

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THIAGO MORIGGI

Modelagem hidrodinâmica da região costeira de Cartagena, Colômbia, com
aplicação do software Delft Dashboard

CURITIBA

2015

THIAGO MORIGGI

Modelagem hidrodinâmica da região costeira de Cartagena, Colômbia, com aplicação do software Delft Dashboard

Trabalho Final II apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Ambiental no curso de graduação de Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Professor Dr. Tobias Bleninger

CURITIBA

2015

“Imagination will often carry us to worlds that never were. But without it we go nowhere.”

Carl Sagan

RESUMO

Zonas costeiras são regiões de transição entre áreas continentais e os oceanos e sofrem influência direta e/ou indireta das atividades existentes no local, sendo a poluição hídrica um dos principais problemas enfrentados. Para estabelecer um bom gerenciamento dos recursos hídricos o conhecimento da hidrodinâmica local é muito importante e possível através de modelos numéricos. Neste trabalho aplicou-se o software de modelagem hidrodinâmica *Delft Dashboard* na região costeira de Cartagena, que conta com uma interface de fácil utilização e com diversas ferramentas para confecção dos dados de entrada do modelo. Por meio deste software, que possui o módulo *Delft3D FLOW* implementado, pode-se gerar modelos com base nas equações de águas rasas. Utilizando as ferramentas disponíveis foram gerados dois cenários de simulação, um mais grosseiro e outro mais refinado, gerando-se resultados para nível de água e velocidade de corrente para o período de interesse, os quais foram analisados e comparados estatisticamente com dados obtidos em campo. Os resultados mostraram que o modelo representa bem a forçante astronômica, principal forçante de maré definida, além de possuir grande aproximação com os dados obtidos da estação CARTAGENA IHO, no entanto não apresenta boa aproximação com os dados de campo, possivelmente devido à fonte de dados utilizada pelo modelo na geração das condições de contorno. Com relação à velocidade, a comparação dos resultados mostra que, embora sendo gerados dados de velocidade, as simplificações adotadas e a possível existência de correntes marítimas de grande escala no local fizeram com que os resultados simulados apresentassem elevada discordância com os dados medidos em campo.

Palavras-chave: Região costeira; Modelagem hidrodinâmica; Delft Dashboard; Cartagena.

ABSTRACT

Coastal zones are regions of transition between inland areas and oceans which suffer direct and indirect influence of local activities and where the water pollution is the major problem faced. To establish a good management of water resources is necessary to know the local hydrodynamics, which is possible using numerical models. In this work of the hydrodynamic modeling of coastal region of Cartagena, Colombia, will be used the free software Delft Dashboard, which has a user-friendly interface and many tools for preparation of the input data of the model. Through this software, which has Delft3D FLOW module implemented, can be generated models based on shallow water equations. Using the available tools were created two simulation scenarios, one coarser and other more refined, leading to water level data and current velocity for the period of interest, which were statistically analyzed and compared with data from field. The results showed that the model represents well the astronomical forcing, main forcing defined tide, besides having great approach to data obtained from CARTAGENA IHO station, however does not show good approximation with the field data possibly owing to weather tide or large-scale flows, which is not taken into account in the generated model. Regarding the speed, the comparison of results shows that while being generated speed data, the simplifications adopted and the possible existence of large-scale ocean currents at the site caused the simulated data presented high disagreement with the data measured in the field.

Keywords: Coastal region; Hydrodynamic modeling; Delft Dashboard; Cartagena.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração para exemplificar os contornos aberto e fechado, profundidade (batimetria), rugosidade de fundo e nível de água.	28
Figura 2 – Software Delft Dashboard.	29
Figura 4 – Mapa e imagem de satélite da área de estudo – Cartagena, Colômbia.	32
Figura 5 – Diagramas da dispersão da corrente ao longo das 4 campanhas de medição. Fonte: ROBERTS (2003).	34
Figura 6 – Perfil de temperatura, salinidade e densidade ao longo da região costeira de Cartagena. Fonte: ROBERTS (2003).	35
Figura 7 – Distribuição da freqüência anual dos ventos de acordo com os dados do aeroporto de Cartagena. Fonte: ROBERTS; VILLEGAS (2006).	37
Figura 9 – Comparação das medições de Punta Canoas e Boca Grande durante fevereiro de 1998. Fonte: BLENINGER (2006).	39
Figura 10 – Informações de elevação e profundidade da região costeira de Cartagena, Colômbia. Fonte: ROBERTS (2006).	40
Figura 11 – Definição de nível da água (ζ), cota do fundo (d) e profundidade total (H). Fonte: DELFT3D FLOW (2014).	42
Figura 12 – Discretização do espaço físico para o espaço computacional. Grade escalonada. Fonte: DELFT3D FLOW (2014).	45
Figura 13 – Interface inicial do software Delft Dashboard.	47
Figura 14 – Barra de ferramentas disponível no Delft Dashboard.	47
Figura 15 – Ferramentas listada na opção “Toolbox”	48
Figura 16 – Utilização da ferramenta “Geo Image” com definição de região de interesse e geração de imagem georreferenciada.	49
Figura 17 – Ferramenta “Navigation Charts” no software Delft Dashboard.	49
Figura 18 – Ferramenta “Tide Stations” com visualização de estações com dados de maré (pontos amarelos no mapa) e exemplo de visualização da série temporal de uma estação (CARTAGENA IHO).	51
Figura 19 – Exemplos de possíveis visualizações da região de interesse.	52
Figura 20 - Exemplo de definição da Zona UTM onde será feita a modelagem hidrodinâmica.	52

Figura 21 – Exemplo de ajuste do período de modelagem, tempo inicial, final e intervalo temporal desejado.	54
Figura 22 – Exemplo de geração de malha retangular com resolução espacial e altura Z Max definidas.	55
Figura 23 – Configuração do contorno aberto, definição do tipo e do forçante, e ajuste do coeficiente de reflexão alpha.	56
Figura 24 – Localização do ADCP (imagem à esquerda) e da medição de maré (imagem à direita). Fonte: Adaptado de ROBERTS; CARVALHO (2000).	59
Figura 25 – Definição da zona UTM para aplicação do modelo na região costeira de Cartagena.	61
Figura 26 – Informação de batimetria para a região de estudo obtidos pela GEBCO 08.	62
Figura 27 – Exemplo de criação de malha retangular com resolução espacial de 700x700 m na região costeira de Cartagena, Colômbia.	63
Figura 28 – Exemplo de geração de malha com batimetria ajustada e geração de contorno aberto.	64
Figura 29 – Exemplo de cenário com malha retangular, contorno aberto gerado, linha costeira e pontos de monitoramento (pontos azuis) e de lançamento do poluente (ponto rosa) distribuídos ao longo da área de interesse.	65
Figura 37 – Estação CARTAGENA IHO (ponto amarelo no mapa), com dados de nível de água utilizados para comparação com os resultados simulados. ...	67
Figura 31 - Variação do nível da água no tempo de acordo com os resultados simulados (cenários 1 e 2) e os dados da estação CARTAGENA IHO.	69
Figura 32 - Diferença entre os dados da estação CARTAGENA IHO e os resultados simulados dos cenários 1 e 2.	70
Figura 33 – Variação do nível da água no tempo de acordo com os resultados simulados (cenários 1 e 2) e os dados medidos em campo em Punta Canoas.	74
Figura 34 – Diferença entre os dados medidos em campo com os resultados simulados dos cenários 1 e 2 para Punta Caonas.	75
Figura 35 - Variação do nível da água no tempo de acordo com os resultados simulados (cenários 1 e 2) e os dados medidos em campo em Boca Grande.	79
Figura 36 - Diferença entre os dados medidos em campo com os resultados simulados dos cenários 1 e 2 para Boca Grande.	80

Figura 37 – Localização dos pontos de monitoramento inserido nos dois cenários de modelagem – Cenário 1 – 700x700 (A) e Cenário 2 - 400x400 (B).	82
Figura 38 – Variação do nível da água conforme aumenta a distância da região costeira e aumenta a profundidade. Cenário 1 – 700x700. Pontos de monitoramento PM04, PM14 e PM28.	84
Figura 39 - Variação do nível da água conforme aumenta a distância da região costeira e aumenta a profundidade. Cenário 2 – 400x400. Pontos de monitoramento PM1, PM6 e PM9	85
Figura 40 - Variação do nível da água. Cenário 1 – 700x700. Pontos de monitoramento PM4, PM14 e PM28.	86
Figura 41 - Variação do nível da água. Cenário 2 – 400x400. Pontos de monitoramento PM1, PM6, PM9.	87
Figura 42 – Variação do nível da água em alguns dos picos de maior e menor valor no cenário 1 – 700x700 m.	88
Figura 43 - Variação do nível da água em alguns dos picos de maior e menor valor no cenário 2 – 400x400 m.	88
Figura 44 - Localização dos pontos de monitoramento inserido nos dois cenários de modelagem – Cenário 1 – 700x700 (A) e Cenário 2 - 400x400 (B), bem como dos pontos selecionados para análise espacial da velocidade.....	89
Figura 45 – Gráficos das velocidades nas direções x e y, e gráfico da dispersão da velocidade (Cenário 1).	91
Figura 46 – Gráficos da magnitude da velocidade entre os pontos monitorados (Cenário 1).	92
Figura 47 – Gráficos das velocidades nas direções x e y, e gráfico da dispersão de velocidade (Cenário 2).	95
Figura 48 – Gráficos da magnitude da velocidade entre os pontos monitorados (Cenário 2).	96
Figura 49 – Comparação da variação da componente x da velocidade ao longo do tempo entre os resultados simulados e medidos.	100
Figura 50 - Comparação da variação da componente x da velocidade ao longo do tempo entre os resultados simulados e medidos.	101
Figura 51 – Comparação da variação da velocidade resultante ao longo do tempo entre os resultados simulados e medidos.	102

Figura 52 – Gráficos de dispersão da velocidade nos cenários simulados e nos dados medidos em campo.	103
Figura 53 – Distribuição do ponto de lançamento (em rosa) e dos pontos de monitoramento juntamente com a linha costeira (linha marrom) e os dados de profundidade.	105
Figura 54 – Variação da concentração do poluente (em kg/m ³) em função do tempo em cada ponto analisado.	106
Figura 55 – Gráficos das velocidades nas direções x e y, e gráfico da dispersão da velocidade – Ponto ADCP.	108
Figura 56 – Gráfico da magnitude dos vetores no ponto de lançamento ADCP (A) e distribuição dos pontos analisados próximos ao ponto ‘ADCP’ (B).	108
Figura 57 – Visualização da variação espacial e temporal da concentração do poluente ao longo do período analisado.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Banco de dados de batimetria disponíveis no software Delft Dashboard.....	31
Tabela 2 – Resultados das análises estatísticas das medições do módulo da velocidade de corrente obtidas em ROBERTS (2003).....	33
Tabela 3 – Dados de vento de 1986 e 1989 a 2000.....	36
Tabela 4 – Informações sobre o local, período, profundidade e resultados máximos e mínimos dos pontos de medição de maré realizados.	38
Tabela 5 - Dados de corrente e maré medidos na região costeira de Cartagena, Colômbia, com período, frequência, fonte e local de medição.	58
Tabela 6 – Resumo das principais fontes de dados e valores assumidos para os diversos parâmetros existentes no software para a criação dos cenários de modelagem.....	65
Tabela 7 - Resumo dos resultados da análise estatística entre os resultados simulados e dados da estação CARTAGENA IHO.	68
Tabela 8 – Resumo dos resultados da análise estatística entre os resultados simulados e dados medidos em campo para Punta Canoas.	72
Tabela 9 - Resumo dos resultados da análise estatística entre os resultados simulados e medidos em campo.	78
Tabela 10 – Resumo dos cálculos estatísticos realizados entre os resultados simulados e dados medidos em campo para ambos os cenários modelados..	98

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo Geral	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. Zonas Costeiras	16
3.2. Equações Governantes.....	16
3.2.1. Equações de Águas Rasas	17
3.3. Modelos Numéricos: Solvers.....	19
3.3.1. SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental	19
3.3.2. MIKE	21
3.3.2.1. MIKE 21	22
3.3.2.2. MIKE 3	22
3.3.3. MOHID.....	23
3.3.4. TELEMAC.....	24
3.3.5. ELCOM.....	25
3.3.6. Modelo Delft3D	26
3.3. Condições de Contorno.....	27
3.3.1. Delft Dashboard.....	30
4. ÁREA DE ESTUDO	32
4.1. Correntes	33
4.2. Variação da Densidade	35
4.3. Ventos	36
4.4. Marés	37
4.5. Batimetria	40
5. MATERIAIS E MÉTODOS	41
5.1. Delft3D (Delft3D FLOW).....	41
5.1.1. Hipótese da Pressão Hidrostática.....	43
5.1.2. Força de Coriolis.....	43
5.1.3. Tensão de Reynolds.....	44
5.1.4. Discretização	44

5.1.5.	Estabilidade do Modelo	46
5.2.	Delft Dashboard	46
5.2.1.	Interface e ferramentas existentes no software Delft Dashboard .	47
5.2.2.	Confecção do Modelo para Regiões Costeiras	53
5.2.2.1	Definição do Local de Simulação	53
5.2.2.2.	Período de Simulação.....	53
5.2.2.3.	Geração da Malha Retangular	54
5.2.2.4.	Obtenção da Batimetria, Contorno Aberto e Condições de Contorno	55
5.2.2.5.	Inserir Pontos de Monitoramento/Observação.....	56
5.2.2.6.	Inserir Pontos de Descarga.....	56
5.2.2.7.	Simplificações adotadas	57
5.2.2.8.	Resumo das Etapas para Confecção do Modelo Hidrodinâmico	57
5.3.	Dados de Campo	58
5.4.	Análise dos Resultados.....	59
6.	SIMULACOES E RESULTADOS.....	61
6.1.	Dados Existentes	61
6.2.	Confecção de cenários para a área de estudo.....	62
6.3.	Resultados obtidos.....	66
6.3.1.	Nível de água.....	66
6.3.1.1.	Estação CARTAGENA IHO.....	67
6.3.1.2.	Punta Canoas	72
6.3.1.3.	Boca Grande	78
6.3.1.4.	Análise Espacial e Temporal do Nível de Água	81
6.3.2.	Velocidade de Corrente	89
6.3.3.1.	Punta Canoas	98
6.3.3.	Poluente	105
7.	CONCLUSÃO	111
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

1. INTRODUÇÃO

Ambientes costeiros podem ser entendidos como as áreas de transição entre os continentes e os oceanos, podendo sofrer influências tanto do ambiente continental como do meio marinho. Devido às potencialidades econômicas que apresentam, as margens destes locais são densamente povoadas e recebem influência direta ou indireta de atividades urbanas, pesqueiras, portuárias, entre outras (OLIVEIRA, H. A.; 2009).

Do ponto de vista ambiental, as zonas costeiras possuem regiões mais sensíveis, como manguezais e estuários, que são regiões de interação dinâmica entre a água doce, salgada, o sistema terrestre e a atmosfera. No entanto, toda a porção marítima fica exposta às consequências do desenvolvimento de diversas atividades, como a aquicultura, grandes estruturas industriais, portuárias e logísticas, as quais contribuem, também, na aceleração da expansão urbana irregular e todos os seus possíveis impactos, como o lançamento de esgotos e efluentes industriais costeiros e continentais (MMA, 2014).

O Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA, 2014) destaca como um dos principais problemas em regiões costeiras e marinhas, a poluição gerada pelas diversas atividades que possam existir, como o turismo, que pode ocasionar impactos significativos no descarte de efluentes e na coleta de resíduos, e as indústrias de alimentos, têxtil, siderúrgica, entre outras, que mesmo instaladas em regiões continentais dependem de estruturas viárias e portuárias para distribuição de produtos e aquisição de insumos e que podem utilizar os corpos d'água como receptores de seus efluentes, comprometendo a qualidade da água nestes locais.

Afirma ainda, que existem atividades que contribuem para a contaminação de recursos hídricos através do despejo de substâncias danosas ao meio, como metais pesados, derivados do petróleo, e cargas expressivas de nutrientes, sendo o ambiente marinho, o qual possui elevada capacidade de depuração em regiões de intensa hidrodinâmica, o destino final da maioria

delas. Porém, verifica-se em diversas regiões do Brasil e do mundo, uma redução nesta capacidade de depuração, podendo comprometer o equilíbrio de ecossistemas e atividades como pesca, navegação e turismo destas regiões (MMA, 2014).

Segundo SCHMIDT (2004, citado por OLIVEIRA, H. A.; 2009), qualquer gerenciamento de recursos hídricos requer adequados conhecimentos dos padrões de correntes locais por meio de estudos hidrodinâmicos e de transportes de substâncias que ocorrem nas regiões de interesse. Sendo uma importante ferramenta na solução de modelos numéricos, a modelagem numérica é uma opção existente para auxiliar no entendimento da hidrodinâmica de um corpo hídrico (ANDRADE, R. C.; ROSMAN, P. C.; 2001, citado por RIBAS, T. M.; 2004).

Modelos corretamente calibrados tornam-se boas opções para a gestão e gerenciamento de sistemas ambientais, podendo resultar na redução de custos de monitoramento e medições espacialmente dispersas e ainda expandir o conhecimento para regiões além destes locais de medição, auxiliando num melhor entendimento dos processos dinâmicos que ocorrem no local de interesse (RIBAS, T. M.; 2004).

Embora se mostrem muito úteis na modelagem hidrodinâmica, os modelos numéricos exigem um bom conhecimento da área de estudo e dos processos existentes na região para descrever de forma adequada as condições de contorno, caso contrário os modelos não tem representatividade. De acordo com DELTARES (2014), as condições de contorno representam a influência externa à área definida para modelagem, sendo que a escolha dos tipos de condições de contorno aberto depende do fenômeno a ser estudado, podendo ser nível de água, velocidade, vazão, salinidade, vento, entre outras. A existência de banco de dados que contem tais informações se mostra importante para tornar tais modelos úteis, representativos e aplicáveis nas áreas de interesse. Este trabalho visa à aplicação e avaliação de um software de modelagem hidrodinâmica que possui uma base de dados online com informações de batimetria e nível de água, por exemplo, que facilitam sua aplicação e simulação das condições hidrodinâmicas da região de interesse.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é aplicar o software *Delft Dashboard*, o qual conta com uma interface que possibilita a geração das condições de contorno por meio de bando de dados internacionais, e também possui o método numérico para solucionar as equações de águas rasas, na região costeira de Cartagena para gerar resultados de nível de água e velocidade para comparar com dados medidos em campo e verificar a aplicabilidade do software na região de interesse.

2.2. Objetivos Específicos

- Análise e aplicação do software *Delft Dashboard* na região costeira de Cartagena, na Colômbia para geração de dados para condições de contorno do modelo *Delft3D*;
- Confecção de diferentes cenários para simulação da hidrodinâmica da região;
- Pós-processamento dos resultados do modelo hidrodinâmico geradas pelos cenários;
- Comparação dos resultados simulados para nível da água com dados de estação de maré inserida na região costeira de Cartagena;
- Comparação estatística dos resultados simulados com os dados obtidos em campo;
- Análise espacial e temporal dos dados de nível de água e corrente;
- Simular o lançamento de um poluente em um dos cenários para visualizar seu comportamento no tempo e espaço;
- Verificação da aplicabilidade do software *Delft Dashboard* para a região de interesse.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Zonas Costeiras

Dentre as diversas definições existentes para zona costeira, todas possuem a idéia de que consiste em uma faixa de terra de largura variável e um espaço oceânico adjacente, com comprimento de até 12 milhas marítimas (aproximadamente 22 km), onde os possíveis usos da terra geram impactos na ecologia do espaço oceânico e vice-versa (POLETTE, M., *et al*, 2000).

Devido à extensão da zona costeira e essa interação com a parte terrestre, para um correto planejamento e gestão dos recursos hídricos de uma localidade, é importante o conhecimento dos principais processos físicos, químicos e biológicos atuantes. São diversos os problemas relacionados com zonas costeiras, como o derrame petrolífero, a definição da localização e características de um emissário submarino e até mesmo num sistema de produção aquícola, que pode sofrer alterações locais nas condições ambientais devido à variações sazonais da hidrodinâmica. Sendo assim, o estudo hidrodinâmico do local serve como ferramenta para resolver diversos problemas. No caso do derrame de petróleo, o conhecimento da variação horária das correntes superficiais auxilia na previsão das trajetórias das manchas resultantes, já para emissários submarinos, as características das correntes locais são determinantes (PINHO, J. L. S.; *et al*, 2003).

3.2. Equações Governantes

O principal problema para o entendimento da mecânica de um sistema consiste na determinação do estado de movimento ou da deformação, sendo conhecidas as forças que atuam em tal sistema. Com relação a elementos fluidos, as forças atuantes podem ser divididas em forças de corpo, que surgem da “ação à distância” sem estabelecer contato físico, forças de superfície, que ocorrem na superfície do elemento na existência do contato direto, e forças de linhas, também chamadas de forças de tensão superficial. Considerando todos esses efeitos, obtém-se a equação fundamental de Navier-

Stokes que representa a equação de conservação da quantidade de movimento, as quais, juntamente com a equação da conservação da massa e da energia, formam um conjunto de equações conhecidas como equações primitivas, que são utilizadas para estudos de circulação hidrodinâmica (SOTO, 2004).

Também segundo SOTO (2004), devido a natureza instável de escoamentos turbulentos e todas as limitações analíticas e numéricas envolvidas na resolução destas equações, faz-se necessário assumir hipóteses simplificadoras com base em argumentos da natureza física.

3.2.1. Equações de Águas Rasas

De acordo com CEOLIN (2005), a água de corpos da água, por meio de uma boa aproximação, pode ser considerada como um fluido newtoniano e compressível, independente de sua classificação em doce, salobra ou salgada, o que permite a utilização das equações de Navier-Stokes em águas costeiras.

As equações de Navier-Stokes, citadas anteriormente, descrevem escoamentos turbulentos e laminares, porém não possuem solução analítica em grande parte das situações devido a não-linearidade dos problemas, sendo possível somente em casos bastante simplificados. Buscando sua simplificação, em corpos d'água não estratificados e com perfis de velocidades predominantemente horizontais, tais equações podem ser integradas na vertical, tornando o problema bidimensional. As equações obtidas por meio da integração vertical são denominadas equações de águas rasas (CEOLIN, G. A., 2005).

Para diversos estudos da circulação hidrodinâmica são utilizadas as equações de águas rasas, as quais são aplicadas em locais onde as escalas horizontais de comprimento são maiores em relação aos fenômenos verticais, sendo regiões costeiras, rios e a atmosfera exemplos de tais regiões (BRAITT; DALZOTTO, 2010). O conjunto de equações a seguir representa as equações de águas rasas em coordenadas cartesianas (x,y) (CEOLIN, G. A., 2005).

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Equações da conservação da quantidade de movimento:

Direção x:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(pU)}{\partial x} + \frac{\partial(pV)}{\partial y} = fq - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{H^2C^2} + k \left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

Direção y:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(qU)}{\partial x} + \frac{\partial(qV)}{\partial y} = fq - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{H^2C^2} + k \left[\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

Onde η representa a elevação da superfície da água em relação ao nível de referência, $p = UH$ e $q = VH$ são as vazões por unidade de largura nas direções x e y, respectivamente, U e V representam as componentes de velocidade, f corresponde ao parâmetro de Coriolis devido à rotação da Terra, g a aceleração gravitacional, H a profundidade total da água, C o coeficiente de rugosidade de Chezy e k a viscosidade turbulenta à media da profundidade.

Para a obtenção de um resultado para estas equações diferenciais parciais citadas acima, é necessário um conjunto de condições, chamadas de condições de contorno e condições iniciais e, além disso, suas soluções analíticas podem tornar-se muito complexas, sendo a utilização de modelos numéricos uma opção para alcançar uma solução aproximada para o problema em questão.

3.3. Modelos Numéricos: Solvers

As equações governantes podem ser resolvidas numericamente desde que seja formulado um problema completo com a definição das condições iniciais e de contorno. Matematicamente a solução do problema separa-se na confecção de um "solver" (código numérico para solução de equações), que resolve as equações numericamente, e a definição de condições iniciais e de contorno, geralmente providenciados em arquivos separados quais são lidos pelo solver. Neste capítulo são descritos diferentes solvers e no capítulo seguinte softwares para geração de arquivos de entrada (condições iniciais e de contorno).

Segundo ROSMAN (2001), é inquestionável a importância e a necessidade de aplicação de modelos numéricos em estudos e projetos relacionados a recursos hídricos frente à complexidade dos corpos de água naturais, principalmente em rios, reservatórios, estuários e zonas costeiras. Ainda segundo o autor, estudos que envolvem corpos de água demandam certa quantidade de dados ambientais, os quais, em geral, são escassos, devido ao alto custo envolvido na sua obtenção, e representam somente uma parcela de toda uma área de interesse. Com isso, reforça-se o valor de modelos numéricos, que permitem a interpolação e extrapolação, espacial e temporal, das informações obtidas em poucos pontos para toda a região de interesse.

Integrar informações espacialmente dispersas, interpolá-las para regiões que não possuem dados medidos, bem como auxiliar no entendimento da dinâmica de processos e realizar simulações para cenários futuros, são algumas das possibilidades oferecidas pelos modelos existentes, dentre os quais, pode-se citar SisBaHiA®, MIKE, MOHID, TELEMAC-MASCARET, ELCOM e o Delft 3D, descritos a seguir.

3.3.1. SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA®) é basicamente um sistema de modelos computacionais, registrado pela Fundação Coppetec,

continuamente implementado desde 1987 e contando com desenvolvimento, ampliações e atualizações por parte de professores, alunos e técnicos da COPPE/UFRJ ao longo dos anos. Consiste num sistema de modelos para simulação de escoamentos, denominados “modelos hidrodinâmicos”, além da simulação da qualidade de água ou transporte de grandezas escalares qualificadoras por “modelos de dispersão” (SISBAHIA, 2015).

Sendo adotado em diversos estudos e projetos de modelagem de corpos de água naturais, tanto no Brasil quanto no exterior, o sistema possui diversos modelos, dentre eles o hidrodinâmico, que tratam da circulação hidrodinâmica tridimensional hidrostático (3D) ou bidimensional na horizontal (2DH), modelos de qualidade de água e eutrofização, consistindo em um conjunto de modelos de transporte Euleriano que permitem a simulação acoplada de diversos parâmetros referentes à qualidade de água e indicadores de eutrofização, bem como a análise determinística e estatística dos resultados gerados. Além destes, também incorpora os modelos de transporte de sedimentos e evolução morfológica do fundo, de transporte Lagrangeano (determinístico e probabilístico), modelos de campo próximo para emissários e fontes pontuais e modelos de geração e propagação de ondas, contanto ainda com um módulo de análise e previsão de maré, o qual permite análises harmônicas dos dados de nível ou de corrente (SISBAHIA, 2015).

Segundo ROSMAN (2001), o modelo hidrodinâmico é a base fundamental para análises da circulação hidrodinâmica e de qualidade de água em qualquer sistema de modelos. No SisBaHiA[®] o modelo existente pertence a linhagem FIST (*Filtered in Space and Time*), que representa um sistema de modelagem de corpos de água com superfície livre formado por diversos modelos hidrodinâmicos, resolvendo as equações completas de Navier-Stokes com aproximação de águas rasas e simplificação hidrostática e barotrópica (no caso da versão 3D do FIST). Conta também com um sistema de discretização espacial otimizado para corpos de água naturais, a qual é feita por meio de elementos finitos quadrangulares biquadráticos, podendo ser igualmente realizada via elementos finitos triangulares quadráticos, bem como uma combinação de ambos. Referente à discretização vertical, esta ocorre através de diferenças finitas com transformação sigma, enquanto que a discretização

temporal se dá por meio de um esquema implícito de diferenças finitas. Com relação à base de dados, este modelo não possui acesso a um banco de dados online para geração das condições de contorno, sendo necessária a criação e a inserção das informações de entrada pertinentes ao estudo que se deseja desenvolver.

Como exemplo de aplicações podem-se citar diversos estudos, dentre eles a aplicação do SisBaHiA® no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), para simulação das concentrações de OD e DBO como indicadores de matéria orgânica, onde foi possível a obtenção do destino dos esgotos lançados na região, bem como os locais com maior interferência na qualidade da água (CUNHA, C. L N; *et al.*, 2009), a utilização do módulo bidimensional (2DH) para o estudo da circulação hidrodinâmica da zona costeira entre Macau e Galinhos (RN), gerando resultados de elevações e campo de velocidades (SCUDELARI, A. C.; *et al.*; 2008) e a aplicação dos modelos hidrodinâmico tridimensional (3D) e de Transporte Lagrangeano, em projeto realizado pela Fundação Coppetec, para análise dos sistemas de disposição oceânica na área metropolitana de Salvador (BA), onde foi possível modelar o tamanho, a concentração, bem como o deslocamento da pluma ao longo do tempo (SISBAHIA, 2015).

3.3.2. MIKE

No mercado por mais de 25 anos, os aplicativos MIKE do DHI são utilizados na busca do conhecimento de ambientes aquáticos contando com diversas áreas de aplicação, entre elas cidades, regiões costeiras e oceanos, recursos hídricos, águas subterrâneas e meios porosos (MIKE, 2015).

Com relação às regiões costeiras e oceanos, o sistema oferece diversas possibilidades de simulação de fenômenos de fluxo, ondas, dinâmica de sedimentos, fenômenos de dispersão e de sistemas ecológicos, sendo os dois principais modelos o MIKE 21, utilizado para simulações bidimensionais, e o MIKE 3, com foco na modelagem 3D, os quais são normalmente utilizados em estudos relacionados a portos ou estruturas similares, bem como estudos

ambientais costeiros, como o derramamento de óleo, eutrofização e modelagem de organismos vivos.

3.3.2.1. MIKE 21

O software MIKE 21 é uma ferramenta comercial utilizada na modelagem bidimensional (2D) de áreas costeiras ou marítimas, o qual resolve as equações de águas rasas e utiliza discretização espacial em diferenças finitas, sendo possível a simulação de processos físicos, químicos ou biológicos. É composto por um sistema modular, sendo eles os módulos de pré e pós-processamento, para as tarefas de entrada e análises de dados, bem como a apresentação de resultados, o módulo de hidrodinâmica, advecção-dispersão, transporte de areia e lodo, modelagem acoplada, que reúne diversos modelos em um só modelo morfológico, rastreamento de partículas, derramamento de óleo, entre outros (MIKE 21, 2015).

Dentre as diversas aplicações do MIKE 21, estão a análise de esfriamento, dessalinização e recirculação de água, otimização de emissários submarinos, avaliação do impacto ambiental de infraestruturas marítimas, otimização de sistemas de energia renovável e a modelagem ecológica.

Um exemplo do uso do modelo é a simulação e análise de diferentes cenários hidrodinâmicos na Lagoa da Conceição, Santa Catarina, que permitiu a compreensão de importantes características a respeito da hidrodinâmica local (ROCHA, C. B. M., 2007).

3.3.2.2. MIKE 3

Como citado anteriormente, o software comercial MIKE 3, também direcionado para regiões costeiras e oceânicas, possui foco na modelagem de fluxos superficiais em três dimensões (3D), com e sem simplificação hidrostática com termos baroclínicos, e nos processos associados a sedimentação e qualidade da água. Assim como o MIKE 21, esta ferramenta é modular e também compreende os módulos de pré e pós-processamento, hidrodinâmica, advecção-dispersão, transporte de areia e lodo, rastreamento

de partículas, derramamento de óleo, bem como os módulos de modelagem ecológica e de modelagem baseada em agentes (MIKE 3, 2015).

Com relação ao módulo hidrodinâmico, tanto no MIKE 21 como no MIKE 3 são resolvidas as equações de conservação de massa, de quantidade de movimento bem como para salinidade e temperatura em resposta a variação de forçantes (MIKE 3, 2015).

As aplicações típicas desta ferramenta correspondem a estudos costeiros e oceanográficos de circulação, incluindo a dinâmica de sedimentos finos, à otimização da disposição de águas quentes ou residuais na região costeira, à hidrodinâmica e ecologia de lagos, bem como à projetos de recuperação costeira e marítima.

3.3.3. MOHID

O MOHID é um sistema de modelagem tridimensional (3D) com simplificação hidrostática e termos baroclínicos, desenvolvido pela MARETEC (*Marine and Environmental Technology Research Center*), o qual tem sido aplicado em áreas costeiras e de estuário, bem como em estudos de processos oceânicos e reservatórios. Permite a adoção de uma filosofia de modelagem integrada de processos físicos e biogeoquímicos, bem como de diferentes escalas e sistemas, como estuários e bacias hidrográficas (MOHID, 2015).

Entre as principais características do modelo estão a possibilidade de executar diferentes aplicações simultaneamente, a aplicação de diferentes passos temporais para diferentes módulos (*MOHID Water, Land e Soil*), a possibilidade de utilização do modelo em qualquer dimensão (1D, 2D e 3D) e a discretização espacial, a qual se dá por meio do método dos volumes finitos.

Sua estrutura é composta de três componentes principais, as ferramentas numéricas, a componente de troca e armazenamento de dados e a interface do usuário, onde é possível o gerenciamento de dados de entrada, controle e execução do programa, além da geração e análise dos resultados. A componente referente às ferramentas numéricas fornece os modelos de

cálculo, sendo que o sistema, programado em código FORTRAN, possui três componentes essenciais, MOHID Water, programa numérico tridimensional utilizado na simulação de corpos de água superficial, MOHID Land, focado na simulação em bacias hidrográficas e aquíferos, e o MOHID Soil, que realiza simulações de fluxo de água em meios porosos.

De acordo com JULIANO, M. M. F.; *et al* (2012), o sistema MOHID já foi aplicado em diversas regiões costeiras e estuarinas, tanto como ferramenta de pesquisa como em projetos de consultoria. Dentre suas aplicações, destaca os estudos realizados ao longo da costa portuguesa, incluindo os principais estuários e lagoas costeiras (INAG, 2001; MARTINS *et al.*, 2000), a modelagem de mar aberto na região do Atlântico Nordeste, onde foram estudados o comportamento de correntes e a geração de ondas de maré (NEVES *et al*, 1998), além de trabalhos científicos realizados no Brasil, como o estudo de parâmetros de qualidade de água na Lagoa do Vigário (RJ) (PRECIOSO *et al*, 2008) e a utilização de técnicas de problemas inversos na identificação de parâmetros hidrodinâmicos no estuário do Rio Macaé (LIMA, 2012).

3.3.4. TELEMAT

O TELEMAT, desenvolvido pelo Laboratoire National d'Hydraulique e disponível como open source, consiste em um sistema de ferramentas de modelagem integrado, direcionado para aplicações em corpos de água de superfície livre. Assim como alguns dos modelos já descritos, o TELEMAT é estruturado em módulos, sendo eles o hidrodinâmico, o de transporte e dispersão, o de pré e pós-processamento e o de fluxo subterrâneo, o qual ainda está em desenvolvimento (TELEMAT – MASCARET, 2015).

Com relação à parte hidrodinâmica, o módulo é formado por cinco componentes principais, ARTEMIS, utilizado para modelagem de ondas em portos, MASCARET, para fluxos unidimensionais, TELEMAT-2D e TELEMAT-3D para fluxos bi e tridimensionais, respectivamente, e TOMAWAC, direcionado para modelagem de propagação de ondas em zonas costeiras.

Esses e os demais componentes que formam a estrutura do modelo possuem algoritmos baseados no método dos elementos finitos, além da discretização espacial que se dá por meio de um grid formado por elementos triangulares (TELEMAC – MASCARET, 2015).

Como exemplo de aplicações do TELEMAC 2D estão o uso do modelo para simulação e representação das condições hidrodinâmicas em projetos relacionados a emissários submarinos (MENDONÇA, A., *et al*, 2013), como também sua utilização em projetos de calibração e validação, como no caso da Lagoa dos Patos (FERNANDES, E. H., *et al*, 2001). Fazendo uso do módulo tridimensional hidrostático e com termos baroclinicos TELEMAC 3D, os exemplos são a modelagem de qualidade da água, incluindo a parte hidrodinâmica, bem como sedimentos e a representação de processos físicos e reativos, tanto no fundo como na superfície, (KOPMANN, R. e MARKOFFSKY, M., 2000), e a simulação numérica de transporte de sedimentos no estuário Lorie, França, (CHEVIET, C., *et al*, 2002).

3.3.5. ELCOM

Desenvolvida pelo Centro de Estudos em Recursos Hídricos (CWR – Centre for Water Research) localizado na Austrália, a ferramenta ELCOM (*Estuary, Lake and Coastal Ocean Model*) é um sistema de modelagem numérica, implementado em Fortran 90, utilizado em modelos hidrodinâmicos e termodinâmicos na simulação do comportamento de corpos d'água estratificados ao longo do tempo (ELCOM, 2015).

Gerado para executar simulações em escalas temporais variando entre dias e anos, bem como escalas espaciais de metros a quilômetros, o modelo é adequado para simulações de transporte, mistura, estratificação, variação de marés, dinâmica de vazões e condições de dispersão em diversos regimes de escoamento (ELCOM, 2015).

Com relação ao modelo hidrodinâmico, que conta com o método de discretização com células retangulares cartesianas de espaçamento horizontal fixo e espaçamento vertical variável, o método de simulação resolve as

equações de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis com base na hipótese da pressão hidrostática, sendo que os processos simulados incluem os efeitos de rotação, da maré, do vento, da temperatura superficial, bem como fluxos de entrada, saída e o transporte de sal, calor e escalares.

Juntamente com o módulo de qualidade de água, CAEDYM (*Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model*), ELCOM pode ser aplicado na modelagem tridimensional de transportes e de interações físicas, químicas e biológicas em escoamentos (ELCOM, 2015).

Como exemplos de aplicações estão a implantação do modelo na simulação hidrodinâmica 3D de enchimento do reservatório da usina hidrelétrica de Mauá, buscando entender o comportamento do fluxo da água ao longo deste processo (DARU, R. L., *et al*, 2011), a modelagem da dinâmica e qualidade da água no alto e médio Tietê, em São Paulo, (JESUS, J. A. O., *et al*, 2007), e também a aplicação em estudos da dinâmica espacial e temporal da qualidade da água e da presença de fitoplâncton no rio Erie, Canadá, (LEON, L. F., *et al*, 2011).

3.3.6. Modelo Delft3D

O sistema de modelagem conhecido como Delft3D foi desenvolvido pela WL Delft Hydraulics, na Holanda, e é formado por diversos módulos, entre eles o hidrodinâmico (FLOW), transporte de sedimentos coesivos e não coesivos (SED), propagação de ondas (WAVE), qualidade da água (WAQ) e modelo ecológico (ECO). Tais módulos possuem ferramentas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, facilitando suas implementações nas regiões onde se pretende realizar estudos (GARCIA, G. E., 2008).

O modelo FLOW utilizado neste trabalho é um programa de simulação hidrodinâmica bidimensional (2D, profundidade média) e tridimensional hidrostático e baroclínico (3D) capaz de simular escoamentos não permanentes e fenômenos de transportes resultantes das forças de maré e/ou dos efeitos meteorológicos, incluindo o efeito de diferenças de densidade ocasionados pela distribuição não uniforme de temperatura e salinidade. Possuindo grande

faixa de aplicação, as simulações podem ser feitas regiões costeiras, rios, reservatórios e estuários.

3.3. Condições de Contorno

Os contornos do domínio do modelo consistem nas definições das linhas ao longo da interface terra-água (linha costeira) chamadas de contornos fechados, onde as velocidades são estabelecidas geralmente como sendo nulas, e partes através do campo de escoamento, chamadas de contornos abertos, que são interfaces artificiais “água-água” e são introduzidas buscando limitar a área de modelagem e o esforço computacional, ficando situados o mais longe possível da área de interesse, como exemplifica a figura 1 (DELFT3D FLOW, 2014).

De acordo com LOPES (2010), boas definições de contorno aberto são muito importantes para os modelos, sendo que corresponde a influência de áreas externas à área de modelagem. Ainda segundo o autor, existem dois passos importantes na definição das condições deste tipo de contorno, que é a correta definição do local do contorno aberto e a definição do tipo de forçante hidrodinâmica a ser utilizada.

As equações de águas rasas representam um conjunto de equações diferenciais parciais hiperbólicas, no caso não viscoso, e parabólicas, no caso viscoso. Sua solução pode ser dividida entre solução de estado permanente, que depende das condições de contorno e dos termos forçantes, e solução transiente, a qual segue o desvio entre as condições iniciais e a solução de estado permanente no início da simulação, a reflexão nas condições de contorno aberto e a quantidade de dissipação. No caso da solução transiente, sua solução pode ser propagada para fora da área de simulação ou ser reduzida nos contornos abertos ou ainda desaparecer devido ao atrito de fundo e viscosidade. Para o caso de estado permanente, que é completamente dependente das condições de contorno, a solução é alcançada após o desaparecimento da solução transiente.

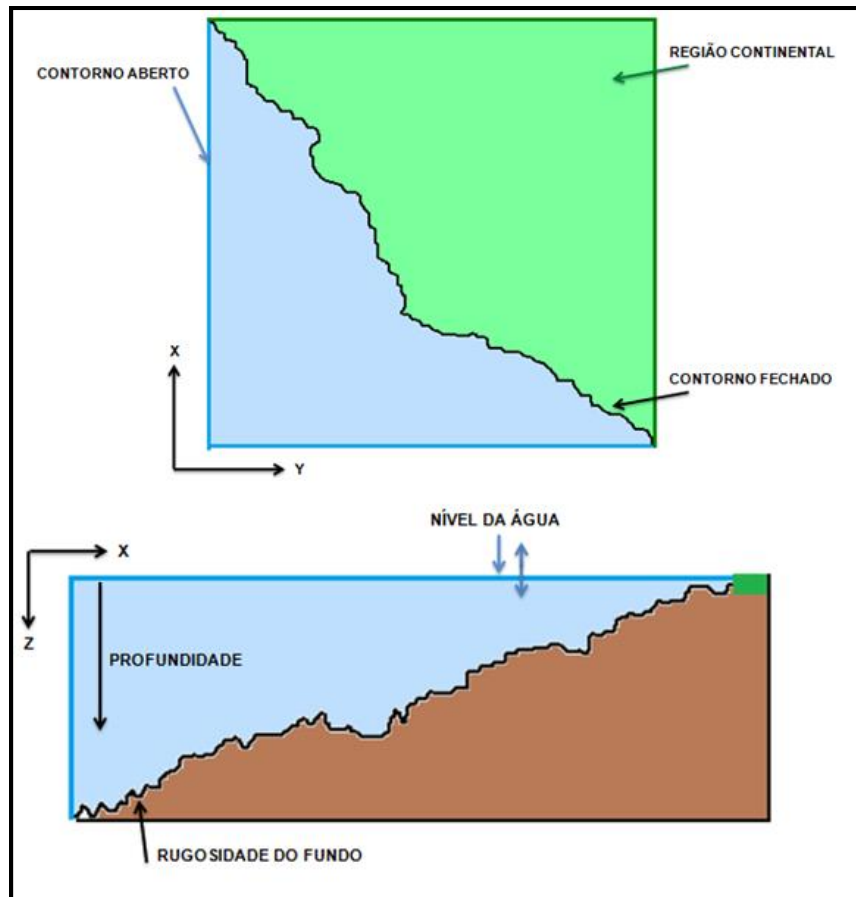


Figura 1 – Ilustração para exemplificar os contornos aberto e fechado, profundidade (batimetria), rugosidade de fundo e nível de água.

Segundo TORO (1994, citado por PALACIO C., GARCIA F., GARCIA U., 2010), as condições de contorno, ou fronteira, tem um impacto crítico na implementação de modelos hidrodinâmicos, pois a solução no interior da área de simulação depende principalmente da qualidade da informação utilizada nos contornos abertos. Tais informações podem ser obtidas de duas maneiras: por medições diretas nas proximidades das fronteiras ou então geradas com o auxílio de modelos numéricos de larga escala ou um conjunto dos dois.

Na prática é muito trabalhoso e complicado compilar informações de medições e/ou modelos de grande escala para serem utilizados como arquivos de entrada para definição de condições iniciais e de contorno em modelos numéricos (solver). Isto, por causa de períodos diferentes entre a medição e o período e simulação de interesse, falta de dados devido a falhas de instrumentos ou devido a distancia do local de interesse, bem como devido a

formatos distintos (resoluções temporais e espaciais, formatos tabelares, tipo dos arquivos) dos arquivos disponíveis. Adicionalmente é difícil atualizar e acessar dados disponibilizados em bancos de dados de diferentes fontes.

A tendência atual é que os próprios programas numéricos sejam acoplados a sistemas de acessar e compilar dados oriundos de bancos de dados para aprimorar e facilitar a definição das condições de contorno e confecção dos arquivos relacionados. De acordo com a pesquisa realizada, os softwares listados acima não apresentam módulos de pré-processamento acoplados da mesma maneira que o Dashboard. Além disso, não se encontrou na literatura algo similar ao Dashboard. Sendo assim, dentre os modelos citados acima, o que apresenta fácil utilização e acesso a dados de banco de dados para criação de cenários de modelagem é o software Delft3D por meio do Delft Dashboard.

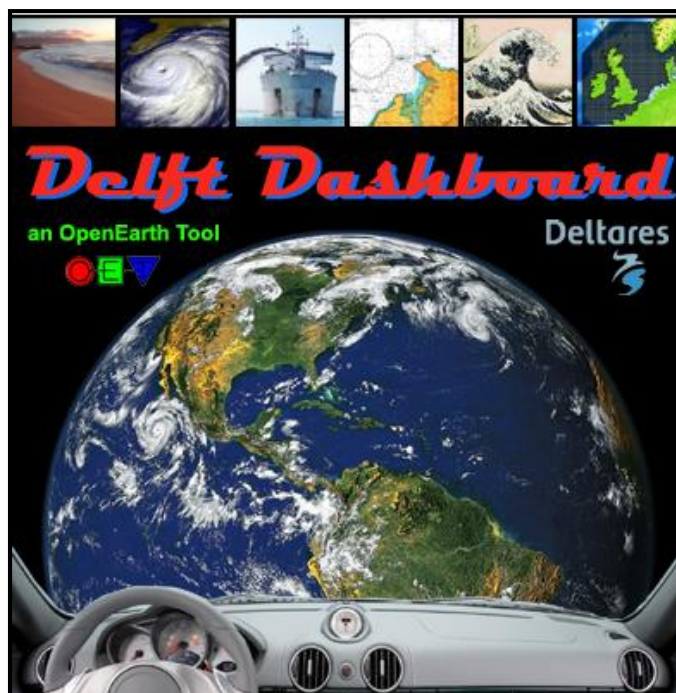


Figura 2 – Software Delft Dashboard.

Por esse motivo, neste estudo se utilizará esta interface livre do Delft3D, conhecida como Delft Dashboard, uma interface gráfica independente baseada no Matlab, destinada a auxiliar no desenvolvimento de novos modelos, permitindo a modelagem hidrodinâmica, de ondas, morfodinâmica e de qualidade da água. Até então, esta interface conta com o módulo Delft 3D

FLOW totalmente implementado, com desenvolvimento para aplicação futura dos demais módulos (DELTARES).

3.3.1. Delft Dashboard

A utilização do software Delft Dashboard apresenta uma vantagem neste ponto de aquisição de dados de entrada, pois trabalha com um banco de dados online de batimetria, linhas costeiras, marés, entre outros, facilitando a realização de simulações mesmo na falta de dados próprios.

Com relação aos dados de batimetria, o software conta com diversas fontes, as quais podem ter uma cobertura global ou somente de uma região específica, conforme tabela 1, que informa os bancos de dados existentes, suas coberturas, sistemas de referência e fonte de dados. Dados de linha costeira são automaticamente obtidos através da Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (NGA), já para os dados de maré, é possível visualizar na interface do programa as estações que disponibilizam informações de séries temporais do nível da água derivadas das componentes astronômicas na área de interesse (pontos amarelos no mapa), como exemplificado na figura 3.

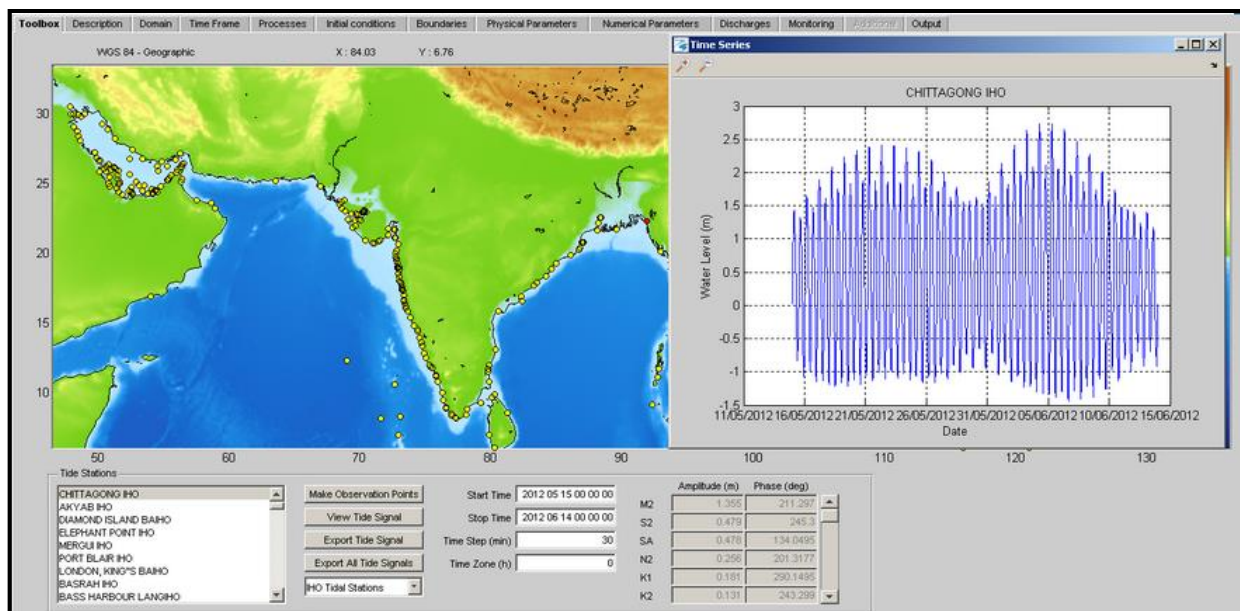


Figura 3 – Exemplo de visualização de estações de dados de maré (pontos amarelos) com visualização de seus dados.

Tabela 1 – Banco de dados de batimetria disponíveis no software Delft Dashboard.

Base de dados	Cobertura	Sistemas de referência	Fonte
GEBCO 08	Global	Horizontal: WGS84 Vertical: MSL	British Oceanographic Data Centre (BODC)
Hawaii	Hawaii	Horizontal: WGS84 / UTM Vertical: NAVD88	USGS (Curt Storlazzi)
ngdc_crm (Coastal Relief Model)	Região costeira do EUA	Horizontal: WGS84 Vertical: MLLW	NOAA
srtm30plus_gom	Golfo do México	Horizontal: WGS84 Vertical: MSL	GCOOS
usgs_social	Sul da Califórnia	Horizontal: WGS 84 / UTM Vertical: NAVD 88	USGS
rws_vakloadingen	Holanda	Horizontal: Amersfoort / RD New Vertical: NAP	Rijkswaterstaat
srtm41	Topografia global	Horizontal: WGS 84 Vertical: MSL	Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara (2008)
gulf_of_mexico	Golfo do México	Horizontal: WGS 84 Vertical: MSL	SURA

Fonte: DELTARES (2014).

4. ÁREA DE ESTUDO

O local de estudo se concentra na região costeira de Cartagena, Colômbia, a qual fica localizada entre as coordenadas 7,8° e 12,2°N (Norte) e entre 78° e 74°W (Oeste), inserida na porção sul do Mar do Caribe. O município de Cartagena possui a Baía de Cartagena ao Sul e a Lagoa de Tesca, ao Norte. Essa região costeira inclui diversos ecossistemas complexos e dinâmicos, sendo os principais estuários, baías, lagoas costeiras, recifes de coral e ecossistemas de mangue. Além disso, existem na região diversas atividades relacionadas à indústria de transformação, como um terminal de petróleo e uma refinaria, uma área de mineração, e a indústria do turismo, da agricultura, entre outras (ROBERTS, P. J. W.; VILLEGAS, B., 2006).

Em estudos para implantação de um emissário submarino na região costeira de Cartagena realizados por ROBERTS (2003, 2004, 2005) e ROBERTS; VILLEGAS (2006), foram discutidas diversas medições em campo, dentre elas estão corrente, perfil de temperatura, salinidade e elevação da superfície, sendo os principais descritos na sequência.



Figura 4 – Mapa e imagem de satélite da área de estudo – Cartagena, Colômbia.

4.1. Correntes

Segundo ROBERTS (2003), para seu estudo o período de medição de velocidade e direção da corrente foi compreendido entre janeiro de 1998 e agosto de 2002 e dividido em quatro campanhas, utilizando um equipamento chamado ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). A medição, que ocorreu a uma distância de 2,5 km de Punta Canoa, foi obtida a cada 20 segundos e a cada 3 metros de profundidade, sendo obtidos quatro conjuntos de dados variando de 5,3 a 14,3 m de profundidade.

A análise estatística dos resultados obtidos, a qual mostra os valores máximos, mínimos, médias e o 10°, 50° e 90° percentil, bem como os gráficos gerados no estudo, são apresentados na tabela 2 e figura 5.

Tabela 2 – Resultados das análises estatísticas das medições do módulo da velocidade de corrente obtidas em ROBERTS (2003).

Campanhas	Velocidade de corrente (cm/s)			
	1 ^a (Jan/98 – Fev/99)	2 ^a (Nov/99 – Ago/00)	3 ^a (Ago/00 – Ago/02)	4 ^a (Ago/01 – Ago/02)
Vel. Mínima	0,1	0,1	0,0	0,0
Vel. Máxima	78,1	88,8	89,7	97,6
Média	20,0	22,5	20,2	21,0
10° percentil	4,2	4,9	4,3	4,4
50° percentil	17,3	18,5	17,5	18,4
90° percentil	39,8	46,0	40,3	41,2

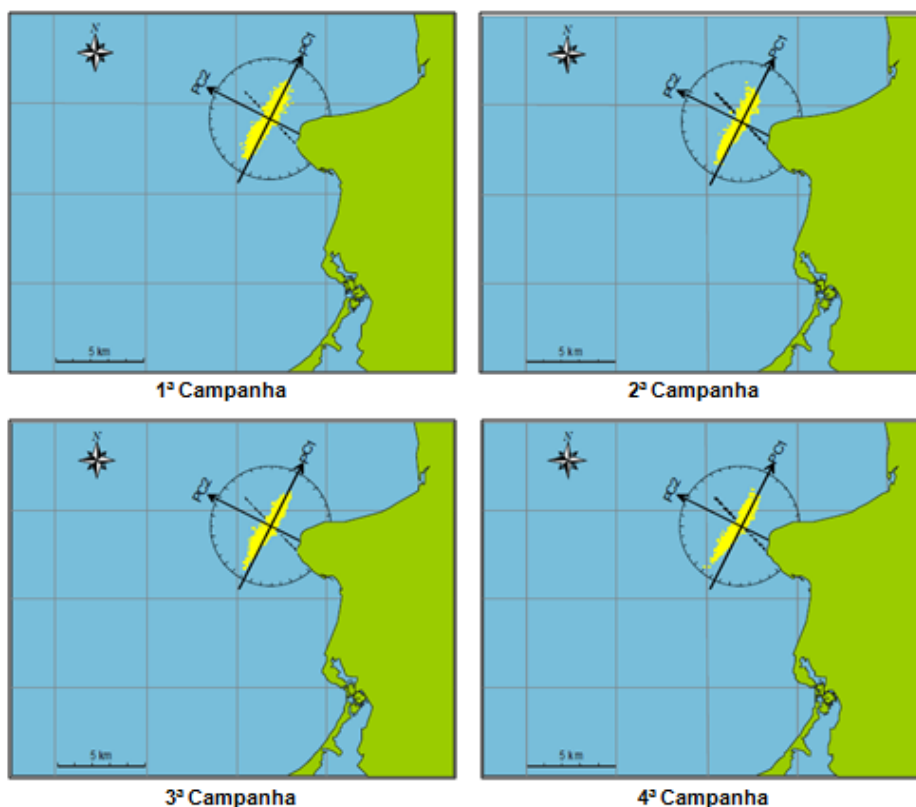


Figura 5 – Diagramas da dispersão da corrente ao longo das 4 campanhas de medição. Fonte: ROBERTS (2003).

Os eixos principais mostrados nos gráficos da figura 5 são ortogonais e nomeados de PC1 e PC2. De acordo com ROBERTS (2003), a corrente possui uma forte preferência ao longo do eixo PC1 e flui predominantemente na mesma direção ao longo da coluna de água, apresentando diminuição na velocidade conforme aumenta a profundidade, com picos de aproximadamente 85 cm/s próximos à superfície e velocidades de 65 cm/s no fundo. Com base na tabela 2, verifica-se uma pequena variação entre as quatro campanhas realizadas, porém em todas elas a média da velocidade fica em torno de 20 cm/s, com valores médios na faixa de 18 cm/s, assim como o 10º e o 90º percentil, que também apresentam valores semelhantes ao longo das medições, em torno de 5 e 40 cm/s, respectivamente.

Ainda segundo ROBERTS (2003), com base nos dados obtidos no seu estudo para, as velocidades registradas na região costeira de Cartagena são elevadas durante todo o ano, com médias mensais variando de cerca de 14 cm/s em junho até 33 cm/s, registrado em fevereiro. Durante o período de janeiro até o início de maio, são verificadas correntes fortes com direção predominante para SSE (su-sudeste), apresentando direção ocasional na

direção NNW (nor-noroeste), sendo que após o início de maio, as correntes mudam a direção para um sentido mais ao Norte, também apresentando oscilações para a SSE (su-sudeste). Em geral, entre os meses de janeiro e maio, a velocidade média fica em torno de 15 cm/s para SSE (su-sudeste), já para o período de junho a dezembro, a velocidade é de 11 cm/s para NNW (nor-noroeste).

Esses dados de velocidade de corrente obtidos servirão para posterior comparação com os resultados modelados no Delft Dashboard, o qual, mesmo não possuindo um banco de dados para este parâmetro, calcula e gera resultados para tal.

4.2. Variação da Densidade

A variação da densidade foi medida com um instrumento de perfilagem em vários locais ao longo da costa de Cartagena, sendo que a amostragem ficou concentrada cerca de Punta Canoa, a uma distância de 13 km da costa (ROBERTS, P. J. W., 2003). Foram obtidos dados de temperatura, salinidade e densidade ao longo da profundidade, nos meses de janeiro a junho de 1998, os quais são apresentados na figura 6.

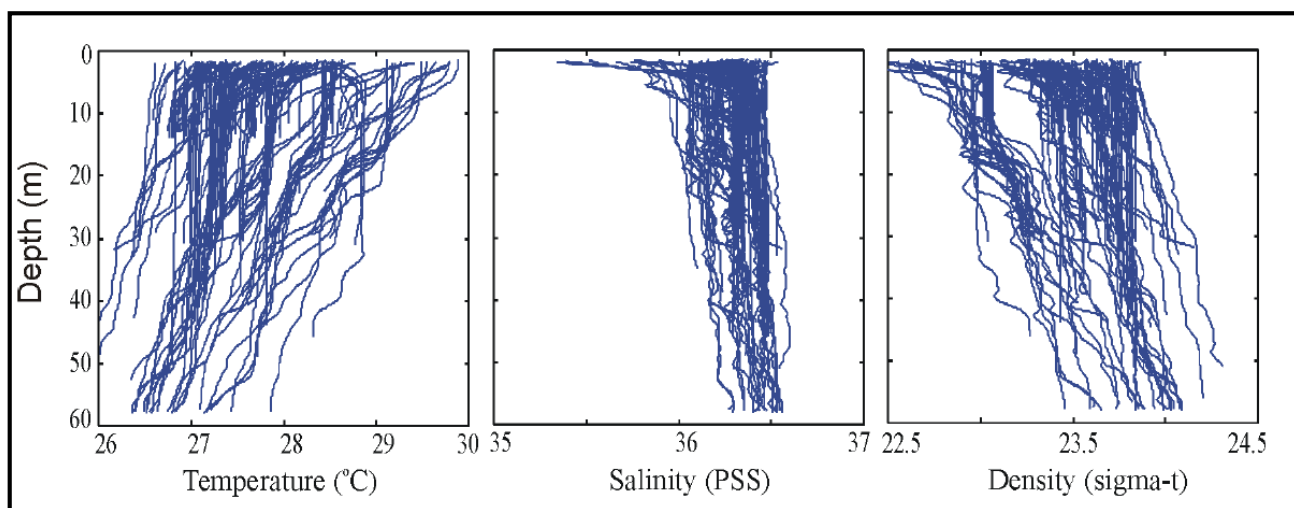


Figura 6 – Perfil de temperatura, salinidade e densidade ao longo da região costeira de Cartagena. Fonte: ROBERTS (2003).

De acordo com ROBERTS (2003), os dados mostram que a estratificação é, em geral, fraca, com diferenças de densidade ao longo da coluna de água variando de zero (condição de ambiente homogêneo ou bem misturado) até 1 g/cm^3 ou 1 kg/m^3 , ocorrendo principalmente devido às

variações na temperatura, ainda que pequenas. Com isso, conclui-se que uma análise bidimensional (2D) já é suficiente para a região de estudo.

Segundo o autor, os dados referentes à temperatura mostram um perfil constante ao longo da profundidade durante a maior parte do ano, sendo que no inverno a estratificação é mais fraca, em torno de 0,3 unidades σ_t , e no verão (durante junho, agosto e setembro) o valor chega a 1,8 unidades σ_t , período em que as temperaturas variam até um máximo de 2°C e existe, assim, um potencial de estratificação.

4.3. Ventos

Em ROBERTS; VILLEGAS (2006) é descrita a climatologia local para Santa Marta, próxima a Cartagena, fornecida por GARZON (1995), o qual afirma que, nesta região, predominam os ventos que sopram do nordeste. Segundo ele, existem três estações definidas, sendo uma seca, durante os meses de dezembro a abril, onde predomina os ventos fortes, com velocidade média de 3,5 a 30 m/s, e a baixa precipitação (menos de 20% do total anual), outra sendo definida como estação das chuvas, que ocorre entre maio e novembro e é caracterizada por ventos mais fracos (velocidade média de 1,5 m/s) e maiores precipitações e, por fim, uma estação seca intermediária a estas durante junho e julho.

Dados horários de vento foram obtidos do aeroporto de Cartagena, em 1986 e 1989 a 2000, e separados por velocidade e direção predominante, como mostra a tabela 3.

Tabela 3 – Dados de vento de 1986 e 1989 a 2000.

Velocidade (m/s)	Porcentagem de ocorrência								Total
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
0,1 – 1,5	3,75	5,86	5,74	2,59	1,26	0,74	1,45	1,44	22,8
1,6 – 3,3	12,57	8,06	3,50	2,08	2,39	1,55	4,85	4,61	39,6
3,4 – 5,4	11,34	4,17	0,23	0,16	0,38	0,42	0,63	0,87	18,2
5,5 – 7,9	2,47	1,37	0,00	0,00	0,02	0,01	0,02	0,03	3,9
8,0 – 10,7	0,19	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,4
10,8 – 13,8	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
>13,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Total	30,34	19,62	9,47	4,84	4,05	2,73	6,95	6,94	84,9
Vel. Média (98 – 00)	2,9	2,7	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	

Fonte: Adaptado de ROBERTS; VILLEGAS (2006).

A análise dos dados mostra consistência com a climatologia descrita anteriormente, sendo os ventos predominantes oriundos do Norte e Nordeste, 50% do tempo em uma base anual, sendo também os mais fortes, com velocidades de 2,9 e 2,7 m/s para o Norte e Nordeste, respectivamente, com base nos dados de 1998 a 2000 (ROBERTS, P. J. W.; VILLEGAS, B., 2006).. Além disso, devido à magnitude dos ventos não ser forte, não foi detectada influência significativa dos ventos na hidrodinâmica da região, o que pode justificar a desconsideração do vento na simulação a ser realizada neste estudo.

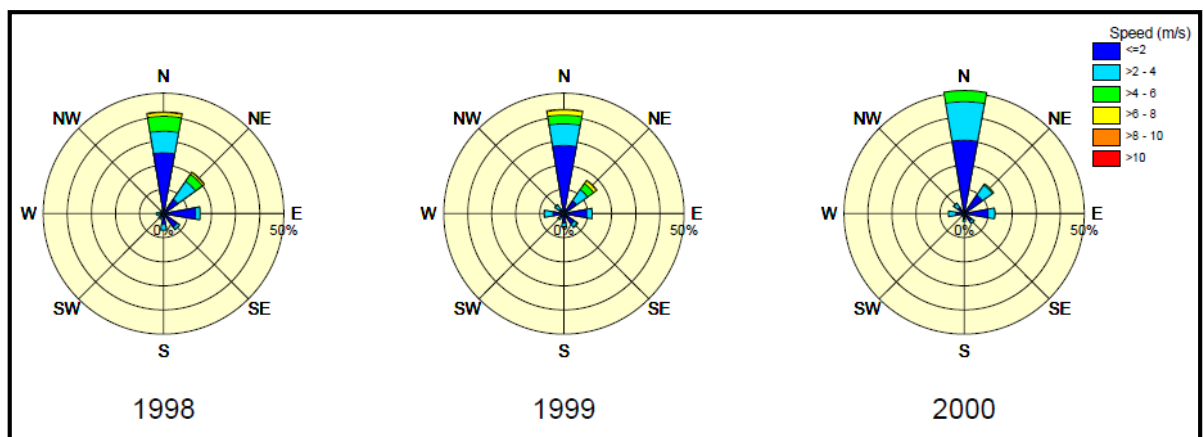


Figura 7 – Distribuição da freqüência anual dos ventos de acordo com os dados do aeroporto de Cartagena. Fonte: ROBERTS; VILLEGAS (2006).

4.4. Marés

De acordo com BLENINGER (2006), foram realizadas medições de maré em três localidades distintas ao longo da região costeira, como indicam as setas vermelhas na figura 8. Informações sobre os locais de medição como profundidade, período e valores máximos e mínimos obtidos, são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Informações sobre o local, período, profundidade e resultados máximos e mínimos dos pontos de medição de maré realizados.

Local	Período	Profundidade (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)
Islas del Rosario	23/02/98 – 17/08/98	15,3	-0,59	0,51
Boca Grande	25/09/97 – 16/08/98	16,0	-0,37	0,52
Punta Canoas	01/01/98 – 26/04/99	20,6	-1,7	0,56

Fonte: BLENINGER (2006).

Como verificado na tabela 4, as amplitudes máximas ficam em torno dos 0,50 metros, mostrando que quase não existem mudanças de fase entre as três localidades de obtenção dos dados. A comparação das séries temporais dos dados de nível da água para as localidades de Punta Canoas e Boca Grande durante fevereiro de 1988 são apresentadas na figura 9 (BLENINGER, T. 2006).

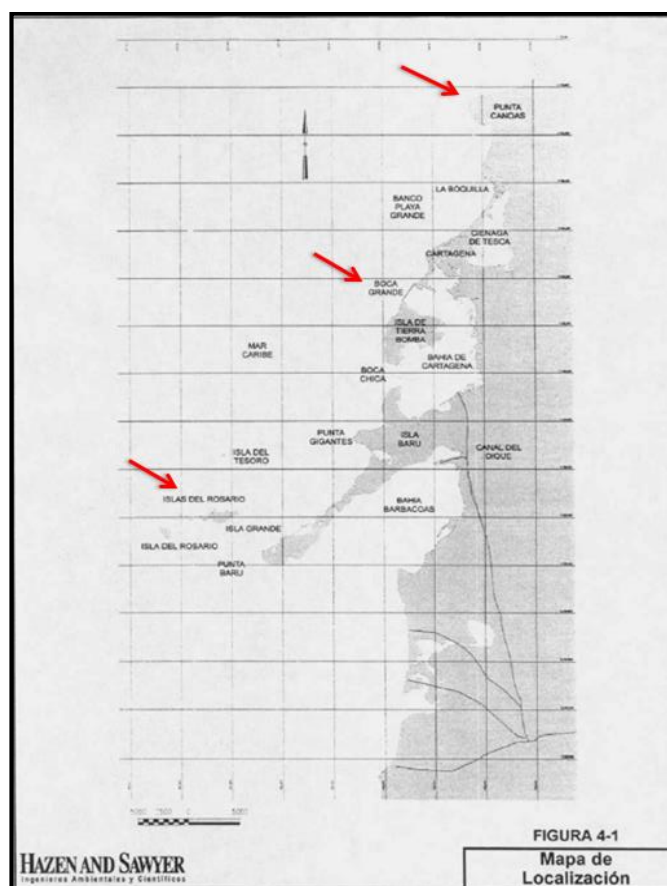


Figura 8 – Localização dos pontos de medição de maré indicado por setas vermelhas. Fonte: Adaptado de BLENINGER (2006).

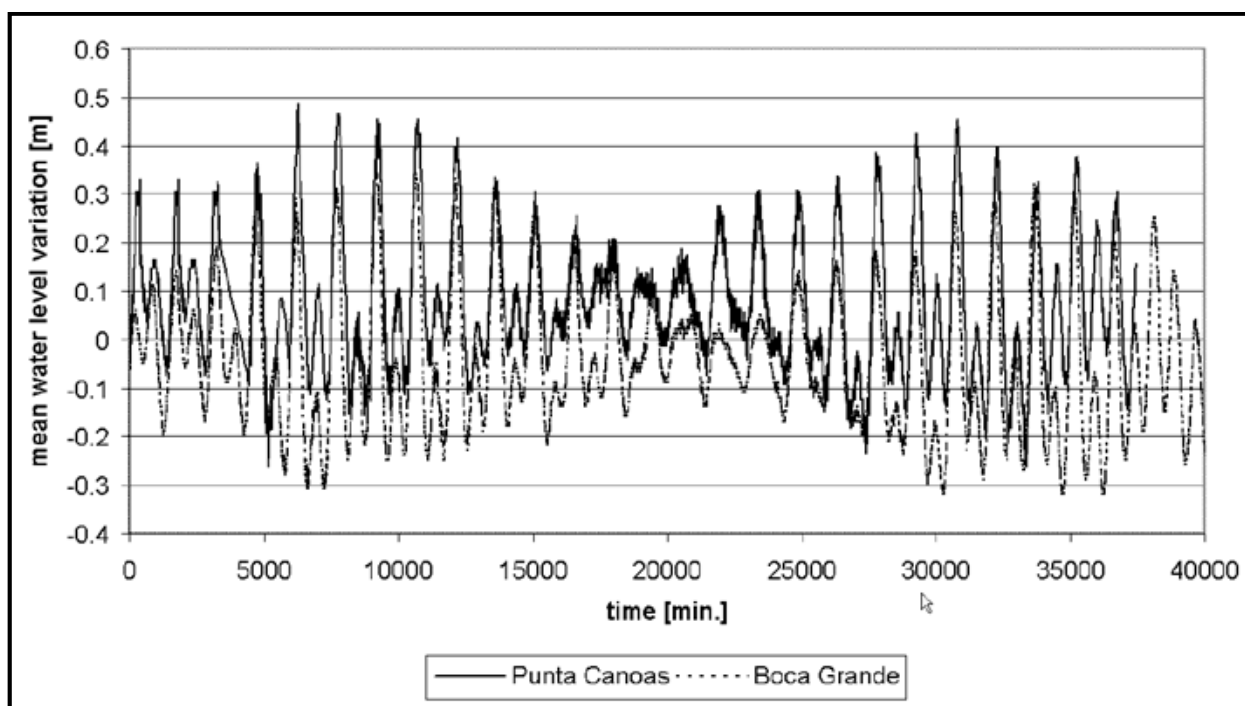


Figura 9 – Comparação das medições de Punta Canoas e Boca Grande durante fevereiro de 1998. Fonte: BLENINGER (2006).

4.5. Batimetria

Informação sobre a batimetria da região costeira de Cartagena é fornecida por ROBERTS (2006) (figura 10). Como mostrado abaixo, pode-se verificar que as dimensões horizontais da região costeira são maiores em comparação com as verticais, condição onde as equações de águas rasas podem ser aplicadas.

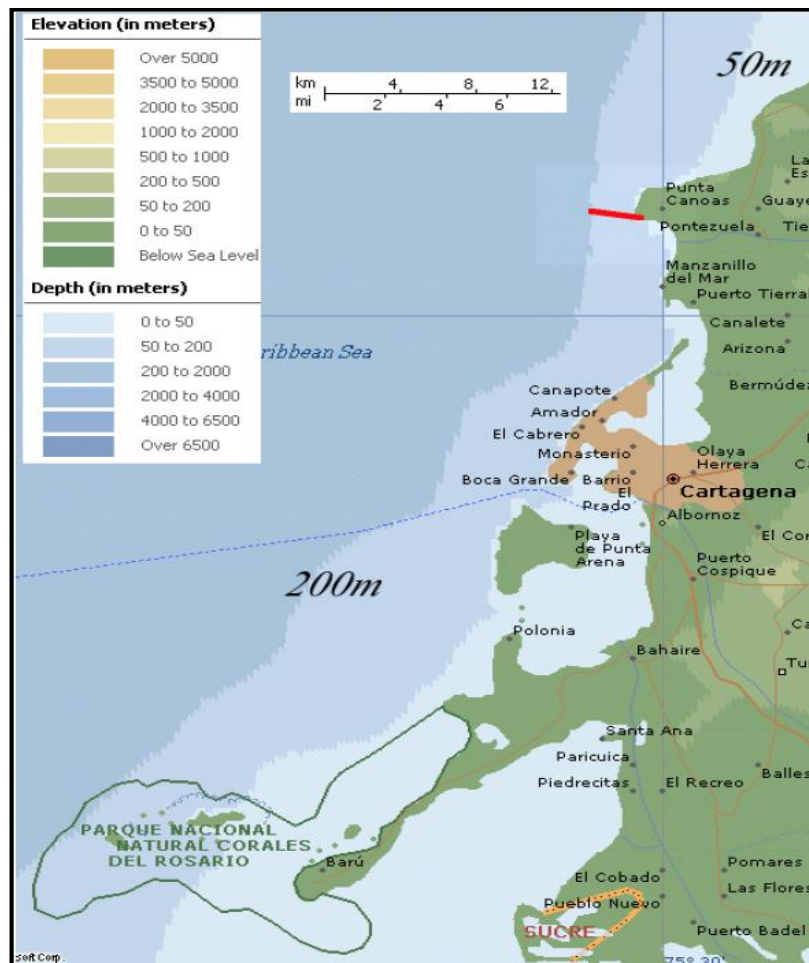


Figura 10 – Informações de elevação e profundidade da região costeira de Cartagena, Colômbia. Fonte: ROBERTS (2006).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

O software utilizado para este estudo será o Delft Dashboard, uma interface livre, baseada no Matlab e com diversas informações disponíveis em um banco de dados online, que possui o módulo Delft3D FLOW implementado para geração de modelos hidrodinâmicos. Será apresentado primeiramente o modelo Delft3D, módulo hidrodinâmico, e depois o Dashboard.

5.1. Delft3D (Delft3D FLOW)

Este módulo resolve as equações de águas rasas não permanentes, as quais são classificadas como equações diferenciais parciais de segunda ordem e que descrevem o fluxo de fluidos, sendo derivadas das equações de Navier-Stokes, que tem origem nas leis de conservação da massa e da quantidade de movimento.

As equações hidrodinâmicas utilizadas pelo modelo são (DELFT3D FLOW, 2014):

Equação da conservação de massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial((d + \zeta)U)}{\partial x} + \frac{\partial((d + \zeta)V)}{\partial y} = (d + \zeta)Q \quad (4)$$

Onde:

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (5)$$

Onde x e y são as coordenadas cartesianas, d é a cota de fundo da água abaixo do plano de referência, ζ é a elevação da superfície livre acima do plano de referência (figura 11), U e V são as componentes das velocidades integradas verticalmente nas direções X e Y , respectivamente, e Q representa a contribuição por unidade de área devido à descarga de água na presença de precipitação (P), evaporação (E), fontes (q_{in}) e sumidouros (q_{out}).

A coordenada σ é definida como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (6)$$

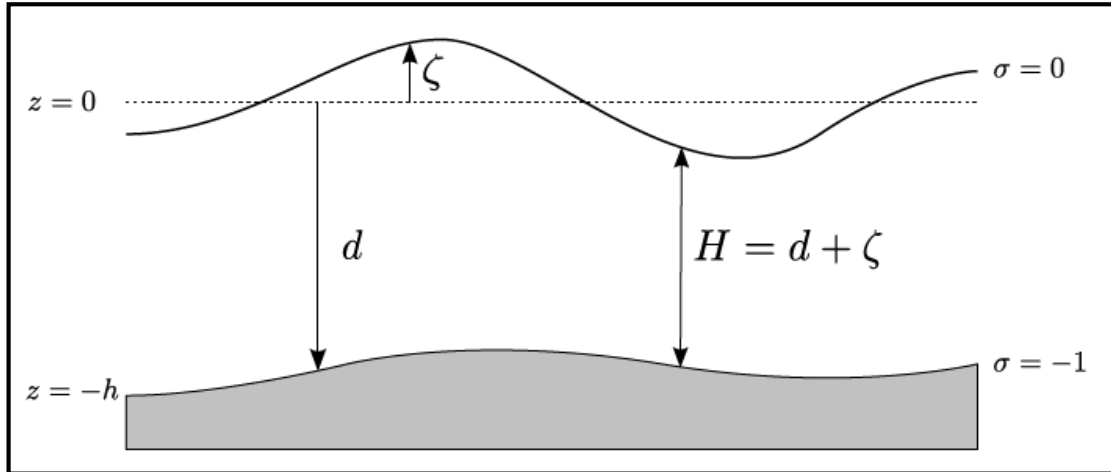


Figura 11 – Definição de nível da água (ζ), cota do fundo (d) e profundidade total (H). Fonte: DELFT3D FLOW (2014).

Equações da conservação da quantidade de movimento na horizontal (DELFT3D FLOW, 2014):

Direções x e y , respectivamente:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_x \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_y \quad (8)$$

Onde, u e v correspondem a velocidade do fluido nas direções x e y , respectivamente, H a profundidade total da água, sendo $H = d + \zeta$, σ a coordenada vertical, F_y e F_x correspondem os fluxos turbulentos, os quais representam o desequilíbrio na tensão horizontal de Reynolds, P_x e P_y os gradientes de pressão hidrostática e M_x e M_y correspondendo às contribuições devido a fontes externas (forças externas de estruturas hidráulicas, perturbação de ondas, vazão de água, entre outras).

5.1.1. Hipótese da Pressão Hidrostática

Tendo a hipótese de águas rasas, a equação do momento vertical se reduz à equação da pressão hidrostática, onde não se leva em conta as acelerações verticais devido aos efeitos de flutuação e às variações na topografia do fundo, sendo:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (9)$$

Esta equação, após integração, resulta em:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(x, y, \sigma', t) d\sigma' \quad (10)$$

Assumindo densidade constante para a água e levando em consideração a pressão atmosférica, obtêm-se os seguintes gradientes de pressão:

$$\frac{1}{\rho_0} P_x = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_{atm}}{\partial x} \quad (11)$$

$$\frac{1}{\rho_0} P_y = g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_{atm}}{\partial y} \quad (12)$$

Os gradientes no nível da superfície livre são chamados de gradientes de pressão barotrópica, ou seja, a densidade varia somente com relação à pressão.

5.1.2. Força de Coriolis

A força de Coriolis representa o efeito da rotação da Terra no sistema, e é determinada pela localização da área de modelagem no globo terrestre, ou seja, o ângulo da latitude.

Seu parâmetro (f), assumido como uniforme no modelo Delft3D FLOW, depende, então, da latitude geográfica (ϕ) e da velocidade angular da rotação da terra (Ω), sendo $f = 2\Omega \text{sen} \phi$.

5.1.3. Tensão de Reynolds

As tensões de Reynolds têm como base o conceito de viscosidade turbulenta, o qual expressa as componentes da tensão como um produto entre a dependência do escoamento, assim como o coeficiente de viscosidade turbulenta, com as componentes correspondentes do tensor de taxa de deformação média.

Geralmente a viscosidade turbulenta é uma função do espaço e tempo, sendo diferente para sistemas 2D e 3D. O seu coeficiente horizontal (ν_H) é muito maior do que a viscosidade turbulenta na vertical (ν_V), sendo que este coeficiente na horizontal é definido como uma superposição de três partes, uma devido à turbulência bidimensional (2D), outra devido à turbulência tridimensional (3D) e uma devido à simulações de dispersão. A parte bidimensional (ν_{2D}) está associada com a contribuição do movimento turbulento na horizontal e forças que não são resolvidas pela grade horizontal ou pelas equações de águas rasas.

As forças F_x e F_y que aparecem na equação de quantidade de movimento horizontal possuem a seguinte forma:

$$F_x = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (13)$$

$$F_y = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad (14)$$

Sendo $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ e τ_{yx} as componentes do tensor de tensões de Reynolds.

5.1.4. Discretização

O método numérico utilizado pelo modelo para a solução das equações citadas anteriormente é baseado nas diferenças finitas, sendo que para sua aplicação, estas equações devem ser discretizadas no espaço de acordo com

a malha gerada, que no caso do Delft Dashboard, é uma malha retangular no sistema cartesiano.

As variáveis nível da água e componentes de velocidade (u, v) descrevem o fluxo que ocorre na área de estudo e na discretização são arranjadas de uma maneira especial na grade, sendo chamada de grade escalonada (*staggered grid*, em inglês). Neste arranjo, cada célula contém a definição de pontos para o nível da água, para a cota do fundo e para as velocidades nas direções x e y, sendo que os pontos não são os mesmos. Os pontos definidos para o nível da água é definido no meio de cada célula e os demais componentes em seus limites, como exemplifica a figura a seguir.

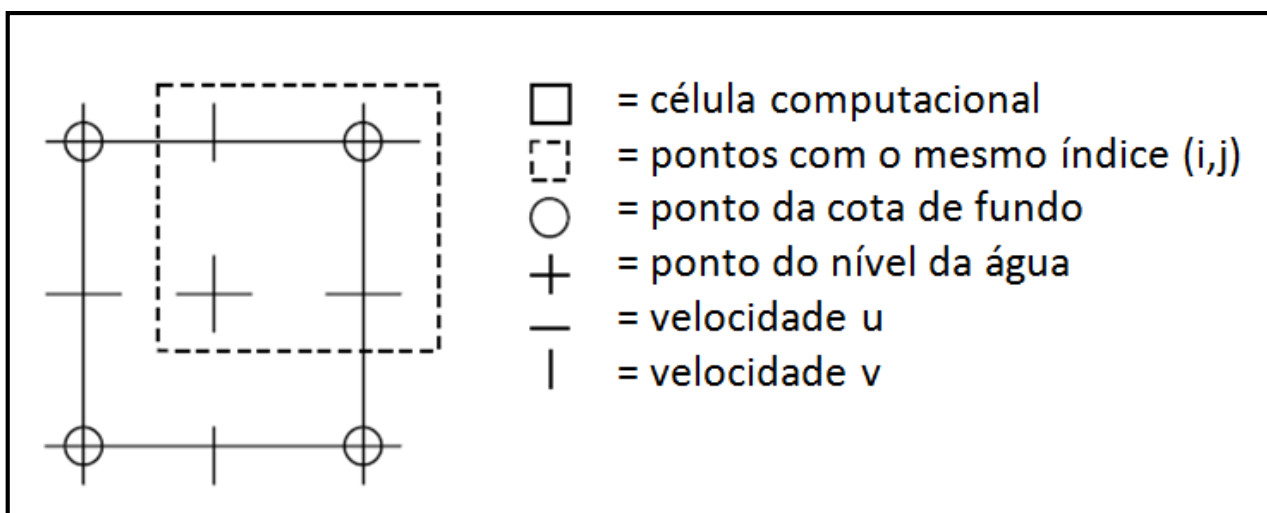


Figura 12 – Discretização do espaço físico para o espaço computacional. Grade escalonada. Fonte: DELFT3D FLOW (2014).

Como citado anteriormente, o método utilizado pelo modelo para a solução numérica das equações diferenciais parciais apresentadas é o método das diferenças finitas, o qual, segundo GREENBERG (1998), é um dos mais importantes na solução deste tipo de equações.

Neste método, o domínio do problema é representado por um conjunto de nós ou pontos, formando uma malha que representa a área da modelagem onde são calculados os parâmetros de interesse. Possuindo o domínio discretizado, o passo seguinte é a discretização espacial das equações diferenciais parciais do problema, onde as derivadas parciais são aproximadas para equações discretas de diferenças finitas.

5.1.5. Estabilidade do Modelo

Segundo FRANÇA, *et al* (2013), a análise da estabilidade é um ponto fundamental na aplicação de métodos numéricos em problemas transientes, sendo necessário encontrar critérios que garantam tal estabilidade do sistema.

Segundo STELLING (1984), citado em DELFT3D FLOW (2014), um bom solucionador das equações de águas rasas deve satisfazer uma série de exigências, como ser incondicionalmente estável, acurado, ser adequado para problemas transientes ou permanentes, além de ser computacionalmente eficiente.

Na definição do passo temporal durante a criação do cenário da modelagem, pode-se escolher o intervalo de tempo com relação à acurácia somente, sendo que a estabilidade não é um problema. A acurácia, além de diversos outros parâmetros, é como a reprodução da importância da escala de comprimento para a malha numérica, sendo dependente do número de Courant-Friedrichs-Lewy (DELFT3D FLOW, 2014):

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} \quad (15)$$

Onde Δt é o passo temporal, em segundos, g a aceleração da gravidade, H a profundidade total, e $\{\Delta x, \Delta y\}$ é um valor característico do espaçamento da malha, sendo adotado o menor valor em muitos casos.

Geralmente o número de Courant não deve exceder o valor de 10, mas no caso de problemas com pequenas variações espaciais e temporais, este número pode assumir valores maiores. Excedendo essa condição para o passo temporal, poderá ser gerada condição de instabilidade, o que não é aceitável no modelo (DELFT3D FLOW, 2014).

5.2. Delft Dashboard

5.2.1. Interface e ferramentas existentes no software Delft Dashboard

A interface inicial do software exibe o conjunto de ferramentas disponíveis e um mapa global que, por meio de uma escala de cores, mostra a batimetria e a topografia das regiões do globo, como mostra a figura 13.

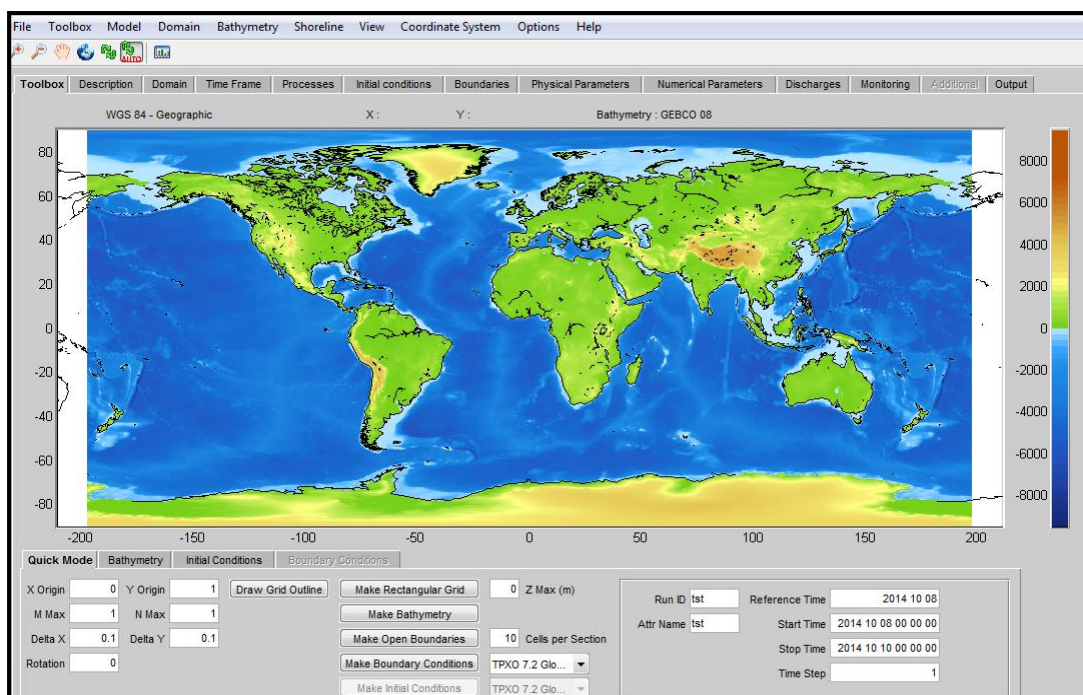


Figura 13 – Interface inicial do software Delft Dashboard.

Explorando as opções da barra de ferramentas existente, percebe-se as possibilidades que o software oferece, como por exemplo, a escolha da fonte de dados de batimetria, a geração de imagens georeferenciadas, visualização de cartas de navegações existentes no banco de dados, obtenção da linha costeira do globo, localização de estações de monitoramento de maré espalhadas pelos continentes, entre outras ferramentas.

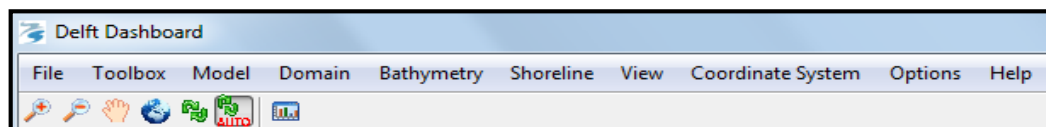


Figura 14 – Barra de ferramentas disponível no Delft Dashboard.

Na opção “File” é possível definir uma área de trabalho onde se dará o armazenamento das informações geradas, abrir arquivos existentes e salvar modelos gerados. A opção seguinte, “Toolbox”, apresenta uma lista de

ferramentas com diversas funções, como mostra a figura 15, sendo as principais funções descritas a seguir.

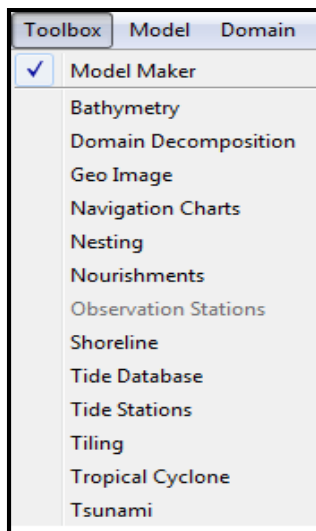


Figura 15 – Ferramentas listada na opção “Toolbox”.

A primeira opção apresentada, “Model Maker”, diz respeito à interface onde as principais informações adicionadas ou geradas estarão disponíveis, ou seja, uma área de trabalho onde efetivamente o modelo será gerado e executado. O segundo item desta lista, “Bathymetry”, fornece as possíveis fontes de dados de batimetria disponíveis para uso no modelo (tabela 1) e a possibilidade de definir uma região de interesse onde se deseja obter a informação de batimetria.

Outra ferramenta interessante inserida na lista da figura 15, é a “Geo Image”. Nesta opção pode-se definir uma região de interesse (desenhando um polígono) e gerar uma imagem georreferenciada do local escolhido, como exemplificado abaixo.

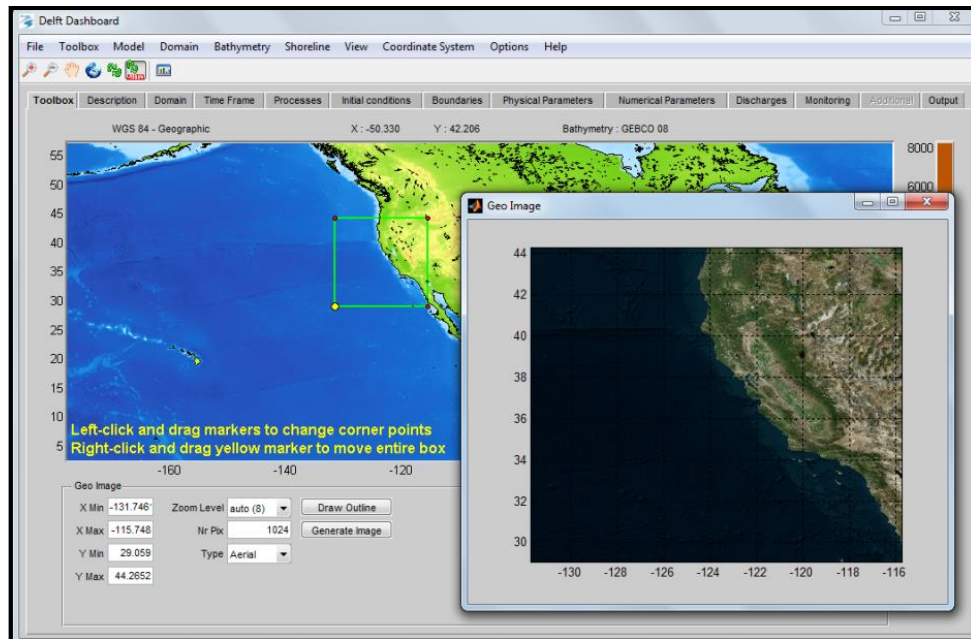


Figura 16 – Utilização da ferramenta “Geo Image” com definição de região de interesse e geração de imagem georreferenciada.

Com relação às cartas de navegação, que são projeções da Terra em uma superfície plana, com informações de profundidade da água, linha costeira, características topográficas, entre outras, a opção “Navigation Charts” do software mostra a base de dados disponível sendo possível selecionar uma carta de interesse e extrair os dados desejados, como exemplificado abaixo.

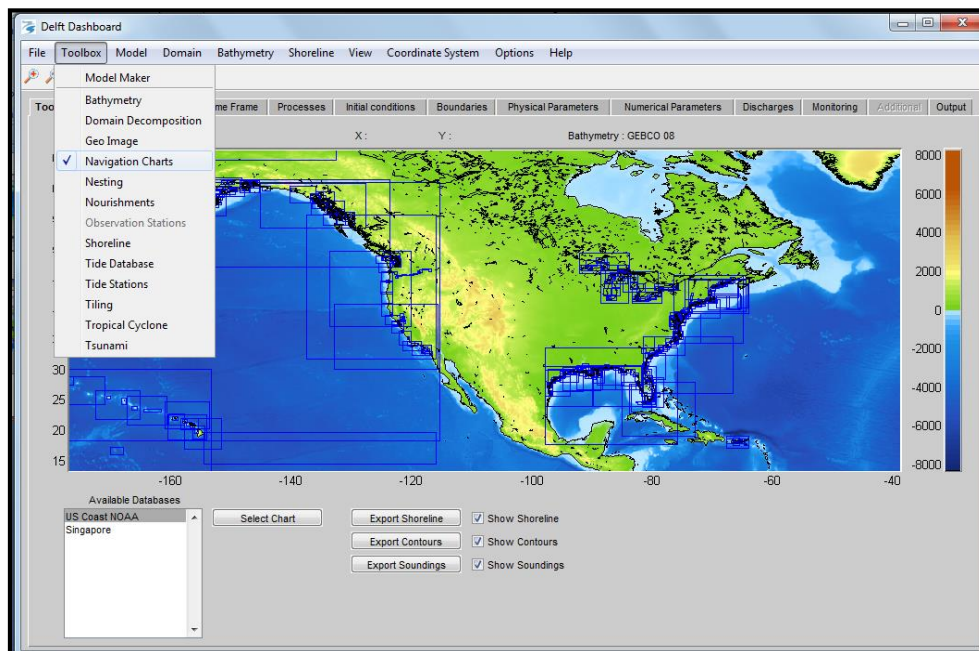


Figura 17 – Ferramenta “Navigation Charts” no software Delft Dashboard.

A função “Shoreline” é a ferramenta que fornece a linha costeira de todo o globo. Assim como nas outras opções, é possível desenhar um polígono na região de interesse para obter a linha costeira desse local.

Em “Tide Database” são mostrados os modelos de maré astronômica disponíveis, os quais são utilizados na etapa de geração das condições de contorno, sendo eles:

- TPXO 6.2 Global Inverse Tide Model;
- TPXO 7.2 Global Inverse Tide Model;
- European Shelf 2008.

Com relação aos modelos TPXO 6.2 e 7.2 Global Inverse Tide Model, são modelos globais de maré com resolução média e interface gráfica com Matlab, desenvolvido na Universidade de Oregon, sendo ambos descritos como uma boa escolha para um modelo de maré global em regiões de alta latitude, uma vez que utilizam informações da linha de aterramento da Antártida (TPXO 6.2) (TPXO7.2). Para o modelo European Shelf, possui maior aplicação na região da Europa, onde possui pontos de calibração espalhados ao longo da linha costeira e no mar (EUROPEAN SHELF).

Mais uma função interessante disponível no software é a “Tide Stations”, a qual mostra no mapa a localização de todas as estações de monitoramento de maré existentes ao longo do globo terrestre (pontos amarelos espalhados no mapa), onde é possível eleger uma ou várias estações, observar e extrair os dados em um dado intervalo de tempo de interesse.

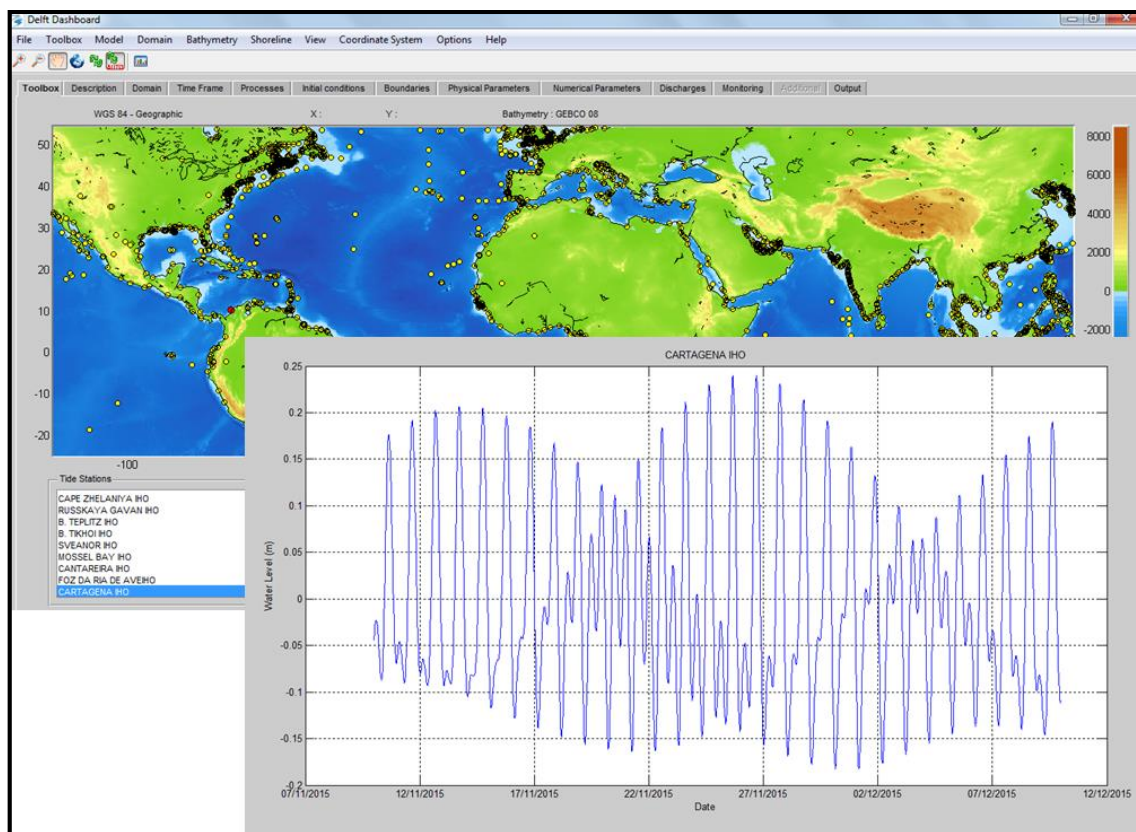


Figura 18 – Ferramenta “Tide Stations” com visualização de estações com dados de maré (pontos amarelos no mapa) e exemplo de visualização da série temporal de uma estação (CARTAGENA IHO).

Para a região de estudo, é verificada a existência de uma estação com dados de maré nomeada como CARTEGENA IHO, de onde são extraídos os dados de acordo com o período de interesse para comparação com os resultados simulados para o mesmo local.

As opções restantes na barra de ferramenta mostrada na figura 14, basicamente repetem os processos listados anteriormente, como escolha do modelo (Delft3D FLOW), definição de um novo domínio se necessário, escolha da fonte de dados de batimetria e linha costeira, com destaque para as opções “View” e “Coordinate System”.

Na ferramenta “View” pode-se definir qual a informação se deseja visualizar no mapa da interface do software, entre as opções estão mapa, imagens de satélite, batimetria e linha costeira, como exemplificado na figura 19, com a visualização da batimetria, mapa e imagem de satélite, todos com a linha costeira.

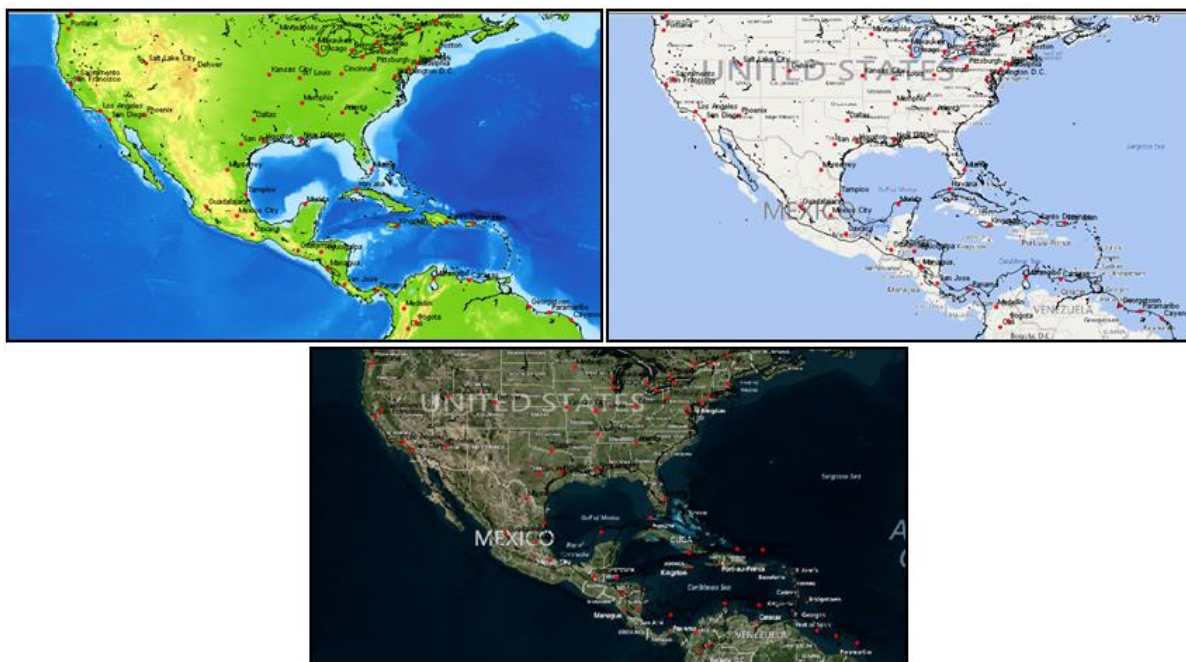


Figura 19 – Exemplos de possíveis visualizações da região de interesse.

Já na ferramenta “Coordinate System” é possível definir o sistema de coordenadas em que se deseja trabalhar e, a partir desse sistema definido, selecionar a zona de interesse, como mostra a figura 20, onde é utilizado o sistema de coordenadas WGS84 e selecionado uma zona UTM de interesse.

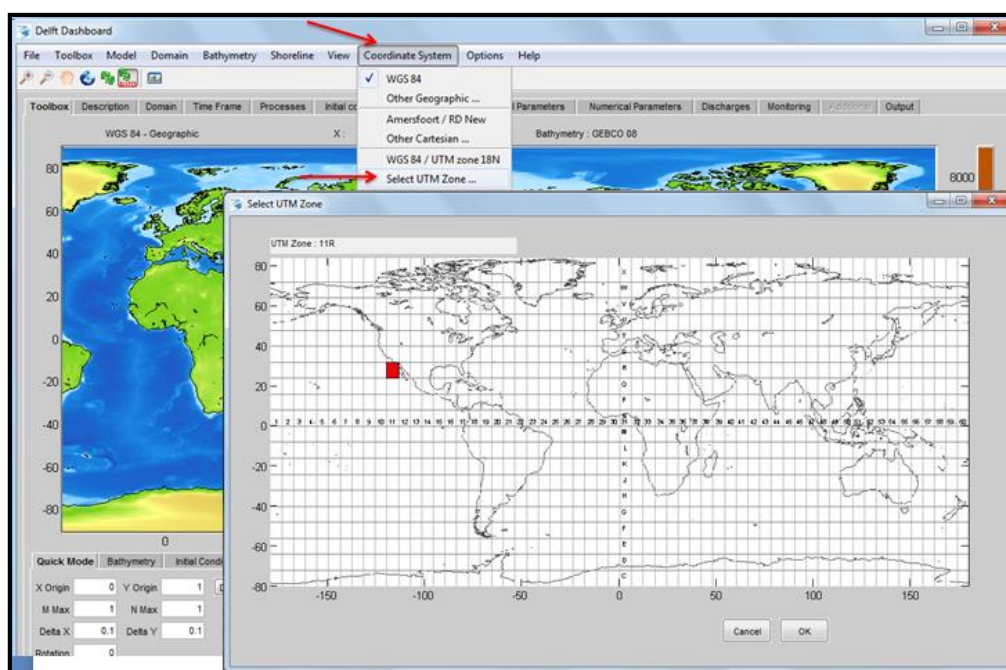


Figura 20 - Exemplo de definição da Zona UTM onde será feita a modelagem hidrodinâmica.

Além de todas essas possibilidades descritas acima que o Delft Dashboard oferece, ao longo da configuração do modelo podem-se definir diversos outros parâmetros, como a inserção de processos no sistema (salinidade, temperatura, vento, poluente, etc), a configuração das condições iniciais (nível de água uniforme, concentração inicial do poluente, ou carregar um arquivo com dados iniciais, por exemplo), bem como a definição de valores de constantes físicas como aceleração da gravidade, densidade da água e do ar, da rugosidade de fundo, viscosidade e difusividade.

5.2.2. Confeção do Modelo para Regiões Costeiras

Na sequência são descritos os passos que serão adotados para a execução da simulação hidrodinâmica bidimensional no Delft Dashboard na região costeira de Cartagena, tendo como base o tutorial disponibilizado no website do software.

5.2.2.1 Definição do Local de Simulação

Após inicializar o programa, define-se o local onde os arquivos gerados serão salvos e a fonte de dados de batimetria (tabela 1). Após isso, define-se a região onde se dará a simulação com base na zona UTM utilizando a ferramenta “Coordinate System”, já descrita anteriormente, onde é exibido um mapa com as diversas zonas existentes e bastando somente clicar na região de interesse.

5.2.2.2. Período de Simulação

A etapa seguinte é estabelecer o período de simulação, ou seja, definir a data e hora de início e fim da modelagem, bem como o passo temporal que se deseja obter os dados. Tal etapa também é feita de forma simples, bastando ajustar os dados no quadro existente na interface inicial do software, como destacado na figura 21.

Como um dos objetivos deste trabalho é a comparação dos resultados simulados com os dados obtidos em campo, a data de início e fim desta obtenção de resultados simulados se dará dentro do mesmo período que ocorreu a coleta de dados de campo.

De acordo com as informações apresentadas na seção de descrição da área de estudos, os dados referentes aos parâmetros corrente e nível da água variam entre foram medidos entre setembro de 1997 a abril de 1999. Sabendo disso, o período de simulação é definido levando em consideração o esforço computacional e a representatividade dos dados gerados no período escolhido.

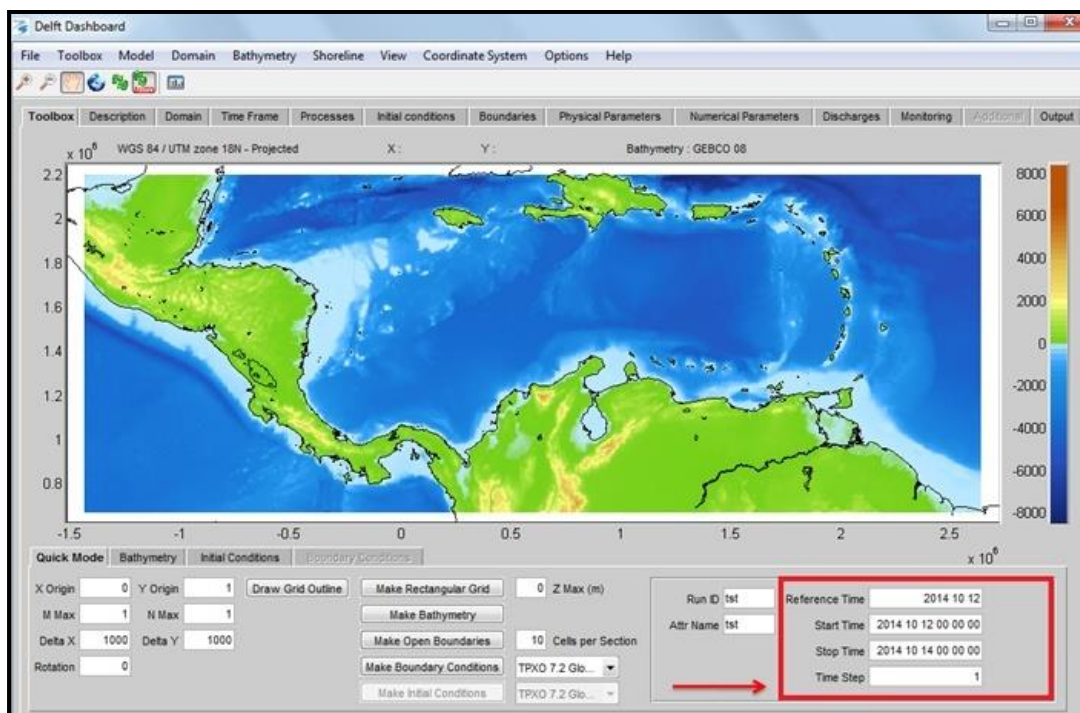


Figura 21 – Exemplo de ajuste do período de modelagem, tempo inicial, final e intervalo temporal desejado.

5.2.2.3. Geração da Malha Retangular

Assim como todos os passos a serem seguidos, o desenho da grade retangular é de fácil obtenção. Será definida a área de modelagem e, após isso, a resolução espacial desejada (Delta X e Delta Y) e a altura (Z Max), que representa a altura em que a área do grid estará acima do nível do mar. Por fim, o software interpola linearmente os dados de batimetria com os pontos da grade retangular e gera-se a malha com base nos valores definidos. Quanto menores os valores para Delta X e Delta Y, mais detalhada será a malha retangular e maior será o esforço computacional no processamento do modelo gerado.

A figura 22 exemplifica a definição de uma malha retangular com Delta X e Delta Y iguais a 1000 m e um Z Max de 10 m.

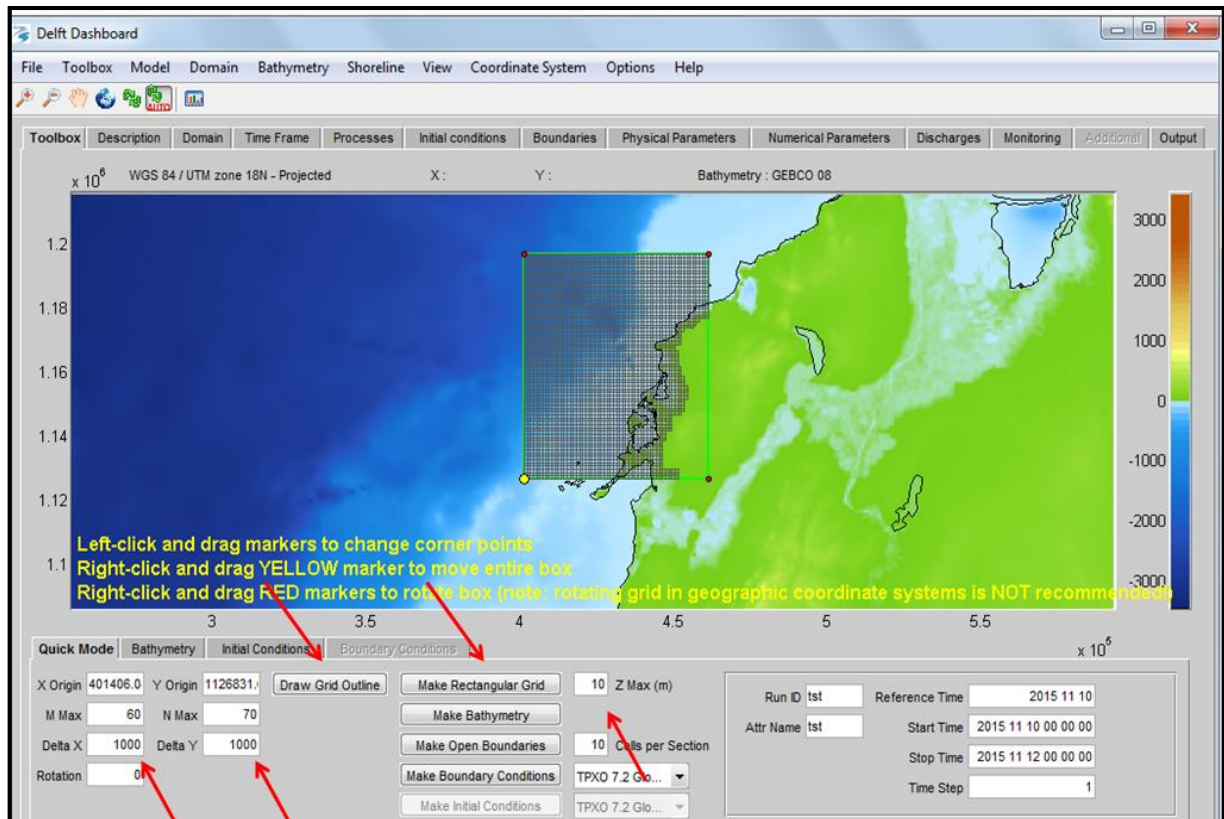


Figura 22 – Exemplo de geração de malha retangular com resolução espacial e altura Z Max definidas.

5.2.2.4. Obtenção da Batimetria, Contorno Aberto e Condições de Contorno

Para a área de modelagem definida geram-se a batimetria e o contorno aberto, que são os limites definidos pela malha gerada. O passo seguinte para o contorno aberto é a definição do tipo de contorno (nível de água, corrente, descarga total, entre outros), o valor do coeficiente de reflexão (alfa), que tem relação com a reflexão das ondas no contorno aberto, e qual o forçante deste contorno (figura 23). As condições de contorno são obtidas através de um banco de dados online, basta definir o modelo de maré desejado e solicitar a geração das condições de contorno clicando em “Make Boundary Conditions”.

Finalizando esta etapa, já terá sido definida a fonte de dados de batimetria, o local da simulação, bem como o intervalo temporal em que se dará a modelagem, a malha com a resolução espacial escolhida e a geração do contorno aberto e das condições de contorno.

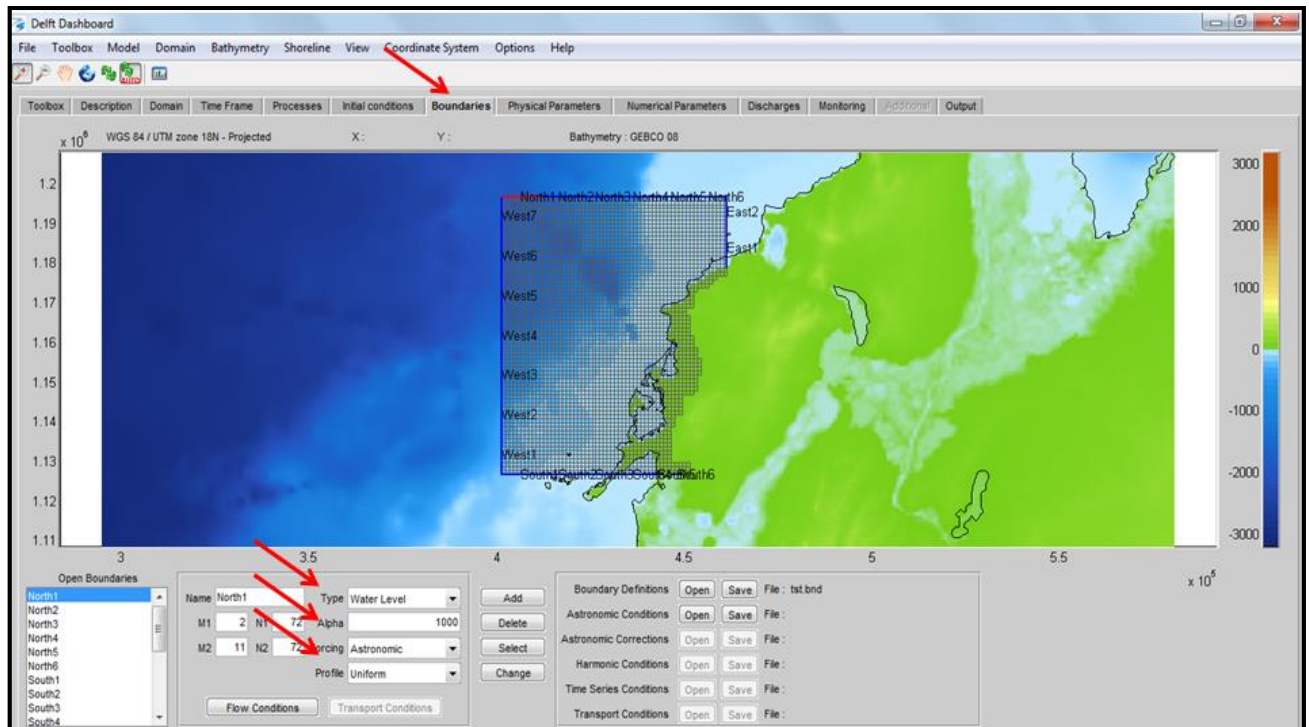


Figura 23 – Configuração do contorno aberto, definição do tipo e do forçante, e ajuste do coeficiente de reflexão alpha.

5.2.2.5. Inserir Pontos de Monitoramento/Observação

Novamente, de forma fácil, a interface do programa possibilita a observação da localização de estações fixas de monitoramento de maré existentes ao longo de todo o globo e também a inserção de pontos de monitoramento para obtenção de valores simulados.

Assim como na definição do período da modelagem (período de início e fim da simulação), também será tomado o cuidado de inserir os pontos de monitoramento para obtenção de resultados simulados na mesma localização em que foram obtidos os dados medidos em campo, possibilitando, assim, uma correta comparação entre os mesmos.

5.2.2.6. Inserir Pontos de Descarga

Assim como para inserção de pontos de monitoramento, é possível inserir pontos de descarga, ou lançamento de um determinado poluente, como citado anteriormente. Como os dados de campo foram obtidos para um estudo referente a um emissário submarino, será simulada uma descarga de um

poluente junto ao ponto do emissário, com determinada vazão e concentração para se observar o comportamento do poluente ao longo da área de interesse.

5.2.2.7. Simplificações adotadas

Nesta simulação bidimensional da região costeira de Cartagena, é confeccionado um modelo forçado por maré onde são adotadas algumas simplificações, como a desconsideração das variações da temperatura, salinidade e da presença de vento, bem como condições iniciais uniformes, como nível da água e concentração inicial do poluente igual a zero. Também serão desconsideradas vazões de entrada e saída, como contribuições, precipitações e evaporação.

5.2.2.8. Resumo das Etapas para Confecção do Modelo Hidrodinâmico

Em resumo, os passos que serão executados no software Delft Dashboard para a modelagem da região costeira são:

- Definição de um local de trabalho, onde todos os arquivos gerados serão salvos;
- Selecionar a região onde se pretender realizar a simulação definindo a zona UTM desde local;
- Escolha de qual a fonte de dados de batimetria;
- Configurar o período de simulação de acordo com o desejado, bem como o passo temporal;
- Desenhar a malha (grid retangular) no local pretendido, definindo a resolução espacial desejada (Delta X e Delta Y);
- Gerar a batimetria para a região onde foi definida a malha da simulação;
- Gerar o contorno aberto e ajustar o valor do coeficiente de reflexão Alpha;
- Gerar condições de contorno através de um modelo de maré disponível;

- Inserir pontos de observação/monitoramento em locais específicos;
- Inserir ponto de descarga do poluente com vazão e concentração conhecida;
- Salvar, no local de trabalho definido anteriormente, todos os passos executados até então;
- Rodar o modelo para obtenção dos resultados desejados.

5.3. Dados de Campo

Seguindo um dos objetivos definidos para este trabalho, os resultados simulados serão comparados com os dados registrados em campo. Diversos dados como de vazão, intensidade e direção de corrente, maré, densidade, entre outros, foram obtidos para a realização de estudos, com o objetivo de caracterizar a região costeira de Cartagena, onde seria implantado um emissário submarino. Mais detalhes sobre estes estudos podem ser obtidos em ROBERTS; CARVALHO (2000); ROBERTS (2003, 2004, 2005) e ROBERTS; VILLEGAS (2006).

Dentre todos os dados obtidos, os que possuem aplicação neste estudo são os de maré e corrente, como mostrado na tabela 5, com a descrição do período, frequência, fonte e local de obtenção de dados.

Tabela 5 - Dados de corrente e maré medidos na região costeira de Cartagena, Colômbia, com período, frequência, fonte e local de medição.

Parâmetro	Período	Frequência	Fonte/Local
Correntes Intensidade (m/s) e direção (°)	01/01/98 – 12/02/99	A cada 20 segundos, promediado a cada 15 minutos	ADCP* – Punta Canoas
Marés/nível da água(m)	25/09/97 – 16/08/98	A cada 10 minutos	Boca Grande
	01/01/98 – 26/04/99		Punta Canoas

Fonte: ROBERTS; CARVALHO (2000); ROBERTS; VILLEGAS (2006). *
Accoustic Doppler Current Profiler.

A localização dos pontos de medição de corrente e de marés pode ser visualizada nos mapas da figura 24.

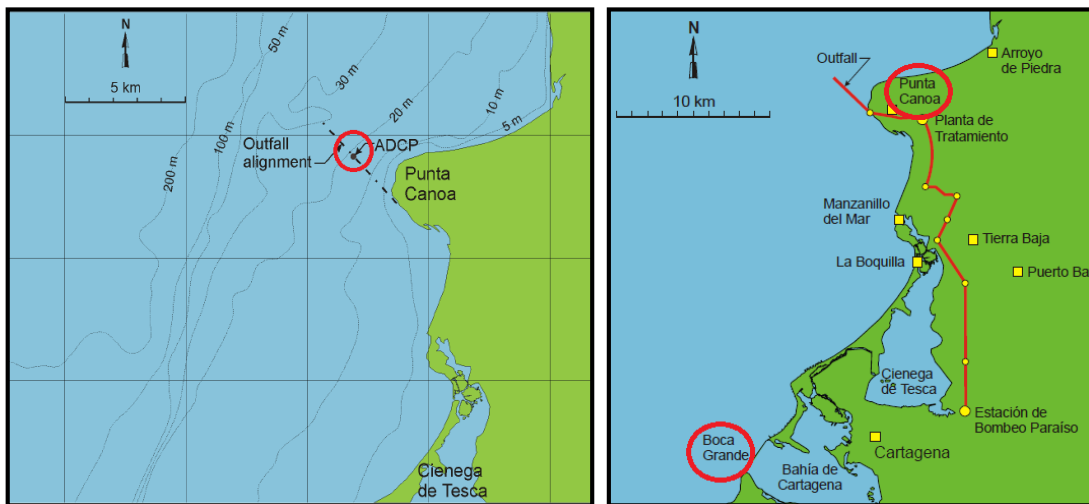


Figura 24 – Localização do ADCP (imagem à esquerda) e da medição de maré (imagem à direita). Fonte: Adaptado de ROBERTS; CARVALHO (2000).

5.4. Análise dos Resultados

Segundo o objetivo principal deste trabalho, que é a modelagem hidrodinâmica da região costeira de Cartagena e avaliação deste modelo com base em análises estatísticas entre os resultados simulados e os dados medidos em campo, o passo seguinte é a configuração do modelo para o período correto de simulação.

Para a comparação dos dados são feitos diversos cálculos, entre eles média, variância, desvio padrão, erro médio, erro absoluto e, por fim, a aplicação do índice skill que, segundo OLIVEIRA (2009), foi proposto por WILLMOTT (1981) para comparação entre dados modelados e amostrados. A equação deste índice adimensional, que varia entre 0 e 1, é apresentada abaixo.

$$SKILL = 1 - \frac{\sum |X_{MOD} - X_{OBS}|^2}{\sum (|X_{MOD} - \langle X_{OBS} \rangle| + |X_{OBS} - \langle X_{OBS} \rangle|)^2} \quad (16)$$

Onde X_{mod} representa os valores dos resultados simulados, X_{obs} os valores amostrados/medidos, e $\langle X_{\text{OBS}} \rangle$ representa a média temporal da propriedade amostrada.

Segundo WARNER (2005), o índice varia entre 0 e 1, sendo que quando o valor do índice tende a 1, significa que existe uma boa aproximação entre os dados modelados e medidos, já quando o valor tende a zero, é observada uma discordância entre estes dados.

São criados diferentes cenários de simulação, adotando as simplificações definidas anteriormente, sendo variada a resolução da malha bem como o passo temporal da simulação. Posteriormente é feita a análise estatística entre os dados e a verificação da possibilidade de aplicação do modelo para a região de estudo.

6. SIMULACOES E RESULTADOS

6.1. Dados Existentes

Segundo a descrição do software Delft Dashboard, existe diversas ferramentas possíveis para aplicação e geração de modelos hidrodinâmicos, bem como bancos de dados com informações de batimetria, linha costeira, possibilidade de criação de imagem georreferenciada, cartas de navegação, entre outras.

Previamente à confecção dos cenários, com a definição da região costeira de Cartagena como a área de aplicação do modelo, utilizaram-se algumas das ferramentas disponíveis no software para verificação da existência de dados para o local de interesse. O passo inicial foi a escolha da zona UTM da aplicação do modelo (figura 25), definida como “Zona UTM 18 P”, de acordo com o software.

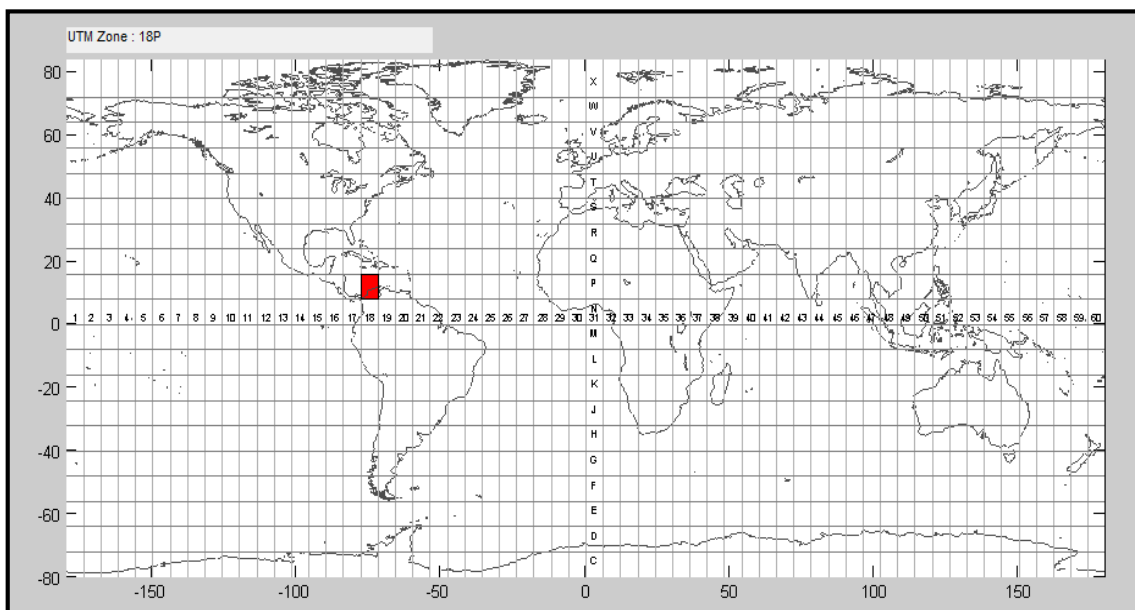


Figura 25 – Definição da zona UTM para aplicação do modelo na região costeira de Cartagena.

Após esta primeira etapa, foi possível verificar a existência dos dados de batimetria para a área de interesse dentre todas as fontes de dados disponíveis, as quais já foram listadas na tabela 1. Entre todas elas, a única com dados de batimetria existentes para o local é a GEBCO 08, os quais

podem ser visualizados na figura 26. Com relação às demais ferramentas disponíveis para a área de estudo, não existem cartas de navegação e é verificada apenas uma estação com informações de nível da água, a estação CARTAGENA IHO.

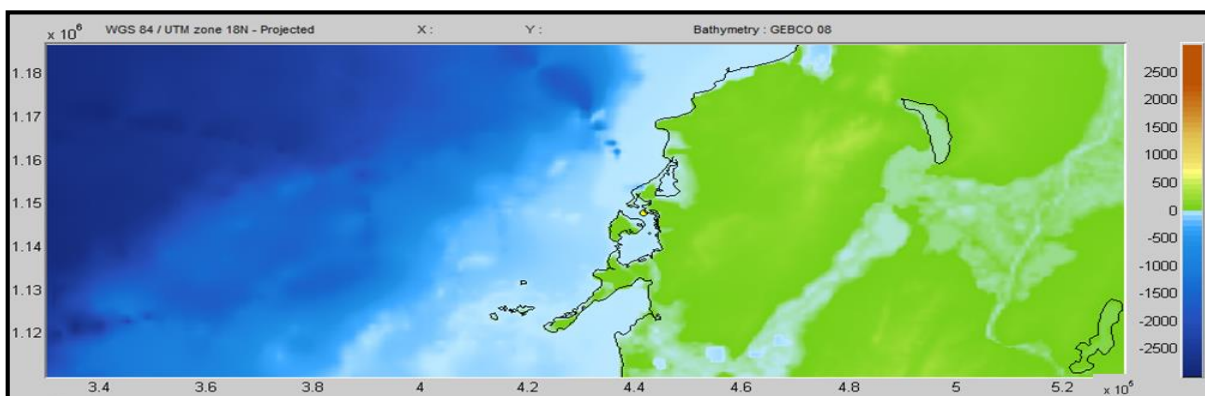


Figura 26 – Informação de batimetria para a região de estudo obtidos pela GEBCO 08.

6.2. Confecção de cenários para a área de estudo

A criação dos cenários para a modelagem hidrodinâmica seguiu as etapas descritas na metodologia, sendo definida, primeiramente, a zona UTM de interesse e a fonte de dados de batimetria, já apresentados acima e ilustradas nas figuras 25 e 26.

Para a seguinte etapa, que consistiu na definição do período de modelagem, observaram-se as datas em que os resultados de campo foram obtidos. Segundo ROBERTS; CARVALHO (2000) e ROBERTS (2006), os dados de corrente medidos em Punta Canoas se deram entre 01/01/1998 e 12/02/1999, enquanto que os valores de nível de água em Punta Canoas e Boca Grande ocorreram em 25/09/1997 a 16/08/1998 e 01/01/1998 a 26/04/1999, respectivamente. Levando-se em consideração o esforço computacional e com base nesses intervalos apresentados, foi definido que a simulação teria duração de durante três meses, abrangendo o período de 01/05/1998 a 31/07/1998.

O terceiro passo executado foi a criação da malha retangular abrangendo toda a área de interesse, onde foram definidas diferentes

resoluções espaciais (Delta X e Delta Y), uma para cada cenário, variando de 100x100 m a 400x400 m. A figura a seguir exemplifica uma malha com resolução de 700x700 m inserida na região de interesse.

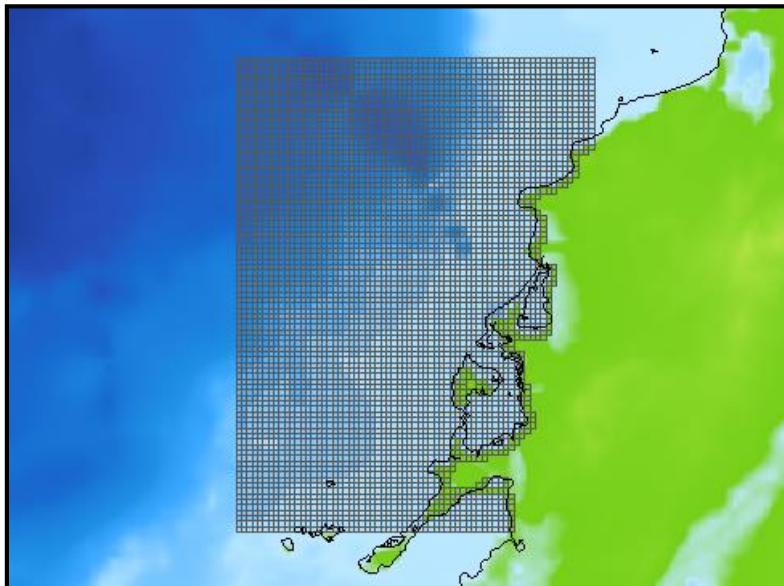


Figura 27 – Exemplo de criação de malha retangular com resolução espacial de 700x700 m na região costeira de Cartagena, Colômbia.

A sequência, igual para todos os cenários criados, consistiu na geração da batimetria, onde os dados são interpolados de acordo com a malha proposta, a geração do contorno aberto e das condições de contorno. A figura 28 exemplifica a região costeira com a malha desenhada, os dados de batimetria já ajustados, o contorno aberto dividido em seções, possibilitando resolver melhor as variações ao longo da linha, bem como a linha costeira.

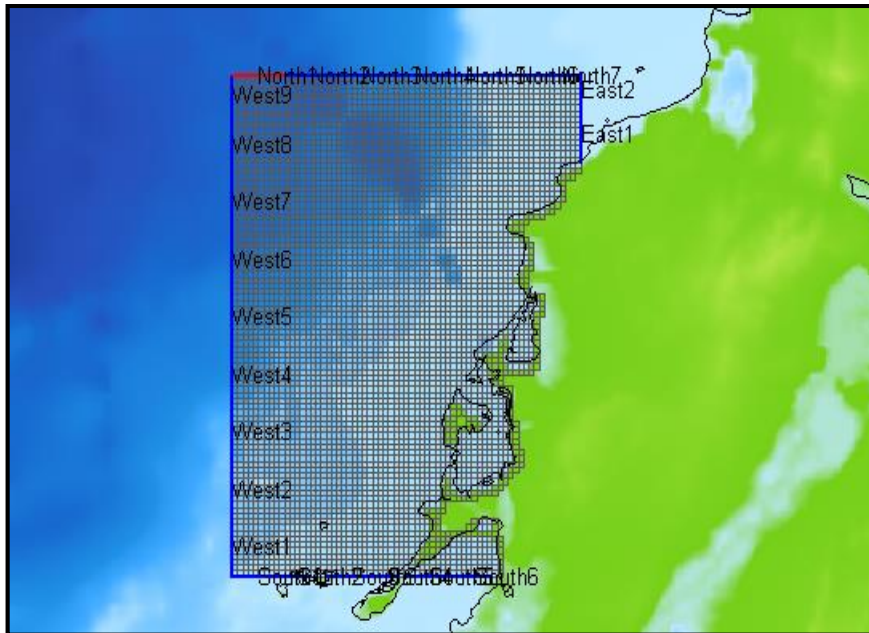


Figura 28 – Exemplo de geração de malha com batimetria ajustada e geração de contorno aberto.

Em cada cenário foram distribuídos diversos pontos de observação ao longo de toda a malha criada, tendo o cuidado de inserir pontos nos mesmos locais onde foram obtidos os dados de campo, ou seja, na região de Punta Canoas e de Boca Grande. Quanto ao ponto de lançamento de um poluente com vazão e concentração conhecida, foi realizada a simulação de sua emissão somente no cenário com a malha mais refinada (400x400 m), visando observar o comportamento da concentração do poluente ao longo da área de estudo, sendo que sua localização se deu no local do emissário submarino.

A figura 29 exemplifica um cenário praticamente finalizado, contendo a malha retangular com resolução de 700x700 m, as informações de batimetria ajustadas, o contorno aberto e os pontos de monitoramento e descarte do poluente.

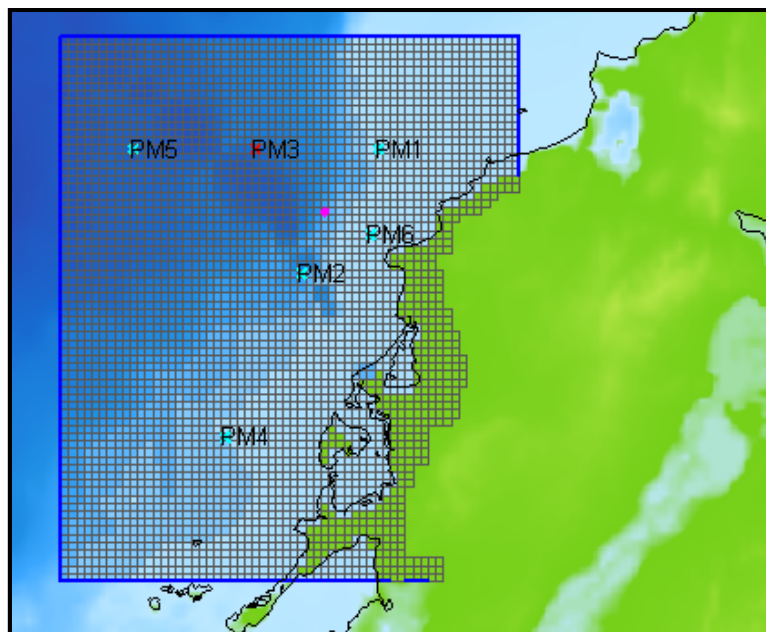


Figura 29 – Exemplo de cenário com malha retangular, contorno aberto gerado, linha costeira e pontos de monitoramento (pontos azuis) e de lançamento do poluente (ponto rosa) distribuídos ao longo da área de interesse.

Por fim, com relação à criação dos cenários para a simulação hidrodinâmica da região costeira de Cartagena, é apresentado na tabela a seguir um resumo das principais fontes de dados e valores definidos para os parâmetros existentes no software, como o espaçamento da malha, intervalo e passo temporal, condições iniciais, viscosidade, rugosidade, entre outros.

Tabela 6 – Resumo das principais fontes de dados e valores assumidos para os diversos parâmetros existentes no software para a criação dos cenários de modelagem.

Parâmetros	Dados utilizados
Fonte de dados de batimetria	GEBCO 08
Espaçamento da grade (m)	Cenário 1 -700x700 Cenário 2 – 400x400
Passo temporal (min)	Cenário 1 – 1,0 Cenário 2 – 0,5
Intervalo temporal	01/05/1998 a 31/07/1998
Condição inicial (nível da água) (m)	0
Concentração inicial do poluente (kg/m ³)	0
Coefficiente de reflexão alpha	1000
Gravidade (m/s ²)	9,81
Densidade da água (kg/m ³)	1021
Vazão do poluente (m ³ /s)	2
Concentração de lançamento do poluente (kg/m ³)	4

6.3. Resultados obtidos

Devido o software apresentar um período inicial de ajuste dos resultados de algumas horas, apesar do período de simulação ter início em 01/05/1998, os resultados simulados foram analisados e comparados no período entre 01/06/1998 a 31/07/1998, evitando qualquer influência nos resultados gerados.

Com relação aos modelos produzidos, foram confeccionados diversos cenários, com espaçamento de grade, intervalo temporal e área de cálculo variados. No entanto, com relação à estabilidade do modelo, no decorrer do processo de cálculo o processo foi interrompido em diversos cenários devido à presença de instabilidade nos cenários, ou seja, número de Courant elevado. Observado estes cenários instáveis, notou-se que possuíam uma grande área de cálculo, a qual abrangia áreas mais profundas na região costeira e, por isso, tornavam a continuação do processo de cálculo inviável devido a instabilidade encontrada nestes pontos.

Foram obtidos, por completo, os resultados de dois cenários distintos, um com uma malha mais grosseira (700x700 m) e um passo temporal de 1 minuto, e outro com uma grade mais refinada, apresentando espaçamento de 400 m e passo temporal de 0,5 minutos (30 segundos), estando de acordo com o proposto no objetivo deste trabalho.

6.3.1. Nível de água

A seguir são apresentadas as análises realizadas para o parâmetro nível de água, onde os resultados simulados foram comparados estatisticamente com os dados da estação CARTAGENA IHO, parte integrante do banco de dados do modelo, bem como comparados com dados obtidos em campo nos pontos Punta Canoas e Boca Grande.

6.3.1.1. Estação CARTAGENA IHO

Como descrito a respeito do software Delft Dashboard, uma de suas ferramentas disponíveis (*Tide Station*) permite a visualização de estações de monitoramento de maré existentes ao longo do globo e que podem ter seus dados extraídos de acordo com o período de interesse, além de serem utilizadas como fonte de dados nas condições de contorno para a simulação. Observando a região costeira de Cartagena, observa-se a existência de somente uma estação, CARTAGENA IHO, a qual faz parte da *International Hydrographic Organization* (IHO) (figura 37).

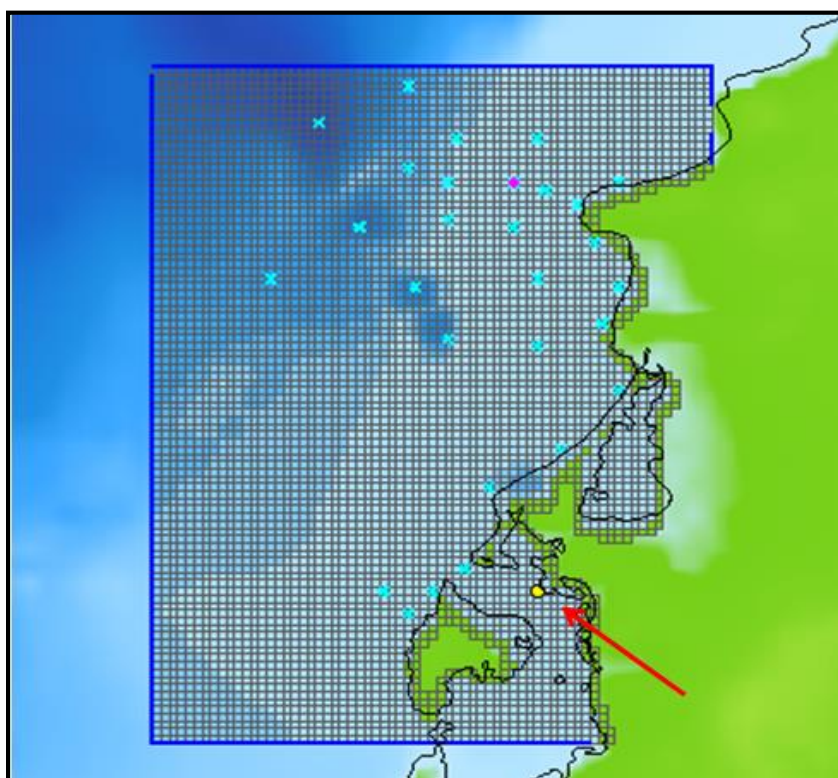


Figura 30 – Estação CARTAGENA IHO (ponto amarelo no mapa), com dados de nível de água utilizados para comparação com os resultados simulados.

Seguindo o período de modelagem para ambos os cenários, foram extraídos os dados desta estação em questão entre 01/05/1998 e 31/07/1998, sendo realizada a comparação estatística com os resultados simulados para o período entre 01/06/1998 e 31/07/1998. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Resumo dos resultados da análise estatística entre os resultados simulados e dados da estação CARTAGENA IHO para nível de água.

Parâmetro	Medido	Cenário 1 (700x700 m)	Cenário 2 (400x400 m)
Média (m)	0,04149	0,00025	0,00028
Variância	0,01129	0,00913	0,00890
Desvio Padrão	0,10624	0,09556	0,09433
Máximo	0,31700	0,24276	0,24000
Mínimo	-0,14800	-0,16727	-0,16377
Erro médio	-	0,04283	0,04308
SKILL	-	0,94011	0,93864

Inicialmente, com base nos resultados do índice SKILL, o qual varia de 0 a 1, sendo 1 o resultado que corresponde a elevada aproximação entre os resultados simulados e medidos, nota-se que ambos os cenários possuem significativa aproximação com os valores existentes na estação CARTAGENA IHO, com resultados de aproximadamente 0,94.

Analisando os demais parâmetros estatísticos se observa que entre os cenários modelados não ocorrem grandes variações entre a média, variância e os valores máximo e mínimo. Comparando estes parâmetros com os obtidos para os dados da estação, verifica-se maior distância entre os valores de média, sendo que enquanto a estação apresenta resultado de 0,04149 m, os cenários 1 e 2 possuem média de 0,00025 e 0,00028 m, respectivamente.

A figura 31, apresentada na sequência, mostra os resultados da estação juntamente com os valores simulados, sendo possível verificar a aproximação dos dados, evidenciada pelo alto valor do índice SKILL. A diferença entre os valores pode ser visualizada na figura 32, onde são apresentados os dados da estação de maré menos os resultados simulados para cada cenário.

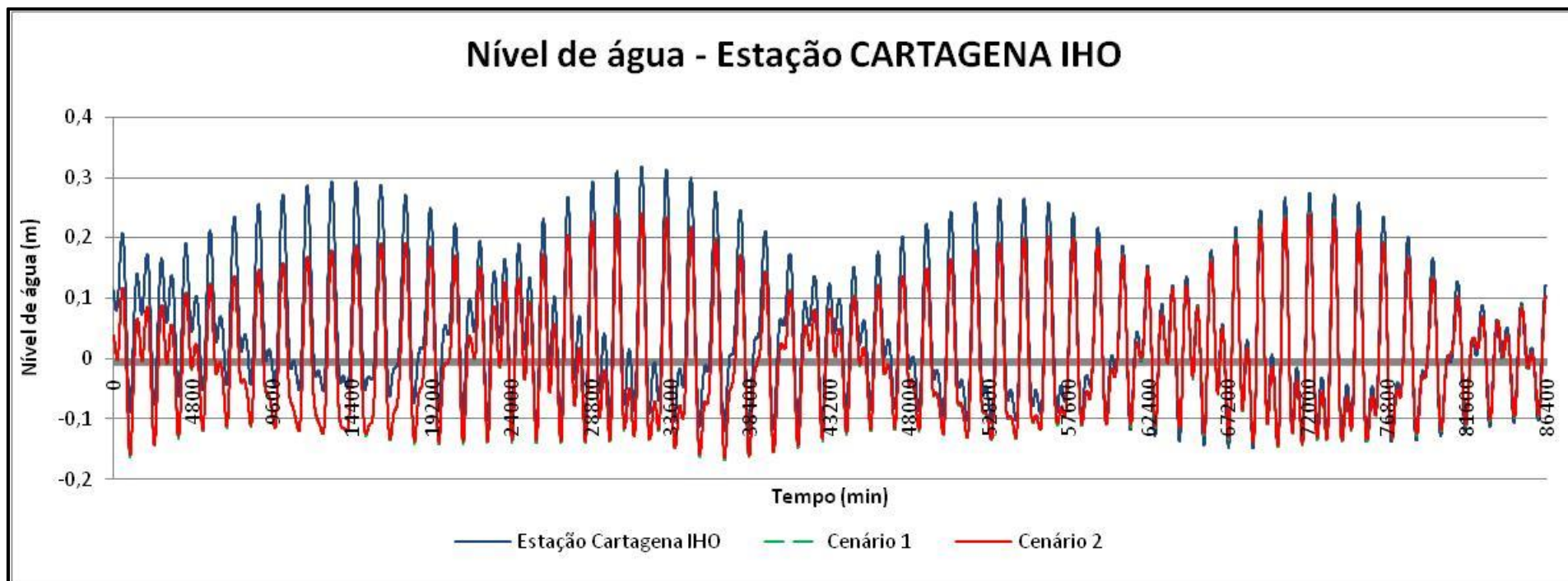


Figura 31 - Variação do nível da água no tempo de acordo com os resultados simulados (cenários 1 e 2) e os dados da estação CARTAGENA IHO.

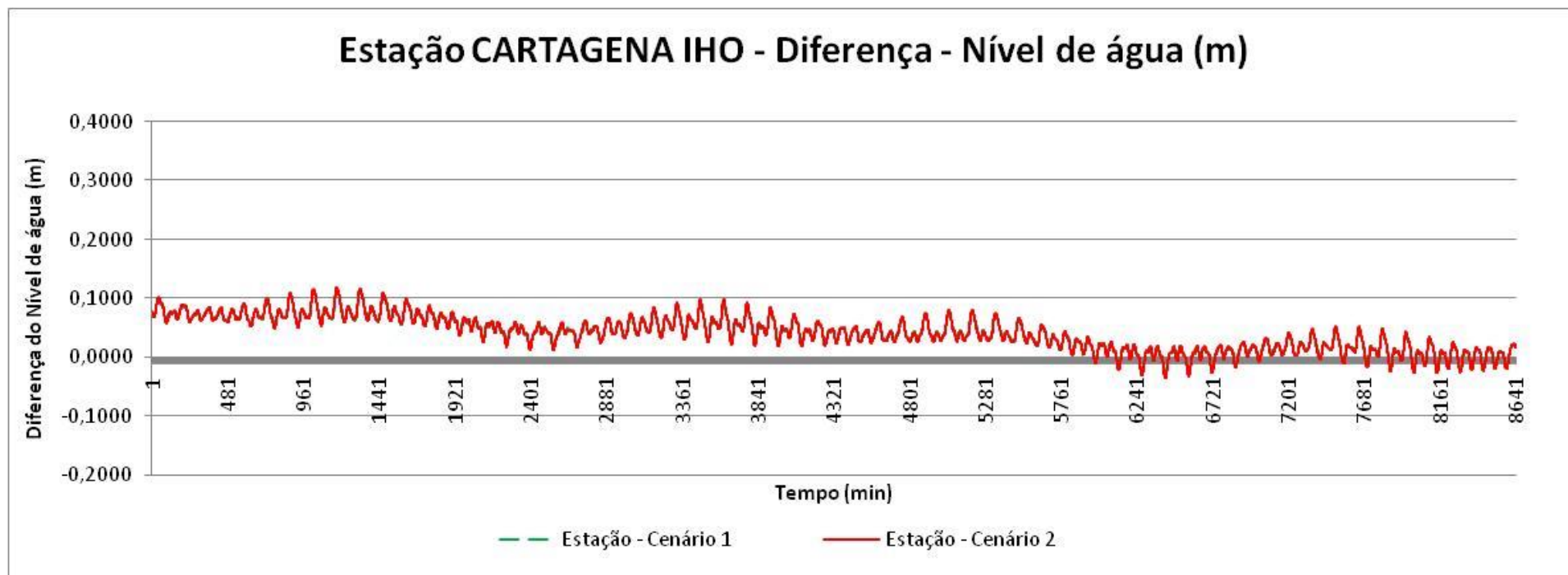


Figura 32 - Diferença entre os dados da estação CARTAGENA IHO e os resultados simulados dos cenários 1 e 2.

Com base nos resultados e gráficos apresentados, nota-se que para a região onde a estação de maré CARTAGENA IHO está inserida, os modelos gerados representam bem as condições de nível da água, sendo observado um alto valor para o índice SKILL além de pequenas diferenças entre os parâmetros calculados. Por meio da figura 39 que apresenta a diferença entre os dados, fica mais evidenciada a pequena variação entre os valores, onde a diferença do nível da água não ultrapassa 0,1 m.

É possível, ainda, verificar que não existem diferenças de fases entre os cenários bem como entre os resultados simulados e registrados na estação, apresentando os mesmos períodos de preamar e baixa mar devido à forçante astronômica, sendo que a diferença mais aparente tem relação com a amplitude do nível da água, que é ligeiramente maior nos dados da estação CARTAGENA IHO, sobretudo nos período iniciais de comparação.

De acordo com estes resultados, pode-se afirmar que o modelo representa de forma satisfatória a forçante astronômica nas variações do nível da água ao longo do tempo, tendo como base os dados da estação de CARTAGENA IHO, que é utilizada como fonte de dados na geração das condições de contorno.

6.3.1.2. Punta Canoas

Destaca-se aqui que os dados de campo foram registrados a cada 10 minutos, no entanto, possuem “falhas” ao longo do período monitorado (01/06/1998 a 31/07/1998). Sendo assim, os cálculos foram feitos somente nas datas e horários em que existiam ambos os resultados, medidos e simulados.

Tabela 8 – Resumo dos resultados da análise estatística entre os resultados simulados e dados medidos em campo para Punta Canoas para nível de água.

Parâmetro	Medido	Cenário 1 (700x700 m)	Cenário 2 (400x400 m)
Média	0,04599	0,00085	0,00037
Variância	0,02274	0,00939	0,00911
Desvio Padrão	0,15078	0,09692	0,09544
Máximo	0,47654	0,23823	0,23846
Mínimo	-0,23346	-0,16383	-0,16348
Erro médio	-	0,14856	0,12612
SKILL	-	0,38365	0,51345

Observando os resultados obtidos na análise estatística feita entre os resultados simulados e os medidos em campo, nota-se que existe grande diferença entre os valores.

Como definido na metodologia, o índice SKILL tende a 1 quando existe uma boa aproximação entre os dados modelados e medidos em campo e, do contrário, quando os dados apresentam grande discordância, o seu valor tende a zero. Analisando inicialmente o resultado deste índice, nota-se que nenhum dos dois cenários apresenta boa aproximação com os dados medidos em campo, sendo o cenário 2 (mais refinado) o que resultou com o maior índice, 0,513.

Os resultados dos cálculos estatísticos somente reforçam o exposto pelo índice SKILL, que é a grande discordância com os dados de campo. Analisando a média, observa-se que enquanto os dados medidos possuem valor médio de aproximadamente 4,6 cm, os resultados médios simulados foram de 0,085 e 0,037 cm para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Os valores máximos e mínimos para os dados medidos também são maiores em magnitude, sendo o valor máximo para o nível de água igual a 0,47

m nos dados medidos e de aproximadamente 0,238 m para ambos os cenários simulados.

A variância e o desvio padrão que, segundo MAGALHÃES; LIMA (2005), são medidas de dispersão dos dados, mostram, também, que os valores registrados em campo possuem maior dispersão, visto que apresentam maiores valores para estes parâmetros.

As figuras 33 e 34 permitem a visualização dos resultados simulados em ambos os cenários juntamente com os dados de campo, possibilitando a confirmação visual do que os cálculos estatísticos mostraram, a discordância entre os valores.

A figura 34, que representa a diferença entre o valor medido e o simulado, mostra que, apesar de grande variação entre os dados, o cenário 2, com malha mais refinada de 400x400 m, apresentou menor diferença com os dados de campo com relação aos resultados do cenário 1, o que já havia sido identificado com o resultado do índice SKILL.

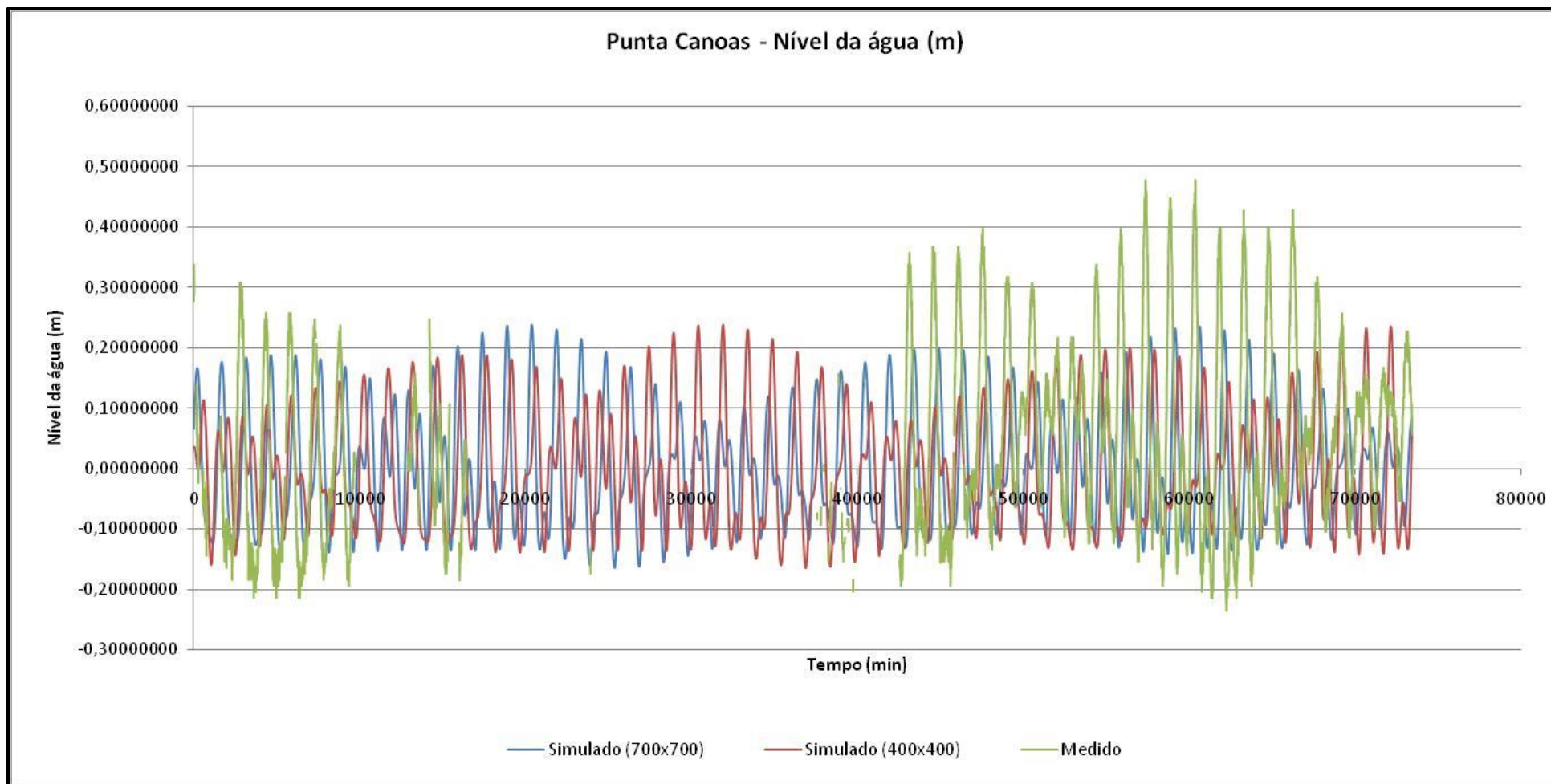


Figura 33 – Variação do nível da água no tempo de acordo com os resultados simulados (cenários 1 e 2) e os dados medidos em campo em Punta Canoas.

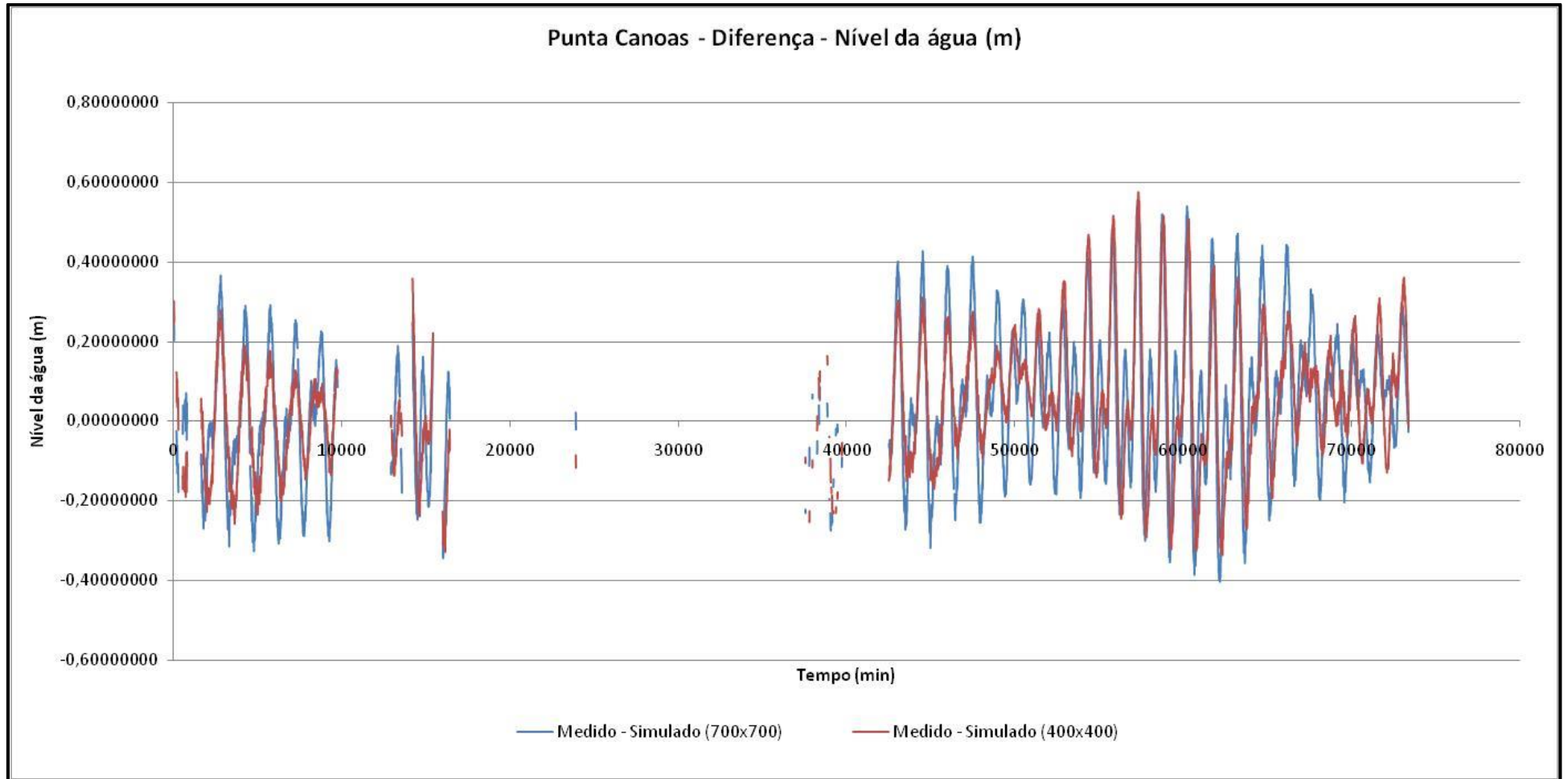


Figura 34 – Diferença entre os dados medidos em campo com os resultados simulados dos cenários 1 e 2 para Punta Caonas.

Segundo o Instituto Hidrográfico da Marinha portuguesa (IH, 2015), a maré astronômica, cuja periodicidade é conhecida e depende exclusivamente de fatores astronômicos, é causada pela atração gravitacional tanto da Lua como do Sol. De acordo com o IH, apesar de a Lua possuir uma massa bem inferior quando comparada com a do Sol, sua influência na maré astronômica é muito superior devido à menor distância que apresenta da Terra.

O nível da água nas regiões costeiras está sempre oscilando em resposta às forçantes tanto astronômicas, como atmosféricas e oceanográficas, em diferentes escalas temporais e espaciais. Tal oscilação consiste no movimento periódico de subida e descida do nível da água obedecendo à força do campo gravitacional, além da possibilidade de oscilação induzida por processos meteorológicos (TRUCCOLO, E. C.; SCHETTINI, A. F., 1999).

Com relação à maré meteorológica, esta pode ser definida como a diferença entre a maré observada e a maré astronômica, tendo origem nas variações da pressão atmosférica, responsável por cerca de 10% do efeito observado, e na troca de *momentum* entre o mar e a atmosfera, responsável pelo restante do efeito. Portanto, é a responsável pelo aumento ou diminuição no nível de água em relação à maré astronômica observada em determinada região e determinado intervalo de tempo, principalmente em períodos longos, visto que a maré meteorológica tem o período de ocorrência de dias (MARONE, E. e CAMARGO, R., 1994).

A periodicidade verificada nos resultados simulados, que se deve à forçante astronômica, não é visualizada da mesma forma nos dados de campo, que apresentam amplitudes bem variadas ao longo do tempo. Tal comportamento pode estar relacionado com a influência de maré astronômica juntamente com a possível presença da maré meteorológica, a qual pode provocar maiores elevações nos níveis de água em determinados períodos de tempo.

Como verificado anteriormente, o modelo representa bem a variação do nível da água no tempo quando comparado com uma das estações que compõe a base de dados de maré disponíveis no software para geração das condições de contorno. Os cenários desenvolvidos para a região costeira de

Cartagena foram criados mediante forçante astronômica, sendo desconsiderada a presença de vento no processo de simulação e, quando comparados os resultados simulados com os dados obtidos em campo, é verificada a grande discordância dos dados.

Frente a este panorama de significativas diferenças entre os resultados simulados e os dados obtidos em campo, pode-se discutir a validade e/ou representatividade dos dados utilizados pelo software *Delft Dashboard* para geração das condições de contorno para toda a área definida para a simulação, bem como a influência dos dados de batimetria utilizados pelo modelo, que também apresentam influência nos resultados de elevação da superfície da água.

6.3.1.3. Boca Grande

Da mesma forma como para Punta Canoas, os dados utilizados foram obtidos entre 01/06/1998 a 31/07/1998 e extraído para o Excel para posterior análise e comparação com os dados de campo. O resumo dos cálculos estatísticos é apresentado na tabela 9.

Tabela 9 - Resumo dos resultados da análise estatística entre os resultados simulados e medidos em campo para nível de água.

Parâmetro	Medido	Cenário 1 (700x700)	Cenário 2 (400x400)
Média	0,00794	0,00023	0,00022
Variância	0,02228	0,00892	0,00893
Desvio Padrão	0,14926	0,09447	0,09451
Máximo	0,45142	0,23983	0,24005
Mínimo	-0,30858	-0,16511	-0,16493
Erro médio	-	0,16467	0,16463
SKILL	-	0,19825	0,19868

Os resultados do índice SKILL, assim como para o ponto em Punta Canoas, mostra que os resultados simulados de nível de água em Boca Grande possuem baixa relação com os dados obtidos em campo, sendo que, em ambos os cenários, os valores foram de aproximadamente 0,198.

Comparando os resultados para variância, desvio padrão, bem como os valores máximo e mínimo, observa-se que os dados de campo possuem resultados bem próximos aos de Punta Canoas. Além disso, como já verificado pelo índice SKILL e observado no ponto descrito anteriormente, os resultados simulados se apresentam muito distantes dos medidos, apresentando um valor médio bem inferior e uma dispersão entre os resultados bem menor que a observada em campo.

As figuras 35 e 36, apresentadas na sequência, permitem a visualização conjunta dos resultados simulados com os valores registrados em campo para a região costeira de Boca Grande. Enquanto que em Punta Canoas foi observada certa diferença entre os dados dos cenários criados, para este ponto em Boca Grande se observa que os resultados simulados em ambos os cenários possuem valores muito próximos, ficando até difícil a distinção entre suas curvas apresentadas.

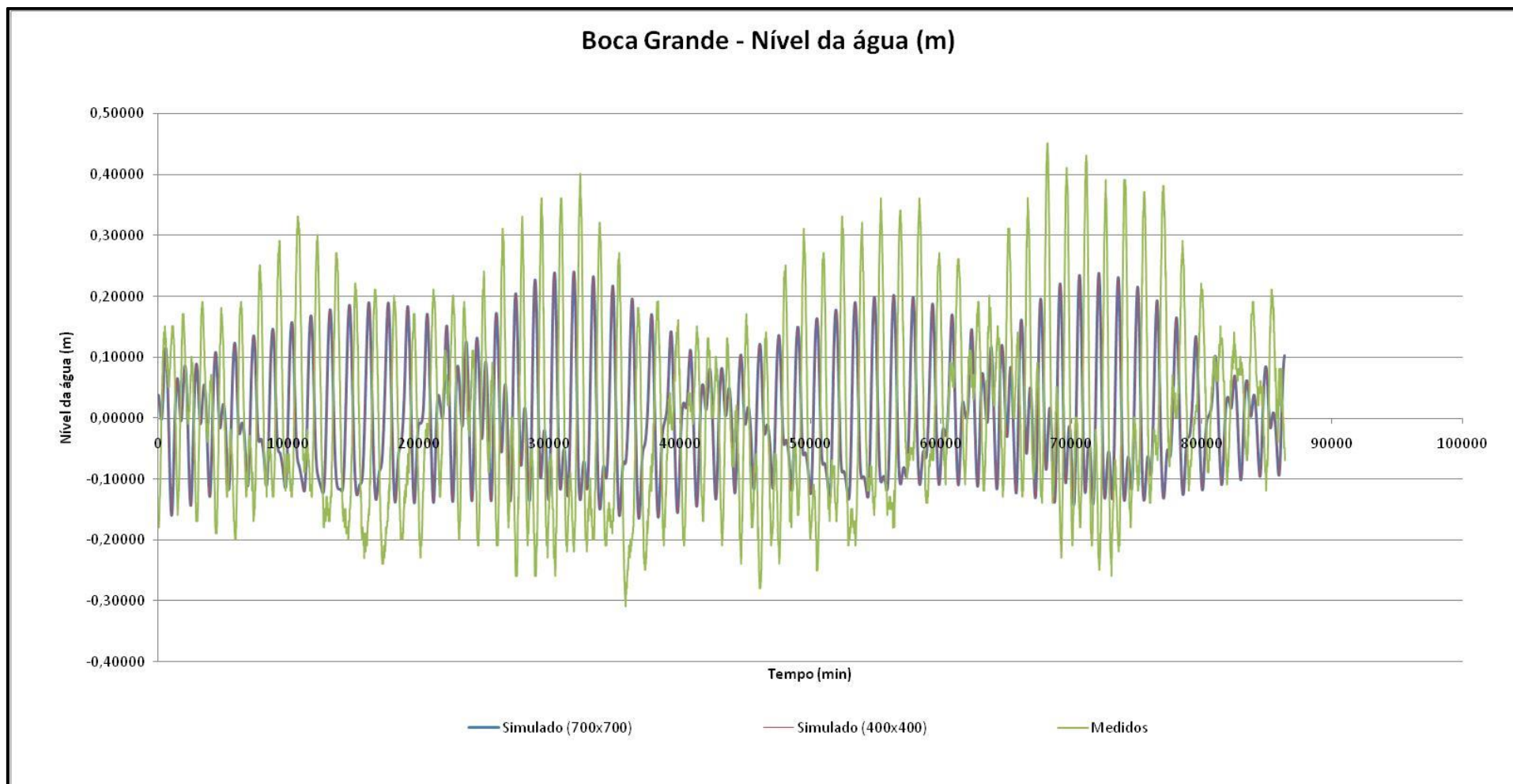


Figura 35 - Variação do nível da água no tempo de acordo com os resultados simulados (cenários 1 e 2) e os dados medidos em campo em Boca Grande.

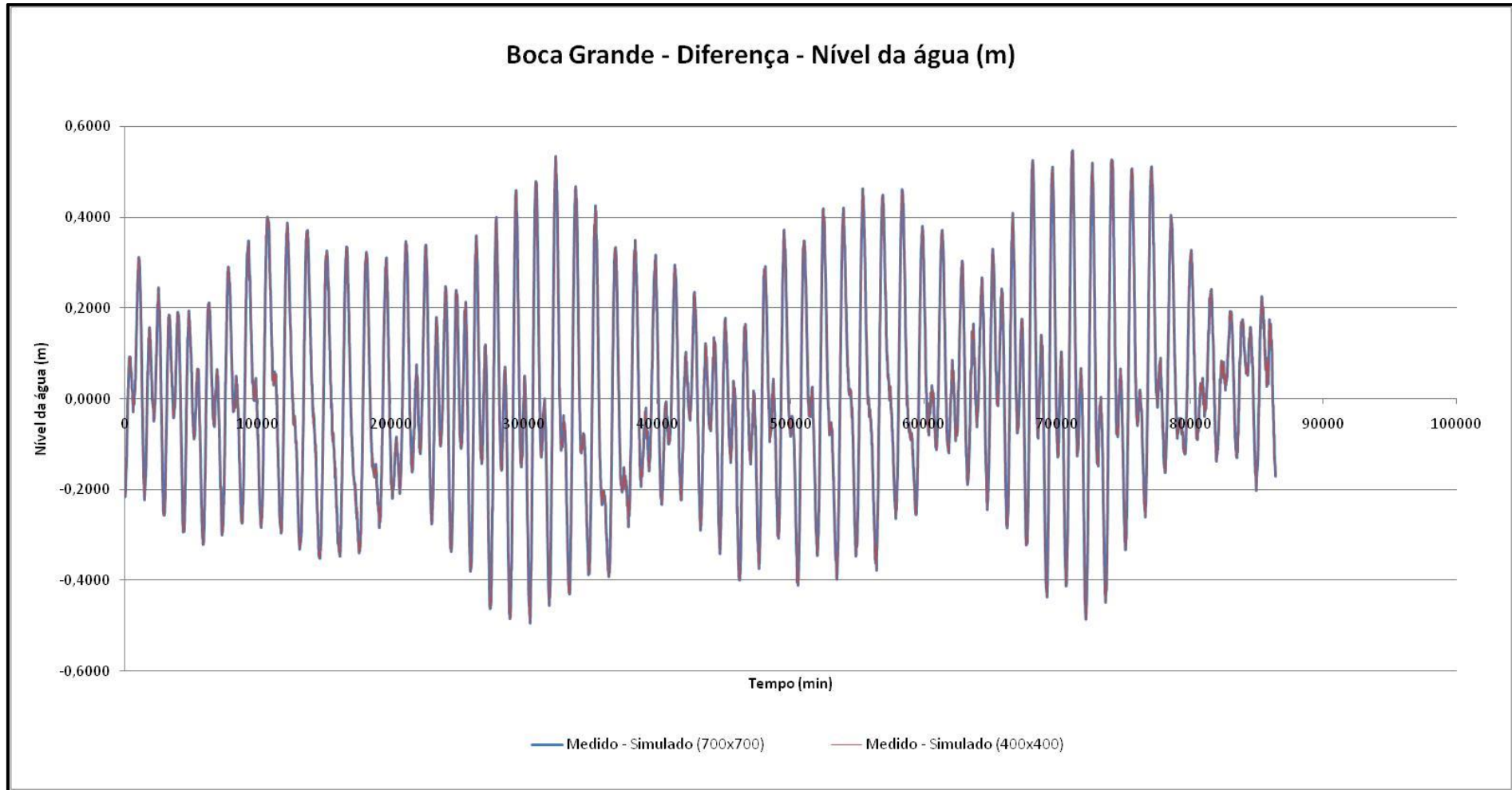


Figura 36 - Diferença entre os dados medidos em campo com os resultados simulados dos cenários 1 e 2 para Boca Grande.

A análise realizada em Punta Canoas, com relação à maré astronômica e meteorológica, pode ser estendida para o ponto Boca Grande, visto que os resultados simulados apresentam o comportamento de subida e descida do nível da água sem apresentar significativas variações entre os valores máximos (preamar) e mínimos (baixa-mar), enquanto que os dados de campo revelam o mesmo movimento oscilatório, porém com maiores variações entre os picos de preamar e baixa-mar. A presença de maré meteorológica, mesmo não sendo a responsável por toda a diferença observada, pode ter certa influência na elevação do nível da água.

A pequena diferença de fase observada entre os resultados simulados para o ponto situado em Punta Canoas não é verificada em Boca Grande, onde em ambos os cenários, os resultados foram muito semelhantes.

Da mesma forma como abordado em Punta Canoas, além das simplificações adotadas para a simulação, os resultados simulados quando comparados com os dados de campo fazem surgir o questionamento quanto à facilidade de aplicação do software e a validade e/ou representatividade dos dados utilizados na geração das condições de contorno, bem como as informações de batimetria.

6.3.1.4. Análise Espacial e Temporal do Nível de Água

Com os dados discutidos anteriormente, verificou-se que os valores simulados quando comparados com os dados da estação CARTAGENA IHO, parte integrante do banco de dados do modelo, apresentavam significativa aproximação entre os dados, além de representar de forma satisfatória a forçante astronômica ao longo do tempo. Já quando a comparação é realizada com os dados obtidos em campo, é observado comportamento diferente, ou seja, grande discordância entre os dados.

Esta diferença poderia estar ligada a distância entre os pontos analisados, bem como as simplificações adotadas no modelo, além da validade dos dados da estação e dos medidos nos locais citados.

Com a finalidade de observar se existe variação do parâmetro nível da água em diferentes regiões da área de interesse, selecionaram-se alguns pontos e foi comparado o comportamento do nível da água. Uma das possibilidades que o software oferece é a inserção de diversos pontos de observação no interior da malha gerada. Nestes pontos serão salvos todos os parâmetros da simulação em alta frequência. Nos demais pontos serão armazenados somente os parâmetros pré-definidos e em frequência menor para evitar a criação de arquivos demasiados grandes.

Além dos pontos inseridos junto a Punta Canoas e Boca Grande, foram, então, marcados diversos outros ao longo de toda a região costeira, bem como em áreas mais distantes. A localização destes pontos pode ser visualizada na figura a seguir.

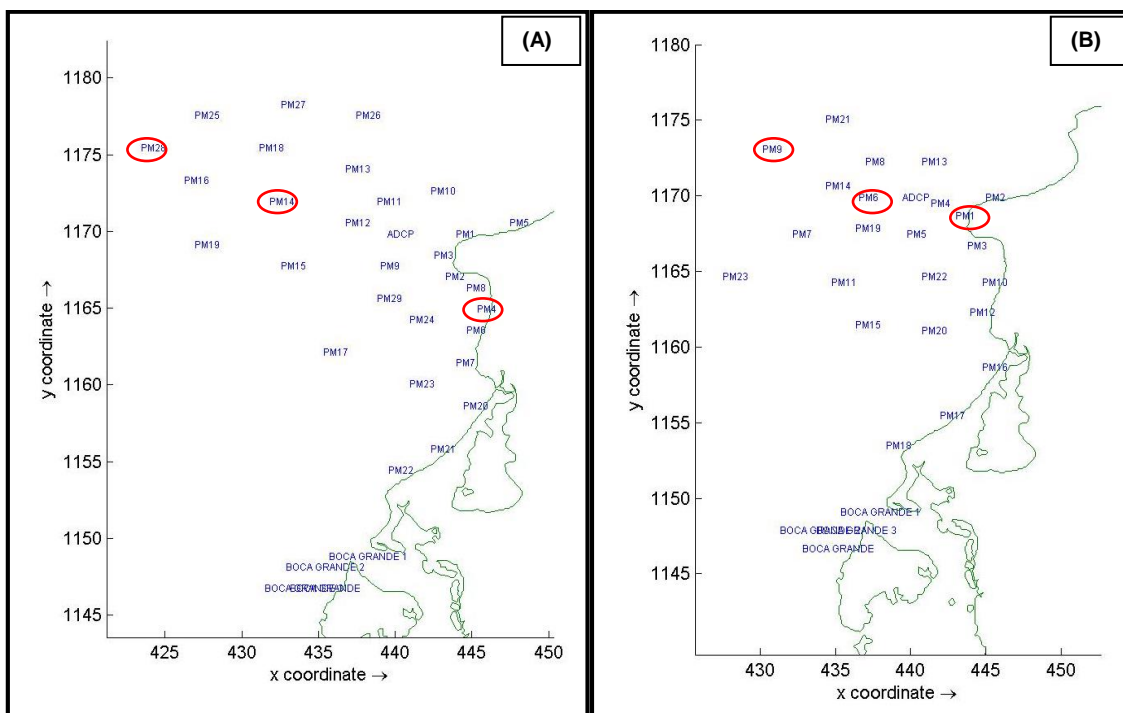


Figura 37 – Localização dos pontos de monitoramento inserido nos dois cenários de modelagem – Cenário 1 – 700x700 (A) e Cenário 2 - 400x400 (B).

Selecionando-se alguns dos pontos distribuídos (destaque em vermelho), pode-se obter o comportamento do nível da água ao longo da área simulada de forma espacial e temporal. As figuras a seguir mostram a variação

do nível da água nos três pontos escolhidos, para cada um dos cenários simulados.

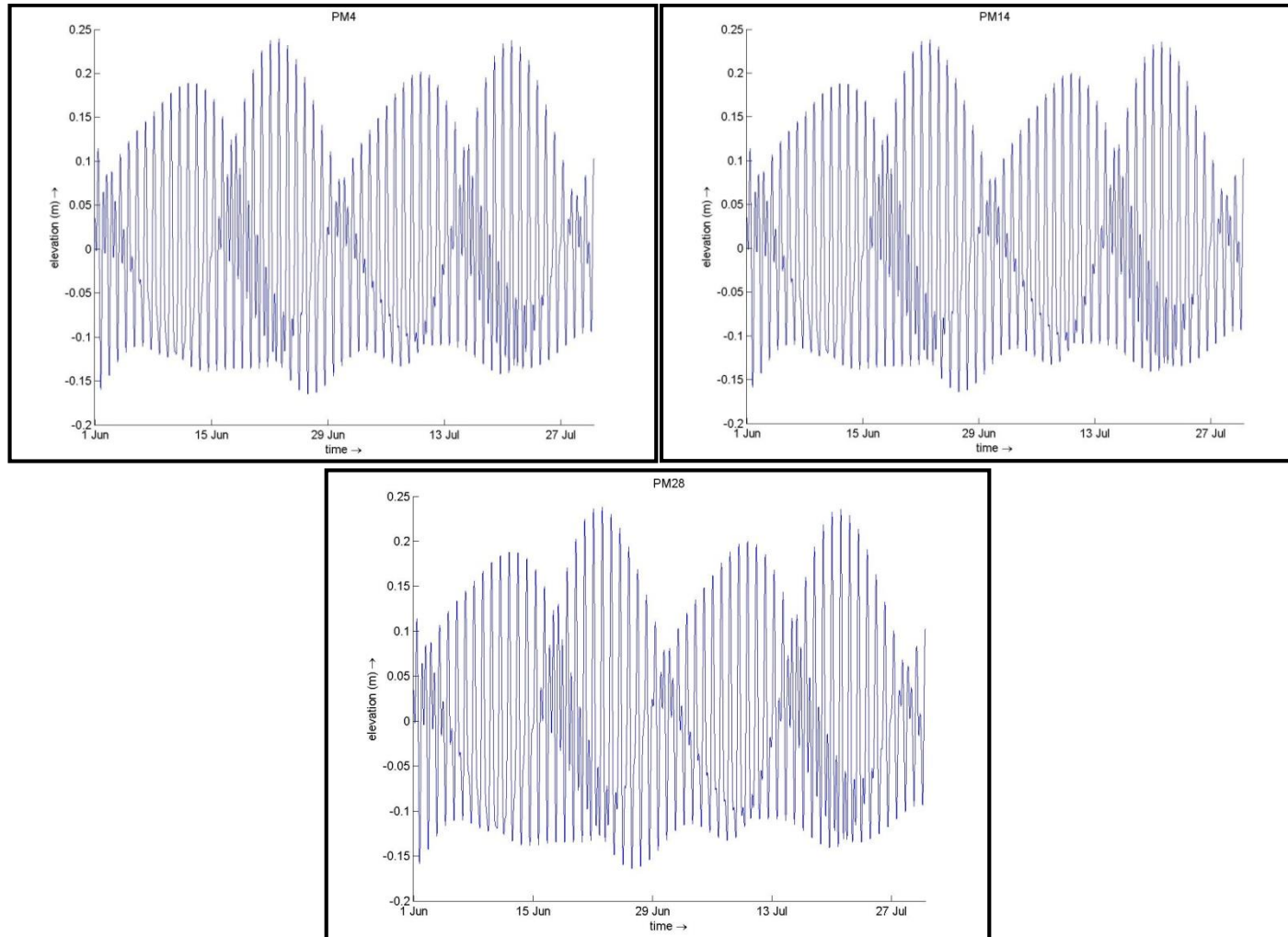


Figura 38 – Variação do nível da água conforme aumenta a distância da região costeira e aumenta a profundidade. Cenário 1 – 700x700. Pontos de monitoramento PM04, PM14 e PM28.

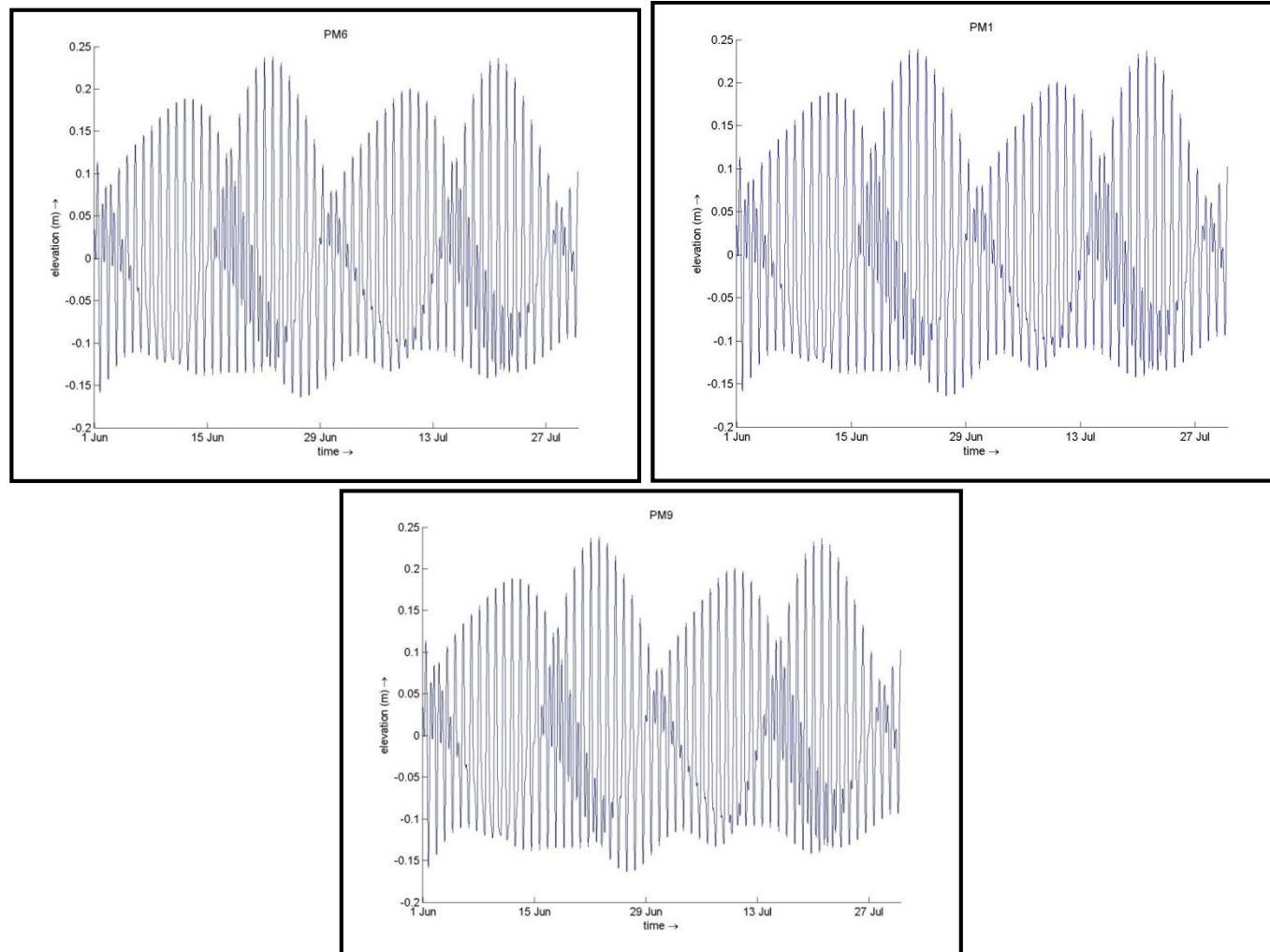


Figura 39 - Variação do nível da água conforme aumenta a distância da região costeira e aumenta a profundidade. Cenário 2 – 400x400. Pontos de monitoramento PM1, PM6 e PM9

Em ambos os cenários, unindo os dados de variação do nível da água nos diferentes pontos em um só gráfico, podemos verificar que a diferença do nível de água conforme aumenta a distância da costa parece não variar significativamente (figura 40 e 41) como esperado.

É possível verificar, também, que existe um comportamento semelhante entre os pontos, com períodos de preamar e baixa mar aproximadamente nos mesmos horários.

Devido aos pontos estarem próximos entre si em uma escala global, não observa-se uma mudança de fase entre os pontos.

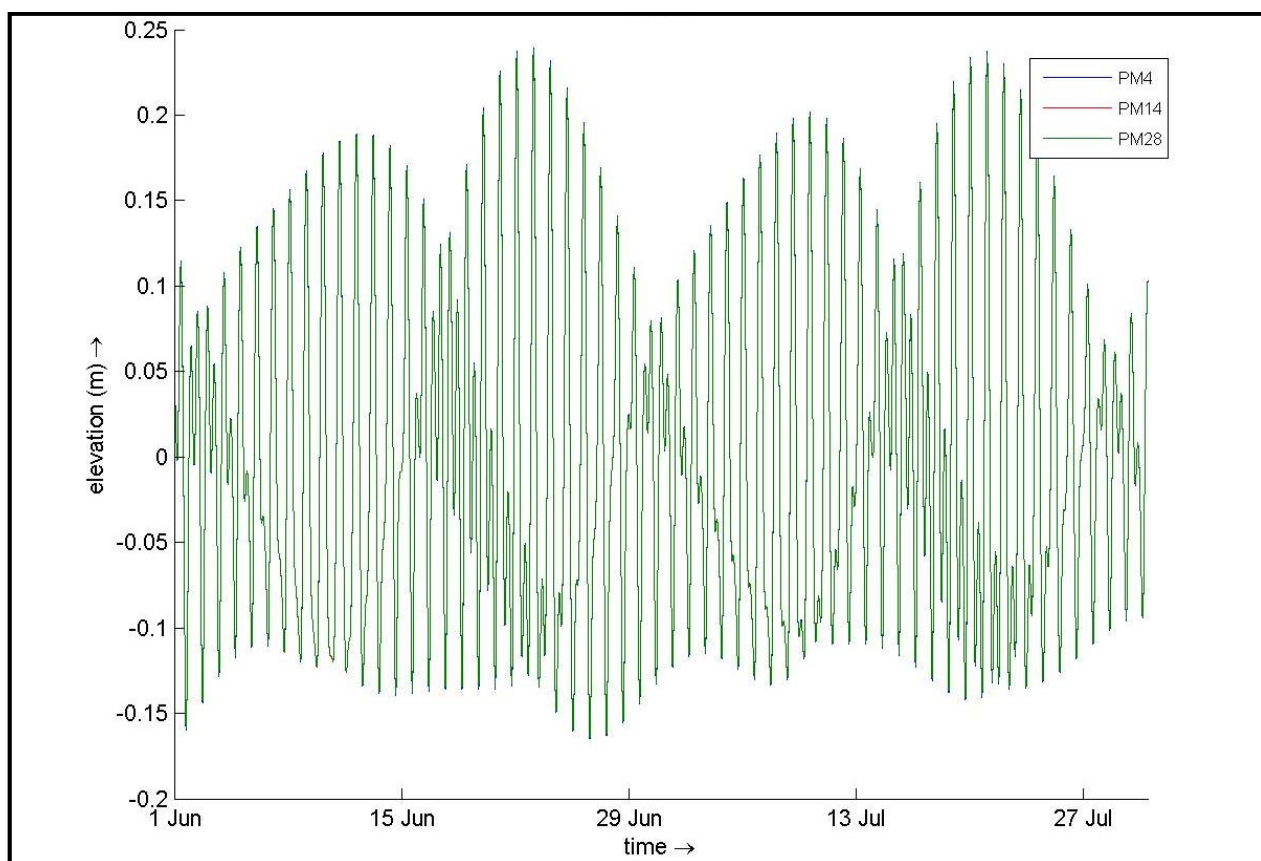


Figura 40 - Variação do nível da água. Cenário 1 – 700x700. Pontos de monitoramento PM4, PM14 e PM28.

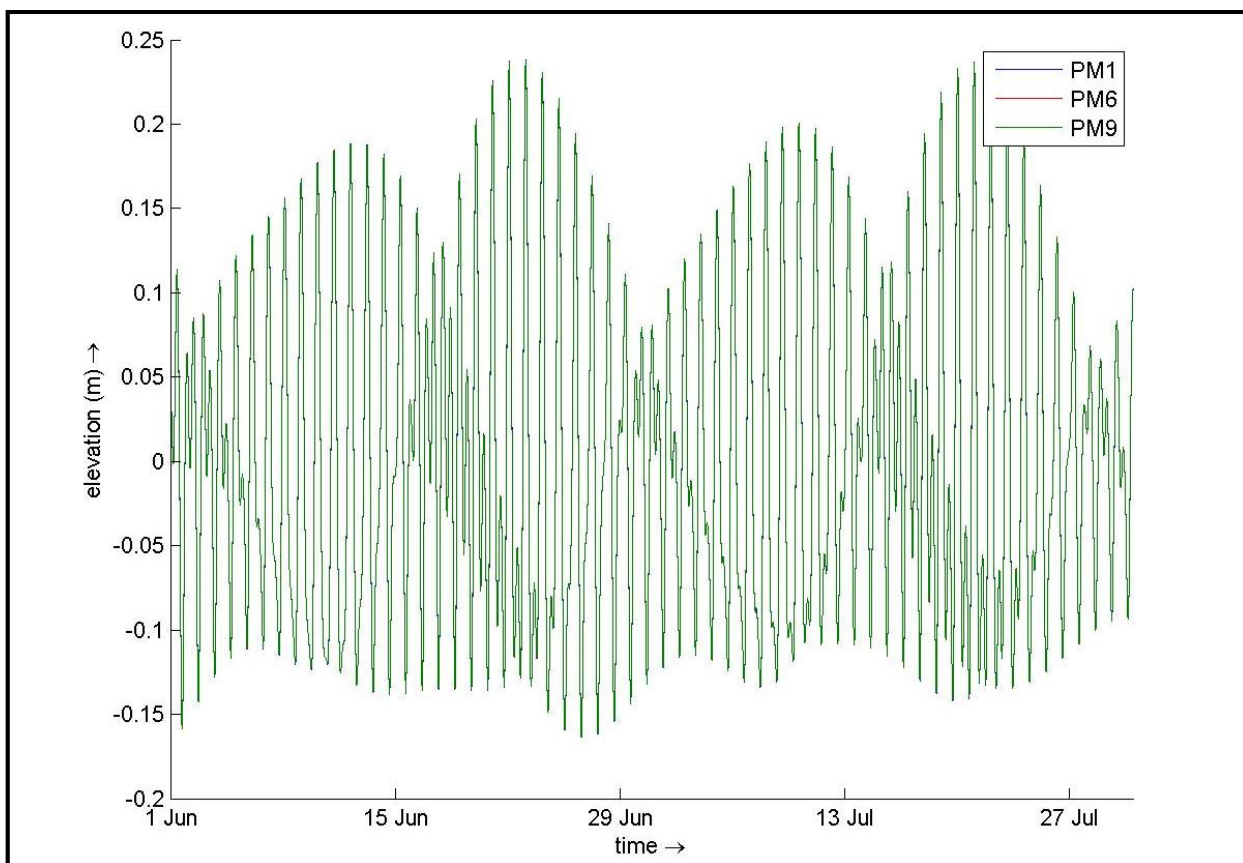


Figura 41 - Variação do nível da água. Cenário 2 – 400X400. Pontos de monitoramento PM1, PM6, PM9.

Ao visualizarmos os dados com uma maior proximidade, vemos que existe apenas uma pequena variação na amplitude entre os pontos analisados (figuras 42 e 43). De uma forma geral, os pontos mais próximos à região costeira possuem, ainda que bem pequena (ordem de centímetros), uma maior variação na amplitude, sendo que podemos identificar que tanto nos picos de preamar como nos de baixa mar, os pontos situados mais próximo à costa, PM4 e PM1 para os cenários 1 e 2, respectivamente, apresentam uma pequena variação.

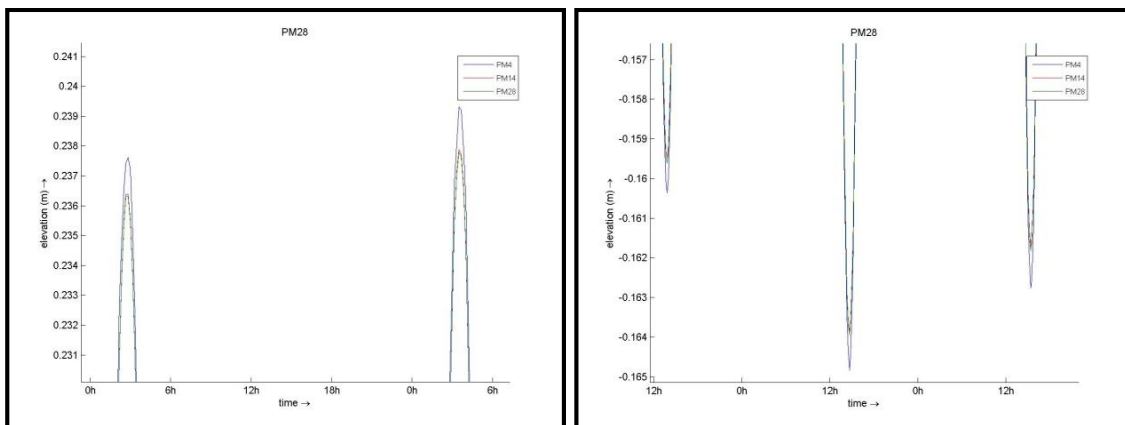


Figura 42 – Variação do nível da água em alguns dos picos de maior e menor valor no cenário 1 – 700x700 m.

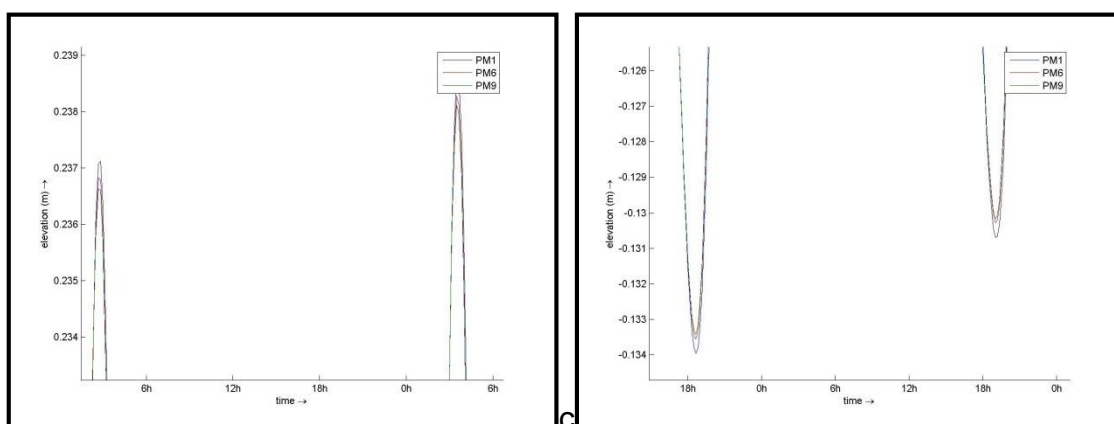


Figura 43 - Variação do nível da água em alguns dos picos de maior e menor valor no cenário 2 – 400x400 m.

Tendo como base estes resultados e as discussões apresentadas, pode-se afirmar que não existe significativa variação no nível da água em diferentes regiões quando comparado os dados de diferentes locais. Portanto, a justificativa da influência da distância nas grandes diferenças entre os resultados simulados e medidos em campo e a estação CARTAGENA IHO não pode ser considerada como verdadeira.

6.3.2. Velocidade de Corrente

Previamente à comparação dos resultados simulados com os dados de campo, foi feita uma análise dos dados de velocidade ao longo da malha gerada para os diferentes cenários. Da mesma forma como para o nível da água, foram escolhidos alguns pontos de monitoramento ao longo da área de interesse a fim de se observar o comportamento da velocidade em diferentes regiões.

A figura 44 mostra, novamente, a distribuição dos pontos de monitoramento em cada cenário confeccionado, bem como os pontos escolhidos (em vermelho) para análise espacial e temporal da velocidade dentro da área de interesse.

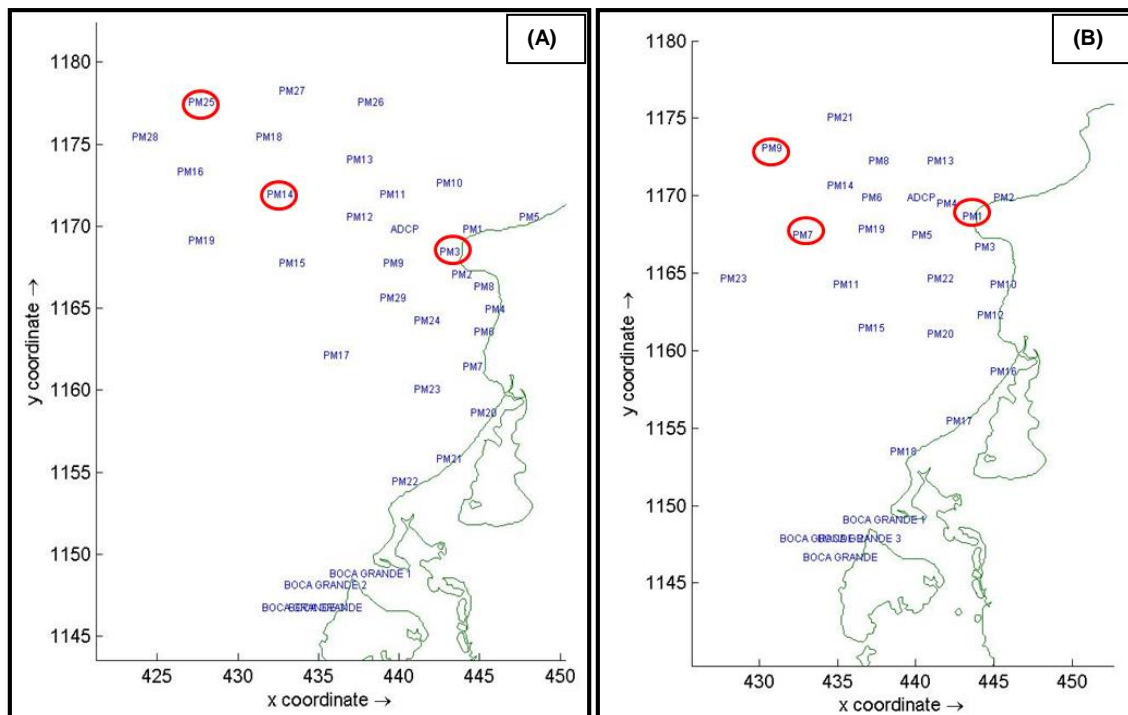


Figura 44 - Localização dos pontos de monitoramento inserido nos dois cenários de modelagem – Cenário 1 – 700x700 (A) e Cenário 2 - 400x400 (B), bem como dos pontos selecionados para análise espacial da velocidade.

As figuras 45 e 46, separadamente para cada cenário, apresentam os resultados simulados das componentes das velocidades nas direções x e y, a velocidade resultante, bem como gráficos de dispersão da velocidade,

possibilitando identificar a direção predominante em cada ponto ao longo do tempo.

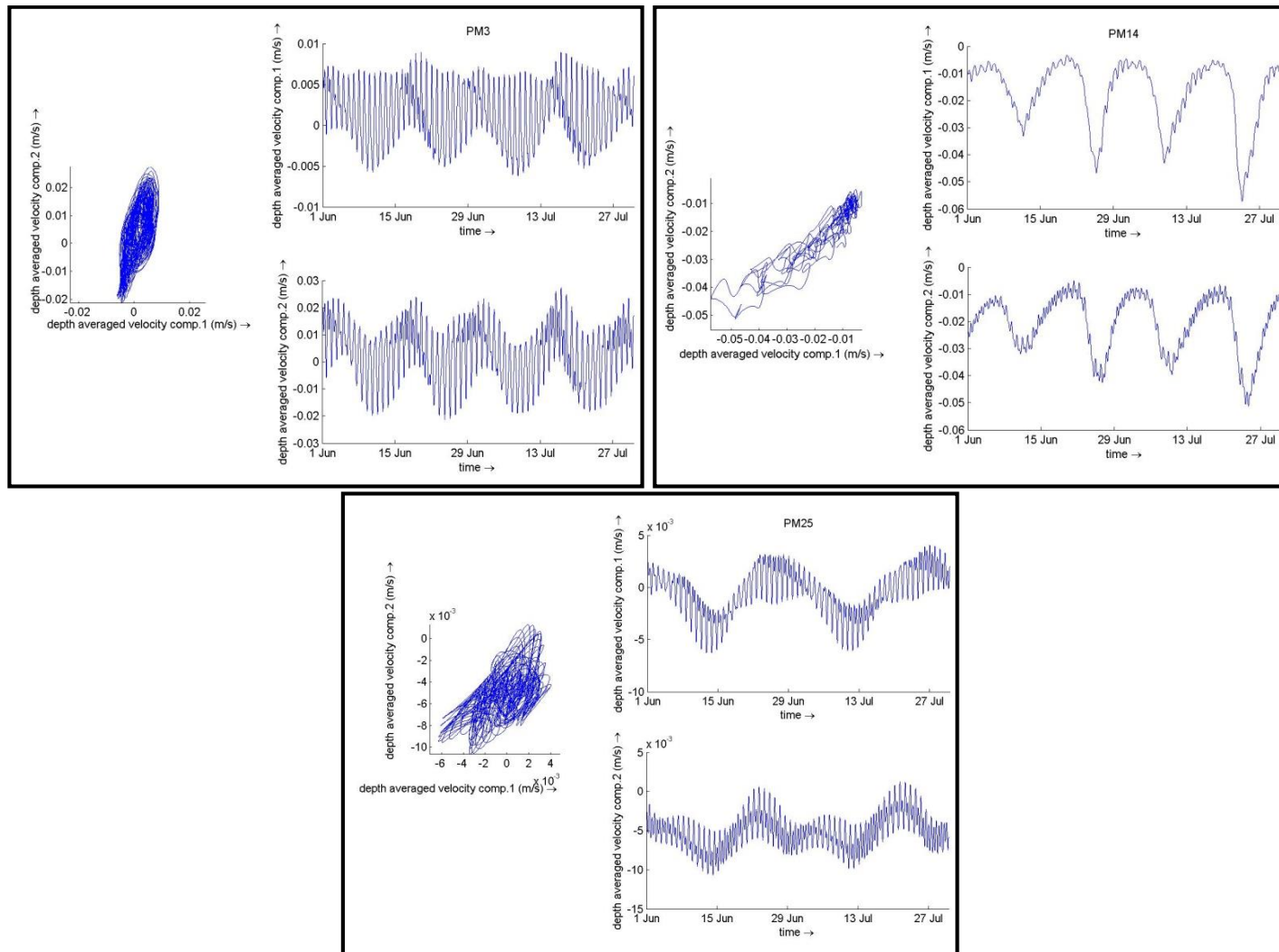


Figura 45 – Gráficos das velocidades nas direções x e y, e gráfico da dispersão da velocidade (Cenário 1).

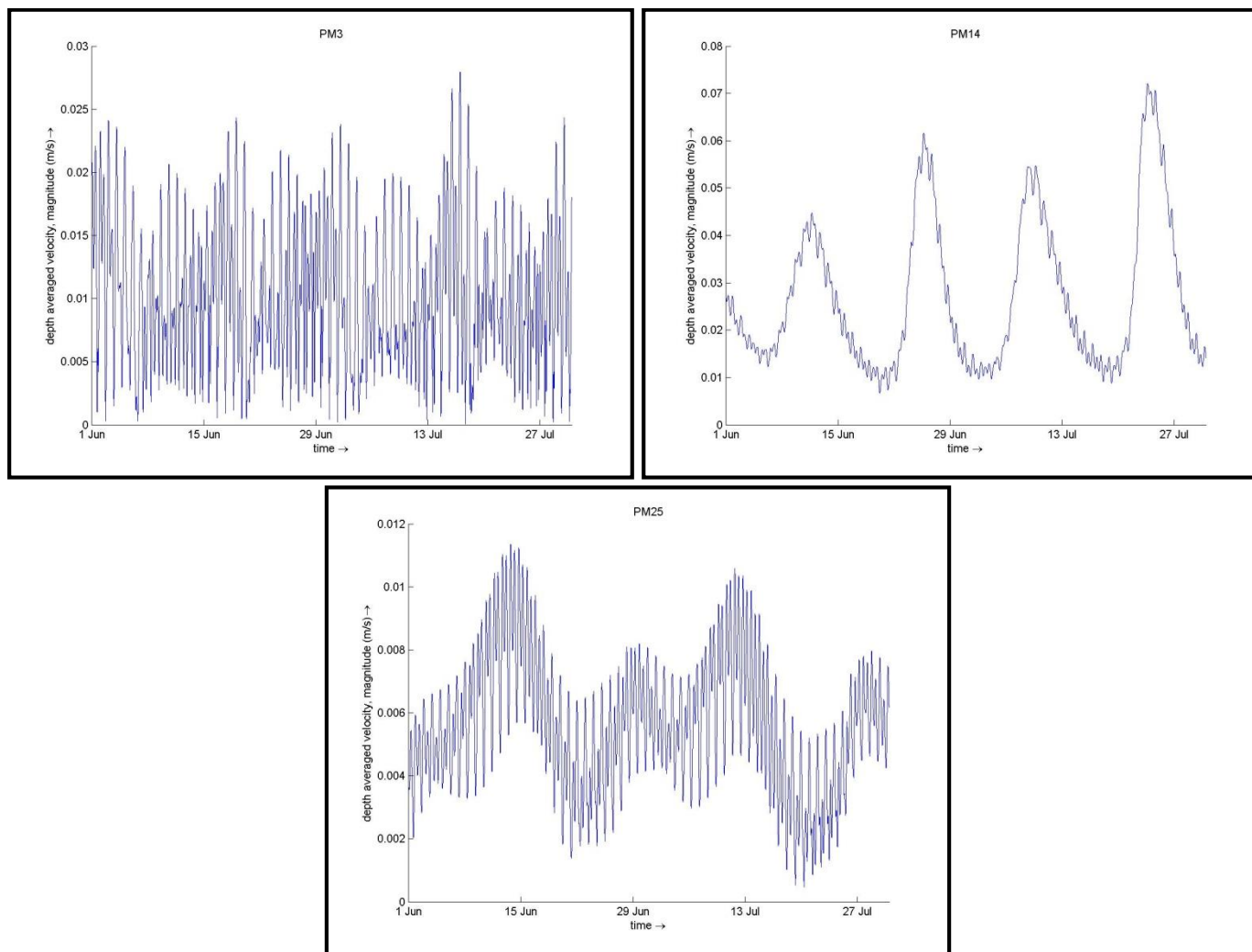


Figura 46 – Gráficos da magnitude da velocidade entre os pontos monitorados (Cenário 1).

Os pontos definidos para análise no cenário 1, com malha retangular de 700 m, corresponderam a PM3, PM14 e PM25. Após a simulação e extração dos dados, foi possível gerar os gráficos da variação das velocidades nas direções x e y, bem como a velocidade resultante e a dispersão da velocidade, indicando a direção predominante deste parâmetro.

Com base nestes resultados apresentados nos gráficos acima, nota-se que as velocidades apresentam comportamento distinto conforme se afastam da costa. O ponto PM3, localizado muito próximo à zona costeira, apresenta uma maior variação da velocidade ao longo do tempo, com muitas variações nos dados e com uma oscilação ligeiramente maior na componente 2 (direção y).

No ponto PM14, um pouco mais afastado da costa, observam-se flutuações mais suaves da velocidade ao longo do tempo, tanto na direção x com na direção y, com picos nas velocidades mais espaçados que no ponto PM3 e apresentando maior magnitude na velocidade resultante. Enquanto o ponto PM3 possui a velocidade resultante variando entre 0 e 0,03 m/s, o ponto PM14 possui variação entre 0 e pouco mais de 0,07 m/s.

Por fim, no ponto PM25, o mais afastado entre os selecionados, é percebida uma maior oscilação na velocidade ao longo do tempo em comparação com o ponto PM14, porém com resultados de menor magnitude, sendo que a velocidade resultante ao longo do tempo, mostrada nos gráficos da figura 19, evidenciam que os dados para este ponto possui os menores valores, variando entre 0 e 0,012 m/s.

Com base nos resultados simulados, pode-se afirmar que os locais mais afastados da região costeira de Cartagena, mais especificamente Punta Canoas, apresentam as velocidades com menores magnitudes e com direção predominante no sentido NE-SW (nordeste – sudoeste). Pontos mais próximos à Punta Canoas e com menores profundidades, como o PM3, apresentam grande flutuação nos dados de velocidade no tempo, com ligeira elevação na magnitude e direção predominante NNE-SSW (nor-nordeste – su-sudoeste).

Os gráficos apresentados na sequência (figuras 47 e 48) são referentes ao cenário 2, com malha retangular mais refinada de 400 m, sendo analisados os pontos PM1, PM7 e PM9, distribuídos de forma similar aos pontos analisados no cenário 1.

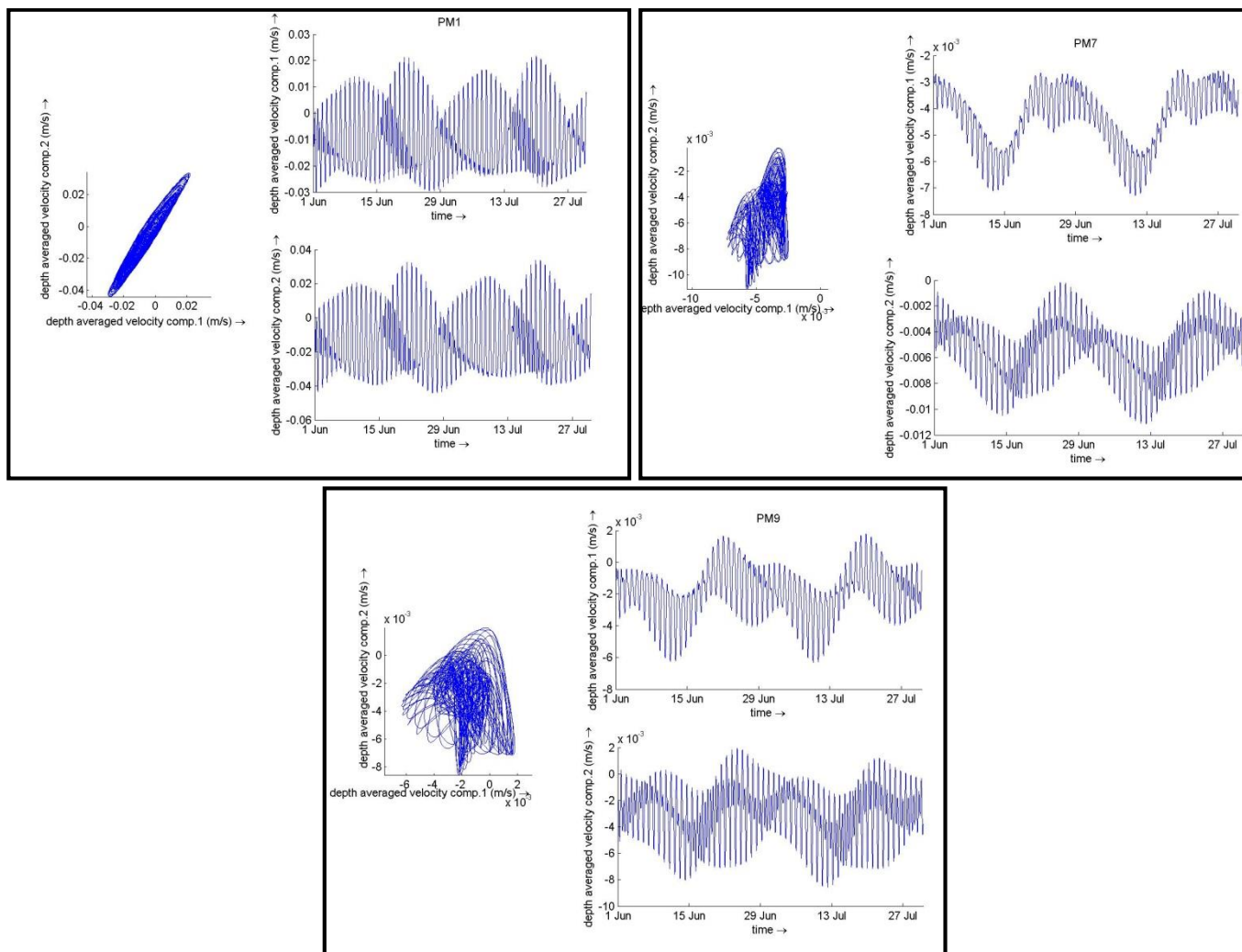


Figura 47 – Gráficos das velocidades nas direções x e y, e gráfico da dispersão de velocidade (Cenário 2).

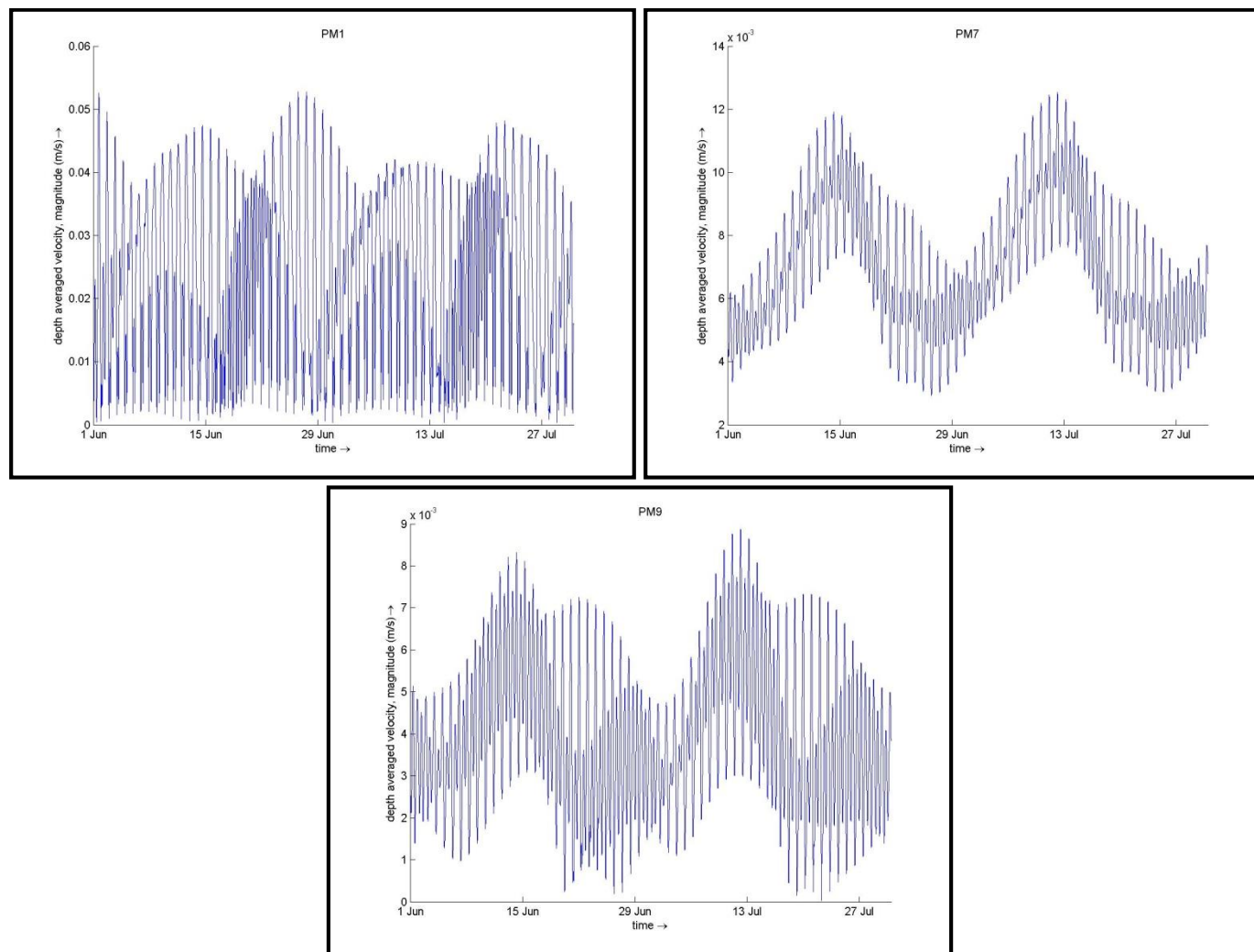


Figura 48 – Gráficos da magnitude da velocidade entre os pontos monitorados (Cenário 2).

Os pontos analisados no cenário 2 possuem o mesmo critério de espacialização dos monitorados no cenário 1, sendo um ponto inserido junto à costa de Punta Canoas (PM1), um próximo ao limite da área de cálculo e bem afastado da região costeira (PM9) e outro situado entre estes dois pontos (PM7).

O mesmo padrão de comportamento observado no cenário q para os pontos anteriores é observado nestes locais, ou seja, o ponto mais próximo à costa apresenta grande variação na velocidade ao longo do tempo e uma direção predominante mais bem definida, NE-SO (nordeste – sudoeste) para o cenário 2.

Enquanto que os pontos situados mais afastados da região costeira possuem oscilações menos intensas que o ponto PM1, além de apresentarem magnitudes de velocidades menores conforme se afastam e uma direção predominante da velocidade no tempo mais difícil de identificar, sendo mais dispersa que nos pontos situados junto à costa.

6.3.3.1. Punta Canoas

Diferentemente dos dados de nível da água, os quais foram analisados em dois pontos distintos, os resultados simulados para velocidade da água são comparados com os de campo somente na região de Punta Canoas, no ponto nomeado como 'ADCP'.

Na tabela 10 é apresentado o resumo dos resultados obtidos nos cálculos estatísticos realizados na comparação dos resultados simulados em cada cenário com os dados registrados em campo durante o intervalo de interesse definido (01/06/1998 – 31/07/1998).

Tabela 10 – Resumo dos cálculos estatísticos realizados entre os resultados simulados e dados medidos em campo para ambos os cenários modelados.

Parâmetro	Medido (cm/s)			Cenário 1 (cm/s)			Cenário 2 (cm/s)		
	Vx	Vy	V	Vx	Vy	V	Vx	Vy	V
Média	2,99	6,99	14,94	0,21	0,76	1,61	-2,00	-3,29	4,01
Variância	57,38	217,15	109,13	1,12	1,53	0,69	2,48	1,40	2,60
Desvio Padrão	7,58	14,74	10,45	1,06	1,24	0,83	1,57	1,18	1,61
Máximo	34,80	59,45	66,64	2,58	3,15	3,62	1,37	-0,21	8,10
Mínimo	-44,93	-49,23	0,39	-2,39	-1,81	0,02	-5,54	-6,10	0,38
Erro médio	-	-	-	6,48	13,05	13,38	7,63	14,61	11,41
SKILL	-	-	-	0,30	0,35	0,43	0,37	0,42	-0,09

Observando os parâmetros estatísticos calculados para os dados medidos e simulados, nota-se que existe uma grande diferença entre os mesmos. O índice SKILL, que representa a aproximação dos dados modelados com os medidos, reforça tal observação, possuindo resultados inferiores a 0,45 entre os dois cenários, sendo que quanto mais próximo de zero, maior a discordância entre os valores.

Analisando inicialmente a componente x da velocidade, verifica-se que os dados registrados em campo apresentam velocidade média de aproximadamente 3,0 cm/s, no sentido leste devido o sinal positivo, com uma grande dispersão entre os valores registrados no tempo, tendo uma variância de 57,38 cm/s. Para esta componente da velocidade, foi obtido um valor médio de 0,21 e -2,00 cm/s para os cenários 1 e 2, respectivamente, além de uma variância muito inferior à obtida nos dados de campo.

Os dados para a componente y da velocidade apresentam o mesmo comportamento, ou seja, os dados de campo possuem magnitudes maiores e com grande variância entre os dados, enquanto os cenários modelados mostram magnitudes bem inferiores e com variância bem inferior.

A grande diferença entre os resultados também é vista quando comparado os valores máximos e mínimos. Enquanto os dados de campo possuem velocidade máxima resultante (V) na ordem de 66 cm/s, os cenários 1 e 2 apresentam valores de 3,62 e 8,10 cm/s, respectivamente.

Comparando somente os resultados alcançados entre os cenários, nota-se que o refinamento da grade, de 700 para 400 m, aliado ao passo temporal definido, de 1 para 0,5 min, fez com que os resultados fossem bastante distintos, tanto entre as componentes da velocidade, como na velocidade resultante, sendo verificado maiores magnitudes do parâmetro no cenário 2.

Os gráficos apresentados a seguir, para a componente x, y e a velocidade resultante, compilam os resultados modelados nos cenários 1 e 2 com os dados registrados em campo, permitindo a comparação visual dos resultados, a diferença dos resultados simulados com os medidos e a dispersão da velocidade no tempo.

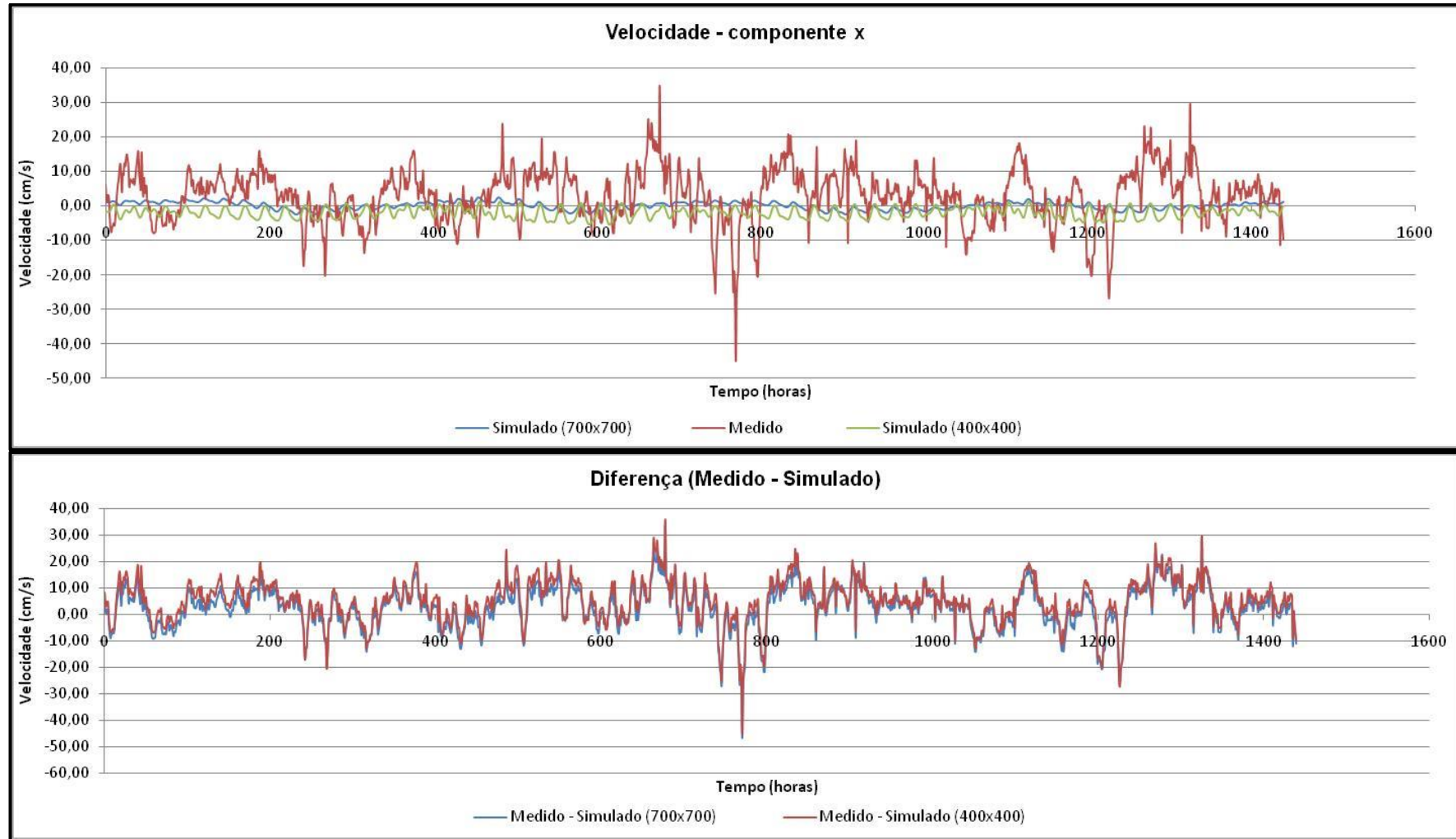


Figura 49 – Comparação da variação da componente x da velocidade ao longo do tempo entre os resultados simulados e medidos.

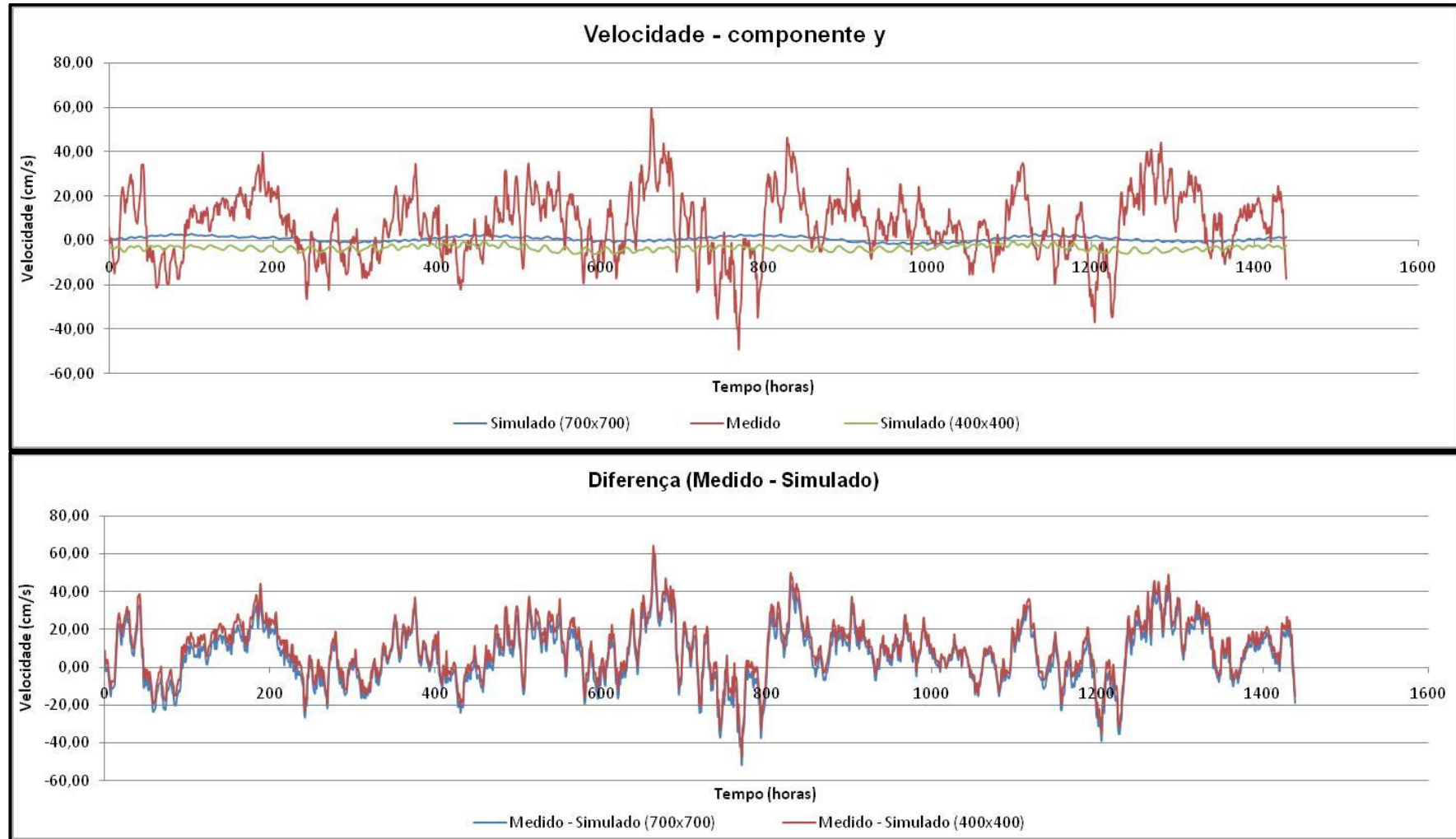


Figura 50 - Comparação da variação da componente x da velocidade ao longo do tempo entre os resultados simulados e medidos.

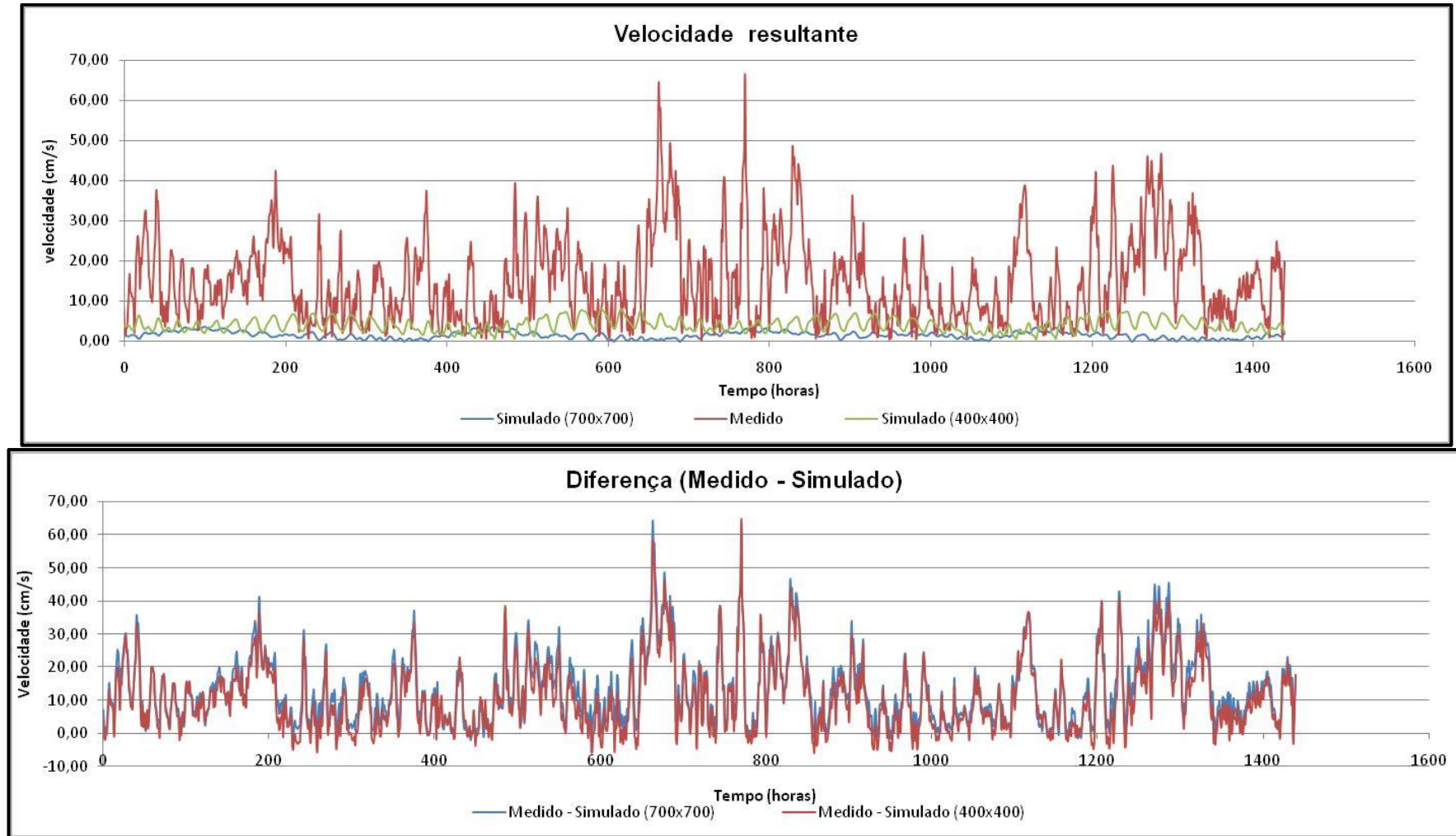


Figura 51 – Comparação da variação da velocidade resultante ao longo do tempo entre os resultados simulados e medidos.

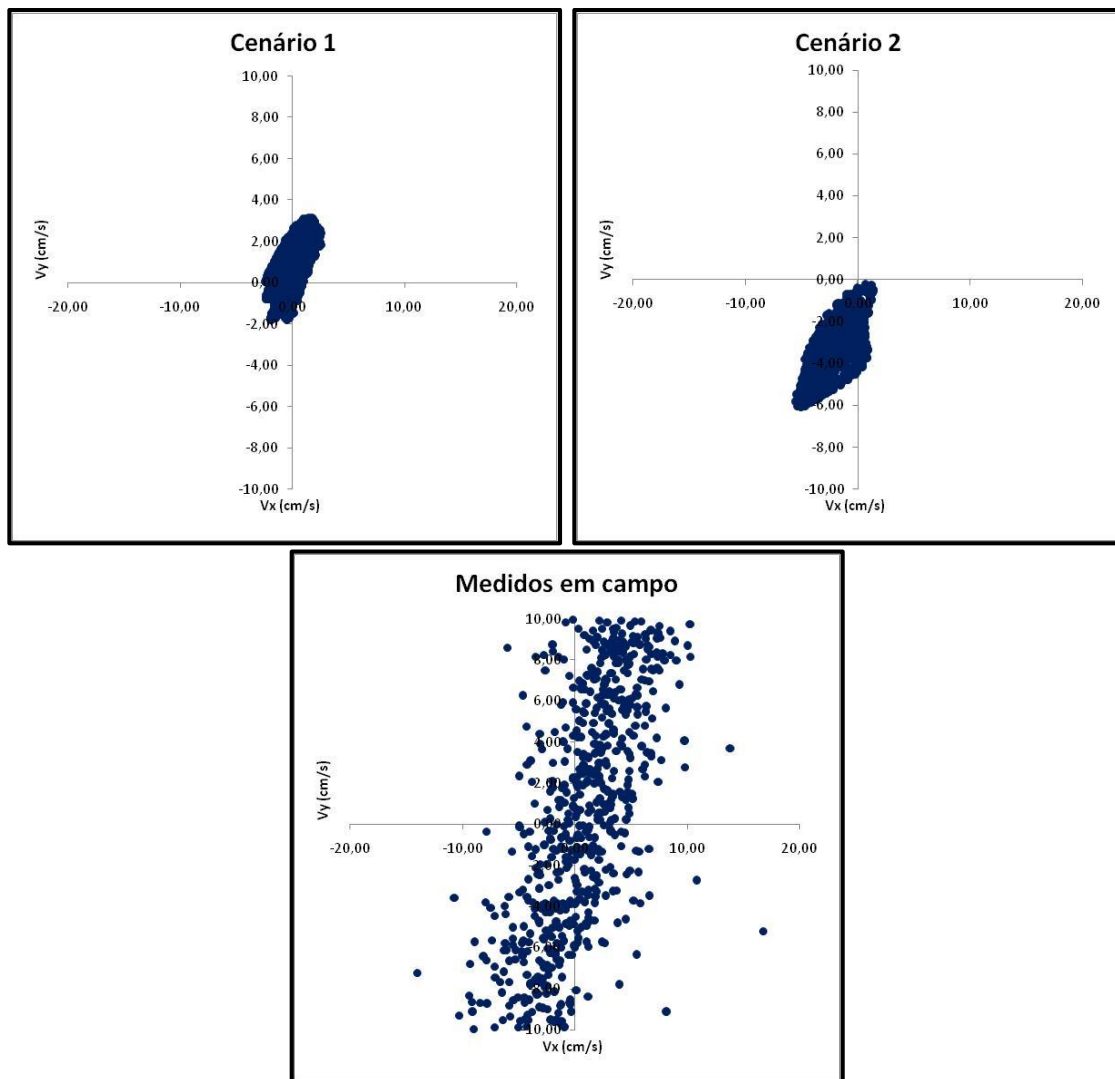


Figura 52 – Gráficos de dispersão da velocidade nos cenários simulados e nos dados medidos em campo.

A visualização dos gráficos, aliada aos resultados estatísticos apresentados anteriormente, reforça o que já foi discutido. Independente da componente da velocidade, os resultados simulados não apresentam boa aproximação com os dados de campo.

Nas figuras 49 e 50, que apresentam as variações das componentes x e y da velocidade, respectivamente, é possível visualizar que nos dados medidos (curvas em vermelho) as variações ao longo do tempo são significativamente maiores que as simuladas (curvas verde e azul), as quais ficam inseridas na faixa central do gráfico, com baixos valores máximos e mínimos.

A velocidade resultante, que é a soma vetorial entre as componentes x e y da velocidade, possui o mesmo padrão de grande variação nos dados medidos, chegando a magnitudes de quase 70 cm/s, ao mesmo tempo em que os resultados simulados tendem a permanecer na base do gráfico, mesmo sendo observado que os dados do cenário 2 possuem valores relativamente maiores que os obtidos no cenário 1.

Com relação aos gráficos de dispersão da velocidade apresentados na figura 52, é possível perceber que a direção predominante entre os resultados simulados e medidos fica entre NNE-SSW (nor-nordeste – su-sudoeste), no entanto os dados de campo mostram grande dispersão ao longo do tempo, diferentemente dos simulados, que por possuírem menores velocidades resultantes, tenderam a se concentrar mais.

Quando o nível de água está mais elevado, ou seja, período de preamar, espera-se que a velocidade siga o mesmo comportamento, apresentando maiores magnitudes. De acordo com os resultados de velocidade de corrente, as magnitudes simuladas ficaram bem inferiores às obtidas em campo. Isso pode ser justificado pelo fato do modelo considerar, para geração das condições de contorno, dados de estações de maré como os da CARTAGENA IHO, também inferiores aos registrados em campo.

O modelo representa bem a forçante astronômica e as variações do nível da água tendo os dados desta estação como base e apresenta resultados de velocidades proporcionais a esses níveis de água. Por esse motivo, aliado às simplificações adotadas pelo modelo, os dados de velocidade simulados podem ter ficado inferiores aos alcançados em campo, apresentando grande discordância entre eles.

Assim como para o nível da água, os dados de velocidade de corrente podem apresentar diferenças devido às influências da presença de vento e também de correntes marítimas de grande escala existentes na região, as quais não foram consideradas para a simulação.

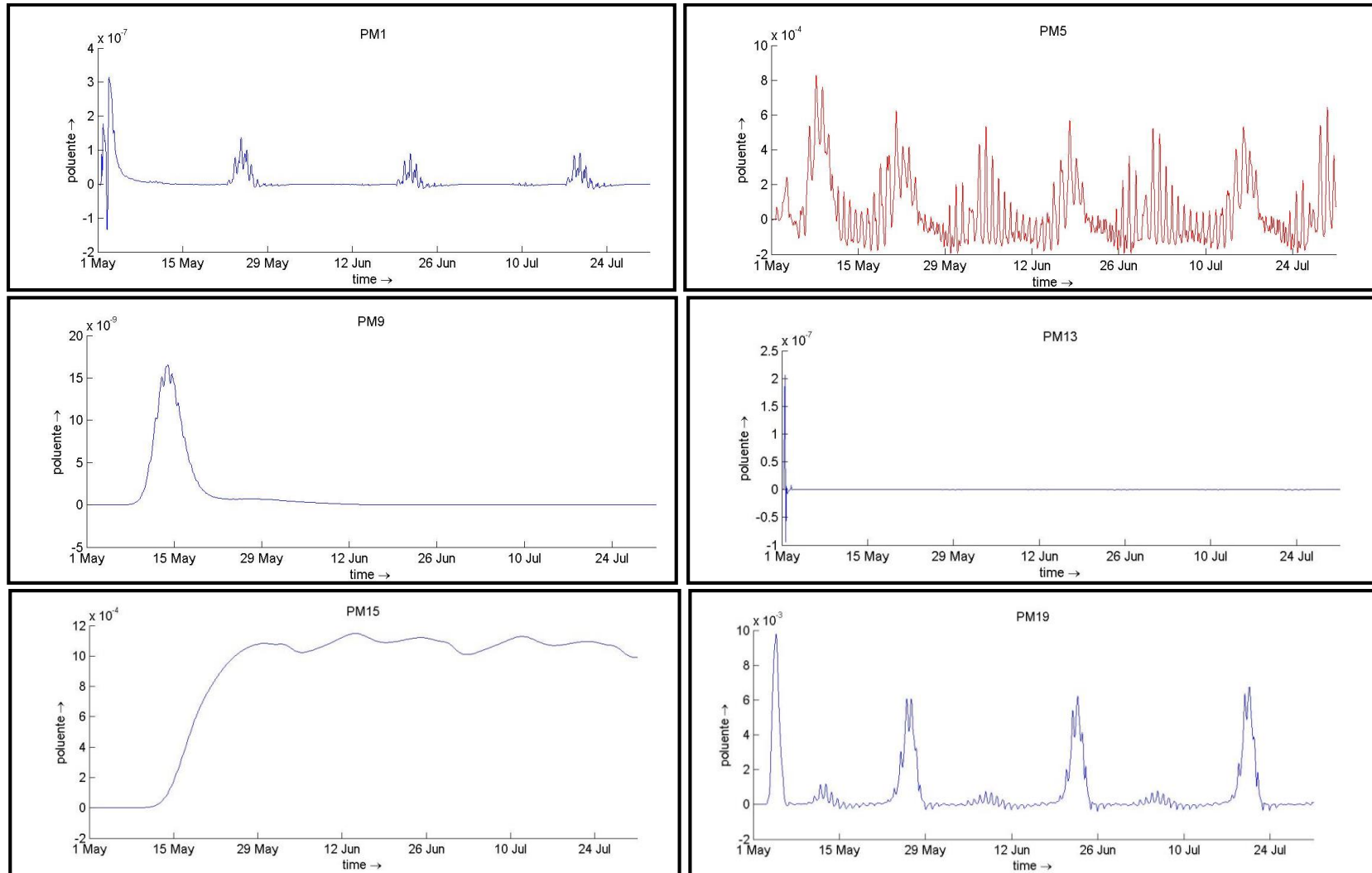


Figura 54 – Variação da concentração do poluente (em kg/m^3) em função do tempo em cada ponto analisado.

Os pontos escolhidos, como visualizado na figura 53, ficam inseridos em todo o entorno do ponto de lançamento (ADCP), permitindo uma visualização temporal e espacial do comportamento de dispersão do poluente na região costeira.

Analisando somente a variação da concentração do poluente nos pontos, verifica-se que cada local possui uma característica distinta quanto ao comportamento ao longo do tempo e a ordem de grandeza da concentração. Os pontos PM1, PM5 e PM19 são os únicos que apresentam oscilações ao longo do tempo monitorado, no entanto, o ponto PM1 possui picos de concentração na ordem de grandeza de 10^{-7} kg/m³ e bem espaçados temporalmente, enquanto o ponto PM5 apresenta oscilações mais freqüentes e na ordem de grandeza de 10^{-4} kg/m³. No ponto PM19 as variações são semelhantes à do Pm1, mais espaçadas temporalmente, mas apresentam a maior ordem de grandeza entre todos os pontos analisados, 10^{-3} kg/m³.

Dos pontos restantes, verifica-se que as concentrações se estabilizam no tempo e não variam significativamente como nos demais locais. O ponto PM9, apesar do pico inicial na ordem de 10^{-9} kg/m³, reduz sua concentração para valores nulos (0,0 kg/m³), assim como ponto PM13. Diferente destes dois, no PM15, a concentração se estabiliza após certo período com resultados entre 10 e 12×10^{-4} kg/m³.

Além do coeficiente de difusão da substância, da massa do poluente, bem como a distância entre os pontos de monitoramento e o local de lançamento, os termos advectivos, relacionados com a maré (nível da água) e velocidade, também influenciam nos resultados de concentração modelados. Sabendo, então, da utilidade que os dados de velocidade possuem na análise da dispersão do poluente, foi analisada a velocidade no local do lançamento para auxiliar no entendimento da dispersão do poluente.

Os gráficos apresentados a seguir representam as informações de velocidade simuladas para o ponto de lançamento (ADCP) permitindo visualizar a variação ao longo do tempo bem como a direção predominante da velocidade resultante.

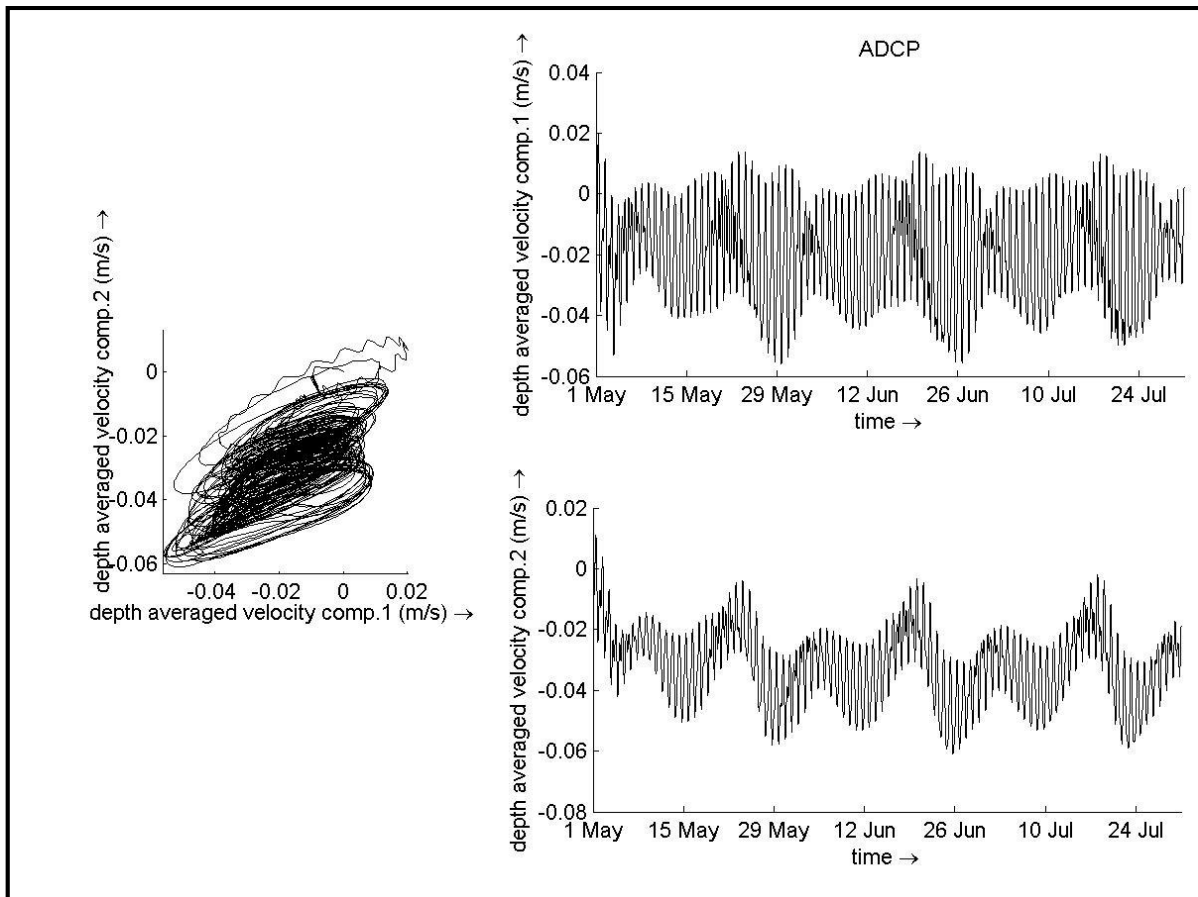


Figura 55 – Gráficos das velocidades nas direções x e y, e gráfico da dispersão da velocidade – Ponto ADCP.

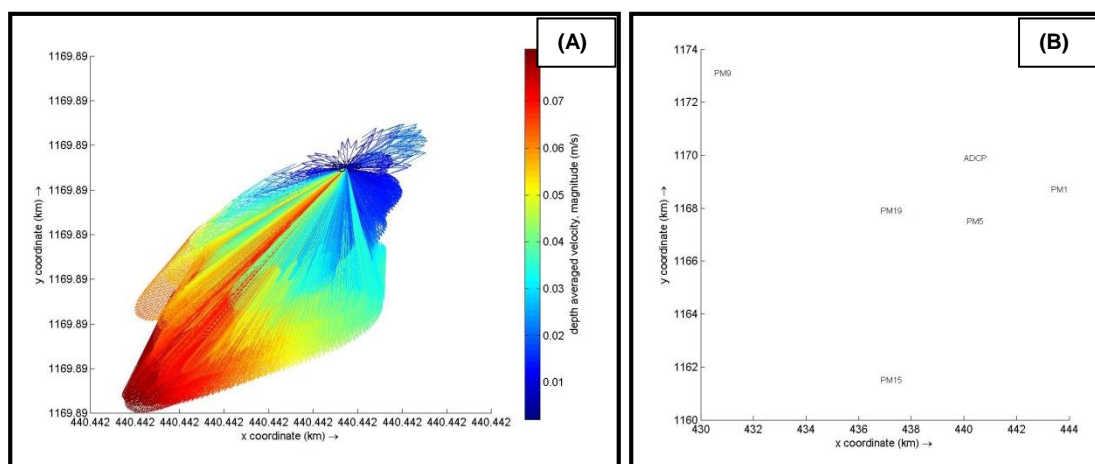


Figura 56 – Gráfico da magnitude dos vetores no ponto de lançamento ADCP (A) e distribuição dos pontos analisados próximos ao ponto 'ADCP' (B).

Por meio dos gráficos da variação da concentração no tempo (figura 54), evidenciou-se que as maiores concentrações estão entre os pontos PM5, PM15 e, sobretudo, no PM19. De acordo com a distribuição destes pontos, e a observação dos vetores da velocidade no local de lançamento, pode-se afirmar que a velocidade da corrente possui grande influência na dispersão do poluente, visto que os vetores da velocidade no ponto ADCP possuem como sentido predominante a porção inserida entre Oeste e Sul do ponto ADCP (figura 56), o que pode ser evidenciado de forma mais clara no conjunto de gráficos na figura 57, que apresenta a concentração na região costeira em determinados momentos ao longo do período analisado.

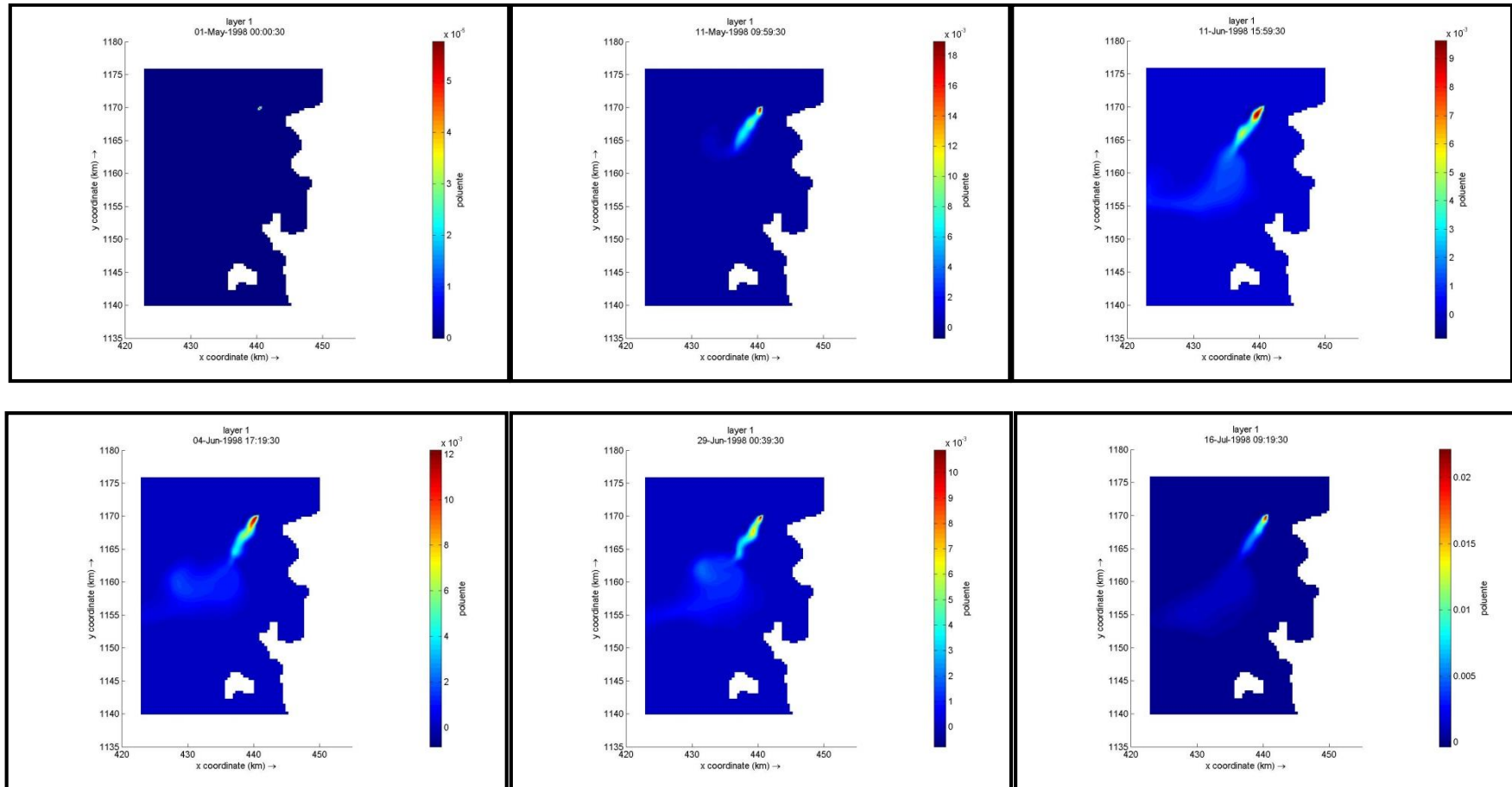


Figura 57 – Visualização da variação espacial e temporal da concentração do poluente ao longo do período analisado.

7. CONCLUSÃO

Seguindo o objetivo deste trabalho, foram confeccionados dois cenários de modelagem, utilizando-se dois cenários distintos para análise e comparação com os dados de campo, sendo um com malha mais grosseira e outro com malha mais refinada. Após a criação dos modelos e a geração dos resultados, os mesmos foram extraídos, compilados de acordo com o período de interesse, analisados e comparados com os dados registrados em campo para a região costeira de Cartagena, na Colômbia.

Inicialmente, quando comparados os resultados simulados com os dados da estação de maré CARTAGENA IHO, verificou-se elevada aproximação entre os valores. Com base nisso, pode-se afirmar que as simulações realizadas neste ponto representam bem as condições de nível da água, sendo verificados os mesmos períodos de preamar e baixa mar devido à forçante astronômica, com apenas uma pequena variação na amplitude nos picos de preamar, onde os dados da estação se mostraram ligeiramente maiores. Tal aproximação dos resultados se deve ao fato do modelo utilizar os dados desta estação na geração das condições de contorno.

Com relação à comparação da elevação da superfície livre entre os resultados simulados e medidos em Punta Canoas e Boca Grande, as conclusões são as mesmas, ou seja, os resultados modelados produziram baixa aproximação com os resultados de campo. Quando visualizados em conjunto, notou-se que a amplitude dos dados medidos são superiores ao simulados, principalmente na durante a preamar.

A análise temporal e espacial realizada nos pontos definidos mostrou que em ambos os cenários o nível da água entre os pontos ficou muito semelhante, exibindo os mesmos períodos de preamar e baixa mar. Neste sentido, pode-se afirmar que o modelo representa bem a forçante astronômica nos cenários gerados e não é verificada diferenças significativas entre pontos distintos distribuídos na área de cálculo.

Como observado, a diferença de localização entre os pontos não é um fator que justifique a diferença observada, sendo que o modelo representa bem as condições de nível da água de acordo com os dados da estação. Sendo assim, a grande variação observada em Punta Canoas e Boca Grande, entre os resultados simulados e medidos, pode ter relação com as simplificações adotadas no modelo, uma possível influência da chamada maré meteorológica, bem como com os dados existentes nos bancos de dados incorporados pelo software *Delft Dashboard*.

O modelo apresenta boa aproximação quando comparados com os dados da estação CARTAGENA IHO, pois a mesma é utilizada como fonte de informação para a geração das condições de contorno de ambos os cenários confeccionados. Quando analisados os dados de campo, verifica-se que os resultados simulados não estão condizentes com a realidade apresentada pelos dados de campo e, portanto, os dados do software podem não ser válidos ou suficientemente representativos para a região de interesse.

Outra possível justificativa, além do questionamento da validade dos dados utilizados na geração das condições de contorno, tem relação com as informações de batimetria, também obtido por meio de banco de dados internacional, que pode não estar de acordo com a realidade existente na área de interesse e pode influenciar nos resultados da elevação da superfície livre.

Para a velocidade de corrente, a análise espacial e temporal dos dados mostrou que, com base nos pontos selecionados, as velocidades apresentam maior variação no tempo (oscilações) quando próxima da costa e tem magnitude menor conforme se afasta desta região, sendo este comportamento observado nos pontos de ambos os cenários.

Quando comparados os dados de velocidade de corrente simulados com os obtidos em campo, assim como para o nível de água, se observa a grande discordância entres os mesmos. Ao visualizar de forma conjunta as velocidades simuladas e medidas, verifica-se que o modelo gerou dados com uma magnitude muito inferior à realmente observada no local para o período analisado, chegando a apresentar diferença de até 60 cm/s entre os dados.

Conforme discutido, a existência de uma corrente marítima de maior escala presente na região costeira de Cartagena pode ter sido a principal forçante para a velocidade no local. Pelo fato do modelo não considerar as correntes marítimas e ter sido gerado adotando a simplificação de não existir vento, pode-se afirmar que com as configurações adotadas para a simulação, o modelo não apresenta boa aproximação com a realidade observada em campo e, assim, não possui aplicabilidade no estudo de velocidade de corrente.

Embora os resultados simulados tenham revelado baixa aproximação quando comparados com os resultados obtidos em campo, o cenário com malha mais refinada, cenário 2, foi escolhido para realizar a simulação de lançamento de um poluente a fim de se verificar o seu comportamento no tempo e espaço. Com concentração e vazão conhecidas, a dispersão do poluente se deu predominantemente na parcela inserida entre Oeste e Sul do local de lançamento. De acordo com os dados de velocidade de corrente simulados para o ponto ADCP, onde se deu o lançamento do poluente, o sentido predominante da dispersão também é a direção predominante da velocidade. Com isso, pode-se afirmar que a velocidade da corrente apresenta significativa influência na dispersão do mesmo.

Por fim, sabe-se que a modelagem hidrodinâmica não é uma tarefa fácil devido a todos as etapas e conhecimentos envolvidos. A fácil aplicação apresentada pelo modelo juntamente com os resultados obtidos, tornam questionável a aplicação do modelo para a área de estudo, visto que os resultados simulados se apresentam condizentes com as informações utilizadas na geração das condições de contorno e que, de acordo com as comparações realizadas, não se apresentou condizente com a realidade dos dados de campo. Com isso, considerando que os dados registrados em campo são fiéis à realidade do local, seguindo as simplificações adotadas nos cenários confeccionados, as informações existentes nos bancos de dados utilizados pelo software e os resultados alcançados, conclui-se que a aplicação do *Delft Dashboard* na região costeira de Cartagena não é indicada.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OLIVEIRA, H. A. **Aplicação do Modelo Numérico Hidrodinâmico Delft3D na Baía de Guanabara**. 137 f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Oceanografia) - Centro Universitário Monte Serrat, Santos, 2009.

MMA - Ministério do Meio Ambiente: A zona costeira e seus usos múltiplos. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/item/8943-a-zona-costeira-e-seus-usos-multiplos>>. Acesso em: 31/10/2014.

SCHMIDT, C. C. **O Emprego do Modelo ELCIRC na Simulação Computacional da Hidrodinâmica e do Transporte de Corpos de Águas**. 2004. 90 f. Monografia (Bacharelado em Informática) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR, 2004.

ANDRADE, R. C. & ROSMAN, P. C. **Padrões de circulação hidrodinâmica na Lagoa da Conceição Florianópolis-SC**. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Aracajú – SE, 2001.

RIBAS, T. M. **Implementação de Modelo Numérico para Estudo Hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá - PR**. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

POLETTE, M. *et al.* **Gerenciamento Costeiro Integrado e Gerenciamento de Recursos Hídricos: como Compatibilizar tal Desafio**. Em: MUÑOZ, H. R. Interface da gestão de recursos hídricos - Desafio da lei das águas em 1997. Brasília, 2000. p. 221-238.

PINHO, J. L. S.; *et al.* **Modelação Matemática da Hidrodinâmica na Zona Costeira do Noroeste da Península Ibérica**. II Congresso do Quaternário de Países de Língua Ibérica, IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário e II Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa. ABEQUA, 2003.

ROCHA, C. B. M. **Implementação e uso do modelo MIKE 21 na análise de cenários hidrodinâmicos na a Lagoa da Conceição – SC**. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental na área de concentração Hidrodinâmica e Ecologia de Sistemas Marinhos Costeiros) – Centro Tecnológico – CTC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MIKE 3 – 3D Modelling of coast and sea. Disponível em: <<http://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-3>>. Acesso em: 21/04/2015.

MOHID – Water Modelling System. Disponível em: <<http://www.mohid.com/HowItWorks.htm>>. Acesso em: 22/04/2015.

JULIANO, M. M. F. et al. **Aplicação da Plataforma MOHID para simulação computacional de deriva oceânica de petróleo na bacia de Campos – RJ.** Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes, RJ, v.6 n. 1, 2012, p. 161-172.

MARTINS, F.; LEITÃO, P.; SILVA, A.; NEVES, R. **3D modeling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach.** Oceanologica Acta, 2000.

NEVES, R.; COELHO, H.; LEITÃO, P.; MARTINS, H.; SANTOS, A. **A numerical investigation of the slope current along the western European margin.** In: BURGANO, V.; KARATZAS, G.; PAYATAKAS, A.; BREBBIA, C.; GRAY, W.; PINDER, G. (Ed.). In: COMPUTACIONAL METHODS IN WATER RESOURCES, v.2, 1998, p. 369-376.

PRECIOSO, C. H. O.; KALAS, F.; RODRIGUES, P. P. G. W.; LUGON JR., J. **Avaliação da variabilidade de parâmetros ambientais numa lagoa urbana (Campos dos Goytacazes, RJ) com auxílio do sistema MOHID.** Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, v.4, 2010, p.186 – 204

LIMA, E. B. **Problemas Inversos Aplicados à Identificação de Parâmetros Hidrodinâmicos de um Modelo de Estuário do Rio Macaé.** Tese (Doutorado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro UERJ, Nova Friburgo, RJ, 2012.

TELEMAC – MASCARET – The TELEMAC – MASCARET Modelling System. Disponível em: < <http://www.opentelemac.org/index.php/presentation>>. Acesso em: 23/04/2015.

MENDONÇA, A., LOSADA, M. A., NEVES, M. G. e REIS, M. T. **Ferramentas para a otimização e gestão de riscos nos projectos de emissários submarinos: Aplicação a um caso de estudo em Portugal,** 2013.

FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. R. e NIENCHESKI, L. F. H. **Calibration and Validation of the TELEMAC-2D Model to the Patos Lagoon (Brazil).** Journal of Coastal Research Special Issue 34, 2001, pg 470 – 488.

KOPMANN, R. e MARKOFFSKY, M. **Three-dimensional water quality modeling with TELEMAC-3D.** Hydrological Processes, vol. 14, Issue 13, 2000, p.2279-2292.

CHEVIET, C., VIOLEAU, D., GUESMIA, M. **Numerical simulation of cohesive sediment transport in the Loire estuary with a three-dimensional model including new parameterisations.** Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment. Proceeding in Marine Science, volume 5, 2002, pg 529-543.

ELCOM - Estuary, Lake and Coastal Ocean Model. Disponível em: < <http://www.ce.utexas.edu/prof/hodges/site2006/elcom.htm>>. Acesso em: 26/04/2015.

HODGES, B. e DALLIMORE, C. **ELCOM: Estuary, Lake and Coastal Ocean Model - User Manual.** Centre for Water Research – University of Western Australia, 2015.

DARU, R. L., SILVA, E. D. B., KAN, A., GIBERTONI, R. F. C. **Simulação hidrodinâmica 3D de enchimento do reservatório da Usina Hidrelétrica de Mauá.** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

JESUS, J. A. O., *et al.* **Implementação de modelo hidrodinâmico 3D de qualidade da água no Alto e Médio Tietê.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.

LEON, L. F., *et al.* **Application of a 3D hydrodynamic-biological model for seasonal and spatial dynamics of water quality and phytoplankton in Lake Erie.** Journal of great lakes research, volume 37, issue 1, 2011, pages 41-53.

SOTO, Y. J. M. **A Modelagem Hidrodinâmica como Apoio a Tomada de Decisão em Caso de Derrame de Óleo na Parte Interna do Complexo Estuarino Antonina-Paranaguá - PR.** 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

BRAIT, M. S.; DALZOTTO, D. **Simulações Numéricas das Equações de Águas Rasas Adimensionais.** In: XXXIII CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 2010, São Paulo: Águas de Lindoia. Anais do CNMAC, 2010. p. 1026-1027.

GARCIA, G. E. **Implementação de Modelo Numérico para Avaliação do Transporte de Sedimentos no Reservatório de Itaipu – PR.** 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

DELTARES: Delft Dashboard. Disponível em:
<<https://publicwiki.deltares.nl/display/OET/DelftDashboard>>. Acesso em: 31/08/2014.

DELFT3D FLOW. **Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, Including Sediments - User Manual.** 2014.

LOPES, M. G. **Aplicação de um Modelo Hidrodinâmico para as Baías de Paranaguá e Antonina – PR.** 137 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos) – Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciência da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PALACIO C., GARCIA F., GARCIA U. **Calibración de un Modelo Hidrodinámico 2D para la Bahía de Cartagena.** Dyna, Medellín, Año 77, n. 164, p. 152-166, 2010.

TORO, F.M. **Verification of the CCHE – 3D Hydrodynamic Model for Open Channel Flow.** Ph. D. Dissertation, University of Mississippi. 1994.

GREENBERG, M. **Advanced Engineering Mathematics.** 2.ed. Prentice Hall, 1998.

FRANÇA, H. L.; TAKATA, A. S.; OISHI, C. M. **Estudos sobre a Estabilidade Numérica de Métodos de Diferenças Finitas.** Trabalho apresentado no Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, Sudeste, 2013.

ROBERTS, P. J. W.; CARVALHO, J. L. B. de. **Modeling of Ocean Outfall for Cartagena, Colombia**. Washington: World Bank, 2000.

ROBERTS, P. J. W. **Dilution Modeling for Cartagena Ocean Outfall**. Cartagena: Aguas de Cartagena, 2003.

ROBERTS, P. J. W. **Additional Water Quality Modeling for Cartagena Ocean Outfall**. Washington: World Bank, 2004.

ROBERTS, P. J. W. **Modeling of Wind Effects on Bacterial Transport for the Cartagena Ocean Outfall**. Washington: World Bank, 2005.

ROBERTS, P. J. W.; VILLEGAS, B. **Three Dimensional Modeling of Bacterial Transport for the Cartagena Ocean Outfall**. Cartagena: Aguas de Cartagena, 2006.

GARZÓN-FERREIRA, J. (1995). - **Bahía de Chengue, Parque Natural Tayrona, Colombia, UNESCO, Environment and Development in Coastal Regions and in Small Islands**, Coastal Region and Small Island Papers 3.

BLENINGER, T. **Coupled 3D Hydrodynamic Models for Submarine Outfalls: Environmental Hydraulic Design and Control of Multiport Diffusers**. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Civil e Geociências Ambientais, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe, 2006.

BLENINGER, T. **3-D Modelin of Cartagena Outfall**. Institute for Hydromechanics, University Karlsruhe, 2006.

TPXO 6.2: Global Inverse Tide Model. Disponível em: <https://www.esr.org/polar_tide_models/Model_TPXO62.html>. Acesso em: 08/11/14.

TPXO 7.2. TPXO7.1 => TPXO 7.2. Disponível em: <<http://volkov.oce.orst.edu/tides/TPXO7.2.html>>. Acesso em: 08/11/14.

EUROPEAN SHELF, 2008. Disponível em: <<http://volkov.oce.orst.edu/tides/ES.html>>. Acesso em: 08/11/2014.

WILMOTT, C.J. **On the Validation Models -Physical Geography**, vol. 2, p. 184-194.1981.

WARNER, J. C. et al. **Numerical Modeling of an Estuary: A Comprehensive Skill Assessment**. Journal of Geophysical Research, 2005.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. – **Noções de Probabilidade e Estatística**. 6ª edição. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

INSTITUTO HIDROGRÁFICO (IH), 2015. Disponível em: <<http://www.hidrografico.pt/glossario-cientifico-mares.php>>. Acesso em: 04/11/2015.

TRUCOLLO, E. C.; SCHETTINI, C. A. F. – **Marés Astronômicas na Baía da Babitonga, SC**. Notas Técnicas – FACIMAR, 3:57:66, 1999. Laboratório de Oceanografia Física – CTTMar – Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar – UNIVALI

MARONE, E.; CAMARGO, R. – **Marés meteorológicas no Litoral do Estado do Paraná: O Evento de 18 de Agosto de 1993**. Nerítica, volume 8, pg 73-85. 1994. Editora da UFPR, Curitiba, PR