes de tensão radiativa, F_x e F_y , são descritos por:

$$F_x = \frac{1}{\sqrt{G_x}}\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_y}}\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y} \quad (9)$$

$$F_y = \frac{1}{\sqrt{G_x}}\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_y}}\frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} \quad (10)$$

Os tensores τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} são determinados de acordo com as equações (11), (12) e (13).

$$\tau_{xx} = \frac{2v_H}{\sqrt{G_x}}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right) \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}v\left\{\frac{1}{\sqrt{G_y}}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y}\right) + \frac{1}{\sqrt{G_x}}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right)\right\} \quad (12)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2v_H}{\sqrt{G_y}}\left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y}\right) \quad (13)$$

Para a equação da continuidade, a representação utilizada no DELFT3D-FLOW é:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}}\frac{\partial(H)(U)\sqrt{G_y}}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}}\frac{\partial(H)(V)\sqrt{G_x}}{\partial y} = Q \quad (14)$$

,onde U e V significam os transportes por unidade de distância horizontal nas respectivas direções x e y; Q representa as contribuições por unidade de área de descarga ou sumidouro de água. Q é dado por:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_f - q_s) d\sigma \quad (15)$$

As equações de difusão de sal e calor, tendo λ como processos de decaimento de primeira ordem, S a salinidade e T a temperatura, são representadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial HS}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \left(\frac{\partial \sqrt{G_x} H u S}{\partial x} + \frac{\partial \sqrt{G_x} H v S}{\partial y} \right) + \frac{\partial w S}{\partial \sigma} \\ = \frac{H}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_H \sqrt{G_y}}{\sigma \sqrt{G_x}} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \left(\frac{D_H \sqrt{G_x}}{\sigma \sqrt{G_y}} \frac{\partial S}{\partial y} \right) \right\} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\vartheta_{mol}}{\sigma_{mol}} + \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) \\ - \lambda H + F_s \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial HT}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \left(\frac{\partial \sqrt{G_x} H u T}{\partial x} + \frac{\partial \sqrt{G_x} H v T}{\partial y} \right) + \frac{\partial w T}{\partial \sigma} \\ = \frac{H}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_H \sqrt{G_y}}{\sigma \sqrt{G_x}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(\frac{D_H \sqrt{G_x}}{\sigma \sqrt{G_y}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\vartheta_{mol}}{\sigma_{mol}} + \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) \\ - \lambda H + F_t \end{aligned} \quad (17)$$

O sistema de equações é fechado por uma versão da equação de estado que é função de T, S e P (pressão). A versão utilizada é derivada de UNESCO (1981):

$$\rho = \rho_0 + AS + BS^{3/2} + CS^2 \quad (18)$$

onde,

$$\rho_0 = 999,842594 + 6,793952 \cdot 10^{-2}T - 9,095290 \cdot 10^{-2}T^2 + 1,001685 \cdot 10^{-4}T^3 \\ - 1,120083 \cdot 10^{-6}T^4 + 6,536332 \cdot 10^{-9}T^5$$

$$A = 8,24493 \cdot 10^{-1} - 4,0899 \cdot 10^{-3}T + 7,6438 \cdot 10^{-5}T^2 - 8,2467 \cdot 10^{-7}T^3 \\ + 5,3875 \cdot 10^{-9}T^4$$

$$B = -5,72466 \cdot 10^{-3} + 1,022710^{-4}T - 1,6546 \cdot 10^{-6}T^2$$

$$C = 4,8324 \cdot 10^{-4}$$

O DELFT3D-FLOW apresenta vários esquemas de fechamento turbulento e é totalmente não linear, inclusive nas parametrizações dos atritos de fundo e

superfície. Tendo ρ_0 a densidade de referência da água do mar, \vec{u}_b a magnitude da velocidade horizontal na primeira camada acima do fundo e C_{3D} o coeficiente de Chézy, temos o atrito de fundo ($\vec{\tau}_b$) descrito por:

$$\vec{\tau}_b = \frac{g\rho_0\vec{u}_b|\vec{u}_b|}{C_{3D}^2} \quad (19)$$

Com ρ_a sendo a densidade do ar, U_{10} a magnitude da velocidade do vento 10 metros acima da superfície livre (dependente do tempo e do espaço) e C_D o coeficiente de arrasto dependente de U_{10} , temos o tensão de cisalhamento do vento com a superfície ($\vec{\tau}_s$) descrito por:

$$|\vec{\tau}_s| = \rho_a C_D U_{10}^2 \quad (20)$$

O coeficiente de arrasto C_D é dependente da velocidade do vento e é dado por, de acordo com SMITH & BANKE (1975):

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 0,00063 & \text{se } U_{10} = 0 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \\ \frac{0,00803 U_{10}}{100} & \text{se } 100 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} < U_{10} < 100 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \\ 0,00723 & \text{se } U_{10} > 100 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \end{cases} \quad (21)$$

O esquema de fechamento turbulento utilizado foi o denominado modelo k- ϵ . Neste modelo de turbulência, as equações de transporte são resolvidas para a energia cinética turbulenta (k) e para a dissipação de energia (ϵ). O comprimento da mistura (L) é então determinada de ϵ e k de acordo com:

$$L = C_D \frac{k\sqrt{k}}{\epsilon} \quad (22)$$

Nas equações de transporte, as duas seguintes suposições são feitas:

- A produção, o empuxo e a dissipação são os termos dominantes;
- A escala de distância horizontal são muito maiores que a vertical (águas rasas)

Devido a esta primeira suposição, a conservação das quantidades turbulentas é pouco importante e a equação de transporte é implementada de forma não conservativa.

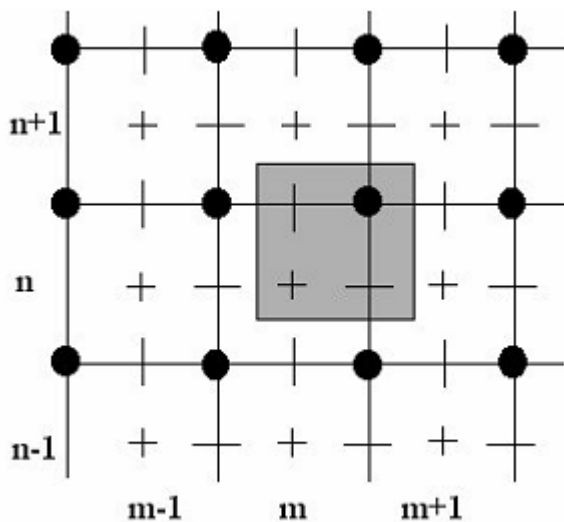
As equações de transporte para k e ϵ são acopladas de forma não linear pelas médias de seus coeficientes de difusividades (D_k e D_ϵ) e termos de dissipação. As equações de transporte para k e ϵ são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{u}{\sqrt{G_{yy}}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_K \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + P_K + P_{Kw} + B_K - \epsilon \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \frac{u}{\sqrt{G_{yy}}} \frac{\partial \epsilon}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_K \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \right) + P_\epsilon + P_{\epsilon w} + B_\epsilon - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (24)$$

, onde P são os termos de produção e B os termos de empuxo. $c_{2\epsilon}$ é termo de calibração e tem valor 1,92.

O método numérico do DELFT3D-FLOW é baseado em diferenças finitas. Para discretizar no espaço as equações demonstradas acima, a área é representada por uma grade curvilínea. A configuração das variáveis na grade é do tipo Arakawa-C, com os pontos de pressão (nível) localizados no centro das células e as componentes de velocidade são situados nas faces, de forma perpendicular, de acordo com a Figura 2.



Onde:

- Linhas cheias: grade numérica;
- Área cinza: itens com o mesmo índice (m,n) ;
- + : elevação da superfície, concentração de constituintes, salinidade e temperatura;

- - : componente horizontal da velocidade na direção x;
- | : componente horizontal da velocidade na direção y;
- • : profundidade.

Figura 2 - Distribuição das variáveis em grade numérica do tipo Arakawa-C.

Fonte: DELTARES (2010).

O esquema numérico implementado no DELFT3D-FLOW utilizado é o WAQUA-scheme, baseado em STELLING (1984) e STELLING & LEENDERTSE (1992), que é uma extensão do consagrado método ADI (Alternating Direction Implicit – LEENDERTSE (1967); LEENDERTSE & GRITTON (1971) e LEENDERTSE *et al.* (1973)), adicionando-se uma aproximação especial para os termos advectivos horizontais.

O método ADI divide cada espaçamento de tempo em dois estágios. Cada estágio se refere a metade do espaçamento de tempo, sendo resolvida todas as equações em ambos. Os níveis de tempo são alternados: se em um estágio o termo é tomado implicitamente no tempo, este termo será levado explicitamente no tempo, no estágio seguinte. Para o passo de tempo completo, cada termo é integrado com precisão de segunda ordem.

A vantagem do método ADI é que as equações integradas implicitamente de elevação do nível da superfície livre e velocidade são acopladas ao longo das linhas da grade numérica, levando o sistemas de equações com uma pequena largura de banda.

De forma vetorial, uma exemplificação do método ADI para a velocidade é proposto de acordo com as Equações (25) e (26).

Estágio 1:

$$\frac{\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} - \vec{U}^l}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y\vec{U}^l + B\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} = \vec{d} \quad (25)$$

Estágio 2:

$$\frac{\vec{U}^{l+1} - \vec{U}^{l+\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y\vec{U}^{l+1} + B\vec{U}^{l+1} = \vec{d} \quad (26)$$

Onde,

$$A_x = \begin{bmatrix} 0 & -f & g \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ H \frac{\partial}{\partial x} & 0 & u \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$A_y = \begin{bmatrix} u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 \\ f & 0 & g \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & H \frac{\partial}{\partial y} & v \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}$$

Com μ sendo o coeficiente de atrito de fundo linearizado e \vec{d} forçantes externas como vento e pressão atmosférica.

ANEXO B – O MODELO DE CAMPO PRÓXIMO UM3

Neste Anexo B, são apresentadas as considerações teóricas sobre o modelo numérico de campo próximo UM3. A descrição dos processos relativos aos cálculos considerados pelo UM3 foram obtidas de BAUNGTHNER *et al.*, 1976.

Um dos principais processos que devem ser apresentados é relativo ao entranhamento. Entranhamento é o processo pelo qual o jato incorpora material do ambiente. Pode ser pensado como um processo em que massa flui para o interior do jato através de sua superfície, vindo do exterior.

Quando o UM3 modela o jato, sua área projetada é diretamente proporcional à força exercida pelo entranhamento. Esta força influencia a forma do elemento, que é estabelecida arbitrariamente.

A forma do jato é definida por uma superfície lisa, que aumenta de tamanho conforme afasta-se da fonte e tem a trajetória curvada, tendo portanto a forma de uma secção de cone fletida. O crescimento e os termos de curvatura são necessários para descrever com precisão a área projetada do jato.

Assume-se que a pluma está em estado estacionário. A pluma permanece invariante enquanto elementos que se deslocam por ela mudam sua forma e posição com o tempo. No entanto, condições podem ser alteradas, em intervalos de tempo maiores quando comparados ao tempo decorrente da diluição inicial. O estado estacionário pressuposto é utilizado para determinar o comprimento do jato, em função da velocidade média instantânea, o seu comprimento inicial, e a velocidade inicial do efluente. Deste modo, o comprimento do elemento não é geralmente mantido constante, sendo alterado de acordo com as variações de velocidade do meio. Com isto, o raio do elemento deve responder a esta convergência ou divergência de velocidade, bem como o entranhamento.

O limite exterior da pluma coincide inicialmente com a borda do orifício que lança o efluente. Para integração a partir da condição inicial, e utilizando condições de borda, o volume do jato é calculado baseando-se na massa entranhada e assumindo a forma do elemento. Pressupõe-se que as propriedades da pluma na fronteira são indistinguíveis das do ambiente adjacente. Isto implica que a massa que atravessa a área projetada do jato possui a mesma velocidade do ambiente.

O modelo inclui princípios de conservação de massa (continuidade), momento horizontal e energia. O momento vertical não é conservado porque é normalmente alterado pela flutuabilidade do jato.

A conservação do momento é dada por:

$$\frac{dm\vec{V}}{dt} = \vec{U} \frac{dm}{dt} - m \frac{\rho_a - \rho}{\rho} \vec{g} \quad (1)$$

, onde m é a massa de cada elemento da pluma, ρ_a e ρ são as densidades do ambiente e do elemento, respectivamente e \vec{g} é o vetor aceleração gravidade, \vec{U} representa a velocidade média da corrente e \vec{V} é a velocidade dos elementos que compõem o jato.

A Equação (1) indica que a mudança no momento da pluma é devido a introdução de momento pelo entranhamento de massa dm e a mudança no momento vertical é gerado pela força de empuxo. Para avaliar o termo de empuxo na equação de conservação do momento, é necessário definir a equação de conservação de energia, que é:

$$\frac{dm c_p (T - T_{ref})}{dt} = c_p (T_a - T_{ref}) \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

onde c_p é o calor específico a pressão constante. T , T_a e T_{ref} são as temperaturas médias do elemento, a temperatura do ambiente, e uma temperatura de referencia arbitrária, respectivamente.

A conservação de salinidade é expressa por:

$$\frac{dmS}{dt} = S_a \frac{dm}{dt} \quad (3)$$

, onde S e S_a são as salinidades do elemento e do ambiente, respectivamente.

A densidade é derivada da equação de estado definida por TEETER & BAUMGARTNER (1979). Esta equação é independente da pressão, limitando UM3 a águas rasas.

Três mecanismos de entranhamento são considerados: de Taylor (aspirado), forçado, e área projetada (turbulento). Entranhamento de Taylor é provocado por cisalhamento pois, regiões com alta velocidade são regiões de baixa pressão

relativa provocando fluxo de massa para dentro do jato. O entranhamento forçado é devido à presença de corrente que advecta massa para dentro da pluma.

Entranhamento de área projetada é composto de três termos. O primeiro termo é proporcional ao comprimento e ao raio do jato, o segundo ao crescimento em diâmetro da pluma e o terceiro à curvatura da trajetória do jato. Ele é descrito por:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_a A_p u \quad (4)$$

, onde dm é o incremento de massa por entranhamento em cada incremento de tempo dt , A_p é a área projetada, u é velocidade da corrente normal à área projetada e ρ_a é a densidade do ambiente.

A equação (4) é uma expressão parcial para o entranhamento; este estado é parcialmente forçado pelo montante de massa adicionado ao jato no tempo dt e é igual ao fluxo de massa total sobre sua superfície. A equação completa do entranhamento é a soma desta forçante com os termos do entranhamento de Taylor:

$$\frac{dm}{dt} = -\rho \overrightarrow{A_p} \overrightarrow{U} + \rho A_t v_t \quad (5)$$

, onde A_t é a área do jato em contato com o fluido ambiente e v_t é a velocidade de aspiração de Taylor.

A área do jato em contato com o ambiente, A_t é descrita por:

$$A_t = 2\pi b h \quad (6)$$

, onde h e b são o comprimento e o raio do jato, respectivamente.

A velocidade de aspiração de Taylor, v_t , é frequentemente relacionada à velocidade média da pluma através do coeficiente de proporcionalidade α :

$$v_t = \alpha |\vec{V}| \quad (7)$$

, onde Frick (1984) apresenta o valor médio de 0,1 para α como sendo mais indicado.

Quando as plumas adjacentes crescem significativamente elas se fundem e se entranham umas às outras. Fusão de plumas tem o efeito imediato de reduzir

entranhamentos, reduzindo a área de contato entre a pluma e seus arredores. Apenas a fusão das plumas adjacentes lançadas por difusores lineares são considerados no UM3.

A aproximação básica para a fusão de jatos é 1) redução das áreas de entranhamento, tanto de Taylor quanto forçado, e a perda de superfície exposta que ocorre quando jatos vizinhas interferem uns com os outros, e, 2) confinar a massa do jato no espaço entre o que é conhecido e disponível pelas considerações simétricas. Assume-se que os jatos são idênticos e qualquer interação entre elas é recíproca.

Para completa descrição do problema, as bordas e as condições iniciais devem ser especificadas. A condição de borda é o local e a subsequente posição onde a pluma vai ser determinado pela integração das equações. Uma outra condição de borda é o raio inicial da pluma. Condições iniciais incluem o fluxo de velocidade, a temperatura do efluente, etc.

Em geral o procedimento computacional descrito pelo modelo é: 1) o incremento de tempo é estabelecido, 2) as equações de entranhamento são usadas para determinar a quantidade de massa que vai ser adicionada neste incremento de tempo, 3) este aumento é então comparada com o aumento de massa e as devidas adaptações são feitas para o incremento de tempo e as componentes de entranhamento satisfazer os criterios apropriados, 4) as equações de movimento e outras equações do modelos são resolvidas e 5) um novo incremento de tempo é estabelecido e o ciclo se repete.

ANEXO C – O MODELO DE CAMPO DISTANTE DELFT3D-WAQ

O DELFT3D-WAQ resolve as equações para transporte e para processos físicos, (bio)químicos e biológicos.

O balanço de massa é administrado para as variáveis de estado selecionadas, em cada uma das células computacionais. Para resolver em cada incremento de tempo ($t+\Delta t$), o DELFT3D-WAQ resolve a equação (1), que é a representação simplificada da equação da advecção-difusão-reação:

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{Tr} + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_P + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_S \quad (1)$$

, onde :

M_i^t : massa no início do incremento de tempo

$M_i^{t+\Delta t}$: massa no final do incremento de tempo

$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{Tr}$: mudanças de massa pelo transporte

$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_P$: mudanças de massa por processos físicos, (bio)químicos ou biológicos

$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_S$: mudanças de massa por introdução externa (descargas de esgotos, rios, etc)

Δt : incremento de tempo

O transporte advectivo na troca entre cada célula de grade é dado por:

$$T_{x_0}^A = v_{x_0} \times A_{x_0} \times C_{x_0} \quad (2)$$

Com,

$T_{x_0}^A$: transporte advectivo em $x=x_0$

v_{x_0} : velocidade em $x=x_0$

A_{x_0} : área superficial da célula em $x=x_0$

C_{x_0} : concentração em $x=x_0$

O transporte dispersivo entre as células é assumido como sendo proporcional ao gradiente de concentração e a área superficial da célula:

$$T_{x_0}^D = D_{x_0} \times A_{x_0} \times \left|\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=x_0}$$

Com,

$T_{x_0}^D$: transporte dispersivo em $x=x_0$

D_{x_0} : coeficiente dispersivo em $x=x_0$

$\left|\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=x_0}$: gradiente de concentração em $x=x_0$

Esta dispersão é dada de acordo com a lei da difusão de Fick. Ela é proporcional a constante D, que é o coeficiente de dispersão (ou difusão), que é

obtido por meio de calibração ou obtido por cálculos de modelos de turbulência. Neste caso, os valores são oriundos do módulo hidrodinâmico (DELFT3D-FLOW).

A equação uni-dimensional do transporte de massa por advecção e dispersão por unidade de área é dada por:

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t$$

$$\times \left(Q_{x_0} C_{x_0} - Q_{x_0+\Delta x} C_{x_0+\Delta x} - D_{x_0} A_{x_0} \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x_0} + D_{x_0+\Delta x} A_{x_0+\Delta x} \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x_0+\Delta x} \right) \times A \quad (3)$$

Onde,

Q_{x_0} : fluxo em $x=x_0$

Dividindo-se equação (3) por volume $V(\Delta x \Delta y \Delta z)$ e pelo incremento Δt , assumindo os limites $\Delta t \rightarrow 0$ e $\Delta x \rightarrow 0$, adicionando termos de transporte nas direções y e x, a equação tri-dimensional de advecção difusão utilizada é:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} + S + f_R(C, t) \quad (4)$$

Onde,

S: descargas externas, como esgotos ou rios

f_R : termos reacionais ou processos, como evaporação, volatilização, predação, reações químicas, etc.

Anexo 7.1-7

Modelagem de Dispersão de Sedimentos

I.INTRODUÇÃO

Foi executado um estudo da modelagem das possíveis alterações da morfologia costeira ao longo das tubulações do gasoduto e da tomada de água e restituição do salmoroduto (emissário) a serem implantados na praia dos Coqueiros.

O objetivo principal deste estudo é verificar, por meio de modelagem numérica computacional, se os dutos que serão instalados podem alterar a morfologia do fundo mar em suas imediações.

A localização do gasoduto e dos dutos de captação d'água do mar e lançamento de efluentes, que estarão desenterrados a partir da isóbata de 5 m, pode ser vista na **Figura 1**.

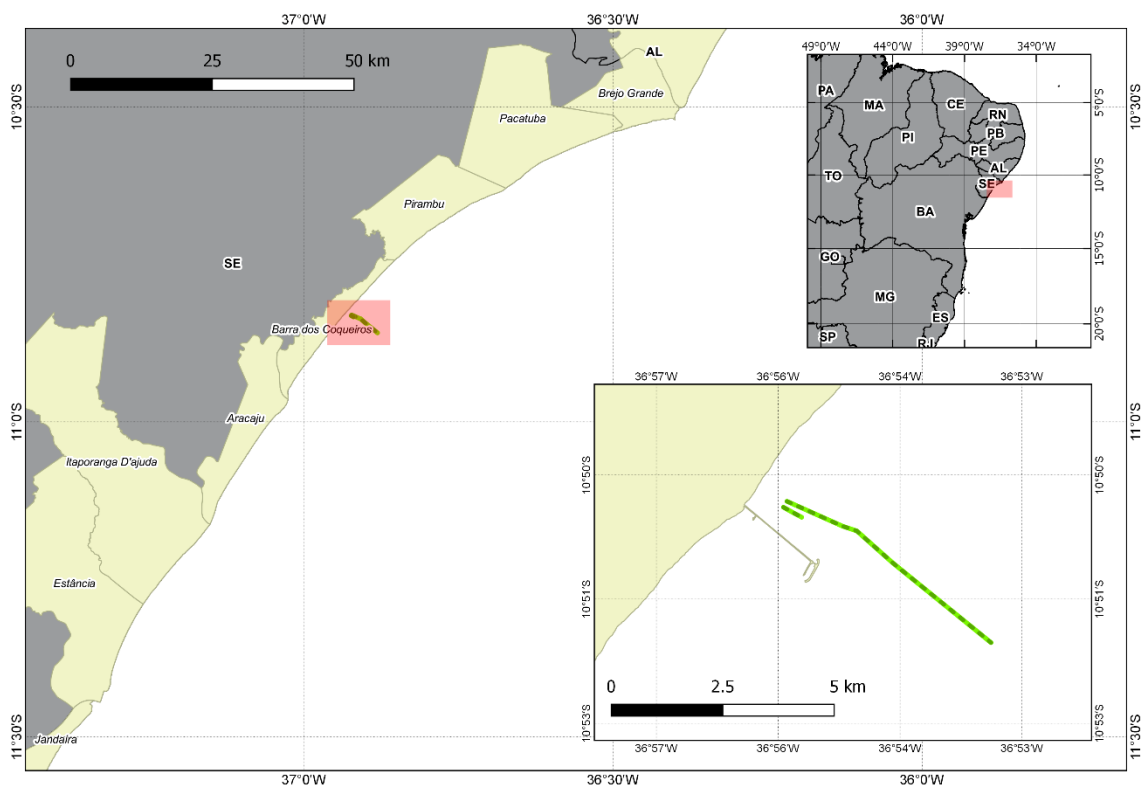


Figura 1 – Localização do gasoduto e emissário (linhas tracejadas em verde) na costa de Aracaju/SE. Está apresentado somente o trecho em profundidade acima de 5m, onde o gasoduto e adutora serão assentados sobre o assoalho marinho.

É feita uma breve descrição da oceanografia regional (descrevendo os parâmetros pertinentes a este estudo). Em sequência são apresentadas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento deste estudo, bem como os cenários computacionais simulados. Os resultados e as discussões destes cenários computacionais finalizam o trabalho.

II. DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

Nesta seção são descritas as características da região, relevantes para este estudo, englobando primeiramente a Plataforma Continental da Bacia Sergipe-Alagoas, dando enfoque em seguida para a região onde o gasoduto e os emissários serão instalados. Chegando aos padrões atmosféricos que influenciam a circulação nesta região e, por fim, o padrão de ondas local.

II.1 A PLATAFORMA CONTINENTAL DA BACIA SERGIPE ALAGOAS

A Bacia Sergipe-Alagoas (SEAL) está centrada em 11°S e se localiza na porção norte da Margem Continental Leste-Nordeste Brasileira na borda oeste do Oceano Atlântico Tropical (**Figura 2**).

A Plataforma Continental da SEAL (PCSEAL) se estende por cerca de 370 km, com uma orientação aproximadamente 40° no sentido horário em relação ao norte geográfico. Define-se a PCSEAL como uma plataforma continental estreita, com largura de cerca de 18 km no extremo sul e 42 km no extremo norte. A maior parte da sua região não ultrapassa os 40 m de profundidade, com topografia significativamente acidentada (SUMMERHAYES *et al*, 1976 *apud* PARENTE, 2016).

Na porção do Atlântico Sudoeste Tropical, onde está inserida a PCSEAL, encontra-se, em geral, uma estrutura de massas de águas formada pelo empilhamento, da superfície até o fundo, das massas de água: Água tropical, Água Central do Atlântico Sul, Água Intermediária Antártica, Água Circumpolar Superior, Água Profunda do Atlântico Norte, Água Circumpolar Inferior e Água de Fundo Antártica (MÉMERY *et al*, 200, REID, 1989). Contudo, Parente (2016) analisando dados de hidrografia coletados no ano de 2014 (duas campanhas – maio e novembro) na PCSEAL observou águas praticamente homogêneas – tanto para a temperatura quanto para a salinidade, em ambas campanhas, com valores médios de 27 °C para a temperatura e 37 para a salinidade - **Figura 3**.

Em campanha realizada em 16/05/2017 na região de instalação do gasoduto e emissário, também foram obtidos dados homogêneos de temperatura e salinidade ao longo da coluna d'água. Os dados de temperatura oscilaram entre 27,9 °C e 28,7°C e a salinidade entre 32,5 e 33,4 -**Tabela 1**.

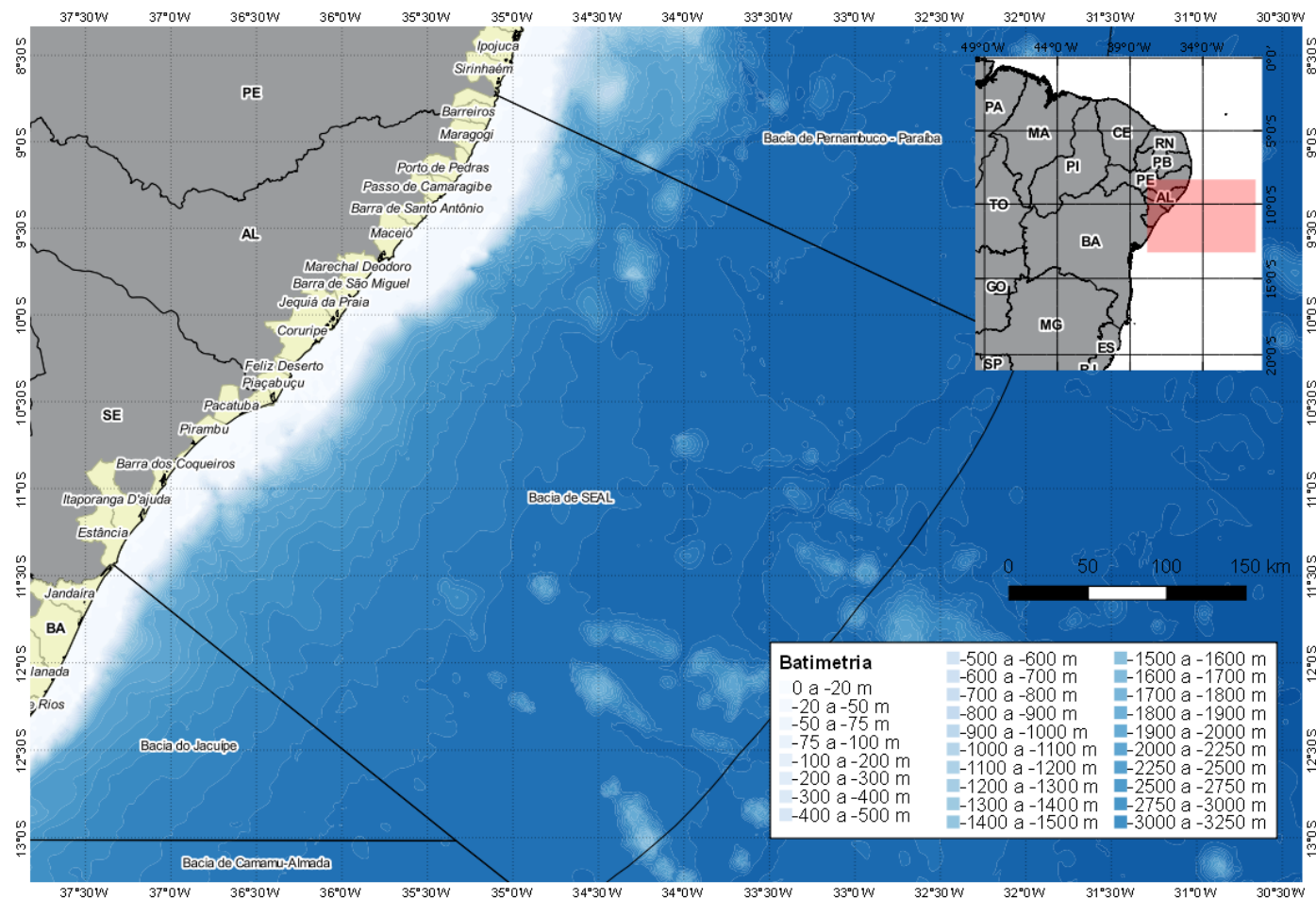
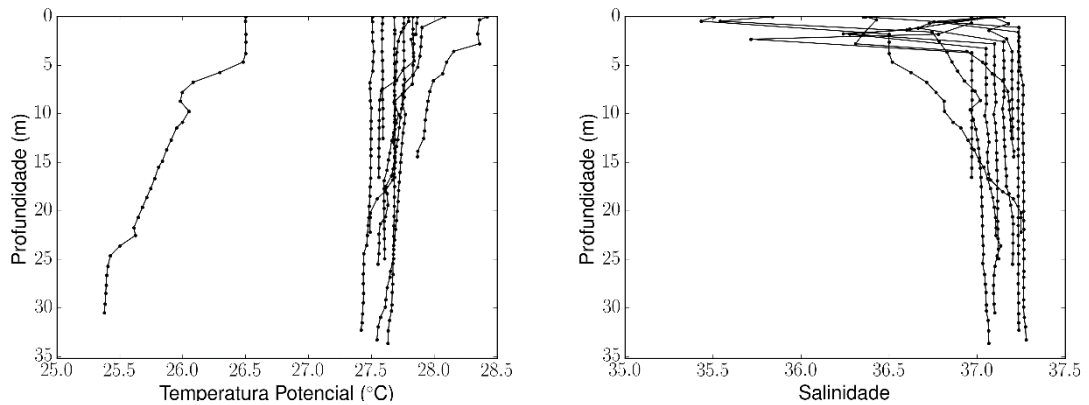


Figura 2 – Localização da Bacia Sergipe-Alagoas (SEAL).

Maio/2014



Novembro/2014

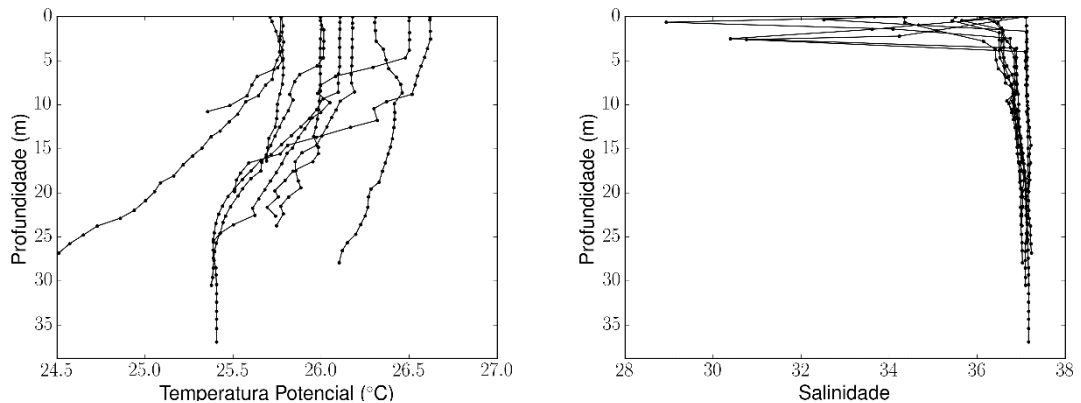


Figura 3 – Dados de temperatura (esquerda) e salinidade (direita) em maio (superior) e novembro (inferior) de 2014 ao longo da Plataforma Continental de SEAL.
 Fonte: modificado de Parente (2016).

Tabela 1 – Temperatura e salinidade medidos na região do gasoduto e emissário em 16/05/2017.

	Profundidade (m)	Temperatura (°C)	Salinidade
Pt1	16,25	27,9	33,4
	10,83	27,9	33,2
	5,41	28,1	32,7
	0,44	28,4	32,7
Tp2	3,83	28,6	32,5
	1,91	28,7	33,4
	0,44	28,7	32,8

Com relação às correntes, Parente (2019) analisou o conjunto de dados de três fundeios instalados na PCSEAL, com destaque para o fundeiro intitulado PCM-9, que coletou dados entre 19/03/2012 e 17/06/2015 em região nas

proximidades de Aracajú. Os outros dois conjuntos de correntógrafos foram instalados em região mais ao sul.

O fundeio PCM-9 foi posicionado a uma profundidade de 23 m, com medições a 10 m de profundidade. O autor cita que para este fundeio as correntes apresentaram intensidade média de 0,20 m/s, com desvio padrão de 0,12 m/s, com direção preferencial das correntes paralela a costa (sentido preferencial SSW) e com direções perpendiculares a costa escassas.

II.2 PADRÕES ATMOSFÉRICOS SOBRE A BACIA SERGIPE ALAGOAS

Como mencionado anteriormente, a SEAL situa-se na região Nordeste do Brasil (NEB) aproximadamente entre os paralelos 10 e 12°S e os meridianos 35,5 e 37,5° W, numa região equatorial oceânica adjacente ao estado de Sergipe, abrangendo também o sul do Estado de Alagoas.

Três tipos de clima podem ser identificados na região Nordeste: um clima litorâneo úmido (que se estende do litoral da Bahia ao do Rio Grande do Norte), um clima tropical (em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí) e um clima tropical semiárido (em todo o sertão nordestino). Essa diversidade de climas deve-se à atuação de diversos mecanismos físicos que interagem e são responsáveis pela distribuição das chuvas, pelas variações da nebulosidade e do vento na região (PETROBRAS, 2016). Os principais fatores dinâmicos de larga escala que determinam o clima no Nordeste (NEB) são (i) o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que depende (ii) da intensidade e do posicionamento do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e do Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte (ASAN), conseqüentemente, modificando o padrão de ocorrência (iii) dos ventos alísios e das precipitações na região. Somam-se a estes os sistemas sinóticos e de mesoescala, causadores de perturbações no padrão climático ditado pela ZCIT que podem ser externos ou internos à região e agir de forma isolada ou sinérgica, causando eventos extremos na região de estudo (PETROBRAS, 2016).

A precipitação é a variável meteorológica mais importante quando se estuda o NEB em função de suas conseqüências socioeconômicas, notadamente com relação ao abastecimento hídrico urbano, agricultura, pecuária e diversas atividades industriais ao se adentrar no continente, notadamente na região do

sertão, mais distante do litoral. Por esta razão, em geral os trabalhos científicos sobre o NEB remetem a esta variável (PETROBRAS, 2016).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e as normais climatológicas para a estação de Aracaju (estação código 83096), a temperatura média anual, o mês mais quente é o de março (27,1 °C 1961-1990 e 26,9 °C 1931-1960), e o mais frio julho (23,8 °C 1961-1990) ou agosto (23,7 °C 1931-1960) - **Figura 4**. Assim, é possível concluir que a amplitude térmica na região é de aproximadamente 3,5 °C, que é relativamente baixa.

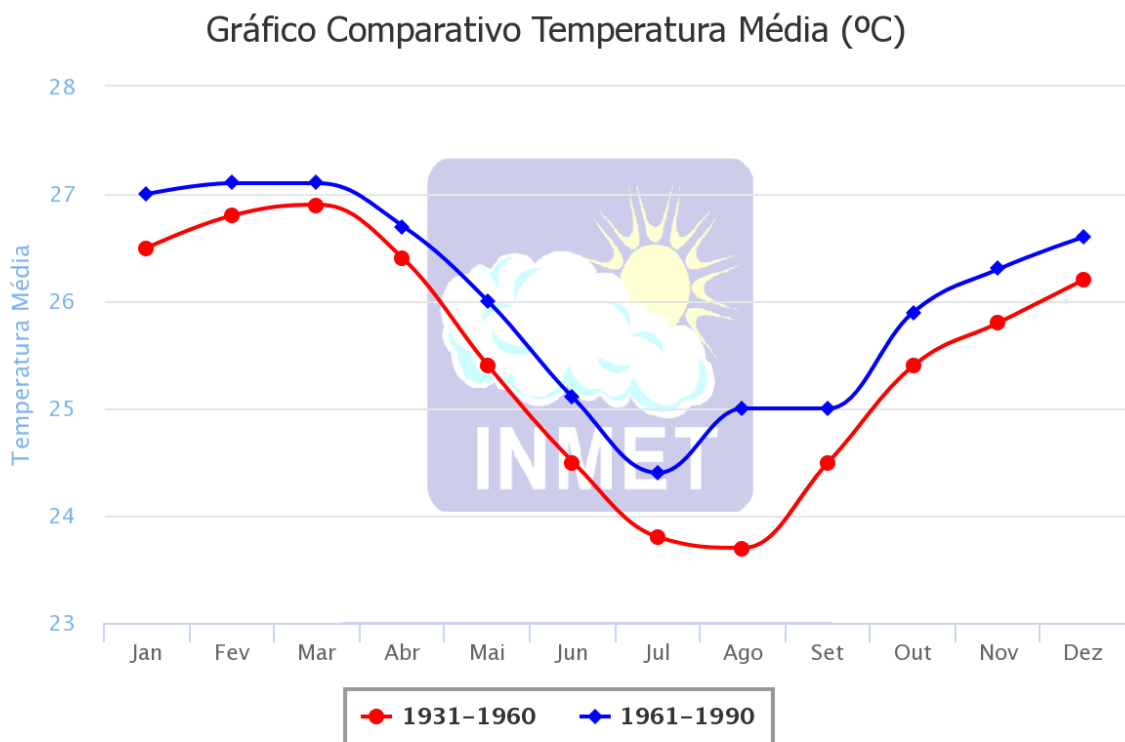


Figura 4 – Variação climatológica da temperatura para o município de Aracaju, entre 1931 e 1990.

Fonte: INMET.

Entretanto, de acordo com o INMET na mesma estação, a pluviosidade varia desde os valores mínimos em dezembro (38,3 mm – 1931-1960; 56,3 mm 1960-1991) e valores máximos maio (262,70 mm – 1931-1960; 333,80 mm – 1960-1991), tendo amplitudes máximas anuais de 277,5 mm (1960-1991) - **Figura 5**. Assim, é possível identificar duas estações extremas e uma intermediária:

- Seca: outubro, novembro e dezembro
- Chuvosa: abril, maio e junho

- Transição: janeiro, fevereiro e março; julho, agosto e setembro.

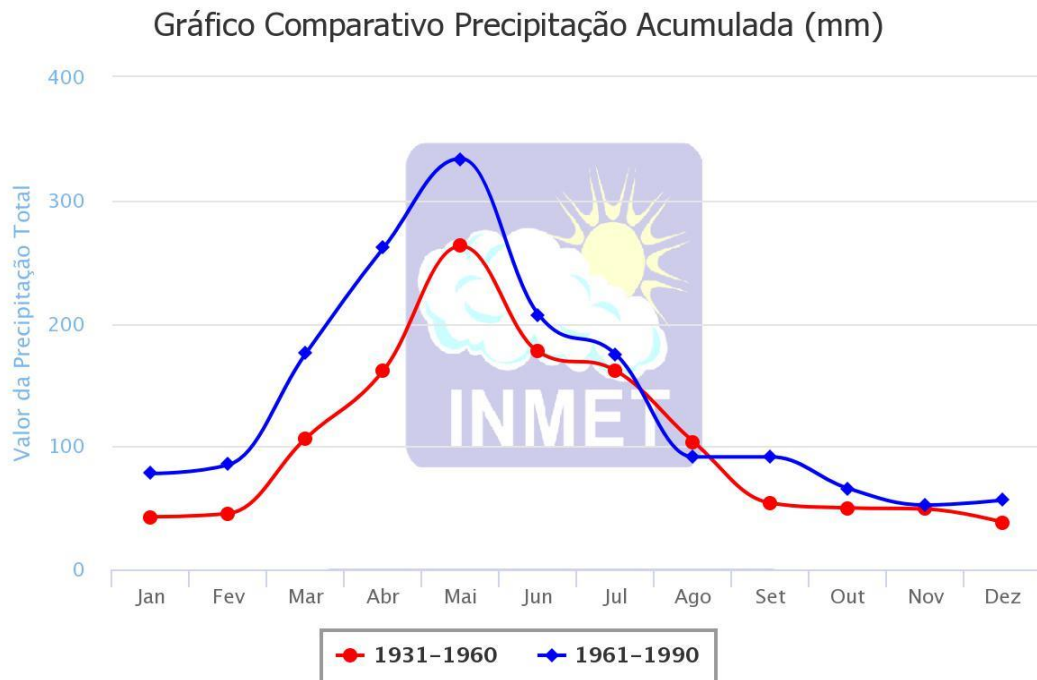


Figura 5 – Variação climatológica da pluviosidade acumulada para o município de Aracajú, entre 1931 e 1990.

Fonte: INMET.

Para analisar a variação dos ventos nestas estações, foram obtidos dados de vento do aeroporto de Aracaju (METAR), do período entre 1997 e 2016, com medições horárias. O aeroporto de Aracajú está localizado na latitude: 10° 59'S, longitude: 37° 04'W a uma altura de 8 m. As rosas dos ventos para os períodos de transição e estações seca e chuvosas estão na **Figura 6** e na **Figura 7**. Nestas figuras é possível notar que na época chuvosa os ventos provenientes de leste são os mais frequentes, com influências de sudoeste e nordeste significativas. Já para a época de seca, os ventos de nordeste são os mais frequentes, com pouca frequência de ocorrência dos ventos do quadrante sudoeste. Nota-se também que no período de seca os ventos possuem maiores intensidades que no período chuvoso.

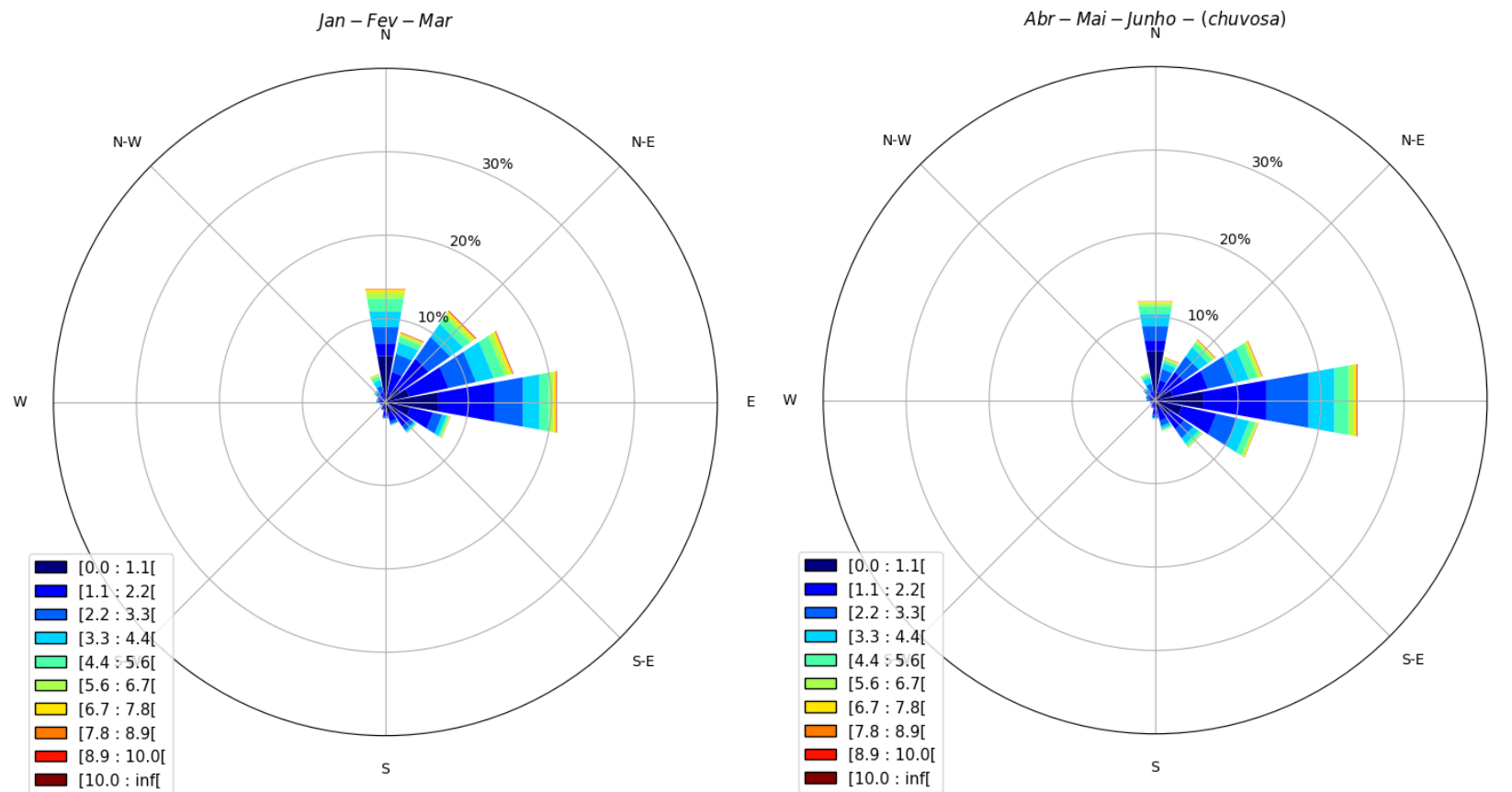


Figura 6 – Rosa dos ventos para os meses de janeiro, fevereiro e março (esquerda) e abril, maio e junho (direita), para o aeroporto de Aracajú entre 1997 e 2016.

Fonte: Metar.

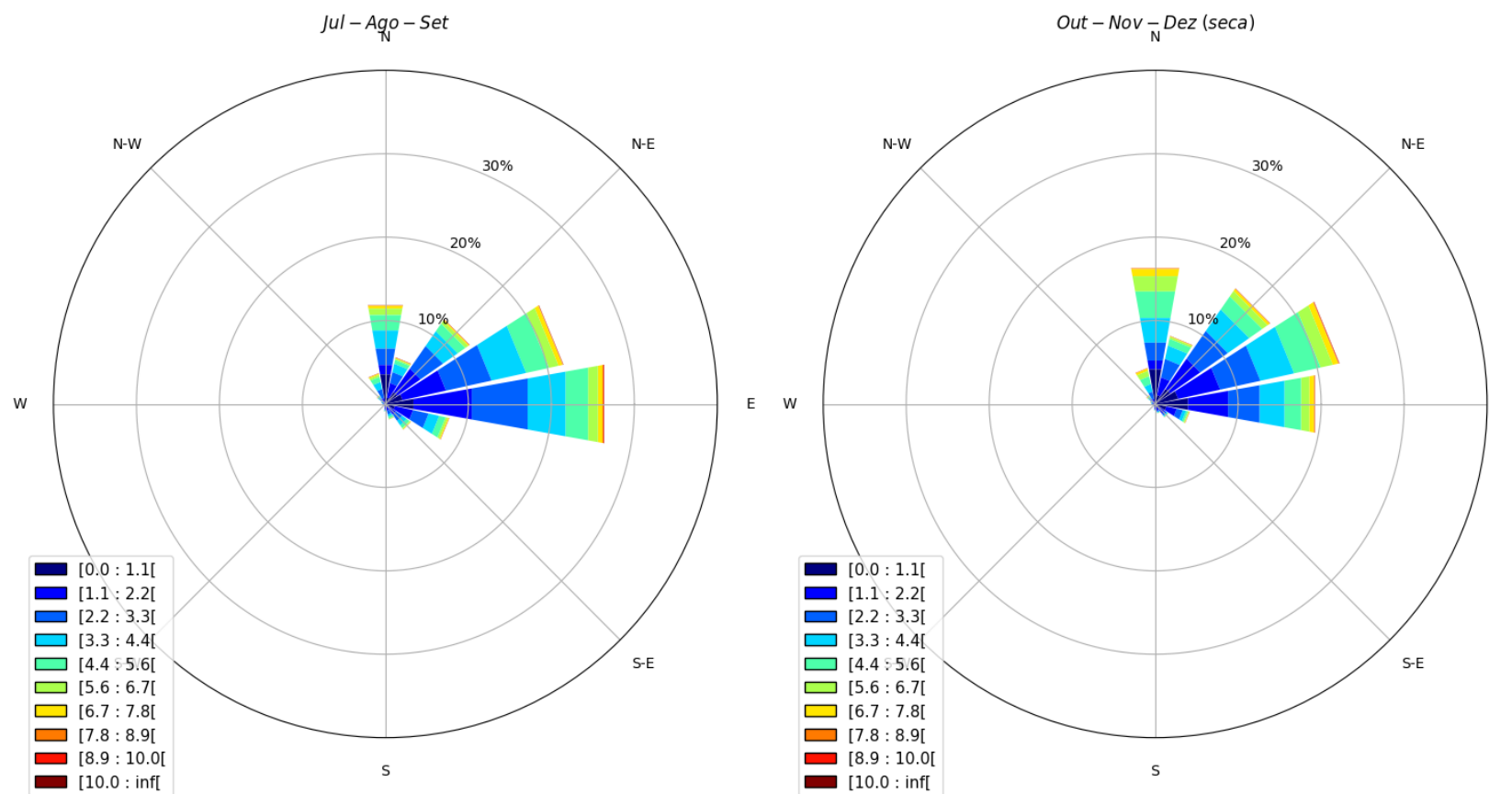


Figura 7 – Rosa dos ventos para os meses de julho, agosto e setembro (esquerda) e outubro, novembro e dezembro (direita), para o aeroporto de Aracajú entre 1997 e 2016.

Fonte: Metar.

II.3 REGIME DE ONDAS NA BACIA SERGIPE ALAGOAS

Para descrever o regime de ondas na bacia Sergipe-Alagoas foram utilizados dados provenientes do modelo global Wave Watch III do NCEP. Foram obtidos dados entre os anos de 01/01/2007 e 31/12/2016, com resolução de 3 horas, para o ponto localizado na posição longitude 36,5 °W e latitude 11,0°S, distante cerca de 50 km do local onde serão instalados o gasoduto e o emissário. A **Figura 8** e a **Figura 9** mostram a série de altura significativa de onda para este conjunto de dados. A **Tabela 2** mostra as estatísticas básicas de altura e período para esta série, contemplando tanto período total quanto as épocas sazonais.

Tabela 2 – Estatística básica para a série de ondas ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016.

Época do ano	Altura (m)				Período (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Anual	1,77	0,78	4,19	0,49	8,93	4,35	20,45	2,27
Janeiro - Fevereiro - Março	1,41	0,78	2,33	0,22	8,24	4,46	17,86	2,28
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	1,79	0,83	4,05	0,50	9,73	4,35	20,45	2,49
Julho - Agosto - Setembro	2,16	1,06	4,19	0,52	9,33	5,73	19,66	1,95
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	1,70	0,95	3,86	0,35	8,42	4,37	18,78	1,99

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

A **Tabela 2** mostra que a altura média de onda anual é de 1,77 m e período médio de 8,93 s. Com relação a sazonalidade, observa-se que o período entre julho a setembro é o que possui a maior altura significativa média, com 2,16 m. Já as ondas com maior período médio foram observadas na estação chuvosa (entre abril e junho), com 9,73. A época do ano com a menor altura média é a de janeiro-março, com 1,41 m. Esta época do ano é também a com menor período médio, com 8,24 s.

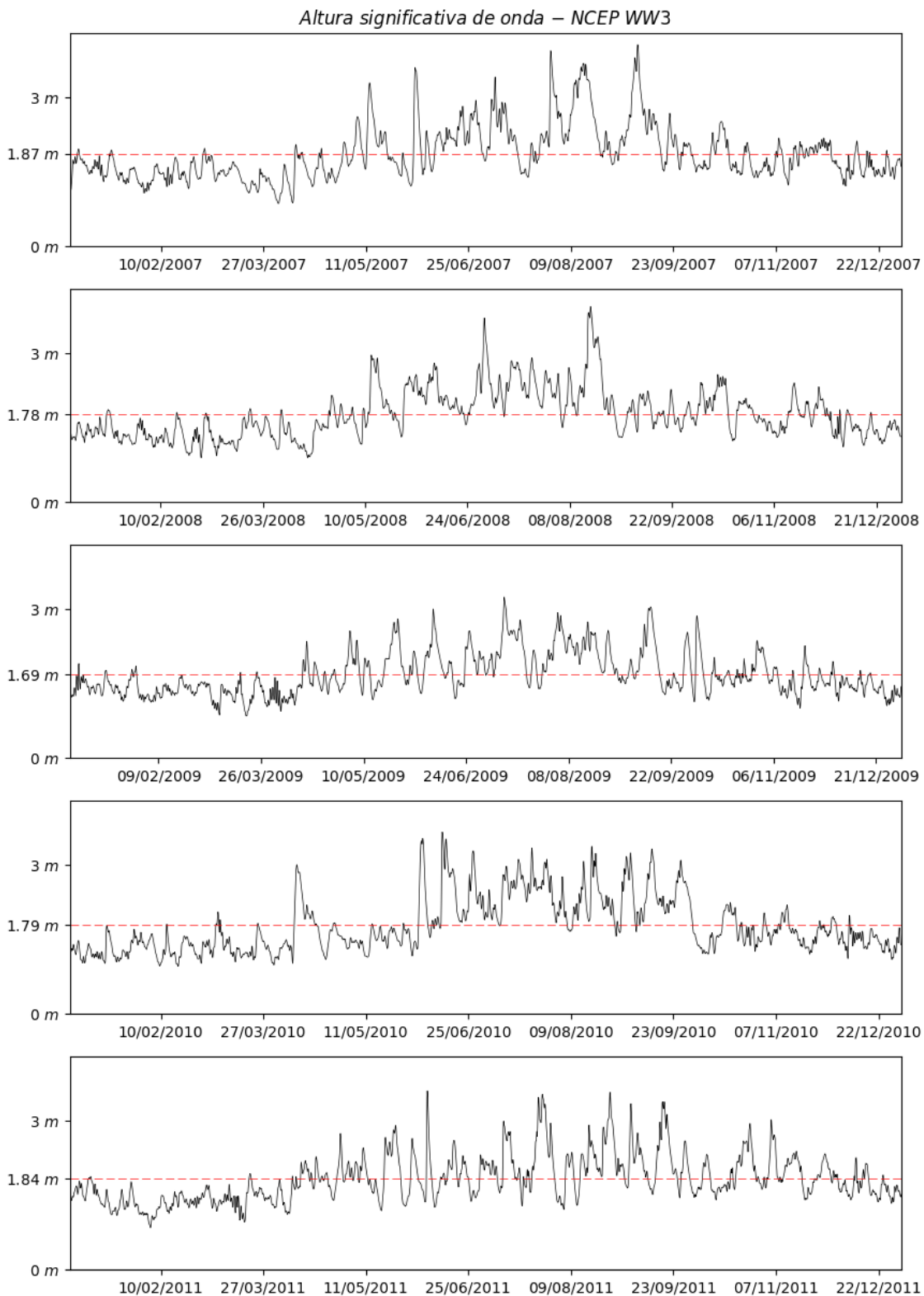


Figura 8 – Altura significativa de onda ao largo da costa de Aracajú entre 2007 (superior) e 2011 (inferior). As linhas tracejadas vermelhas mostram o valor médio anual.

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

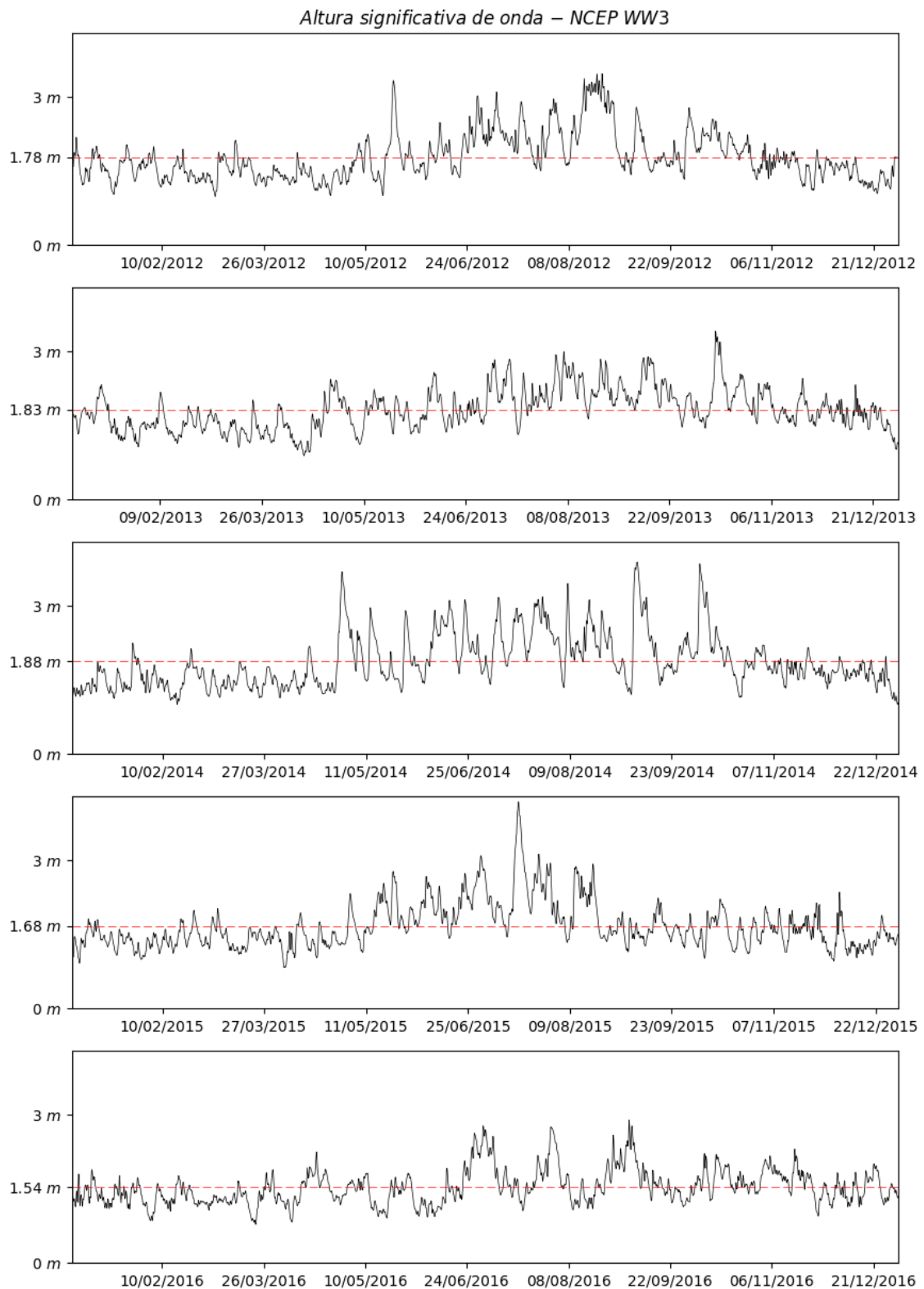


Figura 9 – Altura significativa de onda ao largo da costa de Aracajú entre 2012 (superior) e 2016 (inferior). As linhas tracejadas vermelhas mostram o valor médio anual.

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

Da **Tabela 3** à **Tabela 7** são apresentados os histogramas de distribuição conjunta de altura e direção de onda entre os anos de 2007 e 2016 ao largo do litoral de Aracajú/SE.

Tabela 3 – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016.

Anual										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	149	78	29	0	0	0	256	0,79
1,00 - 1,50	0	34	5230	3013	2235	0	0	0	10512	32,57
1,50 - 2,00	0	57	6313	3521	2965	0	0	0	12856	39,83
2,00 - 2,50	0	19	2513	1854	1224	0	0	0	5610	17,38
2,50 - 3,00	0	0	785	952	488	0	0	0	2225	6,89
3,00 - 3,50	0	0	113	387	151	0	0	0	651	2,02
3,50 - 4,00	0	0	25	75	56	0	0	0	156	0,48
>4,00	0	0	5	5	0	0	0	0	10	0,03
Observações	0	110	15133	9885	7148	0	0	0	32276	
Frequência (%)	0,0	0,3	46,9	30,6	22,2	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

Tabela 4 – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016, para os meses de janeiro-fevereiro-março.

Janeiro - Fevereiro - Março										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	82	38	6	0	0	0	126	1,58
1,00 - 1,50	0	22	2687	1530	1037	0	0	0	5276	66,14
1,50 - 2,00	0	16	1114	885	475	0	0	0	2490	31,21
2,00 - 2,50	0	0	31	41	13	0	0	0	85	1,07
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,00 - 3,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,50 - 4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	38	3914	2494	1531	0	0	0	7977	
Frequência (%)	0,0	0,5	49,1	31,3	19,2	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

Tabela 5 – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016, para os meses de janeiro-fevereiro-março.

Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	63	37	23	0	0	0	123	1,53
1,00 - 1,50	0	12	649	994	698	0	0	0	2353	29,26
1,50 - 2,00	0	7	948	1041	1244	0	0	0	3240	40,29
2,00 - 2,50	0	0	475	537	555	0	0	0	1567	19,49
2,50 - 3,00	0	0	136	225	207	0	0	0	568	7,06
3,00 - 3,50	0	0	1	58	88	0	0	0	147	1,83
3,50 - 4,00	0	0	0	16	25	0	0	0	41	0,51
>4,00	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0,02
Observações	0	19	2272	2910	2840	0	0	0	8041	
Frequência (%)	0,0	0,2	28,3	36,2	35,3	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

Tabela 6 – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016, para os meses de janeiro-fevereiro-março.

Julho - Agosto - Setembro										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
1,00 - 1,50	0	0	371	137	177	0	0	0	685	8,43
1,50 - 2,00	0	0	1464	635	483	0	0	0	2582	31,76
2,00 - 2,50	0	0	1364	933	485	0	0	0	2782	34,22
2,50 - 3,00	0	0	624	654	245	0	0	0	1523	18,74
3,00 - 3,50	0	0	112	276	58	0	0	0	446	5,49
3,50 - 4,00	0	0	25	55	23	0	0	0	103	1,27
>4,00	0	0	5	3	0	0	0	0	8	0,10
Observações	0	0	3965	2693	1471	0	0	0	8129	
Frequência (%)	0,0	0,0	48,8	33,1	18,1	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

Tabela 7 – Histograma de altura e direção de onda ao largo do litoral de Aracajú/SE para o período entre 2007 e 2016, para os meses de janeiro-fevereiro-março.

Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)										
Altura (m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	4	3	0	0	0	0	7	0,09
1,00 - 1,50	0	0	1523	352	323	0	0	0	2198	27,04
1,50 - 2,00	0	34	2787	960	763	0	0	0	4544	55,90
2,00 - 2,50	0	19	643	343	171	0	0	0	1176	14,47
2,50 - 3,00	0	0	25	73	36	0	0	0	134	1,65
3,00 - 3,50	0	0	0	53	5	0	0	0	58	0,71
3,50 - 4,00	0	0	0	4	8	0	0	0	12	0,15
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	53	4982	1788	1306	0	0	0	8129	
Frequência (%)	0,0	0,7	61,3	22,0	16,1	0,0	0,0	0,0		100,0

Fonte: WaveWatch3 – NCEP.

Os histogramas direcionais de onda mostram que, de forma anual, aproximadamente 47% das ondas possuem direção de origem E e em 73% se encontram com altura significativa entre 1,0 e 2,0 m. A segunda direção com maior incidência de ondas é a SE, com 31% de frequência.

Para o trimestre de janeiro a março as ondas de E representam aproximadamente 49% da frequência de ocorrência, e alturas entre 1,0 e 1,5 m ocorrem em 66% do tempo.

Na estação chuvosa (abril a junho), as ondas de S e SE representam 71% das amostragens e ondas entre 1,5 e 2,0% são mais comuns em 40% do tempo.

Os meses de julho-setembro são similares ao primeiro trimestre do ano na questão de direção, com 49% das observações provenientes de E. Já as alturas são maiores, com 34% ocorrendo com valores entre 2,0 e 2,5 m.

O último semestre do ano é o que apresenta a maior frequência de ocorrência em uma única direção – 61% para onde de E. Nesta época do ano as ondas possuem altura significativa entre 1,5 m e 2,0 m em 56% do tempo.

III.METODOLOGIA UTILIZADA

III.1 ETAPAS DA MODELAGEM NUMÉRICA

Admitiu-se que o emissário e o gasoduto possuem diâmetro de 1,0 m e, desta maneira, devido à reduzida escala, optou-se por fazer modelagens morfológicas para três trechos específicos dos dutos, nas profundidades de 20, 13 e 6 m. Tais grades e pontos são mostrados no item III.4 a seguir.

As modelagens nestes três trechos foram realizadas tendo como dados produzidos por modelagens regionais – tanto hidrodinâmica quanto de ondas.

Assim, primeiramente, é realizada a modelagem hidrodinâmica da região. A modelagem hidrodinâmica simula as correntes na região que variam com o tempo e com as forçantes envolvidas. Paralelamente é realizada, de forma regional, a modelagem de ondas, que calcula a altura, período e direção de ondas no domínio selecionado. Por fim, tantos os resultados hidrodinâmicos quanto de ondas são inseridos como forçantes no modelo morfológico para obtenção da variação do relevo nas imediações do gasoduto e emissário.

III.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Para o estudo hidrodinâmico da região de interesse foi empregada a suíte computacional DELFT3D totalmente modular desenvolvida pela WL | Delft Hydraulics, Holanda (DELTARES, 2010).

O modelo hidrodinâmico, denominado DELFT3D – FLOW é um modelo de simulação multidimensional que calcula escoamentos e transportes não estacionários, forçados por descargas fluviais, marés e processos meteorológicos em regiões costeiras, estuarinas, lagunas, rios, represas e lagos. Emprega uma grade horizontal curvilínea, facilmente ajustada aos contornos sólidos da região modelada, facilitando a representação de margens de rios, por exemplo. Suporta, como coordenadas verticais, a transformação conhecida na literatura por sigma (σ) introduzida por Phillips (1957), resultando numa representação suave da topografia de fundo.

Os fluxos calculados pelo DELFT3D-FLOW podem ser forçados por marés, gradientes de densidade, tensão de cisalhamento do vento e gradientes de

pressão atmosférica. Fontes e sorvedouros são incluídos na equação do movimento, simulando algum tipo de descarga como, por exemplo, rios.

O modelo DELFT3D-FLOW resolve as equações hidrodinâmicas aproximadas para águas rasas. Essa aproximação sugere que a profundidade é assumida muito menor que a escala horizontal do movimento. Pela razão de aspecto ser pequena, a aproximação de águas rasas é válida, e a equação do movimento em sua componente vertical é resumida ao equilíbrio hidrostático. Com isto, é assumido que a aceleração vertical é muito pequena comparada com a gravidade reduzida e esta é desprezada nas equações. Além disso, o DELFT3D-FLOW apresenta as seguintes características:

- Na camada de fundo, o efeito do atrito é parametrizado em ordem quadrática;
- A formulação que assume a tensão de cisalhamento provocada pelo fundo em combinação com as correntes é baseada num campo bidimensional de fluxos, gerada a partir de velocidades próximas ao fundo usando uma aproximação logarítmica;
- Os pontos de grade podem ser assumidos como sendo secos quando a profundidade é menor que o descrito para a batimetria. Neste caso, a velocidade neste ponto de grade é considerada como sendo zero. Em instantes de tempo posteriores esta célula pode voltar a ser considerado ponto de grade úmido, de acordo com o nível em relação à batimetria.

As principais equações utilizadas pelo DELFT3D-FLOW são apresentadas no ANEXO A.

III.2.1 Grade numérica

A correta confecção da grade numérica para o modelo numérico hidrodinâmico é detalhe fundamental para atingir os objetivos propostos.

Os principais detalhes que devem ser atentados para uma grade numérica são:

- Abrangência espacial: deve ser suficiente para que todos os fenômenos que atuam significativamente sobre os movimentos da região sejam representados;
- Linhas de costa e batimetria: é necessária a perfeita identificação da região costeira, bem como a disponibilidade de batimetria com resolução acordante com a da grade numérica proposta;
- Resolução espacial: indica o tamanho dos elementos de grade e deve considerar a relação: escala dos movimentos Vs. tempo computacional. Quanto maior a resolução, maior será o detalhamento dos fenômenos, contudo, maior tempo computacional é requerido. A resolução espacial deve atender a resolução dos fenômenos que atuem significativamente sobre a região;
- Ortogonalidade: indica a perpendicularidade da grade ao longo da direção horizontal (direções x e y), definida como o cosseno do ângulo fechado. Para a eficiência computacional, a ortogonalidade da grade deve ser suficientemente alta (valores próximos à zero).

A linha de costa foi obtida por meio de imagens de satélite provenientes de MapLink/TeleAtlas®, Digital Globe®, Geo Eye®, Data Sio®, NGA® e GEBCO® distribuídas pelo Google Earth® Pro.

Para a batimetria, foram digitalizadas cartas náuticas provenientes da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil. As cartas náuticas utilizadas, bem como sua data de atualização, estão listadas na **Tabela III.2-1**.

Tabela III.2-1 - Cartas náuticas da DHN utilizadas para obtenção da batimetria da área de estudo.

Carta Náutica	Data de atualização
1000 - DE MACEIÓ AO RIO ITARIRI	25/11/2016
1001 - PORTO DE BARRA DOS COQUEIROS	25/11/2016

Juntamente com as cartas náuticas, foram utilizados os dados batimétricos do levantamento de detalhe realizado na região de estudo. A batimetria utilizada nas simulações foram a combinação das cartas náuticas com o levantamento de detalhe da região.

A grade numérica confeccionada para este estudo é curvilínear com resolução variável, desde 3.000 m até 200 m na região do gasoduto e emissário. Sua representação gráfica aparece na **Figura 10**.

A dimensão vertical adotada foi de 10 camadas sigma, com resolução variável. As camadas, com relação à porcentagem da profundidade da coluna de água, foram de: 5%, 7%, 9%, 13%, 16%, 16%, 13%, 9%, 7%, 5%.

De forma resumida, as propriedades de forma das Grades Externa e Interna estão listadas na **Tabela 2**.

Tabela 2- Propriedades de forma da grade numérica confeccionada para as simulações hidrodinâmicas.

Propriedade	
Pontos	104 x 29
Resolução horizontal mínima	3.000 m
Resolução horizontal máxima	200 m
Resolução vertical	10 camadas

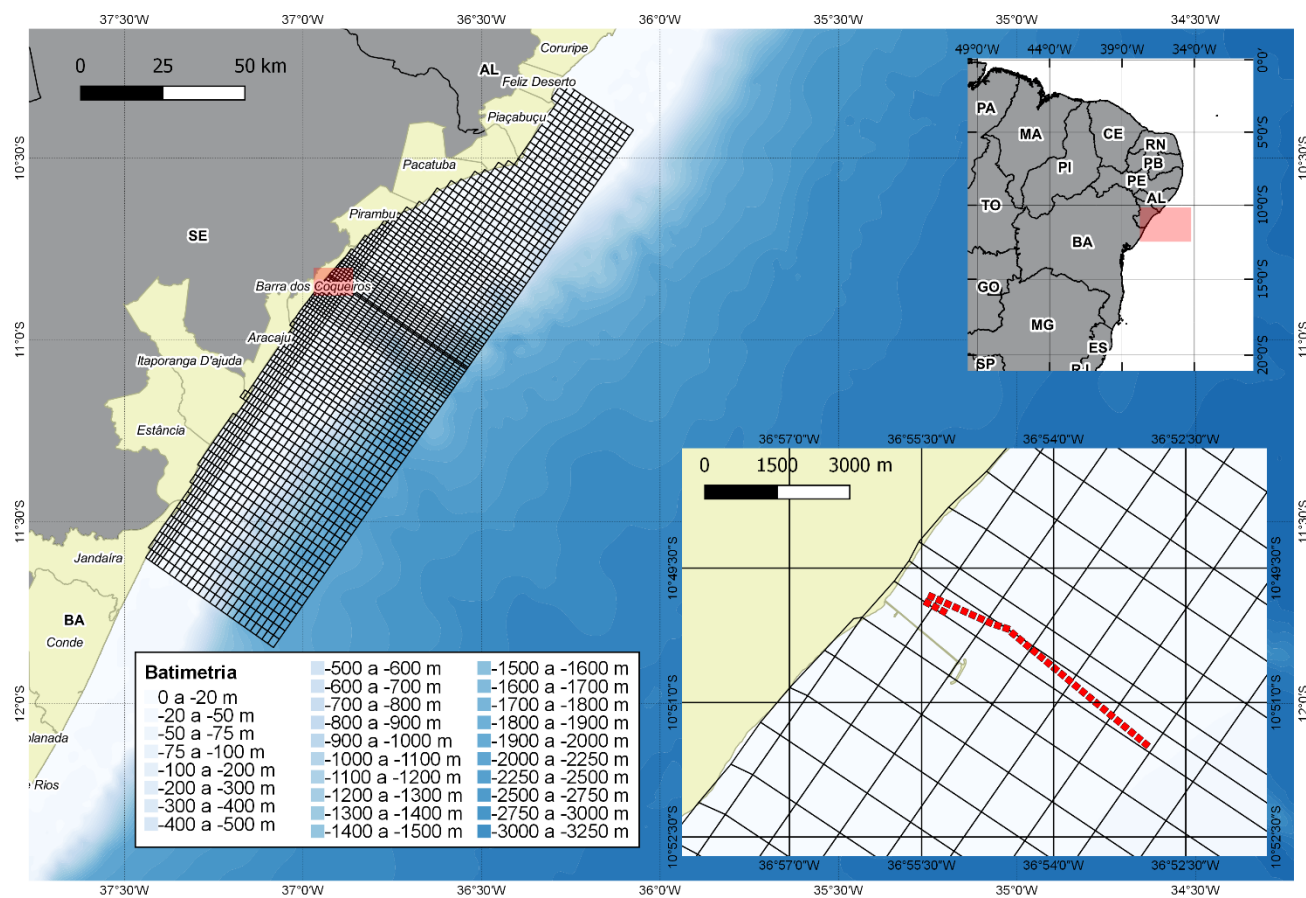


Figura 10 - Grade numérica desenvolvida para as simulações hidrodinâmicas. No painel menor a linha tracejada vermelha mostra a localização do gasoduto e da emissário.

III.2.2 Condições iniciais

Para as condições iniciais de temperatura e salinidade foram utilizados os valores descritos na **Seção II.2**, onde uma compilação de autores mostra uma estratificação da coluna de água na região. Para ambas as simulações foram consideradas condições homogêneas do oceano, com salinidade 33 e temperatura de 27 °C.

As condições iniciais de velocidade e elevação da superfície livre foram nulas em todos os pontos de grade. Desta maneira, os instantes iniciais da modelagem em que o modelo se adaptou às condições de bordas impostas, comumente conhecida como período de aquecimento do modelo, foram descartados após análise destes campos. Para este estudo, o período inicial descartado das simulações foi de 2 dias.

III.2.3 Condições de borda

As bordas fechadas foram utilizadas de maneira a se representar a linha de costa, de forma impermeável, com velocidades perpendiculares nulas. Já as bordas abertas impostas às grades do modelo hidrodinâmico estão representadas na **Figura 11**.

Para as bordas abertas, foram impostas elevações do nível do mar de acordo com as componentes de maré astronômicas mais significativas. As componentes de maré foram obtidas a partir do modelo global TPXO 7.2 (EGBERT & EROFEEVA, 2002) para os harmônicos M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, MF, MM, M4, MS4 e MN4. Em cada um dos vértices apresentados na **Figura 11** foram impostos valores de amplitude e fase das componentes em questão (**Tabela 3**), sendo que os valores impostos nos pontos intermediários representam resultado da interpolação linear entre os vértices.

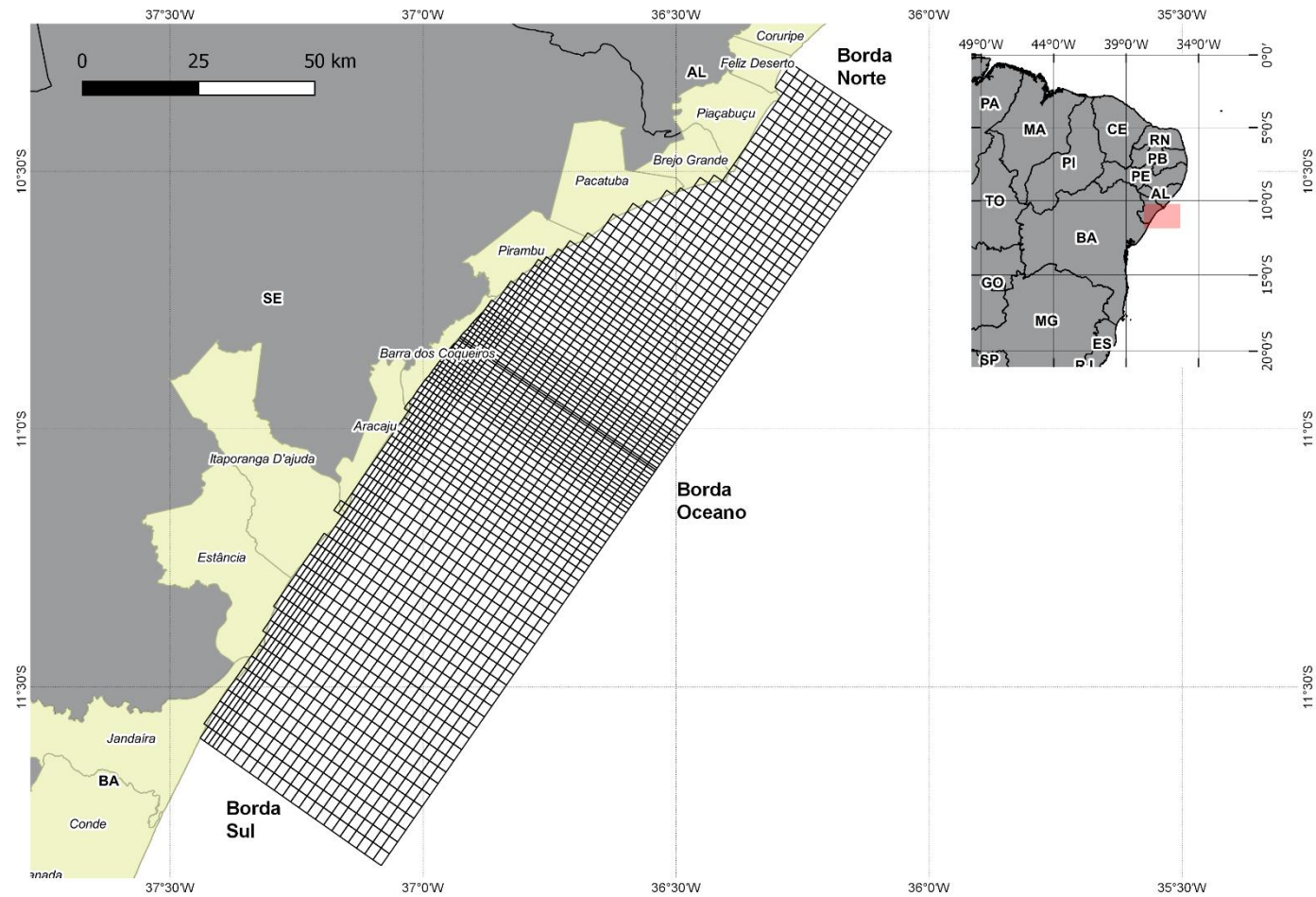


Figura 11 - Configuração das bordas abertas da grade numérica utilizadas nas simulações hidrodinâmicas.

Tabela 3 - Amplitude e fase das constantes harmônicas impostas nas bordas abertas da Grade Externa. A fase é relativa a Greenwich.

	Sul		Oceano		Norte	
	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)
M2	0,690	190,33	0,695	191,05	0,700	192,05
S2	0,260	207,2	0,260	208,05	0,260	209,23
N2	0,130	183,24	0,131	183,64	0,133	184,15
K2	0,076	203,11	0,075	204,04	0,075	205,25
K1	0,039	255,31	0,038	257,52	0,038	260,03
O1	0,060	161,98	0,059	162,95	0,058	164,71
P1	0,011	247,24	0,011	249,86	0,011	252,7
Q1	0,017	133,39	0,017	134,23	0,017	135,66
MF	0,015	357	0,015	357,16	0,015	357,45
MM	0,007	355,38	0,007	355,36	0,008	355,31

Fonte: TPXO 7.2.

Para as propriedades temperatura e salinidade, foram impostos valores nas bordas abertas referentes às condições iniciais apresentadas, de modo a não introduzir campo de massa diferente daquele estipulado no início das simulações.

Para a condição de borda atmosférica foi imposta o vento coletado na cidade de Aracajú. Maiores detalhes desta fonte de dados estão disponíveis no item **III.6 Cenário de Modelagem**.

III.2.3.1 Calibração e validação do modelo hidrodinâmico

A calibração do modelo hidrodinâmico foi realizada por meio de estudos de sensibilidade dos coeficientes, verticais e horizontais, de viscosidade e difusividade. Estes valores foram variados, dentro de níveis reais, e os resultados obtidos de nível do mar, velocidades e estratificação da coluna de água foram comparados com valores de referência (bibliográficos).

O modelo de fechamento turbulento utilizado nas simulações numéricas foi o $k-\epsilon$, cujo detalhamento matemático e numérico encontra-se no Apêndice A. Este modelo de fechamento turbulento utiliza o número de Schmidt (σ_c) igual a:

$$\sigma_c = \frac{V_H}{D_H} = 0,7 \quad (1)$$

, onde VH é o coeficiente de viscosidade horizontal e DH é o coeficiente de difusividade horizontal.

Os coeficientes de viscosidade e difusividade não são calculados pelo modelo de fechamento turbulento, mas sim especificados pelo usuário. Desta maneira, os valores dos coeficientes horizontais de difusividade e viscosidade seguiram o preceito da Equação 1. De acordo com o manual do modelo DELFT3D-FLOW (DELTARES, 2011), para grades com resolução espacial horizontal da ordem de 10 m ou menos, os valores sugeridos, para ambos os coeficientes, estão no intervalo entre 1 e 10 m².s⁻¹. Após diversos testes de calibração, foram utilizados os coeficientes de viscosidade e difusividade iguais a 70 m².s⁻¹ e 100 m².s⁻¹, respectivamente.

O coeficiente de difusividade vertical (DV) é derivado da viscosidade turbulenta. Mesmo que os valores verticais são determinados pelo modelo de fechamento turbulento, o valor de background tem que ser especificado para amortecer as oscilações geradas por condições de fronteira, ventos, etc. (DELTARES, 2011). Ainda, seguindo as mesmas sugestões do manual, os coeficientes verticais para a viscosidade (VV) e difusividade são de 10⁻⁴ m².s⁻¹ e 1,43.10⁻⁴ m².s⁻¹, respectivamente. Estes valores se mostraram adequando dentro dos experimentos realizados.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo hidrodinâmico, foram realizadas comparações entre os níveis do mar computados pelo modelo e dados de previsão de maré para três locais na região, cujas constantes harmônicas são disponibilizadas por Femar (2002). Foram selecionados os locais: Terminal Portuário de Sergipe, Cabeço e Plataforma PCM1 – as constantes harmônicas destes locais, utilizadas para confeccionar as previsões, estão apresentadas da **Figura 12 a Figura 14**.

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

Nome da Estação :		TERMINAL PORTUÁRIO DE SERGIPE - SE			
Localização :		Barra dos Coqueiros			
Organ. Responsável :		DHN / CVRD			
Latitude :		10° 50,0' S	Longitude : 36° 55,7' W		
Período Analisado :		18/02/91 a 19/03/91	Nº de Componentes : 17		
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		III H 51 min	Nível Médio (Zo):		124 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		225 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		170 cm acima do NR
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		22 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		77 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	-	-
Ssa	-	-	N ₂	14,6	097
Mm	3,3	200	NU ₂	2,8	098
Mf	-	-	M ₂	74,0	107
MTM	-	-	L ₂	2,4	144
Msf	3,1	344	T ₂	1,6	122
Q ₁	2,1	088	S ₂	27,4	122
O ₁	6,4	120	K ₂	7,4	123
M ₁	-	-	MO ₃	-	-
P ₁	1,1	224	M ₃	-	-
K ₁	3,2	233	MK ₃	-	-
J ₁	-	-	MN ₄	-	-
OO ₁	-	-	M ₄	1,1	160
MNS ₂	-	-	SN ₄	-	-
2N ₂	1,9	086	MS ₄	-	-
Referências de Nível: RN marco de concreto junto à balança rodoviária, no início da ponte de acesso ao cais. RN 1,2 e 3 d DHN localizadas próximo ao marégrafo, no cais da Sereia					
Obs: Outros Períodos: 01/02/91 a 14/02/91; 19/06/91 a 20/07/91 e 29/07/95 a 17/09/95. Consta das Tábuas das Marés					

Código BNDO: 30810

Figura 12 – Constantes harmônicas para o terminal portuário de Sergipe.

Fonte: FEMAR (2002).

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

Nome da Estação :		CABEÇO – SE			
Localização :		Na Barra do Rio São Francisco, em frente ao Farol.			
Organ. Responsável :		INPH / DHN			
Latitude :		10° 30,2' S	Longitude :		36° 24,0' W
Período Analisado :		06/04/81 a 12/05/81	Nº de Componentes :		82
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco.			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)	IV H 21 min	Nível Médio (Zo):		99 cm acima do NR.	
Médias das Preamares de Sизіgia (MHWS) :	176 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		134 cm acima do NR	
Média das Baixa-mares de Sизіgia (MLWS) :	22 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		63 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	10,1	049
Ssa	-	-	N ₂	16,8	074
Mm	3,7	196	NU ₂	3,2	077
Mf	-	-	M ₂	56,2	102
MTM	3,2	050	L ₂	7,6	123
Msf	1,4	169	T ₂	1,2	127
Q ₁	1,3	021	S ₂	20,5	129
O ₁	9,4	125	K ₂	5,6	131
M ₁	2,1	200	MO ₃	3,3	140
P ₁	1,0	221	M ₃	1,6	264
K ₁	3,2	229	MK ₃	2,4	265
J ₁	1,8	074	MN ₄	1,8	115
OO ₁	2,4	320	M ₄	2,3	148
MNS ₂	1,9	113	SN ₄	1,0	051
2N ₂	2,2	045	MS ₄	1,5	158
Referências de Nível: NR localizada no 9º degrau de baixo para cima da escada do farol São Francisco do Norte.					
Obs: Não há referências a outros períodos.					

Código BNDO: 30800

Figura 13 – Constantes harmônicas para Cabeço/SE.

Fonte: FEMAR (2002).

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

Nome da Estação :		PLATAFORMA PCM - 1 (OCEÂNICA)			
Localização :		Próximo a Aracaju - SE			
Organ. Responsável :		INPH / DHN			
Latitude :		11° 00,0' S	Longitude :		36° 59,6' W
Período Analisado :		15/11/80 a 16/12/80		Nº de Componentes : 72	
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		III H 42 min	Nível Médio (Zo):		124 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		221 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		160 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		26 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		88 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU2	0,4	125
Ssa	-	-	N2	17,5	064
Mm	3,8	014	NU2	3,3	068
Mf	-	-	M2	66,8	090
MTM	0,4	274	L2	3,6	195
Msf	6,4	215	T2	1,8	098
Q1	2,7	110	S2	30,9	098
O1	5,7	124	K2	8,4	099
M1	0,3	147	MO3	1,2	136
P1	1,4	197	M3	0,8	056
K1	4,1	203	MK3	0,5	129
J1	2,2	010	MN4	0,4	152
OO1	1,4	341	M4	0,9	120
MNS2	4,2	337	SN4	0,3	203
2N2	2,3	038	MS4	1,0	266
Referências de Nível: Não foram instaladas RNs.					
Obs: Plataforma da Petrobras - Campo marítimo de Aracaju (não está mais em posição).					

Código BNDO: 30823

Figura 14 – Constantes harmônicas para a Plataforma PCM-1.

Fonte: FEMAR (2002).

Para avaliar a similaridade entre os dados previstos e os modelados foram utilizados o Coeficiente de Ajuste (NRMS) e o Skill (S).

O NRMS pode ser utilizado para qualquer série escalar (nível do mar e componentes de velocidade, por exemplo) e é baseado em Hess & Bosley (1992), cuja formulação é frequentemente utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries com periodicidades relativamente definidas. O coeficiente é definido pela normalização do erro quadrático médio (Equações 3 e 4) e o resultado aparece em percentagem (quanto maior a percentagem, maior o erro).

$$NRMS = \frac{RMS}{d_{mod (max)} - d_{mod (min)}} \quad (3)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{med} - d_{mod})^2}{n}} \quad (4)$$

,onde d_{med} representa o dado medido, d_{mod} o dado simulado, $d_{mod (max)}$ é o valor máximo do dado medido, $d_{mod (min)}$ é o valor mínimo do dado medido e n o número de medições.

O S é um método estatístico desenvolvido por Wilmott (1981) e descrito por Warner *et al.* (2005) e Li *et al.* (2005), que é expressa pela Equação 5. Este método estabelece comparação entre os dados medidos e os simulados (modelados), apresentando coeficientes finais que variam entre 0 e 1 (onde valores próximos de 1 representam um ajuste perfeito e 0 total discordância).

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |d_{mod} - d_{med}|^2}{\sum_{i=1}^n (|d_{mod} - \bar{d}_{med}| + |d_{med} - \bar{d}_{med}|)^2} \quad (5)$$

,onde d_{med} representa o dado medido, d_{mod} o dado simulado e n o número de medições.

III.3 MODELAGEM DE ONDAS

Para a modelagem regional de ondas foi utilizado o modelo numérico DELFT-WAVE. Este modelo de onda reproduz o deslocamento de ondas em águas rasas, geração de onda a partir do vento; interações não lineares entre onda-onda e dissipação de energia para uma determinada topografia de fundo, campo de vento, nível de água e campo de correntes. Neste módulo é implementado o modelo de terceira geração SWAN (Simulating Waves Nearshore) que leva em consideração a evolução de ondas aleatórias de curto comprimento de onda em regiões costeiras de águas rasas, intermediárias e profundas, considerando a refração devido a correntes e variação de batimetria, reproduzindo também processos de difração. A descrição matemática dos processos envolvidos é apresentada no Anexo B.

III.3.1 Grade numérica

A obtenção da linha de costa e batimetria foram as mesmas já descritas para o módulo hidrodinâmico.

A grade numérica confeccionada para a obtenção do regime de ondas é curvilínea com resolução variável, desde 1.100 m até 40 m na região do gasoduto e emissário. Sua representação gráfica aparece na **Figura 15**.

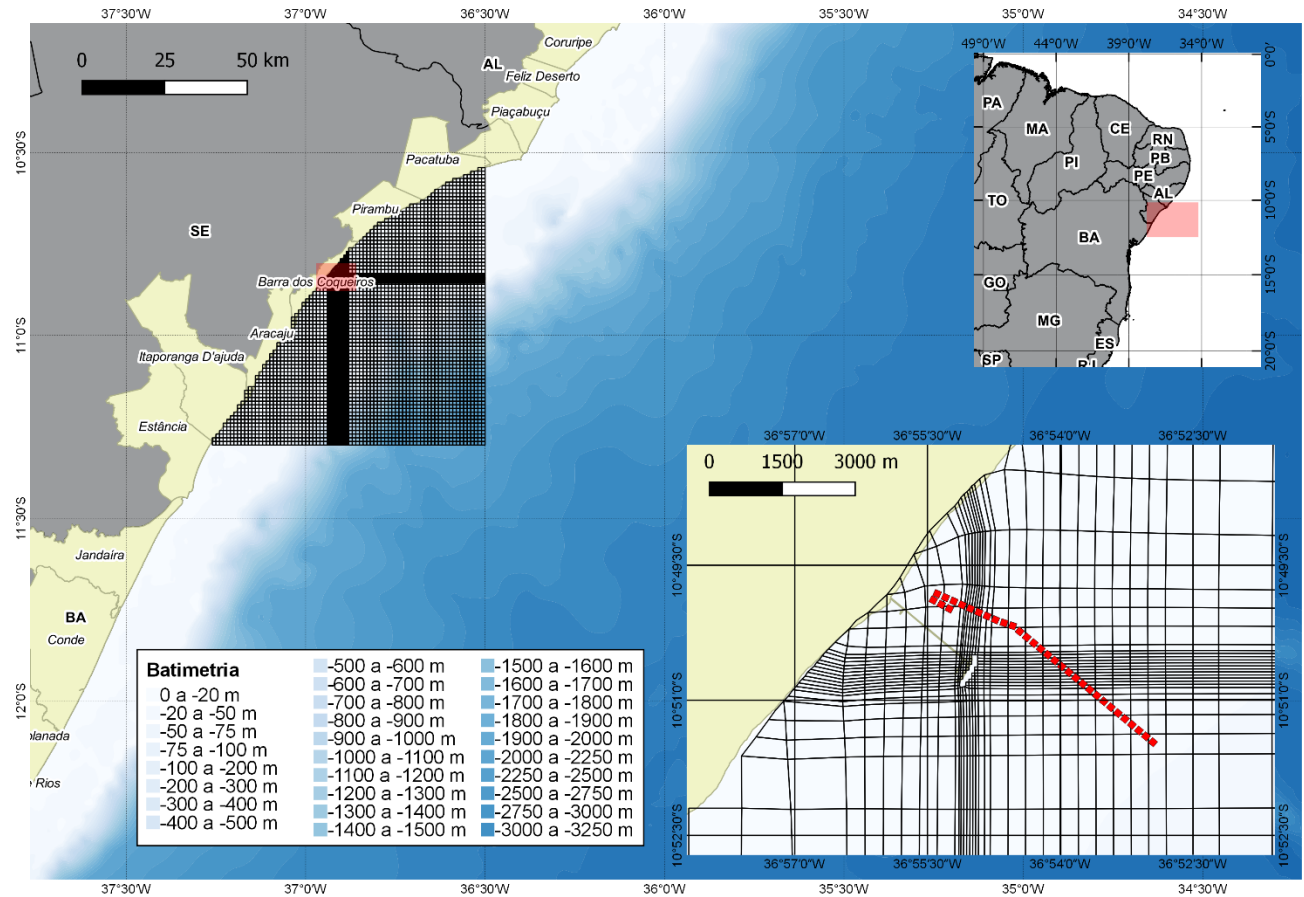


Figura 15 – Grade numérica desenvolvida para as simulações de ondas em contexto regional. No painel menor a linha tracejada vermelha mostra a localização do gasoduto e da emissário.

De forma resumida, as propriedades de forma da grade das simulações de ondas estão listadas na **Tabela 4**.

Tabela 4- *Propriedades de forma da grade numérica confeccionada para as simulações de ondas.*

Propriedade	
Pontos	97x95
Resolução horizontal mínima	1.1000 m
Resolução horizontal máxima	40 m

III.3.2 Condições de borda

As bordas fechadas foram utilizadas de maneira a se representar a linha de costa, de forma impermeável, com velocidades perpendiculares nulas. Já as bordas abertas impostas a grade do modelo de ondas estão representadas na **Figura 16**. Nestas bordas abertas, foram impostas alturas, períodos e direções de ondas do modelo Wave Watch II do NCEP, no ponto descrito no item II.3 deste documento.

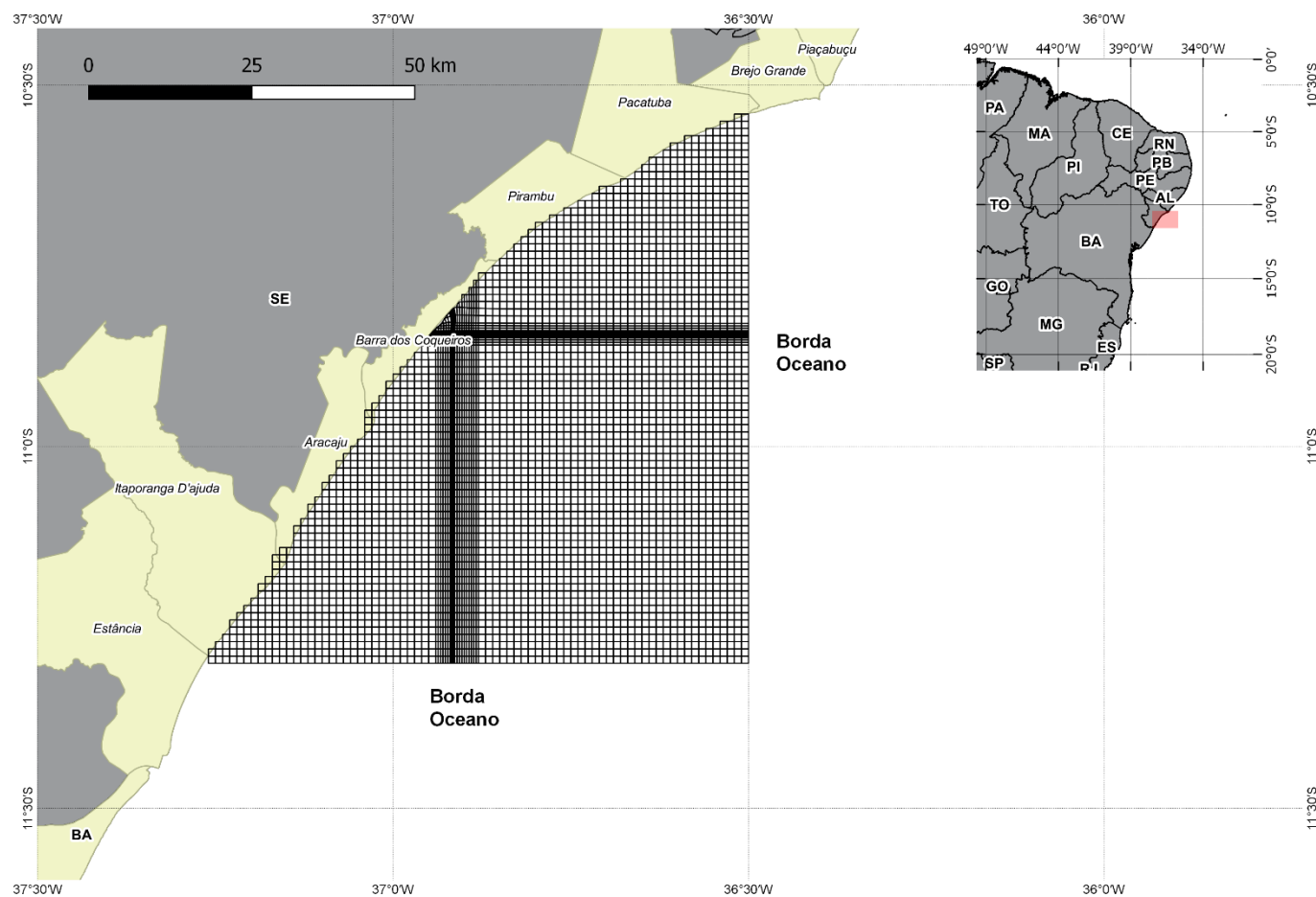


Figura 16 – Bordas abertas empregadas na grade numérica desenvolvida para as simulações de ondas em contexto regional.

Para a condição de borda atmosférica foi imposta o vento coletado na cidade de Aracajú descritos no item II.2 deste documento.

Maiores detalhes sobre o período de dados utilizados nas simulações estão apresentados no item **III.5 Cenário de Modelagem**.

III.4 MODELAGEM MORFOLÓGICA

Para este estudo foi utilizado o módulo morfológico DELFT3D-MOR, elaborado para simular o comportamento morfodinâmico de rios, estuários e áreas costeiras, na escala de dias a anos, resolvendo o complexo processo de interação entre as ondas, correntes, transporte de sedimento e batimetria. A conexão entre os módulos envolvidos no processo (waves-flow-transport-bottom) ocorre via acoplamento dinâmico. As equações principais que descrevem este modelo estão disponíveis no Apêndice C.

III.4.1 Grade numérica

Para o estudo morfodinâmico foram elaboradas três grades numéricas, regulares, de 1 m de resolução, em três trechos específicos do gasoduto, conforme apresentado na **Figura 17**. Assim como o que foi realizado com o modelo hidrodinâmico, o modelo morfodinâmico sofreu também um tempo de aquecimento para sua estabilização. O período selecionado para as três grades foi de 1 semana.

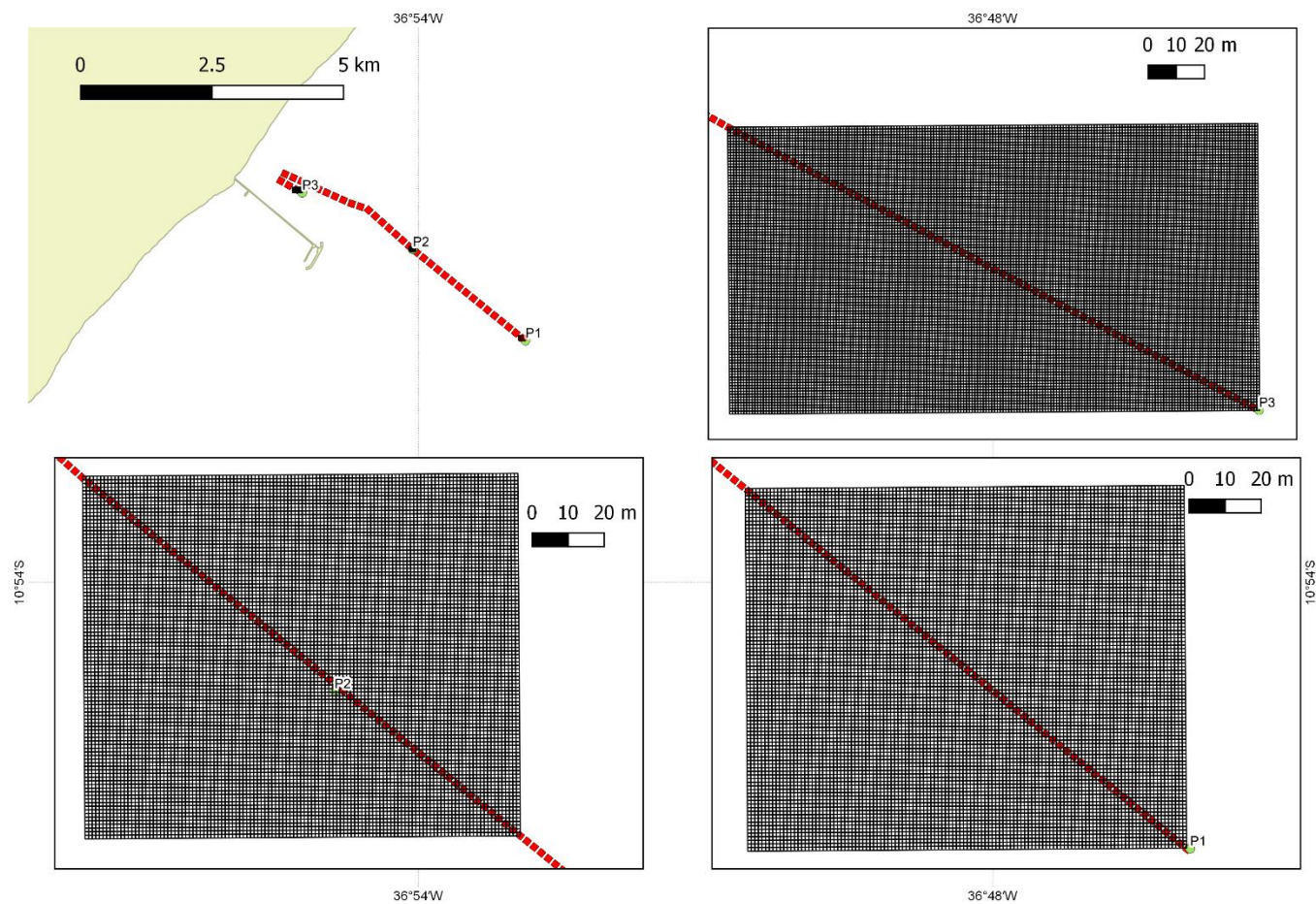


Figura 17 – Grades numéricas desenvolvidas para as simulações de variações morfodinâmicas. As linhas tracejadas vermelhas mostram a localização do gasoduto e da emissário.

De forma resumida, as propriedades de forma das grades utilizadas nas simulações de variação morfodinâmicas estão listadas na **Tabela 5**.

Tabela 5- *Propriedades de forma da grade numérica confeccionada para as simulações hidrodinâmicas.*

Propriedade	P1	P2	P3
Pontos	123 x 121	122 x 101	189 x 102
Resolução horizontal	1 m		
Resolução na vertical	10 camadas sigma		

III.4.2 Condições de borda

Nas grades utilizadas para simular as variações morfodinâmicas as quatro bordas laterais foram impostas como sendo abertas. Nestas foram inseridos os resultados hidrodinâmicos e de ondas obtidos dos módulos hidrodinâmicos e de ondas descritos anteriormente.

Para a condição de borda atmosférica foi imposto o vento coletado na cidade de Aracajú descritos no item II.2 deste documento.

Maiores detalhes sobre o período de dados utilizados nas simulações estão apresentados no item **III.5 Cenário de Modelagem**.

III.4.3 Composição do fundo marinho

Em cada uma das grades numéricas desenvolvidas foram aplicadas profundidades homogêneas, sendo de 20, 13 e 6 m, respectivamente para as grades dos pontos P1, P2 e P3. No local de passagem do gasoduto, foi aplicada batimetria com 1 m, inferior, ou seja, nas grades P1 o local onde passará o gasoduto foi aplicada batimetria de 19 m, no P2, 12 m e no P3, 5 m.

Com exceção do local onde ocorrerá a passagem do gasoduto e emissário, o fundo marinho foi configurado com as características sedimentológica descritas na **Tabela 6**. Estas propriedades sedimentológicas foram obtidas em coletas de campo em 16/05/2017.

Tabela 6- Propriedades sedimentológicas aplicadas para as grades para simulação das variações morfodinâmicas.

Sedimentologia	Diâmetro (mm)	Grades numéricas		
		P1	P2	P3
Argila (%)	0,004	32,2	18,7	1,1
Silte (%)	0,032	67,4	70,3	12,3
Areia muito fina (%)	0,09	0,4	11	85,2
Areia fina (%)	0,18	<0,3	<0,3	1,4
Areia média (%)	0,37	<0,3	<0,3	<0,3
Areia grossa (%)	0,75	<0,3	<0,3	<0,3
Areia muito grossa (%)	1,5	<0,3	<0,3	<0,3

III.5 CENÁRIOS DE MODELAGEM

A escolha dos cenários ambientais nos quais foram realizadas as modelagens tiveram como premissa identificar o pior cenário real possível, adotando premissas conservativas.

Conforme apresentado no item II.3, a análise de altura de ondas para a região de instalação do gasoduto e emissário apresentou maior altura média de onda para o ano de 2014, com altura significativa média de 1,88 m.

Assim, tanto o modelo hidrodinâmico de ondas e de alterações morfológicas foram integrados ao longo do ano de 2014, com um ano completo de simulações.

IV.RESULTADOS

IV.1 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Da **Figura 18** a **Figura 29** são apresentados os resultados hidrodinâmicos e de ondas para os pontos P1, P2 e P3 – a localização destes pontos está apresentada na **Figura 17**. A **Tabela 7** apresenta as estatísticas básicas dos ventos para o ano de 2014 aplicado nas simulações, a **Tabela 8** as estatísticas básicas de variação do nível do mar nos pontos P1, P2 e P3 e a **Tabela 9** as estatísticas básicas da intensidade das correntes nos mesmos locais.

Tabela 7 - Estatísticas básicas para a intensidade do vento para o ano de 2014 para os pontos P1, P2 e P3.

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Anual	3,04	0,00	12,33	1,58
Janeiro - Fevereiro - Março	2,80	0,00	10,28	1,54
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	2,81	0,00	10,28	1,44
Julho - Agosto - Setembro	3,02	0,00	8,75	1,54
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	3,51	0,00	12,33	1,70

Tabela 8 - Estatísticas básicas do nível do mar modelado para o ano de 2014 para os pontos P1, P2 e P3.

	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Anual	0,00	-1,10	1,24	0,57
Janeiro - Fevereiro - Março	0,00	-1,21	1,24	0,58
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	0,00	-1,10	1,08	0,56
Julho - Agosto - Setembro	0,00	-1,14	1,20	0,56
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	0,00	-1,14	1,20	0,56

Tabela 9 - Estatísticas básicas para a intensidade das correntes modeladas para o ano de 2014 para os pontos P1, P2 e P3.

		P1				P2				P3			
		Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Anual	Superfície	0,08	0,00	0,17	0,02	0,07	0,00	0,17	0,02	0,06	0,00	0,17	0,02
	Meia água	0,07	0,00	0,13	0,02	0,06	0,00	0,14	0,02	0,05	0,00	0,14	0,02
	Fundo	0,06	0,01	0,12	0,02	0,05	0,00	0,13	0,02	0,05	0,00	0,13	0,02
Janeiro – Fevereiro - Março	Superfície	0,08	0,01	0,14	0,02	0,06	0,00	0,14	0,02	0,06	0,00	0,13	0,02
	Meia água	0,07	0,01	0,12	0,02	0,06	0,00	0,12	0,02	0,05	0,00	0,12	0,02
	Fundo	0,06	0,01	0,12	0,02	0,05	0,00	0,12	0,02	0,05	0,00	0,11	0,02
Abril – Maio – Junho (estação chuvosa)	Superfície	0,07	0,02	0,15	0,02	0,06	0,01	0,17	0,02	0,05	0,00	0,17	0,02
	Meia água	0,06	0,01	0,13	0,02	0,05	0,00	0,14	0,02	0,05	0,00	0,14	0,02
	Fundo	0,06	0,01	0,12	0,02	0,05	0,00	0,13	0,02	0,04	0,00	0,13	0,02
Julho – Agosto - Setembro	Superfície	0,07	0,00	0,13	0,02	0,06	0,00	0,12	0,02	0,06	0,00	0,12	0,02
	Meia água	0,06	0,00	0,11	0,02	0,05	0,00	0,11	0,02	0,05	0,00	0,10	0,02
	Fundo	0,06	0,01	0,10	0,02	0,05	0,00	0,10	0,02	0,04	0,00	0,10	0,02
Outubro – Novembro – Dezembro (estação seca)	Superfície	0,09	0,03	0,17	0,02	0,08	0,03	0,16	0,02	0,07	0,02	0,15	0,02
	Meia água	0,08	0,03	0,13	0,01	0,07	0,02	0,14	0,02	0,06	0,01	0,13	0,02
	Fundo	0,07	0,03	0,12	0,02	0,06	0,01	0,13	0,02	0,06	0,01	0,12	0,02

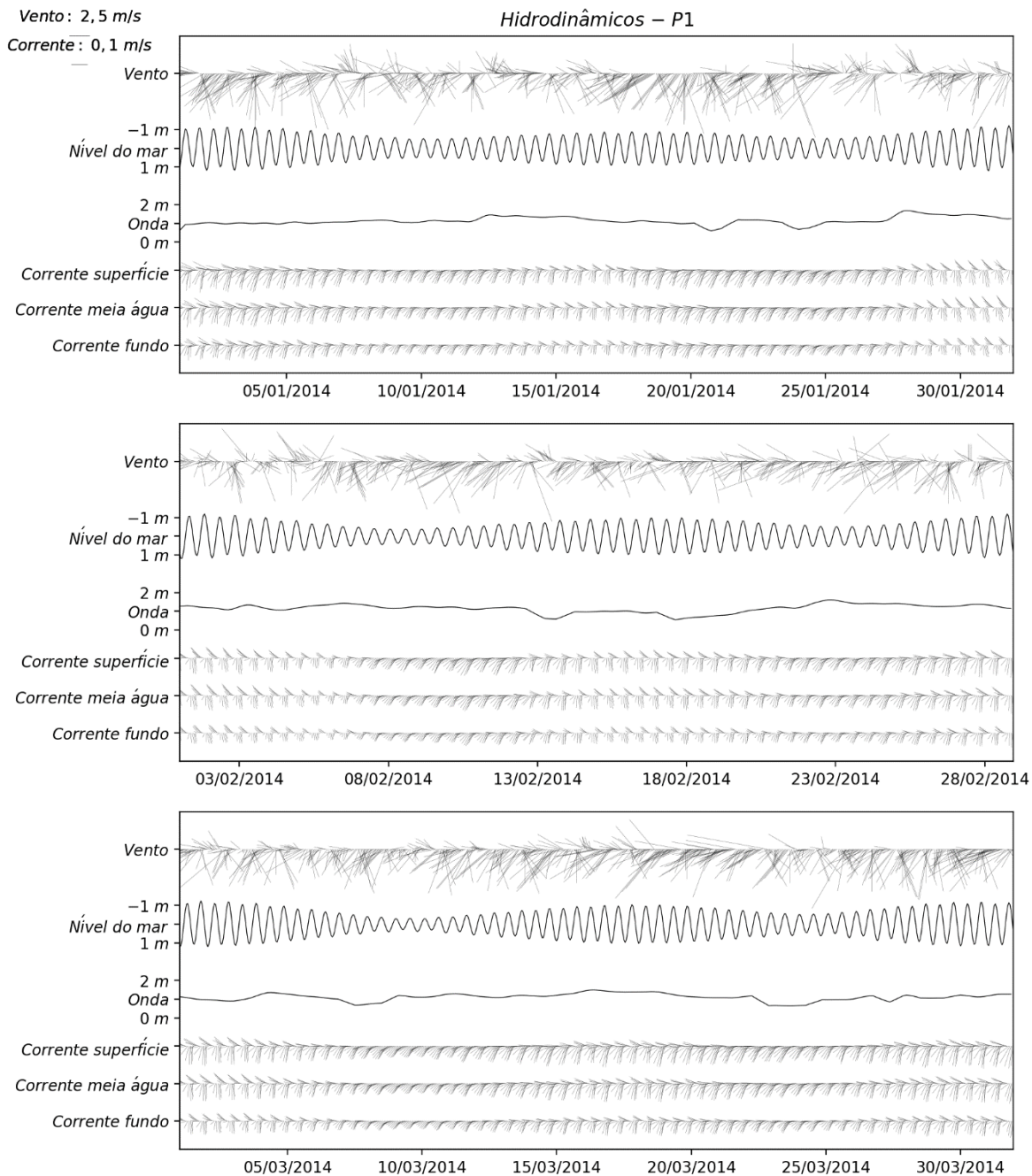


Figura 18 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P1 nos meses de janeiro (superior), fevereiro (meio) e março (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

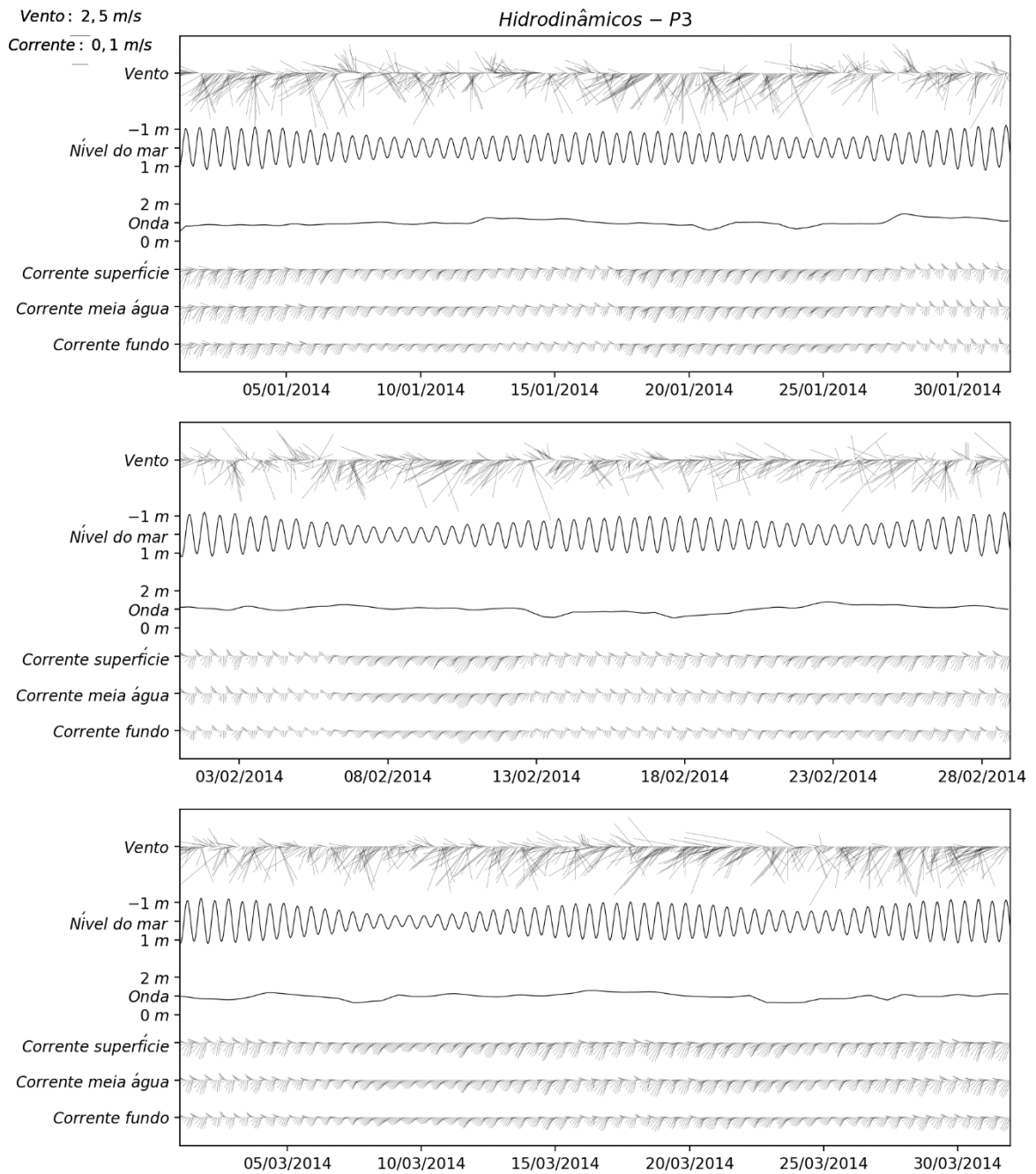


Figura 19 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P2 nos meses de janeiro (superior), fevereiro (meio) e março (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

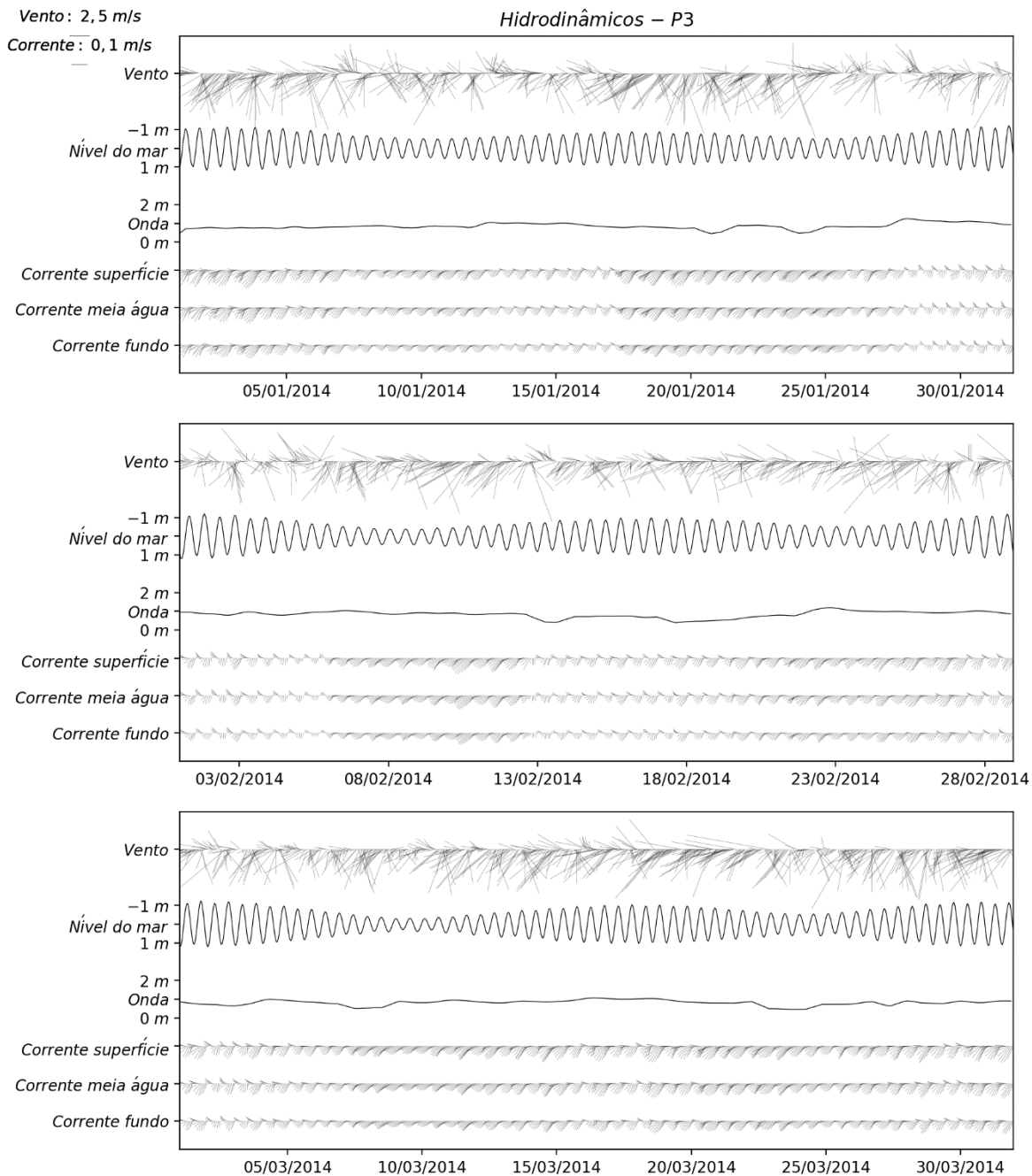


Figura 20 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P3 nos meses de janeiro (superior), fevereiro (meio) e março (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

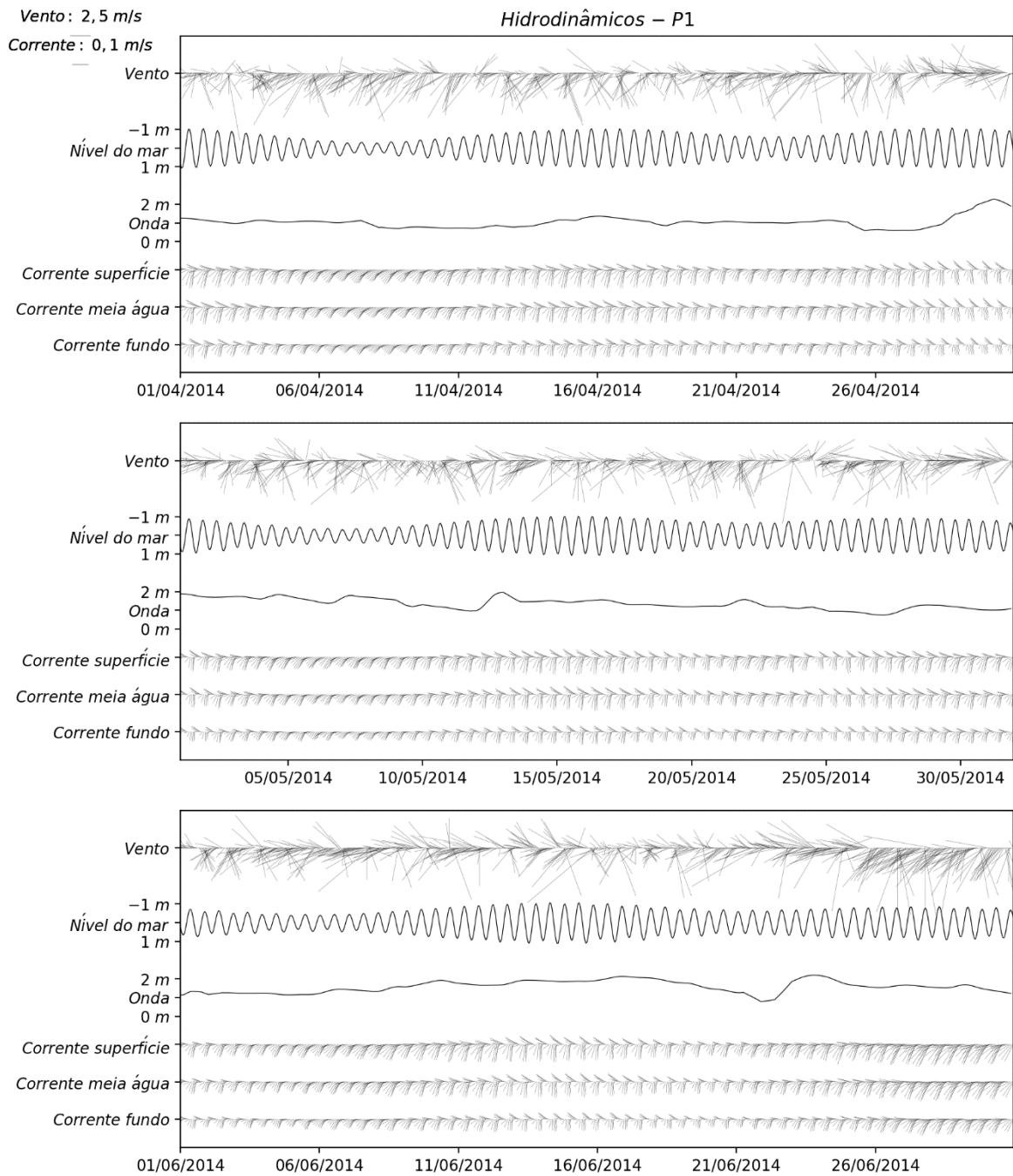


Figura 21 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P1 nos meses de abril (superior), maio (meio) e junho (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

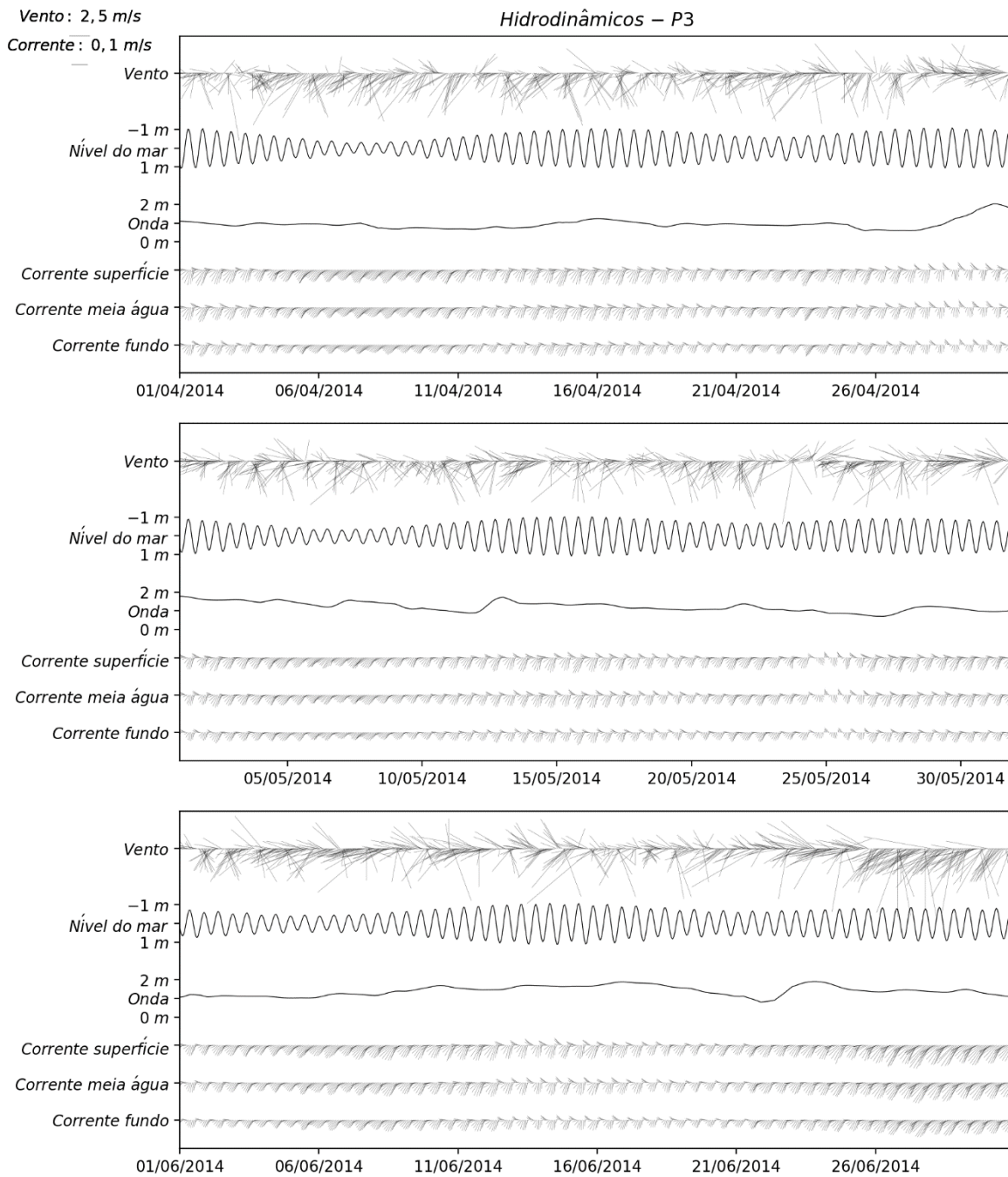


Figura 22 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P2 nos meses de abril (superior), maio (meio) e junho (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

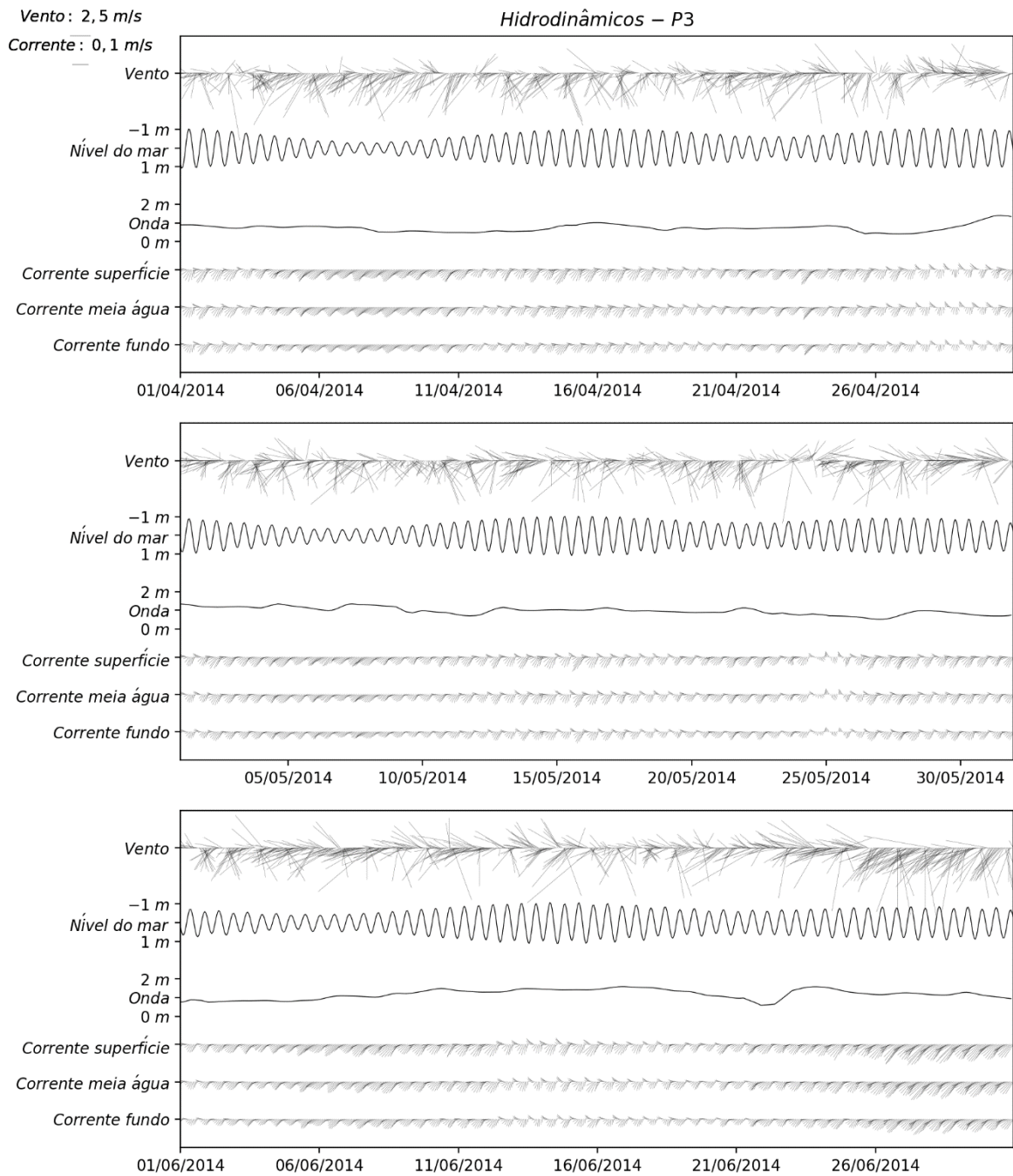


Figura 23 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P3 nos meses de abril (superior), maio (meio) e junho (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

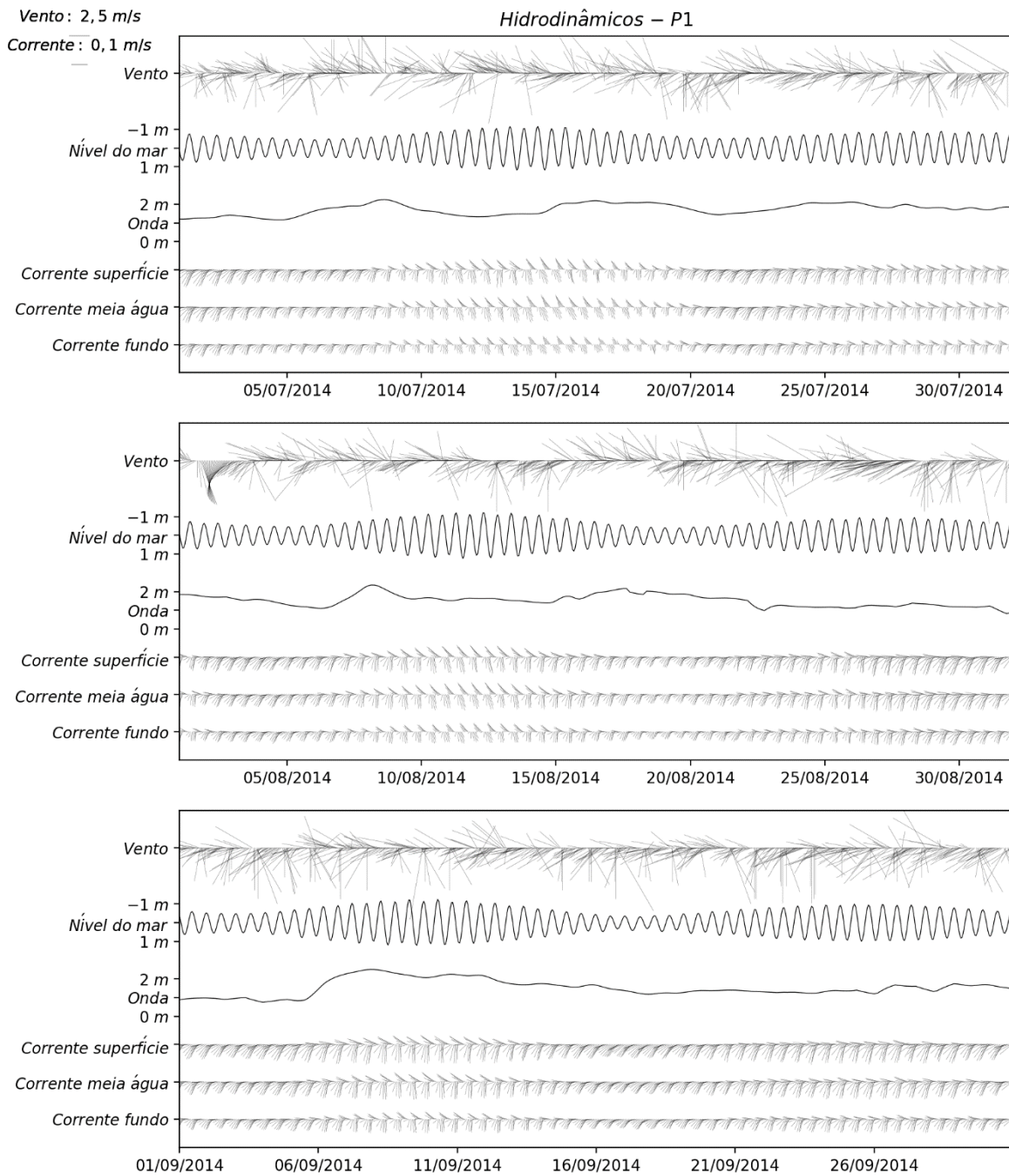


Figura 24 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P1 nos meses de julho (superior), agosto (meio) e setembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

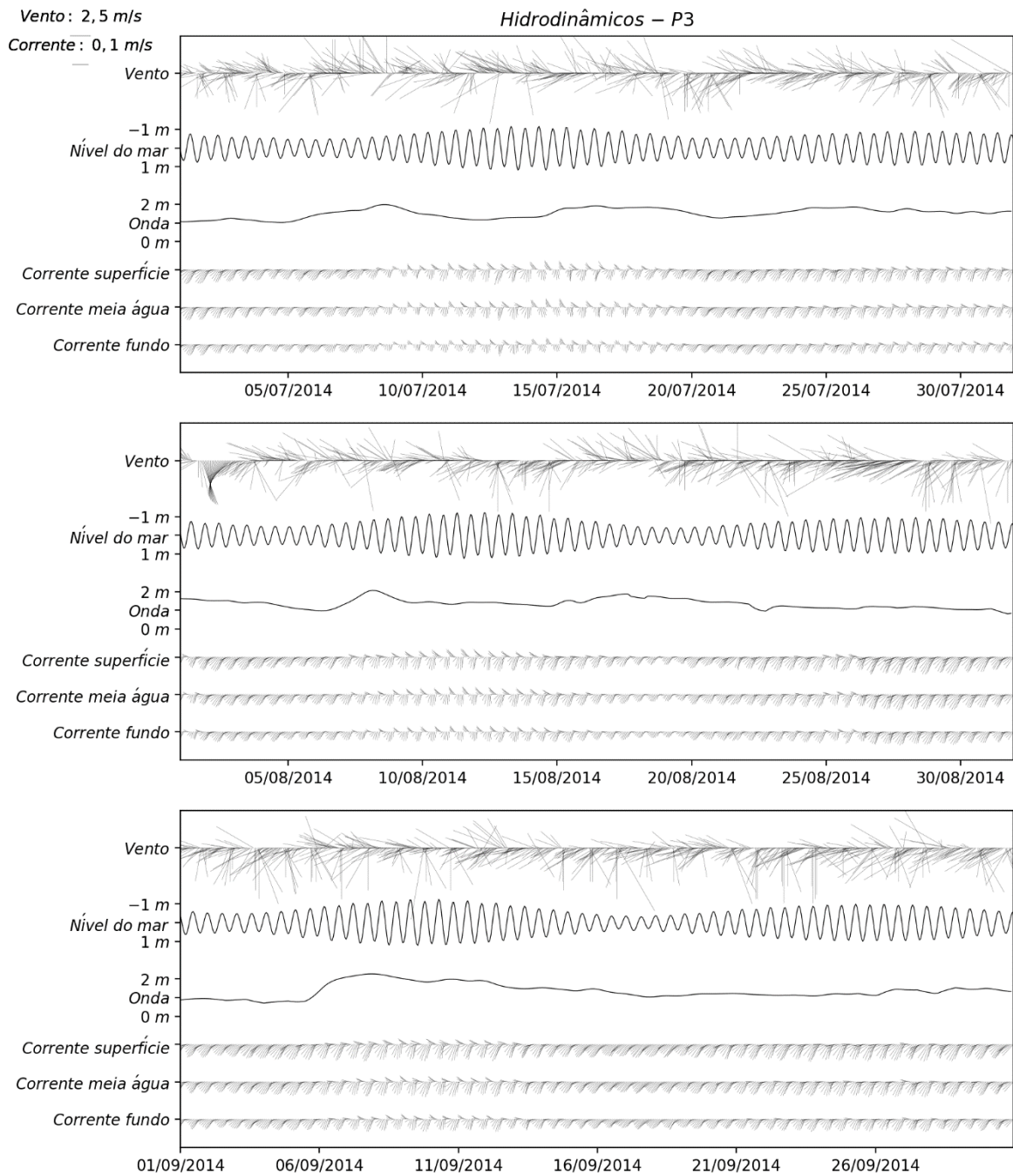


Figura 25 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P2 nos meses de julho (superior), agosto (meio) e setembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

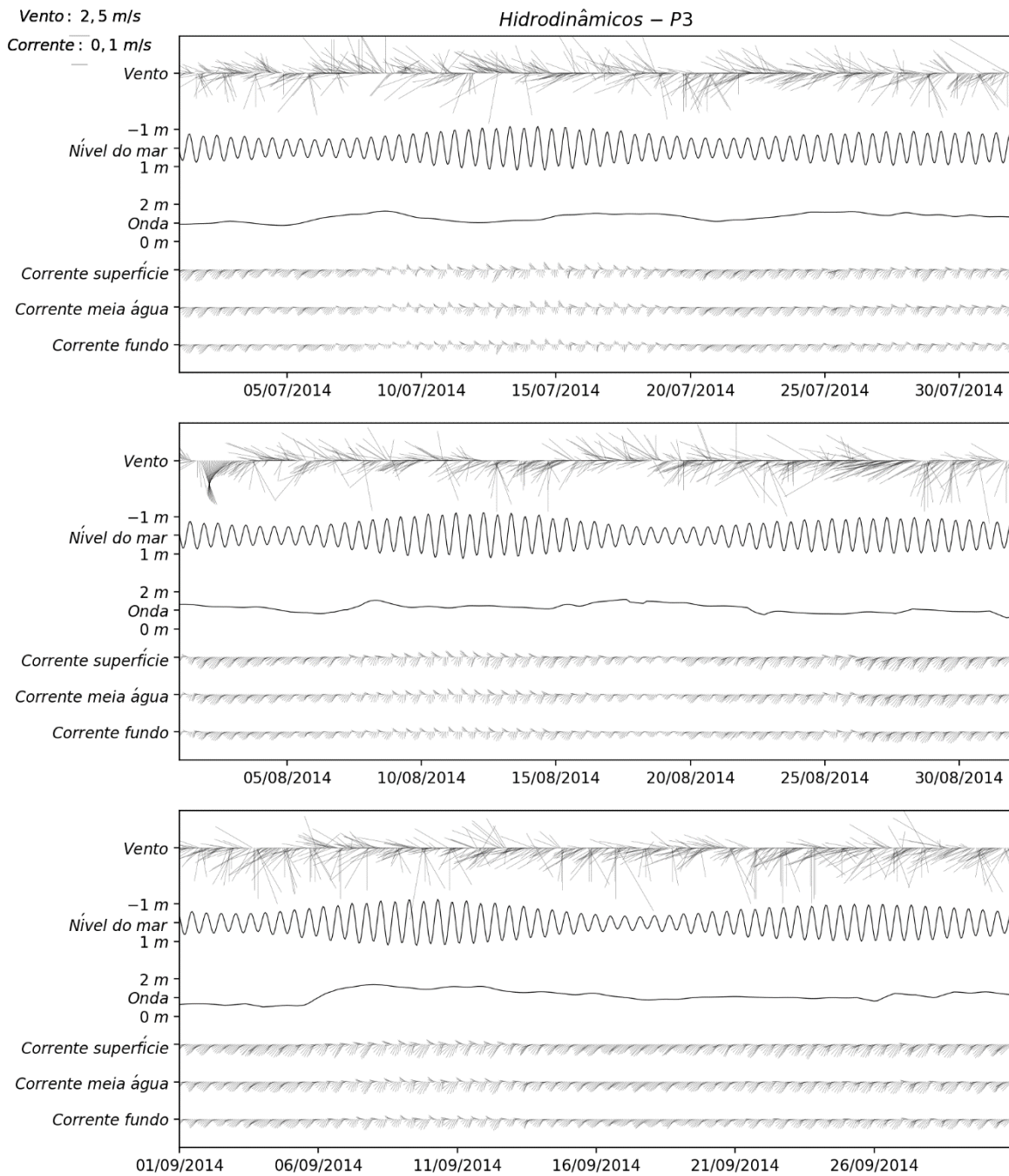


Figura 26 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P3 nos meses de julho (superior), agosto (meio) e setembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

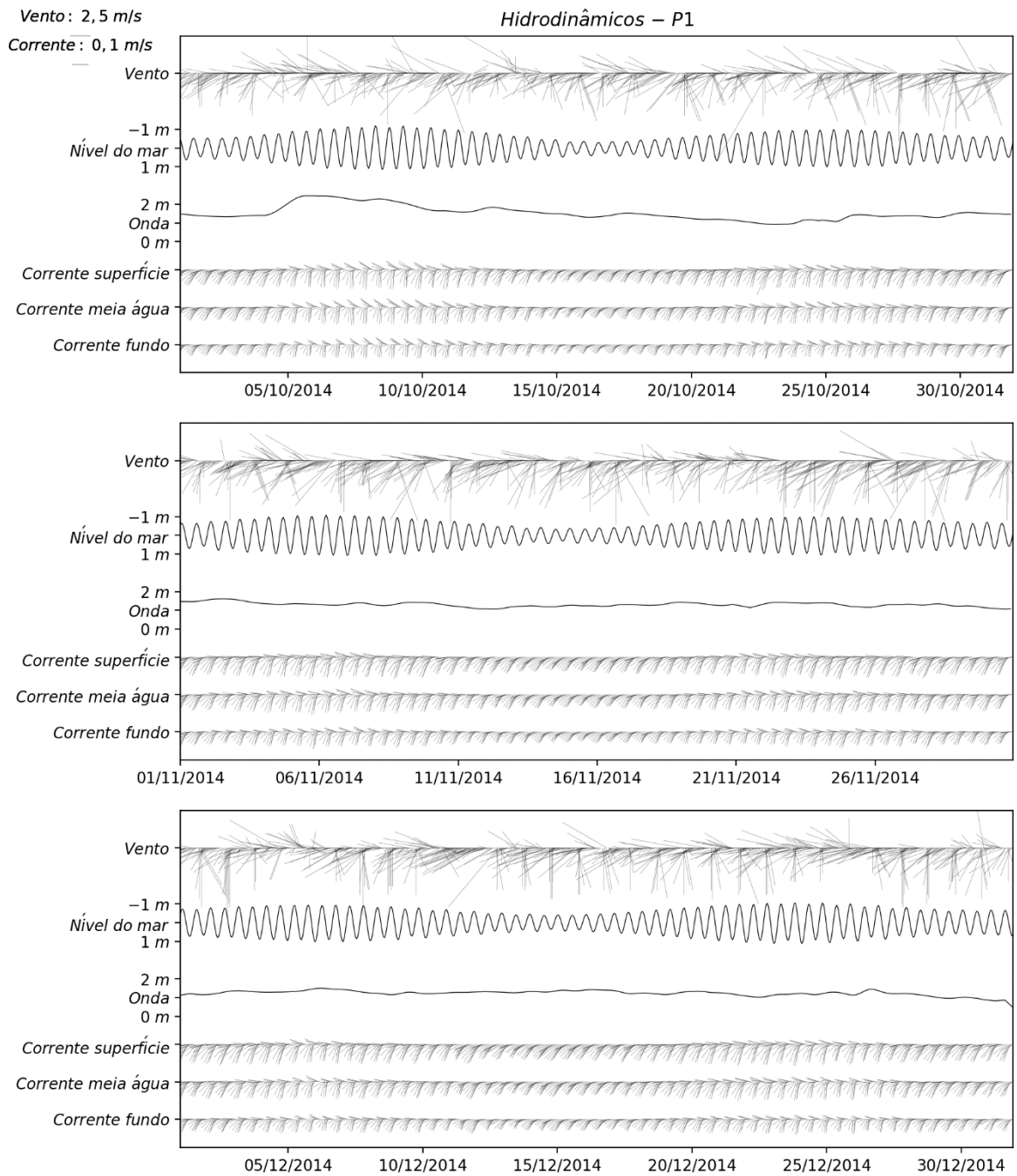


Figura 27 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P1 nos meses de outubro (superior), novembro (meio) e dezembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

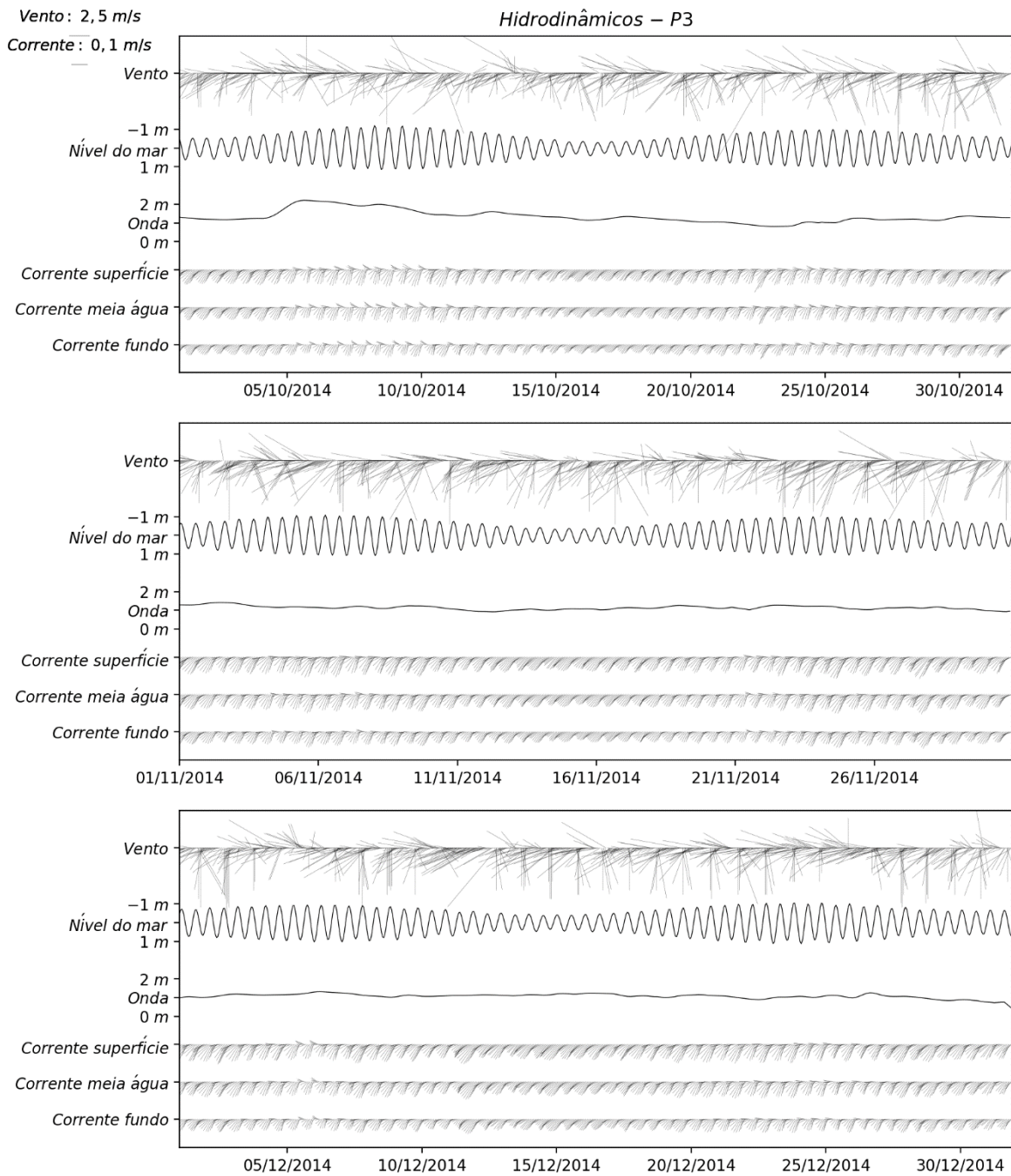


Figura 28 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P2 nos meses de outubro (superior), novembro (meio) e dezembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

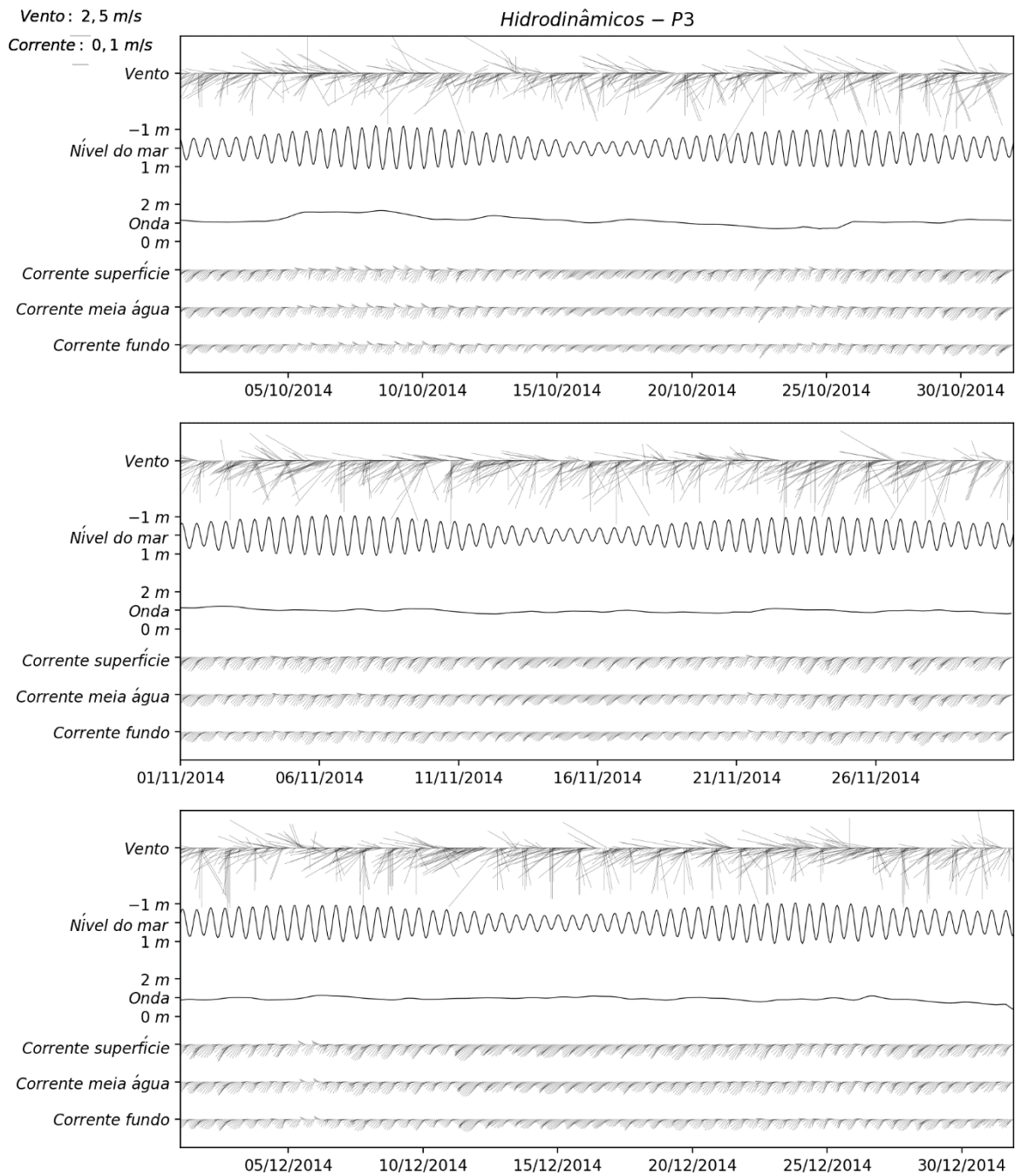


Figura 29 – Resultados hidrodinâmicos modelados para o ponto P3 nos meses de outubro (superior), novembro (meio) e dezembro (inferior) no ano de 2014. São mostradas as variações de vento, nível do mar, ondas e correntes em superfície, meia água e fundo. Os vetores de referência para o vento e as correntes estão apresentados no vértice superior esquerdo.

Os dados de ventos mostram que a intensidade média no ano de 2014 foi de 3,04 m/s, sendo que a estação seca (outubro a dezembro) foi a que apresentou a maior intensidade média, com 3,51 m/s. Os meses de janeiro-março foi a época do ano com menor intensidade média - 2,80 m/s.

Devido à proximidade dos pontos P1, P2 e P3, os dados de nível apresentam estatísticas semelhantes para ambos os pontos. A amplitude de maré nestes locais foi de 2,34 m, com valor mínimo de 1,10 m e máximo de 1,24 m. Por se tratar de variações astronômicas, os valores não possuem diferenças significativas entre os períodos analisados.

Com relação às correntes, o ponto P1, mais externo, possui as correntes mais intensas, contraponto o ponto P3, mais próximo a linha de costa, que possui as correntes menos intensas. Analisando ao longo da coluna d'água, em ambos os três pontos os valores de superfície são mais intensos que os modelados para meia água e fundo, mostrando o cisalhamento das correntes. Sazonalmente, as intensidades das correntes mostraram correlação com o apresentado para o vento, com maiores intensidades na estação seca (outubro a dezembro).

Para analisar o desempenho do modelo hidrodinâmico são comparados os níveis do mar modelados com níveis previsto. Assim, da **Figura 30** a **Figura 32** são mostrados, comparativamente, os níveis modelados e previstos para as simulações. A análise comparativa visual dos níveis modelado e previstos indica uma boa correlação entre as duas séries. De modo a quantificar esta semelhança, foram aplicados os parâmetros estatísticos NRMS e Skill, descritos na **Seção II.3.4**. Os valores obtidos estão apresentados na **Tabela 10** abaixo.

Tabela 10 - Parâmetros estatístico de comparação entre o nível do mar modelado e o previsto.

Local	SKILL	NRMS
Terminal Portuário de Sergipe	0,98	0,06
Cabeço	0,96	0,08
Plataforma PCM-1	0,95	0,09

Os valores de Skill, foram extremamente elevados, com valor mínimo de 0,95 (Plataforma PCM-1) e máximo de 0,98 (Terminal Portuário de Sergipe), indicando uma ótima correlação entre as séries – a correlação total é indicada pelo valor 1. Os valores de NRMS, que indicam o erro médio, também mostraram excelentes

qualificações, com valor mínimo de 6,0% no Terminal Portuário de Sergipe e valor máximo de 9,0% na Plataforma PCM-1.

Autores como NOAA (2011), Medeiros *et al.* (2013), Huang (2011) que tiveram valores de Skill para o nível do mar desde 0,7 a 0,9 e valores de NRMS de 0,1 (10%) a 0,2 (20%), classificaram os resultados como plenamente aceitáveis, podendo desta forma atestar os valores aqui obtido como sendo excelentes.

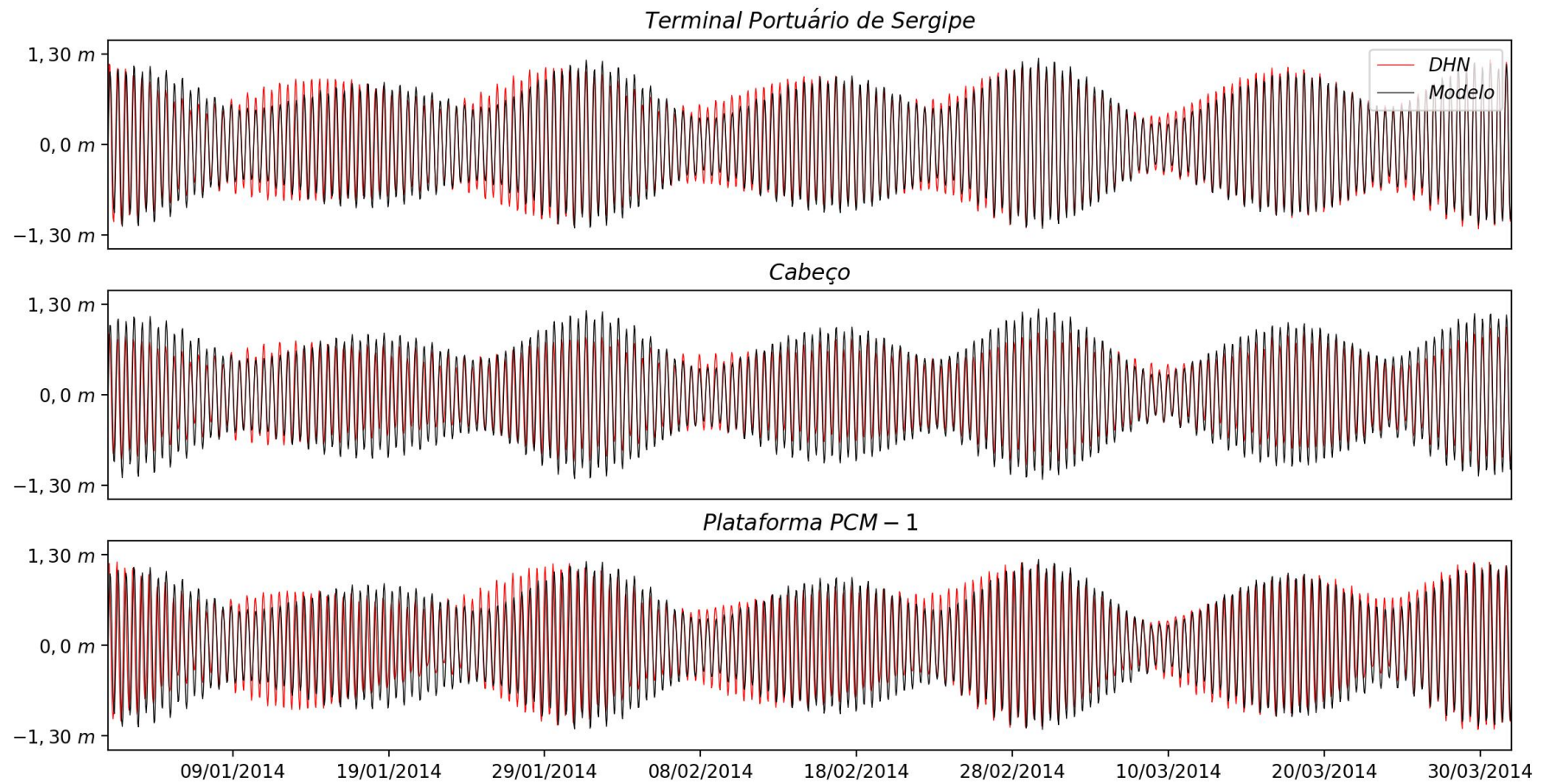


Figura 30 - Comparação entre o nível do mar modelado e a previsão para o Terminal Portuário de Sergipe (superior), no Cabeço (meio) e na Plataforma PCM-1 (inferior) para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2014.

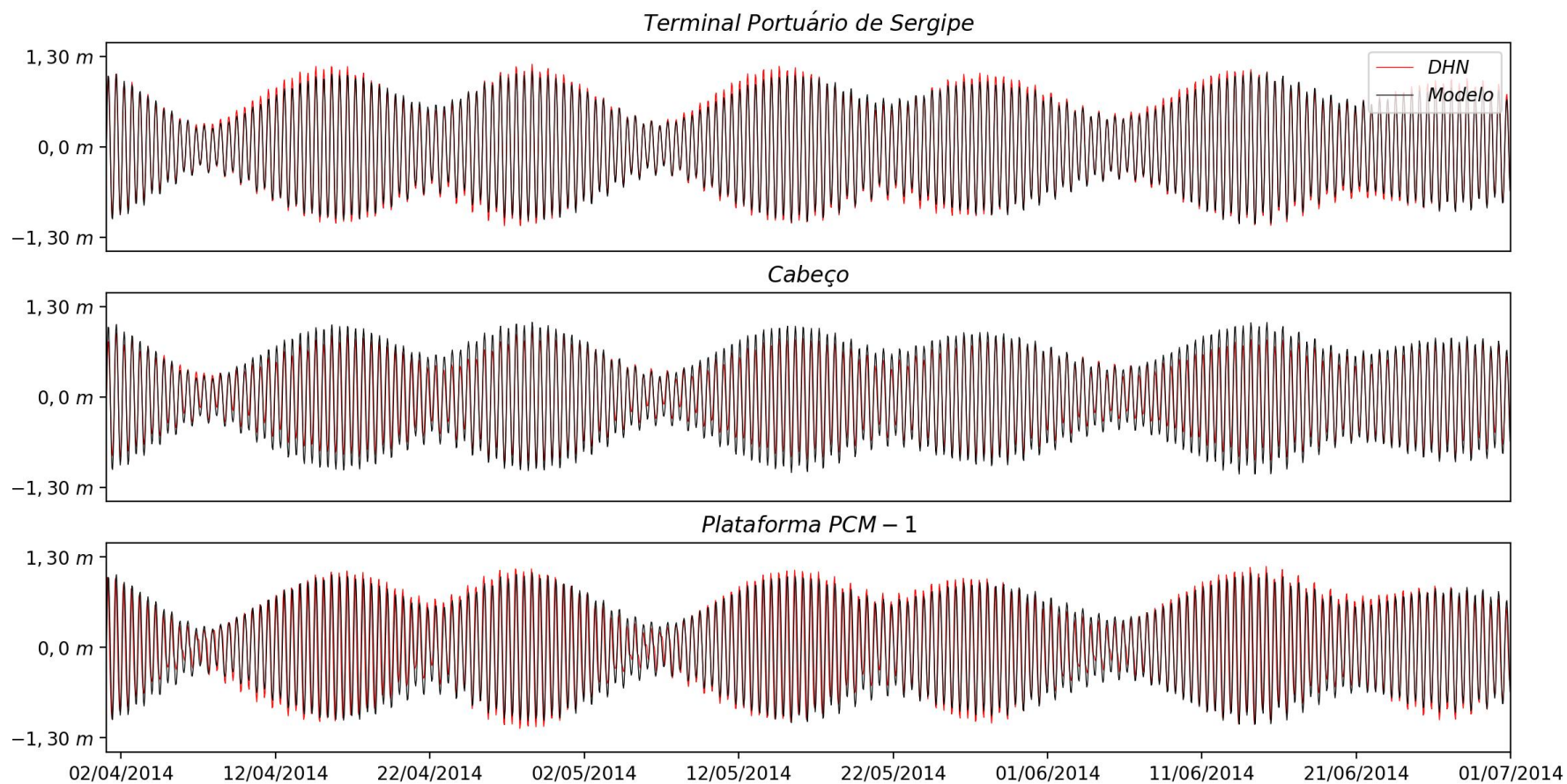


Figura 31 - Comparação entre o nível do mar modelado e a previsão para o Terminal Portuário de Sergipe (superior), no Cabeço (meio) e na Plataforma PCM-1 (inferior) para os meses de abril, maio e junho de 2014.

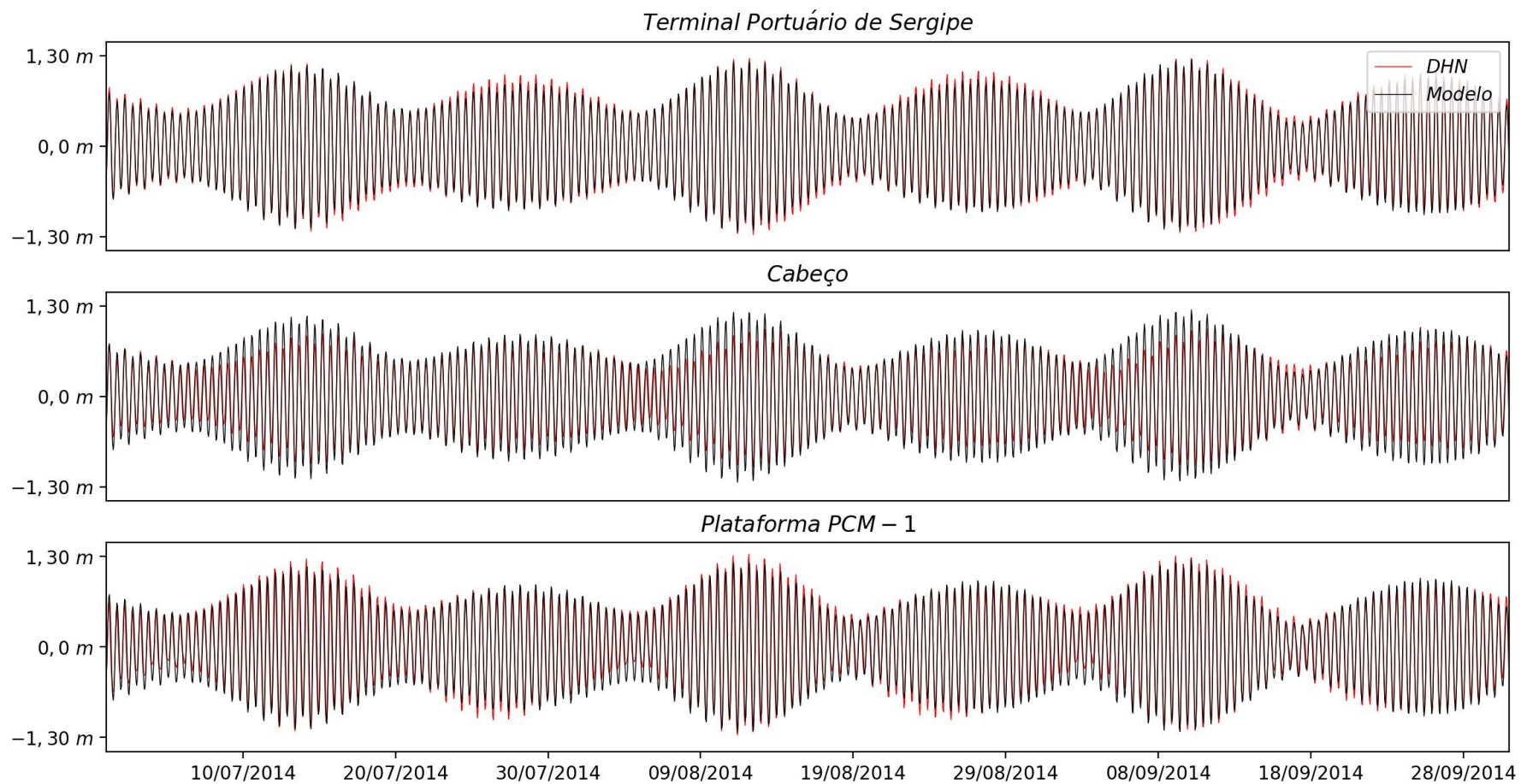


Figura 32 - Comparação entre o nível do mar modelado e a previsão para o Terminal Portuário de Sergipe (superior), no Cabeço (meio) e na Plataforma PCM-1 (inferior) para os meses de julho, agosto e setembro de 2014.

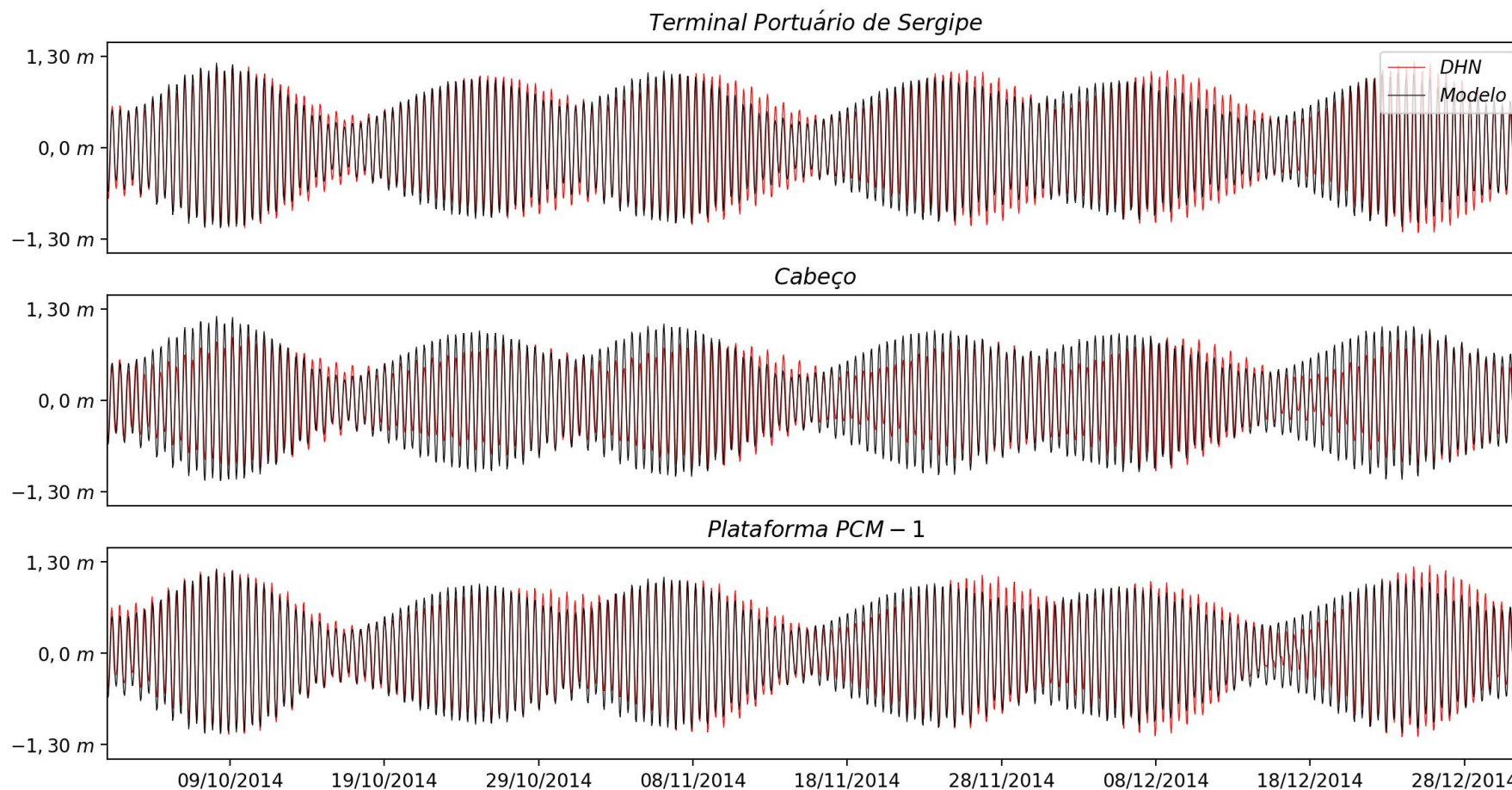


Figura 33 - Comparação entre o nível do mar modelado e a previsão para o Terminal Portuário de Sergipe (superior), no Cabeço (meio) e na Plataforma PCM-1 (inferior) para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2014.

IV.2 MODELAGEM DE ONDAS

Da **Tabela 11** a **Tabela 13** estão apresentadas as estatísticas básicas de altura significativa e período de pico para as ondas modeladas nos pontos P1, P2 e P3. A localização destes pontos está apresentada na **Figura 17**.

Tabela 11 – Estatística básica para a série de ondas modeladas para o ponto P1 no ano de 2014.

Época do ano	Altura (m)				Período (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Anual	1,77	0,78	4,19	0,49	8,93	4,35	20,45	2,27
Janeiro - Fevereiro - Março	1,41	0,78	2,33	0,22	8,24	4,46	17,86	2,28
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	1,79	0,83	4,05	0,5	9,73	4,35	20,45	2,49
Julho - Agosto - Setembro	2,16	1,06	4,19	0,52	9,33	5,73	19,66	1,95
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	1,7	0,95	3,86	0,35	8,42	4,37	18,78	1,99

Tabela 19 – Estatística básica para a série de ondas modeladas para o ponto P2 no ano de 2014.

Época do ano	Altura (m)				Período (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Anual	1,2	0,5	2,3	0,3	7,1	4,2	13,7	1,3
Janeiro - Fevereiro - Março	1,0	0,5	1,5	0,2	6,5	4,7	12,3	1,4
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	1,2	0,5	2,1	0,3	7,8	5,5	12,8	1,4
Julho - Agosto - Setembro	1,4	0,7	2,3	0,3	7,5	5,5	13,7	1,2
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	1,2	0,7	2,2	0,3	6,6	4,2	9,7	0,8

Tabela 13 – Estatística básica para a série de ondas modeladas para o ponto P3 no ano de 2014.

Época do ano	Altura (m)				Período (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Anual	1,0	0,4	1,7	0,3	7,3	4,2	14,9	1,5
Janeiro - Fevereiro - Março	0,8	0,4	1,3	0,2	6,6	4,8	13,3	1,5
Abril - Maio - Junho (Estação Chuvosa)	1,0	0,4	1,6	0,3	8,1	5,5	13,9	1,6
Julho - Agosto - Setembro	1,2	0,5	1,7	0,3	7,7	5,5	14,9	1,4
Outubro - Novembro - Dezembro (Estação Seca)	1,0	0,6	1,7	0,2	6,7	4,2	9,9	0,8

As estatísticas básicas mostram que as ondas diminuem de altura significativa média conforme se aproxima da linha de costa – P1 é o ponto mais distante e P3 o mais costeiro. No ano de 2014 no ponto P1 a altura significativa média foi de 1,77 m, enquanto que no ponto P3 o valor foi de 1,0 m. Sazonalmente, os maiores valores foram obtidos entre os meses de julho a setembro e o menor de janeiro a março.

Os histogramas direcionais para as ondas nos pontos P1, P2 e P3 estão apresentados na

Tabela 21 a Tabela 23.

Tabela 21 – Histograma de altura e direção de onda modelados para o ponto P1 no ano de 2014.

Altura(m)	Anual								Observações	Frequência (%)
	Direção									
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50 - 1,00	0	0	42	307	9	0	0	0	358	12,26
1,00 - 1,50	0	0	374	1373	0	0	0	0	1747	59,83
1,50 - 2,00	0	0	8	593	7	0	0	0	608	20,82
2,00 - 2,50	0	0	0	201	3	0	0	0	204	6,99
2,50 - 3,00	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0,10

3,00 - 3,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,50 - 4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	0	424	2477	19	0	0	0	2920	
Frequência (%)	0,0	0,0	14,5	84,8	0,7	0,0	0,0	0,0		100,0

Tabela 22 – Histograma de altura e direção de onda modelados para o ponto P2 no ano de 2014.

Anual										
Altura(m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0,03
0,50 - 1,00	0	0	92	653	0	0	0	0	745	25,51
1,00 - 1,50	0	0	54	1650	4	0	0	0	1708	58,49
1,50 - 2,00	0	0	0	417	0	0	0	0	417	14,28
2,00 - 2,50	0	0	0	49	0	0	0	0	49	1,68
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,00 - 3,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,50 - 4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	0	146	2770	4	0	0	0	2920	
Frequência (%)	0,0	0,0	5,0	94,9	0,1	0,0	0,0	0,0		100,0

Tabela 23 – Histograma de altura e direção de onda modelados para o ponto P3 no ano de 2014.

Anual										
Altura(m)	Direção								Observações	Frequência (%)
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0,00 - 0,50	0	0	0	73	0	0	0	0	73	2,50
0,50 - 1,00	0	0	35	1522	0	0	0	0	1557	53,32
1,00 - 1,50	0	0	0	1138	0	0	0	0	1138	38,97
1,50 - 2,00	0	0	0	152	0	0	0	0	152	5,21
2,00 - 2,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
2,50 - 3,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,00 - 3,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
3,50 - 4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
>4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Observações	0	0	35	2885	0	0	0	0	2920	
Frequência (%)	0,0	0,0	1,2	98,8	0,0	0,0	0,0	0,0		100,0

Os histogramas direcionais mostram a difração das ondas conforme o trem de ondas se aproxima da linha de costa. No ponto mais afastado – P1, as ondas possuem direção variando desde E (15% de frequência), SE (85% de frequência) a S (>1% de frequência). Para os pontos mais próximos a linha de costa, P2 e P3, as direções das ondas incidentes são mais restritas – no ponto P3, 99% das ondas possuem origem SE, indicando que neste ponto independente da ondulação ao largo, as ondas refratam e chegam a perpendicularmente a linha de costa.

Da **Figura 34** a **Figura 37** são mostradas as variações temporais de altura significativa de onde nos pontos P1, P2 e P3, bem como a variação desta altura significativa no ponto do NCEP, descrito no item II.3 deste documento, que serviu como condição de borda para o modelo de ondas, conforme descrito no item III.3.

Estes gráficos mostram que a variação das alturas significativas nos pontos P1, P2 e P3 oscilaram de acordo com o observado para o ponto NCEP, atestando a fidelidade do modelo. Conforme destacado anteriormente, as ondas tendem a perder altura significativa de acordo com que se aproximam da linha de costa. Pianca *et al.* (2010) validou dados do NCEP na costa do Brasil com dados coletados, atestando que esta fonte de dados possui confiabilidade.

Na série modelada, é possível identificar que a maior altura modelada ocorreu na data de 07/09/2014 – 18h. A **Figura 38** mostra o campo de altura significativa e direção de pico de ondas neste instante, mostrando a diminuição da altura significativa conforme aproxima-se da linha de costa e a refração das ondas, alinhando-se perpendicularmente a linha de costa.



Figura 34 – *Altura significativa de onda modeladas para os meses de janeiro (superior), fevereiro (meio) e março (inferior) de 2014 ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE.*

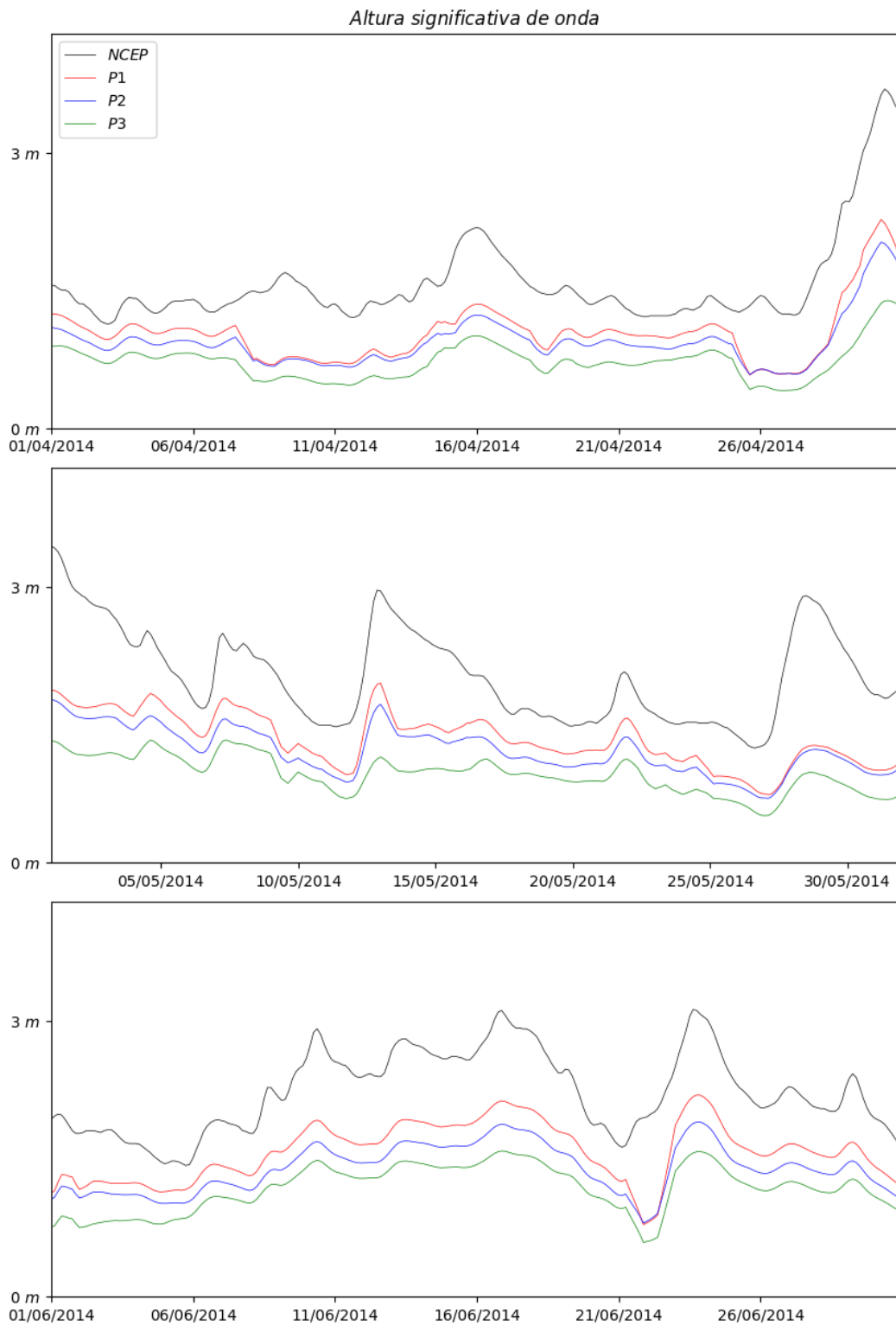


Figura 35 – *Altura significativa de onda modeladas para os meses de abril (superior), maio (meio) e junho (inferior) de 2014 ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE.*



Figura 36 – *Altura significativa de onda modeladas para os meses de julho (superior), agosto (meio) e setembro (inferior) de 2014 ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE.*

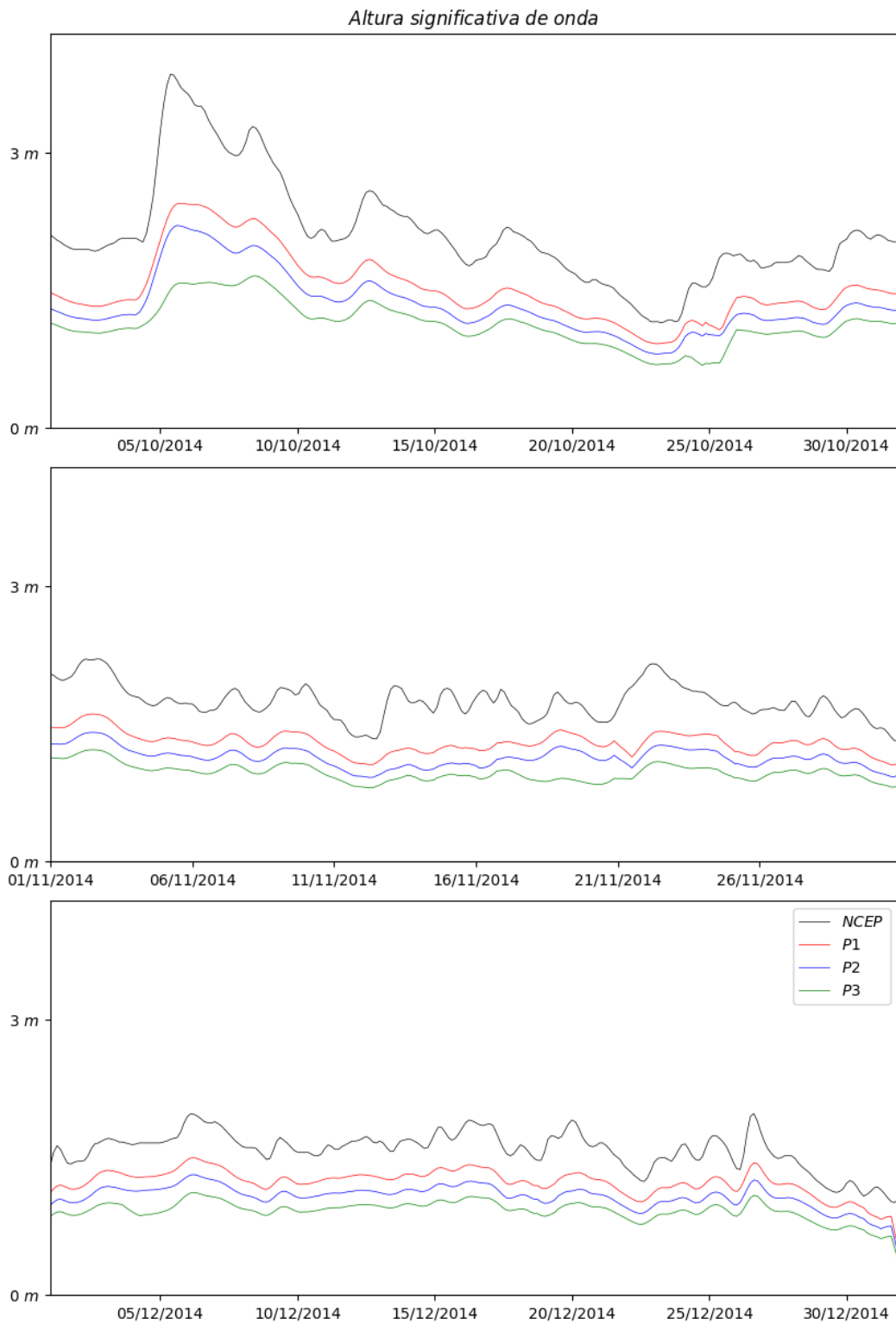


Figura 37 – *Altura significativa de onda modeladas para os meses de outubro (superior), novembro (meio) e dezembro (inferior) de 2014 ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE.*

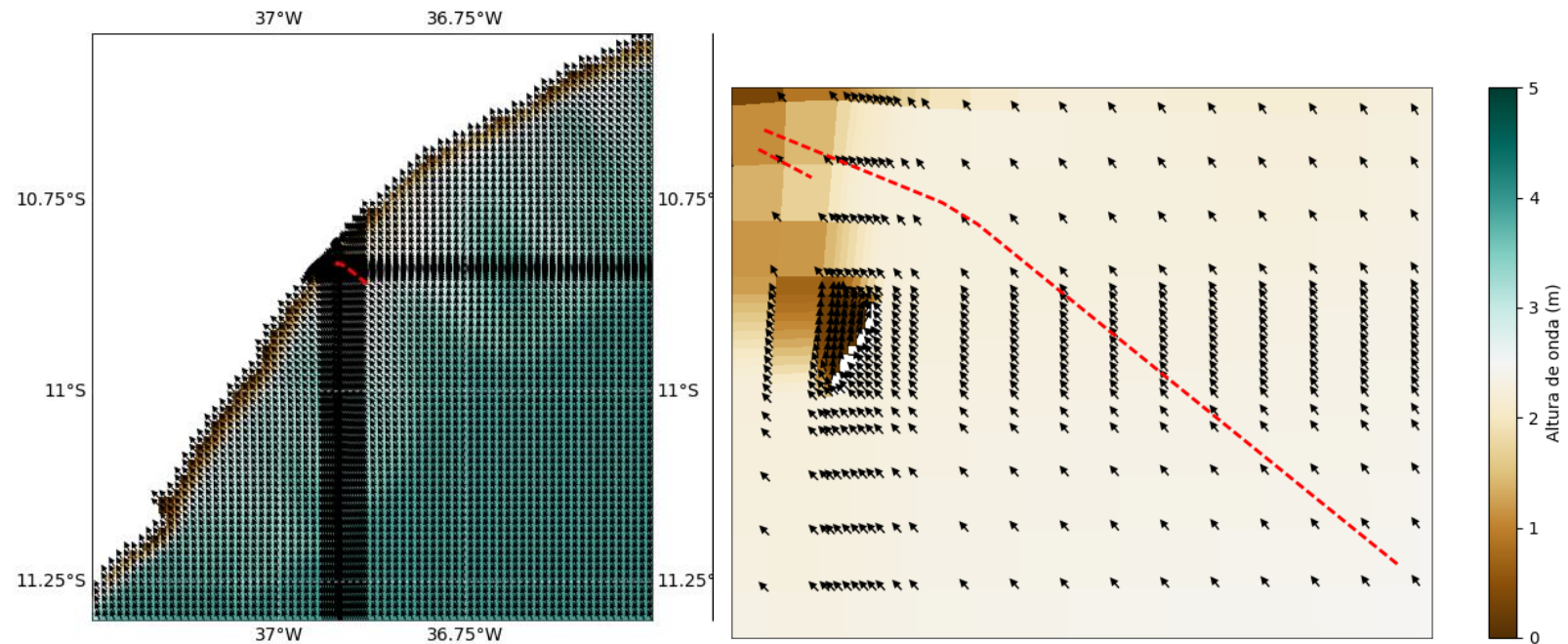


Figura 38 – Instante de tempo com maior altura significativa modelada para o ano de 2014 (07/09/2014 – 18h) ao longo do gasoduto e emissário na costa de Aracajú/SE. Painel da esquerda toda a área modelada e o painel da direita detalhe da região do gasoduto e emissário (linhas tracejadas em vermelho). Cores mostram a altura significativa de onda (m) e os vetores a direção de pico.

IV.3 MODELAGEM MORFOLÓGICA

As variações morfodinâmicas provocadas pela instalação do emissário e gasoduto foram extremamente localizadas. Inicialmente optou-se pela confecção de uma grade numérica que abrangesse todo o gasoduto e emissário e, não foi possível identificar nenhuma alteração – possivelmente devido ao pequeno porte dos dutos, com 1 m de diâmetro. Assim, optou-se pela confecção de grades localizadas em trechos dos dutos, extremamente refinadas, de modo a verificar possíveis alterações nas imediações dos mesmos, conforme apresentado no item III.4 deste documento.

Os resultados batimétricos inicial, final (após um ano de simulação – 2014) e a comparação entre eles estão apresentadas da **Figura 39** a **Figura 41** para os pontos P1, P2 e P3, respectivamente.

Nestas figuras é possível notar que as alterações batimétricas ocorreram somente nas imediações dos dutos, sendo maiores valores no trecho mais próximo a linha de costa (P3). No ponto P1, as maiores alterações batimétricas foram da ordem de 0,03 m. No ponto P2 de 0,07 m e no ponto P3 mais expressivas de 0,5 m com máximos de 0,7 m (50 a 70 cm).

Importante destacar que todas as alterações ocorreram nas células de grades imediatamente ao lado dos dutos, mostrando que as estruturas possuem capacidade de acumular sedimento somente nas suas imediações. E ainda, as alterações ocorreram de maneira similar em ambos os lados dos dutos.

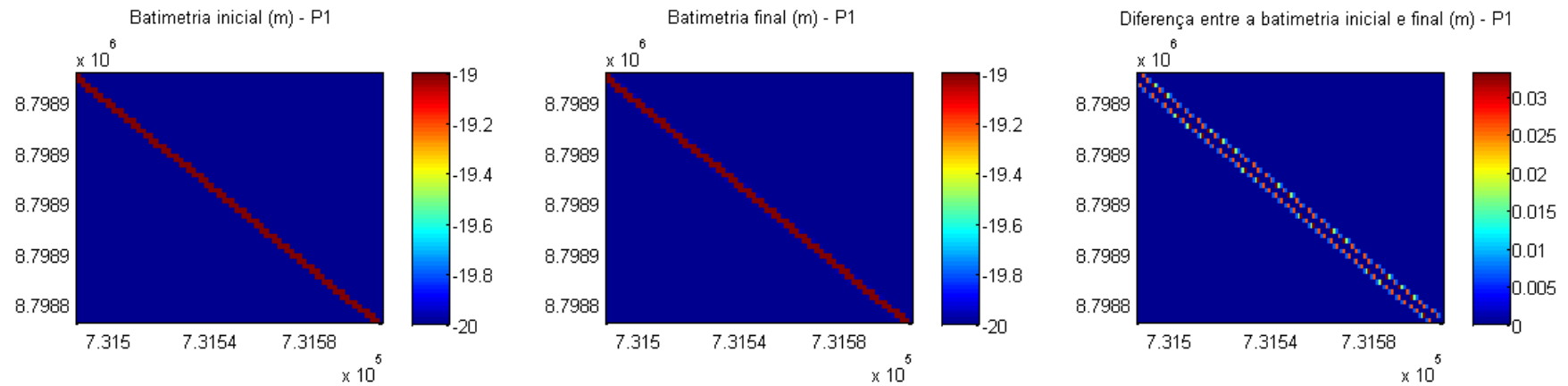


Figura 39 – Batimetria inicial de simulação (esquerda), batimetria final de simulação (central) e comparação entre ambas (direita) para o ponto P1. Os eixos estão em coordenadas UTM (metros). As cores dos painéis da esquerda e central mostram a batimetria (m). As cores do painel da direita mostram a diferença de batimetria entre o painel da esquerda e o central, onde os valores positivos mostram diminuição da profundidade.

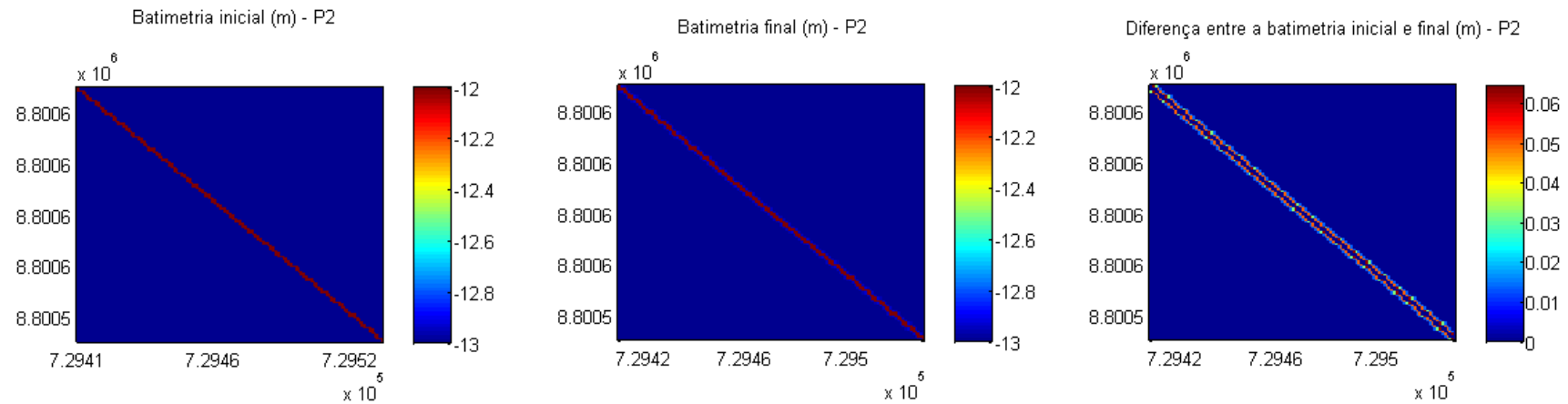


Figura 40 – Batimetria inicial de simulação (esquerda), batimetria final de simulação (central) e comparação entre ambas (direita) para o ponto P2. Os eixos estão em coordenadas UTM (metros). As cores dos painéis da esquerda e central mostram a batimetria (m). As cores do painel da direita mostram a diferença de batimetria entre o painel da esquerda e o central, onde os valores positivos mostram diminuição da profundidade.

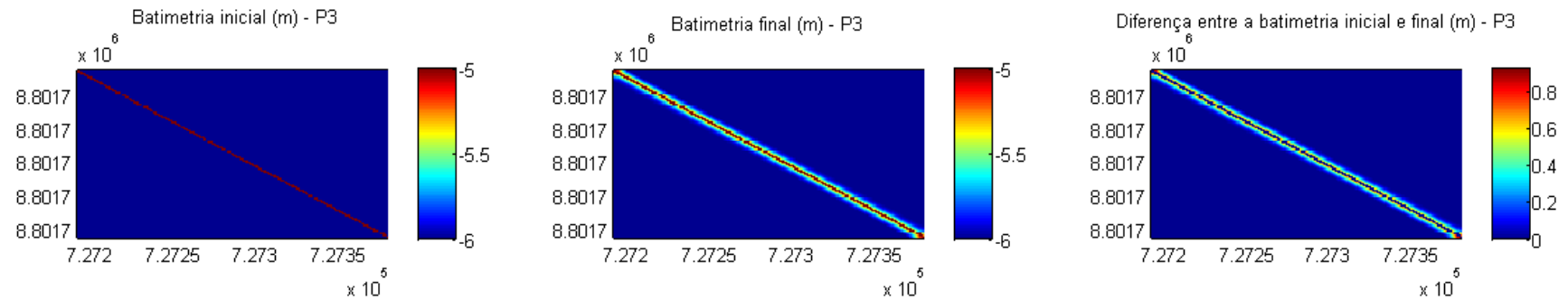


Figura 41 – Batimetria inicial de simulação (esquerda), batimetria final de simulação (central) e comparação entre ambas (direita) para o ponto P3. Os eixos estão em coordenadas UTM (metros). As cores dos painéis da esquerda e central mostram a batimetria (m). As cores do painel da direita mostram a diferença de batimetria entre o painel da esquerda e o central, onde os valores positivos mostram diminuição da profundidade.

V.DISSCUSSÃO DOS RESULTADOS

A **Figura 42** mostra a variação temporal da morfologia em ponto ao lado dos dutos nas grades P1, P2 e P3, juntamente com a variação de ondas e corrente de fundo nestes locais. Esta figura apresenta apenas o período onde o modelo morfodinâmico encontra-se estabilizado, isto é, após o tempo de aquecimento do modelo, mencionado no item III.4 deste documento. Como resultado do período de aquecimento, é possível observar variações na batimetria logo no início do período apresentado nos gráficos.

Na figura apresentada é possível notar que o ponto P1, mais distante da costa, apresenta a menor variação morfológica ao longo do ano e aparentemente esta variação está correlacionada com a variação da intensidade da corrente de fundo. Em períodos de maior intensidade ocorreu uma tendência de erosão, enquanto que com correntes mais baixa de deposição. Os valores são sempre inferiores a 10 cm de variação.

O ponto P2 possui variação semelhante ao descrito para o ponto P1, tendo assim, variação aparentemente regida principalmente pela corrente de fundo. As taxas de deposição são levemente superiores ao observado para o ponto P1.

Para o ponto P3 as taxas de deposição são maiores que as observadas para os pontos P1 e P2. Neste local, onde a profundidade é relativamente inferior aos demais (6 m contra 13 m e 20 m, respectivamente), aparentemente as taxas de deposição estão mais correlacionadas às alturas significativas das ondas. Durante os meses maio e setembro, cuja as ondas são mais intensas, as variações ficaram em torno de 20 cm, enquanto que nas épocas de ondas menos intensas, os valores estiveram próximos a 60 cm, que seria aproximadamente a metade do diâmetro dos dutos.

É importante observar que quando a deposição chega próxima dos 60 cm, a região passa a apresentar um equilíbrio dinâmico, permanecendo com a camada de sedimento depositado praticamente com a mesma espessura, até a chegada de períodos de ondas com maiores alturas, onde então ocorre a erosão no local, diminuindo esta deposição para cerca de 20 cm. Após o término dos períodos de ondas maiores na região, a sequência dos eventos de deposição/erosão novamente se repetem, indicando um comportamento cíclico sazonal.

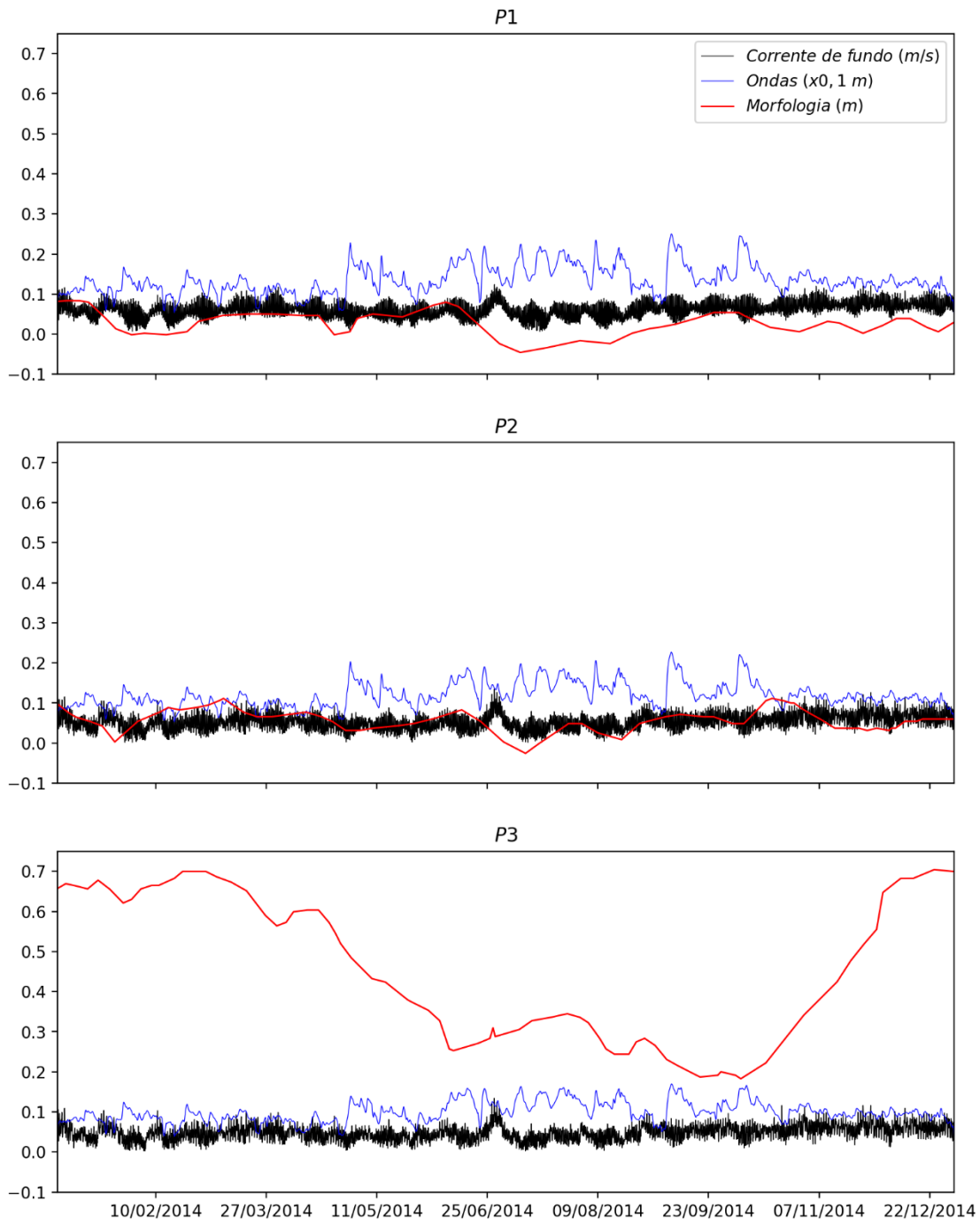


Figura 42 – Variação da batimetria em ponto ao lado do gasoduto nas grades P1 (superior), P2 (meio) e P3 (inferior) – linha vermelha. A linha preta mostra a intensidade da corrente de fundo e a linha azul a altura significativa de onda multiplicado por 0,1 para facilitar a visualização.

VI. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo são:

- Foi confeccionado um modelo hidrossedimentar de cobertura regional para simular e prever os efeitos morfodinâmicos e morfossedimentares na região resultantes da instalação dos emissários e gasoduto do empreendimento;
- A simulação regional de variação morfodinâmica não apresentou nenhum resultado regional, mostrando que as alterações ocorrem somente de forma localizada ao lado dos dutos;
- Foram confeccionadas três grades de maior resolução em três pontos ao longo dos dutos, nas profundidades de 20, 13 e 6 metros. Nestas localidades, foi constatado que nas mediações distantes de até 1 metro da linha do duto pode ocorrer deposição sedimentar.
- Para o trecho a 20 m de profundidade (P1), a deposição máxima foi da ordem de 3 cm, com taxas de deposição estando aparentemente relacionadas às correntes de fundo;
- Para o trecho a 13 m de profundidade (P2), a deposição máxima foi da ordem de 6 cm, com taxas de deposição estando aparentemente relacionadas às correntes de fundo;
- Para o trecho a 6 m de profundidade (P3), a deposição máxima foi da ordem de 0,7 m. Sendo este trecho mais raso mais influenciado pela altura significativa das ondas, os maiores valores foram registrados em momentos de menor altura de onda. Nos períodos de maior altura de ondas os valores de deposição tiveram médias de 20 cm, sempre ao lado dos dutos;
- Ainda a respeito do trecho a 6 m de profundidade (P3), os resultados indicam que quando a deposição atinge a ordem de 0,7 m, o local apresenta um equilíbrio nos processos deposicionais e erosivos, não permitindo que a região acumule mais sedimentos.
- **Assim, a instalação do gasoduto e do emissário não devem alterar significativamente a morfodinâmica da região de implantação, sendo verificada somente deposição de sedimentos ao lado dos tubos, em alturas inferiores ao diâmetro dos mesmos.**

ANEXO A – O MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D-FLOW

No módulo hidrodinâmico DELFT3D-FLOW, as componentes da equação do movimento correspondem às equações do movimento segundo as direções x, y e são representadas pelas equações (1) e (2).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_x}} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{\sqrt{G_y}} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_y}}{\partial x} + \frac{uv}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_x}}{\partial y} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_x}} P_x + F_x + \frac{1}{H^2} \frac{\partial y}{\partial \sigma} \left(\vartheta_{mol} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_x}} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{\sqrt{G_y}} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_y}}{\partial x} + \frac{uv}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial \sqrt{G_x}}{\partial y} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_y}} P_y + F_y + \frac{1}{H^2} \frac{\partial y}{\partial \sigma} \left(\vartheta_{mol} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial [(d+w)u\sqrt{G_y}]}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_x} \sqrt{G_y}} \frac{\partial [(d+w)v\sqrt{G_x}]}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \\ = H (q_f - q_s) \end{aligned} \quad (3)$$

Nestas equações x, y e z são as três coordenadas espaciais e t é o tempo. u, v e w são as componentes de corrente segundo os eixos x, y e z (respectivamente) e a densidade é simbolizada por ρ . ϕ é a elevação da superfície livre, $\sqrt{G_x}$ e $\sqrt{G_y}$ são coeficientes de transformação de coordenadas curvilineares para retangulares (aproximação que não considera a esfericidade da Terra), f é o parâmetro de Coriolis, H significa a profundidade, σ é o sistema de coordenada vertical introduzida por PHILLIPS (1957), P_x e P_y são os gradientes de pressão hidrostática nas respectivas direções, F_x e F_y são os gradientes de tensão radiativa nas respectivas direções, ϑ_{mol} o coeficiente de viscosidade cinemática molecular, M_x e M_y são fontes ou sorvedouros de momento nas respectivas direções. q_f são as fontes e q_s os sorvedouros de água.

Sobre a aproximação de águas rasas, a componente vertical do movimento, na direção z , Equação (3), é reduzida à equação hidrostática:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g H \quad (4)$$

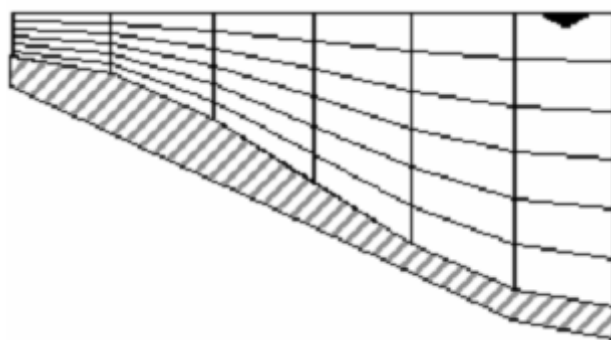
, onde g se refere à aceleração da gravidade.

O parâmetro de Coriolis (f) é dependente da latitude geográfica (Θ) e da velocidade angular de rotação da Terra (Ω) (Equação 5).

$$f = 2 \cdot \Omega \cdot \text{sen}(\Theta) \quad (5)$$

Na coordenada σ introduzida por PHILLIPS (1957) para modelos atmosféricos, as camadas verticais da grade numérica são consideradas como sendo planos sigma, onde não são limitadas horizontalmente, acompanhando a topografia de fundo e a superfície livre. Deste modo o número de camadas é constante, independentemente da profundidade local (Figura 1). Isto implica em maior detalhamento em regiões mais rasas, e a relação entre as camadas também pode ser irregular, dando-se preferência a zonas de interesses, como por exemplo camada de fundo e superfície. Algebricamente a coordenada σ é definida pela equação (6).

$$\sigma = \frac{z - \varphi}{H} \quad (6)$$



com coordenada horizontal σ .

Fonte: DELTARES (2010).

Derivadas da equação (4) podem ser obtidas as expressões que resolvem os gradientes horizontais de pressão:

$$\frac{1}{\rho\sqrt{G_x}}P_x = \frac{g}{\sqrt{G_x}}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + g\frac{H}{\rho\sqrt{G_x}}\int_{\sigma}^0\left(\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\partial\rho}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right)d\sigma \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho\sqrt{G_y}}P_y = \frac{g}{\sqrt{G_y}}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + g\frac{H}{\rho\sqrt{G_y}}\int_{\sigma}^0\left(\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\partial\rho}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y}\right)d\sigma \quad (8)$$

Nas equações (7) e (8), do lado direito da igualdade, o primeiro termo é referente ao gradiente de pressão barotrópico (variações da superfície livre), e o segundo ao gradiente de pressão baroclínico (variações laterais de densidade).

Os gradientes de tensão radiativa, F_x e F_y , são descritos por:

$$F_x = \frac{1}{\sqrt{G_x}}\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_y}}\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y} \quad (9)$$

$$F_y = \frac{1}{\sqrt{G_x}}\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_y}}\frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} \quad (10)$$

Os tensores τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} são determinados de acordo com as equações (11), (12) e (13).

$$\tau_{xx} = \frac{2v_H}{\sqrt{G_x}}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right) \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}v\left\{\frac{1}{\sqrt{G_y}}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y}\right) + \frac{1}{\sqrt{G_x}}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right)\right\} \quad (12)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2v_H}{\sqrt{G_y}}\left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y}\right) \quad (13)$$

Para a equação da continuidade, a representação utilizada no DELFT3D-FLOW é:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}}\frac{\partial(H)(U)\sqrt{G_y}}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}}\frac{\partial(H)(V)\sqrt{G_x}}{\partial y} = Q \quad (14)$$

,onde U e V significam os transportes por unidade de distância horizontal nas respectivas direções x e y; Q representa as contribuições por unidade de área de descarga ou sumidouro de água. Q é dado por:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_f - q_s) d\sigma \quad (15)$$

As equações de difusão de sal e calor, tendo λ como processos de decaimento de primeira ordem, S a salinidade e T a temperatura, são representadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial HS}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \left(\frac{\partial \sqrt{G_x} H u S}{\partial x} + \frac{\partial \sqrt{G_x} H v S}{\partial y} \right) + \frac{\partial w S}{\partial \sigma} \\ = \frac{H}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_H \sqrt{G_y}}{\sigma \sqrt{G_x}} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \left(\frac{D_H \sqrt{G_x}}{\sigma \sqrt{G_y}} \frac{\partial S}{\partial y} \right) \right\} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\vartheta_{mol} + \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) \\ - \lambda H + F_s \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial HT}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \left(\frac{\partial \sqrt{G_x} H u T}{\partial x} + \frac{\partial \sqrt{G_x} H v T}{\partial y} \right) + \frac{\partial w T}{\partial \sigma} \\ = \frac{H}{\sqrt{G_x}\sqrt{G_y}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_H \sqrt{G_y}}{\sigma \sqrt{G_x}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(\frac{D_H \sqrt{G_x}}{\sigma \sqrt{G_y}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\vartheta_{mol} + \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) \\ - \lambda H + F_t \end{aligned} \quad (17)$$

O sistema de equações é fechado por uma versão da equação de estado que é função de T, S e P (pressão). A versão utilizada é derivada de UNESCO (1981):

$$\rho = \rho_0 + AS + BS^{3/2} + CS^2 \quad (18)$$

onde,

$$\begin{aligned} \rho_0 = 999,842594 + 6,793952 \cdot 10^{-2} T - 9,095290 \cdot 10^{-2} T^2 + 1,001685 \cdot 10^{-4} T^3 \\ - 1,120083 \cdot 10^{-6} T^4 + 6,536332 \cdot 10^{-9} T^5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A = 8,24493 \cdot 10^{-1} - 4,0899 \cdot 10^{-3} T + 7,6438 \cdot 10^{-5} T^2 - 8,2467 \cdot 10^{-7} T^3 \\ + 5,3875 \cdot 10^{-9} T^4 \end{aligned}$$

$$B = -5,72466 \cdot 10^{-3} + 1,022710^{-4} T - 1,6546 \cdot 10^{-6} T^2$$

$$C = 4,8324 \cdot 10^{-4}$$

O DELFT3D-FLOW apresenta vários esquemas de fechamento turbulento e é totalmente não linear, inclusive nas parametrizações dos atritos de fundo e superfície. Tendo ρ_0 a densidade de referência da água do mar, \overline{u}_b a magnitude da velocidade horizontal na primeira camada acima do fundo e C_{3D} o coeficiente de Chézy, temos o atrito de fundo ($\overline{\tau}_b$) descrito por:

$$\overline{\tau}_b = \frac{g\rho_0\overline{u}_b|\overline{u}_b|}{C_{3D}^2} \quad (19)$$

Com ρ_a sendo a densidade do ar, U_{10} a magnitude da velocidade do vento 10 metros acima da superfície livre (dependente do tempo e do espaço) e C_D o coeficiente de arrasto dependente de U_{10} , temos o tensão de cisalhamento do vento com a superfície ($\overline{\tau}_s$) descrito por:

$$|\overline{\tau}_s| = \rho_a C_D U_{10}^2 \quad (20)$$

O coeficiente de arrasto C_D é dependente da velocidade do vento e é dado por, de acordo com SMITH & BANKE (1975):

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 0,00063 & \text{se } U_{10} = 0 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \\ \frac{0,00803 U_{10}}{100} & \text{se } 100 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} < U_{10} < 100 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \\ 0,00723 & \text{se } U_{10} > 100 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \end{cases} \quad (21)$$

O esquema de fechamento turbulento utilizado foi o denominado modelo k- ϵ . Neste modelo de turbulência, as equações de transporte são resolvidas para a energia cinética turbulenta (k) e para a dissipação de energia (ϵ). O comprimento da mistura (L) é então determinada de ϵ e k de acordo com:

$$L = C_D \frac{k\sqrt{k}}{\epsilon} \quad (22)$$

Nas equações de transporte, as duas seguintes suposições são feitas:

- A produção, o empuxo e a dissipação são os termos dominantes;
- A escala de distância horizontal são muito maiores que a vertical (águas rasas)

Devido a esta primeira suposição, a conservação das quantidades turbulentas é pouco importante e a equação de transporte é implementada de forma não conservativa.

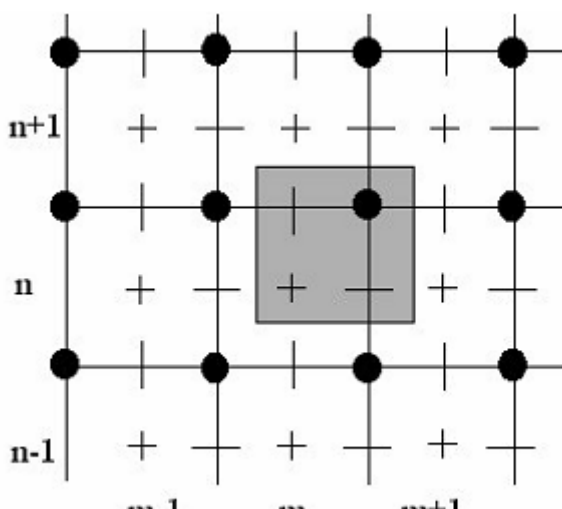
As equações de transporte para k e ϵ são acopladas de forma não linear pelas médias de seus coeficientes de difusividades (D_k e D_ϵ) e termos de dissipação. As equações de transporte para k e ϵ são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{u}{\sqrt{G_{yy}}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_K \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + P_K + P_{Kw} + B_K - \epsilon \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \frac{u}{\sqrt{G_{yy}}} \frac{\partial \epsilon}{\partial \eta} + \frac{w}{d + \zeta} \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_K \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \right) + P_\epsilon + P_{\epsilon w} + B_\epsilon - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (24)$$

, onde P são os termos de produção e B os termos de empuxo. $c_{2\epsilon}$ é termo de calibração e tem valor 1,92.

O método numérico do DELFT3D-FLOW é baseado em diferenças finitas. Para discretizar no espaço as equações demonstradas acima, a área é representada por uma grade curvilínea. A configuração das variáveis na grade é do tipo Arakawa-C, com os pontos de pressão (nível) localizados no centro das células e as componentes de velocidade são situados nas faces, de forma perpendicular, de acordo com a Figura 2.



Onde:

- Linhas cheias: grade numérica;
- Área cinza: itens com o mesmo índice (m,n);

- + : elevação da superfície, concentração de constituintes, salinidade e temperatura;
- - : componente horizontal da velocidade na direção x;
- | : componente horizontal da velocidade na direção y;
- • : profundidade.

Figura 2 - Distribuição das variáveis em grade numérica do tipo Arakawa-C.

Fonte: DELTARES (2010).

O esquema numérico implementado no DELFT3D-FLOW utilizado é o WAQUA-scheme, baseado em STELLING (1984) e STELLING & LEENDERTSE (1992), que é uma extensão do consagrado método ADI (Alternating Direction Implicit – KEEDERTSE (1967); LEENDERTSE & GRITTON (1971) e LEENDERTSE *et al.* (1973)), adicionando-se uma aproximação especial para os termos advectivos horizontais.

O método ADI divide cada espaçamento de tempo em dois estágios. Cada estágio se refere a metade do espaçamento de tempo, sendo resolvida todas as equações em ambos. Os níveis de tempo são alternados: se em um estágio o termo é tomado implicitamente no tempo, este termo será levado explicitamente no tempo, no estágio seguinte. Para o passo de tempo completo, cada termo é integrado com precisão de segunda ordem.

A vantagem do método ADI é que as equações integradas implicitamente de elevação do nível da superfície livre e velocidade são acopladas ao longo das linhas da grade numérica, levando o sistemas de equações com uma pequena largura de banda.

De forma vetorial, uma exemplificação do método ADI para a velocidade é proposto de acordo com as Equações (25) e (26).

Estágio 1:

$$\frac{\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} - \vec{U}^l}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y\vec{U}^l + B\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} = \vec{d} \quad (25)$$

Estágio 2:

$$\frac{\vec{U}^{l+1} - \vec{U}^{l+\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x\vec{U}^{l+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}A_y\vec{U}^{l+1} + B\vec{U}^{l+1} = \vec{d} \quad (26)$$

Onde,

$$A_x = \begin{bmatrix} 0 & -f & g \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ H \frac{\partial}{\partial x} & 0 & u \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$A_y = \begin{bmatrix} u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 \\ f & 0 & g \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & H \frac{\partial}{\partial y} & v \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}$$

Com μ sendo o coeficiente de atrito de fundo linearizado e \vec{d} forçantes externas como vento e pressão atmosférica.

ANEXO B – O MODELO DE ONDA DELFT-WAVE

O WAVE é o módulo de ondas do DELFT3D que simula basicamente a propagação de ondas; geração de onda a partir do vento; interações não lineares entre onda-onda e dissipação de energia para uma determinada topografia de fundo, campo de vento, nível de água e campos de correntes, em águas rasas intermediárias e profundas. Neste módulo é implementado o modelo de terceira geração SWAN (Simulating Waves Nearshore) que leva em consideração a evolução de ondas aleatórias de curto comprimento de onda em regiões costeiras de águas rasas, intermediárias e profundas com influência de correntes, considerando a refração devido a estas correntes e variações de batimetria, reproduzindo também processos de difração, geração de ondas pelo vento, quebra induzida pelo fundo e pela corrente.

Suas formulações se aplicam aos processos de ondas em águas rasas, como fricção com o fundo, difração e quebra de onda. Sua principal característica é a interação dinâmica com o módulo hidrodinâmico Delft3D – FLOW, interagindo onda-corrente. Por isso o efeito das ondas em correntes e o efeito do fluxo em ondas são contabilizados.

O modelo SWAN se baseia na equação discreta do balanço de ação espectral, sendo totalmente espectral em todas as direções e frequências. Nele as ondas são descritas pela densidade espectral bidimensional da ação de ondas $N(\sigma, \theta)$ (conservada em presença de correntes), inclusive quando fenômenos não lineares predominam. As variáveis independentes são a frequência relativa σ (observada em um amplo plano de referência se movendo com a velocidade da corrente) e a direção da onda θ (direção normal às cristas de ondas de cada componente espectral), sendo que a densidade de ação é igual à densidade de energia dividida pela frequência relativa.

A difração implementada no SWAN é a aproximação da refração-difração com fase desacoplada para modelos de ondas espectrais. A equação do balanço da ação espectral é dada por:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

*1

*2

*3

*4

*5

*6

Onde:

$N(\sigma, \theta)$ = densidade de ação da onda;

$S(\sigma, \theta)$ = fonte/sumidouro em termos de densidade de energia;

x, y = distância em x e y (m);

$C_{x,y,\sigma,\theta}$ = velocidade de propagação para x, y, σ, θ (m/s);

σ = frequência relativa (Hz);

θ = direção de onda (°).

Os termos numerados na equação acima representam:

- *1 – Taxa local de variação de ação no tempo;
- *2 e *3 – Propagação de ação no espaço, com velocidades de propagação e nos eixos x e y , respectivamente;
- *4 – Refração induzida pela profundidade e por correntes, com velocidade de propagação no eixo ;
- *5 – Mudança da frequência relativa devido a variações na profundidade e nas correntes;
- *6 – Termo fonte em relação à densidade de energia representando os efeitos de geração, dissipação e interação não linear onda-onda.

Em resumo, os processos hidrodinâmicos e de ondas, alimentam o módulo de transporte de sedimentos, que suporta transporte por suspensão e por carga de tração para sedimentos não coesivos e suspensão para sedimentos coesivos. À medida que o cálculo do transporte por tração é solucionado pela transferência de momento do fluido para o sedimento, aquele referente à carga em suspensão é formulado por equações de advecção e difusão.

ANEXO C – O MODELO DE MORFOLOGIA DELFT3D-MOR

Segundo Deltares (2010), o módulo de transporte de sedimento (SED) e o módulo de morfologia suportam tanto transporte de carga de leito e carga suspensa de sedimentos não-coesivos quanto carga suspensa de sedimentos coesivos.

O limite entre sedimento coesivo e sedimento não-coesivo é obscuro. Em geral, sedimentos muito menores que 2 µm são considerados coesivos. Sedimentos muito maiores que 60 µm são considerados não-coesivos.

Sedimentos coesivos são compostos de material com tamanho semelhante ao da argila e com intensa força iônica entre as partículas. Os sedimentos coesivos consistem de minerais inorgânicos (minerais argilosos e não-argilosos) e material orgânico (detritos de plantas e animais e bactérias).

Transporte de Carga Suspensa

Segundo Deltares (2010), a equação da advecção-difusão é empregada no transporte de sedimento suspenso:

$$\frac{\partial[Hc]}{\partial t} + \frac{\partial[HUc]}{\partial x} + \frac{\partial[HVc]}{\partial y} + \frac{\partial(\omega c)}{\partial \sigma} = H \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right] + HS$$

onde,

c é a concentração de sedimento (kg/m³);

S é a indicação da fonte e do sumidouro por unidade de área;

D_H e D_V são as difusividades horizontal e vertical, respectivamente;

ω é a vorticidade;

σ é a coordenada vertical.

Transporte de Carga de Leito

Para o transporte de carga de leito, Deltares (2010) mostra que o Delft3D emprega a equação:

$$|S_b| = 0,006\rho_s\omega_s d_{50}^{(l)} M^{0.5} M_e^{0.7}$$

onde,

S_b é a taxa de transporte de carga de leito para o diâmetro mediano d_{50} ;

ω_s é a velocidade de queda da partícula de sedimento;

M é a mobilidade do sedimento devido às ondas e correntes;

M_e é a mobilidade do excesso de sedimento.

Atualização da Morfologia

A elevação do leito é atualizada a cada passo de tempo durante a simulação. Isso ocorre porque a mudança na massa de material do leito é calculada como resultado dos gradientes de transporte e dos termos fonte e sumidouro de sedimento.

A mudança na quantidade de sedimentos no fundo causados pelo transporte de carga de leito é calculada pela equação:

$$\Delta_{SED}^{(m,n)} = \frac{\Delta t f_{MORFAC}}{A^{(m,n)}} \left(S_{b,uu}^{(m-1,n)} \Delta y^{(m-1,n)} - S_{b,uu}^{(m,n)} \Delta y^{(m,n)} + \right. \\ \left. S_{b,vv}^{(m,n-1)} \Delta x^{(m,n-1)} - S_{b,vv}^{(m,n)} \Delta x^{(m,n)} \right)$$

onde,

$\Delta_{SED}^{(m,n)}$ é a mudança na quantidade de sedimento na localidade (m,n) ;

Δt é o passo de tempo computacional;

f_{MORFAC} é o fator de aceleração morfológica, MORFAC (descrito no item a seguir);

$A^{(m,n)}$ é a área da célula computacional na localidade (m,n) ;

$S_{b,uu}^{(m,n)}$ e $S_{b,vv}^{(m,n)}$ são os vetores de transporte do sedimento de carga de leito calculada nas direções u e v , respectivamente;

$\Delta x^{(m,n)}$ é a largura da célula na direção x;

$\Delta y^{(m,n)}$ é a largura da célula na direção y.

Fator da Escala Morfológica

De acordo com Deltares (2010), as mudanças morfológicas acontecem em escalas de tempo muito maiores que as mudanças hidrodinâmicas. Para minimizar os efeitos desse fato o Delft3D apresenta o fator temporal de escala de morfológica (f_{MORFAC}), que acelera os efeitos morfológicos durante as simulações. Os fluxos de erosão e deposição entre o leito e o escoamento são multiplicados por esse fator em cada passo de tempo. As alterações no nível do leito ajustado são incorporadas nos cálculos do escoamento hidrodinâmico. De forma mais simplificada, f_{MORFAC} é definido como:

$$f_{MORFAC} = \frac{\textit{tempo morfológico}}{\textit{tempo hidrodinâmico}}$$

Como exemplo, para um fator de escala morfológica igual a 30, em uma simulação de um dia, mudanças morfológicas de 30 dias serão simuladas. O uso do f_{MORFAC} também reduz o tempo computacional das simulações.