

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

GABRIEL VIEIRA DE CARVALHO

**INFLUÊNCIA DO VENTO NA HIDRODINÂMICA DA
BAÍA DE GUANABARA (RJ)**

Monografia apresentada ao curso de Oceanografia da Faculdade de Oceanografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, como requisito final para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador

Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad

Co-orientador

Prof. Dr. Alexandre Macedo Fernandes

**Rio de Janeiro, RJ
Março de 2011**

Carvalho, Gabriel Vieira de

Influência do vento na hidrodinâmica da Baía de Guanabara (RJ).

67p.

Orientador: Luiz Paulo de Freitas Assad

Monografia de Bacharelado – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

1. Modelagem numérica. 2. Hidrodinâmica. 3. Baía de Guanabara 4. Complexidade. I. Assad, L. P. F II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Oceanografia. III. Título

GABRIEL VIEIRA DE CARVALHO

**INFLUÊNCIA DO VENTO NA HIDRODINÂMICA DA
BAÍA DE GUANABARA (RJ)**

Monografia apresentada ao curso de Oceanografia da Faculdade de Oceanografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, como requisito final para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

APROVADA EM ___ DE MARÇO DE 2011, PELA BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre Macedo Fernandes

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Oceanografia

Dr. Maurício da Rocha Fragoso

Prooceano - Empresa de Consultoria Ambiental

M.Sc. Hatsue Takanaka de Decco

Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia - LAMCE

AGRADECIMENTOS

Ao Luiz Paulo, agradeço logicamente à orientação, à oportunidade de aprendizado e de entrada no núcleo de pesquisa NUMA. Além disso, gostaria de agradecer pela simplicidade no trato com os que o cercam (me incluindo), me fazendo aprender um pouco mais sobre como funciona um grupo de pesquisa, fortalecido pelo conhecimento de todos.

Ao professor e amigo Alexandre Fernandes, agradeço pelas conversas que tivemos, sempre francas e amigas, apesar da seriedade dos assuntos

Agradeço ao pessoal do laboratório Geocart, da UFRJ, pela participação fundamental na confecção da batimetria utilizada neste trabalho.

Agradeço ao Adriano Vasconcelos, do LabSAR, pelo envolvimento na confecção da batimetria e consequente aprendizado proporcionado a mim no trabalho com imagens georreferenciadas.

A todos na DHN, em especial ao Jean Félix, João Bosco Alvarenga e Hélio (do arquivo técnico). Aos primeiros por orientações no aprendizado de novas linguagens computacionais e ao último por me ajudar tanto na obtenção das folhas de bordo, mostrando na prática a importância das relações pessoais na solução de problemas e o valor da experiência.

Ao pessoal da meteorologia envolvido com o projeto, pelos campos de vento gerados e análises sinóticas realizadas.

A todos envolvidos no Projeto BG (Prooceano, Projeto Grael e BG Brasil), por me proporcionar, além de um contexto e utilidade prática ao meu trabalho de monografia, contato com um grupo multidisciplinar. Foi muito interessante e instrutivo participar de todas as reuniões, ver os esforços de todos em equalizar os

jargões e manter todos no mesmo plano cognitivo, em um grupo tão heterogêneo.

É muito difícil agradecer à família, pois pode-se pensar que no que tange a confecção da monografia, eles não ajudaram em nada. Porém agradeço a vocês por todas as coisas, desde que nasci, coisas alegres e tristes, momentos difíceis e fáceis e médios, gostosos e amargos, com sorrisos ou lágrimas, com olhares perdidos ou profundos, e conversas bobas ou fundamentais, pois de uma maneira concreta, nos formamos juntos nessa convivência e isso me trouxe até esse momento em que escrevo essas palavras.

O mesmo posso dizer dos amigos, que são a família que escolhemos e que nos escolhe, que nos espelhamos e somos espelhados. Nunca pensei que fosse ter tanto orgulho de todos vocês, realmente admiro muito cada um e me sinto orgulhoso pela nossa amizade. Aprendi demais ao longo de todos esses anos com vocês e não tenho dúvidas de que continuaremos nos vendo sempre. Não posso me esquecer da Nicole, e agradecer pela força diante de todos os problemas, dúvidas e estresses, assim como por todos os momentos felizes que juntamos e fizemos nossos.

RESUMO

Este trabalho pretende realizar uma investigação da hidrodinâmica da Baía de Guanabara com enfoque na influência eólica a partir da implementação de um modelo hidrodinâmico em alta resolução espacial (aproximadamente 30 metros). O modelo batimétrico digital foi obtido através da digitalização de folhas de bordo, cedidas pela Marinha do Brasil. O campo de vento foi extraído do modelo atmosférico MM5, e a série temporal de maré foi reconstruída a partir do conhecimento das principais constantes harmônicas para pontos pré-selecionados na região de interesse. O modelo hidrodinâmico utilizado no estudo é o Princeton Ocean Model (POM), configurado no modo 2D. O modelo reproduziu bem a fase da onda de maré porém subestimou tanto a amplitude da mesma quanto a velocidade de corrente para os pontos analisados. A partir da realização de dois experimentos, com e sem a influência do vento, foram gerados campos de anomalia de elevação da superfície livre e corrente, assim como anomalia percentual de ambos. A influência do vento sobre o campo de velocidade apresentou-se principalmente no setor norte da BG, nos momentos de preamar e baixamar, já sobre o campo de elevação da superfície livre apresentou-se no setor sul, durante os instantes de maré enchente e vazante. Concluiu-se que o vento é um forçante importante para a representação da hidrodinâmica da BG, sobretudo em regiões rasas e que sua influência deve ser considerada de forma não uniforme no tempo e no espaço em estudos que visem o gerenciamento ambiental da BG.

ABSTRACT

This paper aims to study the wind influence over the hydrodynamic of the Guanabara Bay using a high space resolution (approximately 30 meters) hydrodynamic model. The bathymetrical field was obtained through the digitalization of high resolution bathymetric charts, provided by the Brazilian Navy. The wind field was extracted from the MM5 atmospheric model simulations, and tide time series were rebuilt from the main harmonic constants obtained from selected points. The hydrodynamic model used in this study is the Princeton Ocean Model (POM), in its 2D mode. The model reproduced well the phase of the tidal wave and the direction of the current but underestimated both the amplitude of the tidal wave as well as the speed of current in the points analysed. After conducting two experiments with and without the influence of the wind, anomaly fields of free surface elevation and current were generated, as well as anomaly percentage of both. The influence of the wind on the velocity field was observed mainly in the northern sector of GB, at the instants of high tide and low tide. The influence of the wind on the free surface elevation field was more significative in the southern sector of GB, at the instants of flood tide and ebb tide. It was concluded that the wind field is an important factor in the representation of the hydrodynamic of GB, especially in shallow regions and that its influence should be considered, as a non-uniform factor in time and space, in any studies that aims environmental management of the GB.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.3.3 Objetivos Específicos	3
1.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
1.3.1 A Modelagem Numérica Computacional	3
1.3.3 A influência da maré na circulação.	6
1.3.3 A influência do vento na circulação	7
1.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	9
2 METODOLOGIA	14
2.1 O MODELO.....	15
2.2 PRÉ-PROCESSAMENTO	16
2.2.1 Batimetria	16
2.2.1.1 Aquisição	18
2.2.1.2 Digitalização	19
2.2.1.3 Linha de Costa	20
2.2.1.4 Confecção da Malha Batimétrica	21
2.2.2 Forçantes.....	21
2.2.2.1 Maré.....	22
2.2.2.2 Vento.....	23
2.3 IMPLEMENTAÇÃO	24
2.3.1 Cenário.....	24
2.4 ESTRUTURA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	29
3 RESULTADOS	32
3.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO.....	32
3.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	34
3.2.1 Instante 1 - 07:00	35
3.2.2 Instante 2 – 11:00	38
3.2.3 Instante 3 – 15:00	41
3.2.4 Instante 4 – 18:00	44

4	DISCUSSÃO	47
5	CONCLUSÕES.....	49
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Folhas de Bordo e Cartas Náuticas utilizadas no processo de digitalização da batimetria.	19
Tabela 2 - Comparação entre a velocidade dos derivadores e do modelo.	34
Tabela 3- Valores máximos e mínimos de u e v e médias da anomalia relativa de elevação e velocidade para os dois setores da BG analisados.	35

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Coeficiente de arrasto (CD) como função da velocidade do vento a 10 metros. As linhas são de equações e as bolas e triangulos de observações. Retirado de Stewart, 2008. 9
- Figura 2: Imagem de satélite da Baía de Guanabara. Fonte: <http://www.saberweb.com.br/praias-do-brasil/baias-do-brasil/images/baia-de-guanabara.jpg>. 10
- Figura 3: Distribuição hipsométrica de profundidades, adaptado de Kjerfve et al. (1997). 11
- Figura 4: Localização das estações maregráficas no interior da BG, segundo Catálogo de Informações Maregráficas Brasileiras (FEMAR, 2000). 12
- Figura 5: Rosa dos ventos anual das estações do Santos Dumont e do Galeão, respectivamente. Retirado de Jourdan (2007). 13
- Figura 6: Rosa dos ventos do aeroporto Santos Dumont, nos períodos da madrugada e da tarde, sugerindo o sinal da brisa terrestre e marítima, respectivamente. Retirado de Jourdan (2007). 14
- Figura 7: Folha de Bordo no 1511-002-82, representando a entrada da BG..... 17
- Figura 8: Folha de bordo de 1961 (linha preta), sobreposta a carta náutica 1501 (colorida), demonstrando área de aterro na porção noroeste da Ilha do Governador. 18
- Figura 9: A esquerda, mosaico de folhas de bordo sobreposto à carta náutica 1501 e à linha de costa. A direita, pontos com informação batimétrica digitalizados sobrepostos à figura da esquerda. 20

Figura 10: Imagem LandSat V utilizada na digitalização da linha de costa.....	21
Figura 11: Comparação entre a maré de Itaipú (verde) e Copacabana (azul). Notam-se dois ciclos diários de maré de quadratura tipicamente semi-diurna com desigualdades.	23
Figura 12 : Exemplo do resultado do modelo atmosférico MM5, utilizado na modelagem hidrodinâmica da BG. Resolução espacial de 1 Km.....	24
Figura 13 - – Maregrama do mês de Junho de 2010. Em detalhe o dia 17.....	25
Figura 14 - Imagens do Satélite GOES-12 no canal infravermelho do dia 17/06/2010. a) 00Z, b)06Z, b) 12Z, d)18Z.....	26
Figura 15 – Campo de vento em superfície para o dia 17, nas horas 00, 06, 12 e 18 Zulu. Dados de reanálise do NCEP/NCAR.	27
Figura 16 – Campo de vento a 10 metros sobre a Baía de Guanabara para os instantes 07, 11, 15 e 18 horas (hora local). .	28
Figura 17 - Energia Cinética total (acima) e série de elevação da superfície livre para o Forte da Batalha (abaixo). Instantes escolhidos para análise marcados pela linha preta.	29
Figura 18 - Maregrama do forte da batalha (Azul) e Fortaleza de Santa Cruz (Verde).	30
Figura 19 - Divisão da baía nos setores Sul e Norte. A linha tracejada indica a divisão.	31
Figura 20 –Localização dos pontos de comparação da série de maré. De baixo para cima: Itaipú, Santa Cruz, Ilha Fiscal, Boqueirão e Forte da Batalha.....	33

Figura 21 – Comparação entre saída do modelo (vermelho) e previsão de maré (azul). Acima a esquerda, Itaipú, acima a direita, Forte de Santa Cruz, no meio a esquerda, Ilha fiscal, no meio a direita, Boqueirão, em baixo, Forte da Batalha.	34
Figura 22 - Instante da maré (acima) e campo de vento para o 07:00 horas do dia 17/06/2010.	36
Figura 23 – (a) Campo de anomalia de elevação. (b) Campo percentual da influência do vento sobre a velocidade resultante da corrente. (c) Campo de anomalia da componente meridional de velocidade da corrente. (d) Campo de anomalia da componetne zonal de velocidade.....	37
Figura 24 - Campo de corrente do experimento com vento (vetores brancos) superpostos ao campo de corrente do experimento sem vento (vetores pretos), superpostos ao campo de anomalia de elevação (abaixo).....	38
Figura 25 - Instante da maré (acima) e campo de vento para o 11:00 horas do dia 17/06/2010.	39
Figura 26 - (a) Campo de anomalia de elevação. (b) Campo percentual da influência do vento sobre a velocidade resultante da corrente. (c) Campo de anomalia da componente meridional de velocidade da corrente. (d) Campo de anomalia da componetne zonal de velocidade.....	40
Figura 27 - Campo de corrente do experimento com vento (vetores brancos) superpostos ao campo de corrente do experimento sem vento (vetores pretos), superpostos ao campo de anomalia de elevação (abaixo).....	41
Figura 28 - Instante da maré (acima) e campo de vento para o 15:00 horas do dia 17/06/2010.	42

Figura 29 - (a) Campo de anomalia de elevação. (b) Campo percentual da influência do vento sobre a velocidade resultante da corrente. (c) Campo de anomalia da componente meridional de velocidade da corrente. (d) Campo de anomalia da componetne zonal de velocidade.....	43
Figura 30 - Campo de corrente do experimento com vento (vetores brancos) superpostos ao campo de corrente do experimento sem vento (vetores pretos), superpostos ao campo de anomalia de elevação (abaixo).....	44
Figura 31 - Instante da maré (acima) e campo de vento para o 18:00 horas do dia 17/06/2010.	45
Figura 32 - (a) Campo de anomalia de elevação. (b) Campo percentual da influência do vento sobre a velocidade resultante da corrente. (c) Campo de anomalia da componente meridional de velocidade da corrente. (d) Campo de anomalia da componetne zonal de velocidade.....	46
Figura 33 - Campo de corrente do experimento com vento (vetores brancos) superpostos ao campo de corrente do experimento sem vento (vetores pretos), superpostos ao campo de anomalia de elevação (abaixo).....	47

1 Introdução

A Baía de Guanabara (BG) é um dos ambientes marinhos costeiros mais importantes do Brasil do ponto de vista social, econômico, estratégico e político. Possui duas refinarias de petróleo em suas margens, representando 17% do processamento do óleo nacional, com potencial aumento desse percentual a partir da instalação do complexo petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ), cuja construção está em andamento. Abriga o segundo maior porto do País (Porto do Rio de Janeiro) onde atracam anualmente mais de 2.000 navios comerciais, dois aeroportos internacionais (Santos Dumont e Antônio Carlos Jobim), estaleiros, marinas, sendo também uma importante via marítima para um grande número de barcas, balsas, barcos de pesca, de lazer, turismo e da marinha (BERGAMO, 2006). Considerada área de segurança nacional, a BG, abriga duas bases navais e um estaleiro do Ministério da Marinha. Encontra-se inserida na região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, onde há a maior concentração populacional costeira do Brasil, aproximadamente 10 milhões de habitantes somente na planície costeira da Baía de Guanabara, o que representa 80% da população do estado (Kjerfve, 1997).

Além das características citadas acima, pode-se adicionar a importância desse ambiente como local de competições e de uso múltiplo intensificado durante os jogos olímpicos de 2016 (Rio 2016). Esse evento demandará previamente e durante o período de competições um detalhado monitoramento ambiental.

Pelas características acima descritas a circulação das águas na BG já foi objeto de diversos estudos ambientais que visaram basicamente apoiar ações de gestão ambiental em seu interior (BERGAMO, 2006; KJERFVE, 1997; MALTA, 2005; SAMPAIO, 2003; VILELA, 1992).

O conhecimento da dinâmica das águas em um determinado

ambiente marinho costeiro é de fundamental importância, dentre outros motivos, para a construção de estruturas urbanas (portos, marinas, refinarias, pontes e outros) e para a compreensão da dispersão de poluentes oriundos tanto de emissários submarinos quanto de outras fontes poluidoras para o seu interior. Esse conhecimento subsidia o planejamento de medidas de gestão e de emergência que visem minimizar o impacto ambiental de tais atividades sobre o ambiente marinho em questão.

1.1 Motivação

Em função das características sociais, econômicas e ambientais da BG, diversos projetos de pesquisa tem sido desenvolvidos na região. O Projeto Baía de Guanabara (PBG) é um projeto que une uma instituição de pesquisa (Laboratório de Modelagem de Processos Marítimos e Atmosféricos - LAMMA/UFRJ) uma empresa de Oceanografia (Prooceano), uma ONG (Projeto Grael) e uma empresa de óleo e gás (BG-Brasil), no monitoramento ambiental da BG e na coleta de resíduos flutuantes. A modelagem hidrodinâmica desenvolvida neste trabalho será utilizada como base para a implementação de um sistema de modelagem operacional para o PBG.

Inserido no contexto do PBG, este trabalho busca dar sua contribuição para o melhor entendimento da hidrodinâmica da região e conseqüentemente da dispersão do lixo flutuante. Maiores informações a cerca do projeto no endereço eletrônico: <http://www.projetograel.org.br/>

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar a hidrodinâmica da Baía de Guanabara sob a influência conjunta do vento e da co-oscilação da maré.

1.3.3 Objetivos Específicos

- Obter um modelo batimétrico digital com resolução espacial de 30 metros para a BG.
- Implementar um modelo hidrodinâmico em alta resolução espacial para a região da BG.
- Compreender a importância relativa dos dois forçantes ambientais utilizados (maré e vento) para a hidrodinâmica local, em diferentes regiões da BG, principalmente em ambientes hidrodinamicamente mais protegidos.

1.3 Fundamentação Teórica

1.3.1 A Modelagem Numérica Computacional

Modelagem é um processo de traduções da realidade em diferentes etapas no qual o sucesso de uma etapa nunca supera o da etapa anterior, ou seja, em cada etapa, a realidade traduzida nunca é mais verdadeira que na etapa anterior (ROSMAN, 1997). Sendo assim, a modelagem hidrodinâmica computacional consiste em uma série de traduções do fenômeno real para a linguagem computacional (MOURA, 1997). Estas etapas de traduções estão brevemente descritas a seguir:

1. Modelagem Conceitual

Tradução da realidade para um modelo mental.

Desenvolvimento de modelos conceituais que organizam informações a respeito da origem e da variabilidade espaço-temporal de um determinado processo, conhecendo suas causas e

efeitos e compreendendo as interações dos agentes intervenientes na sua ocorrência.

2. Modelagem Físico-Matemática

Tradução do modelo conceitual para linguagem físico-matemática.

Representação do modelo conceitual em linguagem físico-matemática, ou seja, descrição do fenômeno conceitual em um conjunto de fórmulas físico-matemáticas, denominadas equações governantes.

3. Modelagem Numérica

Tradução do modelo físico-matemático adaptado a um método de cálculo discreto.

Discretização das equações governantes, ou seja, transformação das equações governantes de um meio contínuo (infinito) para um meio discreto (finito). Assim, o sistema passa a ser resolvido apenas em pontos pré-definidos, determinados pela grade do modelo.

4. Modelagem Computacional

Tradução do modelo numérico para uma linguagem computacional.

Tradução das equações governantes discretizadas e estruturação do processo de solução do sistema de equações em uma linguagem computacional (Fortran, C, etc.) que possa ser compilada e executada. Desta forma, as equações governantes discretizadas são resolvidas, a partir das condições iniciais (tempo) e de contorno (espaço). As incógnitas do sistema são os valores de cada variável no passo de tempo seguinte, ou seja, a solução é o comportamento da variável no futuro.

Um modelo computacional hidrodinâmico representa um dos métodos utilizados na investigação das condições hidrodinâmicas

de uma região. Como todos os outros (p. Ex. Estudos de campo e modelagem física) possui vantagens, desvantagens e limitações advindas da própria formulação do método. Cada etapa de “tradução” da realidade da etapa anterior possui uma limitação embutida, assim, nunca conseguiremos descrever conceitualmente um fenômeno em toda a sua complexidade ou formular física e matematicamente a ação de cada agente interveniente na sua ocorrência sem simplifica-los (p. Ex. Processos turbulentos).

Todavia este método apresenta uma série de vantagens relativas aos outros métodos, como a logística simples, o baixo custo financeiro e a capacidade de simular diversas condições iniciais e de contorno para uma mesma região de estudo. Assim, torna-se possível estudar a influência de cada forçante e a interação entre eles, como também investigar a influência de diversas feições, tais como novas estruturas urbanas (portos, aterros, dragagens), linha de costa e batimetria, sobre a hidrodinâmica local (FRAGOSO, 1999).

Os modelos numéricos possuem grande sensibilidade às condições iniciais e de contorno, fato relacionado à teoria do caos, na medida em que os resultados finais são amplamente dependentes das condições iniciais impostas ao modelo (LORENS, 1963, *apud* FRAGOSO, 1999). Sendo assim, é indispensável que se tenha grande critério e rigor qualitativo no preparo dos dados de entrada e na análise dos resultados, caso o objetivo da modelagem seja dialogar com grupos e projetos de áreas interrelacionadas na prática de gestão ambiental (Torres Jr., comunicação pessoal¹).

¹ Audálio Rebelo Torres Jr., Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

1.3.3 A influência da maré na circulação.

Maré é a oscilação periódica do nível do mar sob a influência de forças astronômicas. É resultado principalmente das forças da atração gravitacional da Lua e do Sol associadas à aceleração centrípeta, agindo diretamente sobre as grandes massas d'água das bacias oceânicas (FRANCO, 2009).

Devido ao fato da maré ser, por definição, causada pela atuação de forçantes astronômicas, cuja ação é desprezível sobre corpos d'água de pequena escala espacial relativa, como a BG, a ação da maré observada nesses ambientes deve ser chamada de co-oscilação de maré, pois é a propagação da onda de maré gerada globalmente, passando pela plataforma continental até o corpo d'água em questão (MIRANDA, 2002).

A amplitude da onda de maré é a distância vertical entre a crista e o cavado (elevação máxima e mínima, respectivamente), a altura da maré é a distância vertical entre a crista e o nível médio do mar, ou seja, metade da altura de maré. O período da maré é o intervalo de tempo entre duas cristas ou cavados, podendo ser diurno (25 horas aproximadamente) ou semidiurno (12,4 horas aproximadamente). O prisma de maré é o volume de água que entra no sistema durante a maré enchente e está intimamente relacionado com a amplitude da maré, pois é o produto desta com a área superficial do sistema.

Como a onda da maré é resultado da ação de um conjunto de forças, pode ser decomposta em diversas ondas sinusoidais, denominadas componentes harmônicas da maré. Além das componentes harmônicas diurnas e semidiurnas dominantes na maré, esta apresenta também componentes de menor frequência, com período quinzenal (sizígia e quadratura), mensal e anual. As oscilações com período anual são responsáveis pela maré equinocial: nos períodos da primavera e do outono, mais especificamente nos meses nos quais ocorre o equinócio (março e

setembro), a maré de sizígia alcança seu valor máximo (Miranda, *op.cit.*).

Esse forçante é dominante para gerar movimentos (correntes) e mistura em sistemas estuarinos, envolvendo intensos processos advectivos e difusivos, variáveis espacialmente e condicionados pela geometria, sendo esta um elemento importante no comportamento físico da onda de maré durante sua propagação para o interior do sistema. Neste processo, a onda de maré sofre oscilações harmônicas de curto período, ocasionadas pela topografia local, principalmente pela convergência/divergência da linha de costa e pelo atrito com o fundo, podendo deformar significativamente a onda de maré (Miranda, *op.cit.*).

1.3.3 A influência do vento na circulação

O vento, ao fluir sobre a superfície da água, exerce sobre ela uma tensão superficial (“wind stress”), que é o mecanismo pelo qual transfere-se momento da atmosfera para o oceano induzindo a formação de correntes superficiais (STEWART, 2008). Em corpos d’água costeiros esse efeito se apresenta sobreposto ao padrão cíclico imposto pelo movimento das marés.

Segundo Vilela (1992), em bacias costeiras o vento pode ser um fator de grande importância na dinâmica local, podendo modificar o padrão normal de circulação das marés, sendo este tipo de questão de suma importância, por exemplo, no estudo do destino de poluentes em um determinado corpo d’água. Segundo a autora, no caso de corpos d’água restritos, como a BG, um vento fluindo em direção a costa causa, além da corrente superficial, um empilhamento da água, devido ao fato da costa restringir o movimento desta, desenvolvendo inclinações de superfície. Isso causa um aumento do gradiente horizontal de pressão e, em resposta a este aumento, surgem correntes que se superpõem à

deriva inicial devida ao vento, causando uma inversão de corrente em profundidade, formando assim um escoamento compensatório.

O efeito geral do vento escoando sobre um corpo d'água como a BG é a indução de uma distribuição das elevações de superfície livre superpostas à maré local e de correntes, que variam de velocidade e direção com a profundidade e bem como de região para região (BOWDEN, 1984, *apud* VILELA, 1992).

A tensão superficial (T) é calculada em função da velocidade do vento a 10 metros da superfície livre do mar (U_{10}), da densidade do ar (ρ_a) e de um coeficiente de arrasto (C_D), como demonstrado pela fórmula:

(Eq. 1)
$$T = \rho_a C_D U_{10}^2$$

Nota-se a importância crucial do coeficiente de arrasto pois, a partir dele converte-se a velocidade do vento em tensão superficial. Muitos estudos sobre esse coeficiente já foram publicados baseados em experimentos que aferiram medidas da turbulência na camada limite superficial (STEWART, 2008).

O coeficiente de arrasto varia com a intensidade do vento (Fig. 1), assim, quanto maior for a velocidade do vento, maior é a transferência de momento para a superfície do mar e conseqüentemente maior a indução de formação de correntes superficiais.

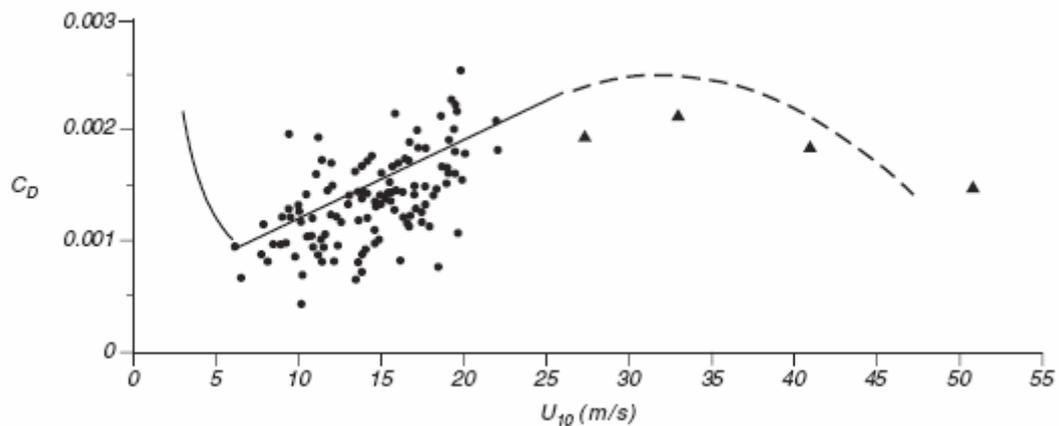


Figura 1: Coeficiente de arrasto (C_D) como função da velocidade do vento a 10 metros. As linhas são de equações e as bolas e triângulos de observações. Retirado de Stewart, 2008.

A tensão superficial do vento é um processo turbulento agindo sobre a hidrodinâmica, logo, é um processo sub-grade parametrizado nos modelos hidrodinâmicos.

1.4 Caracterização da Área de Estudo

A Baía de Guanabara (Fig 2) localiza-se entre as latitudes $22^{\circ} 41'$ e $22^{\circ} 58'$ Sul e as longitudes $43^{\circ} 02'$ e $43^{\circ} 18'$ Oeste. Possui área de 384 km^2 , sendo 56 km^2 de ilhas e 328 km^2 de superfície livre e perímetro de 131 Km. Zonalmente mede 28 Km e de meridionalmente, 30 Km. A entrada entre o forte de São João e a fortaleza de Santa Cruz possui apenas 1,6 Km. Possui uma área de manguezais de aproximadamente 90 km^2 , dos quais 43 km^2 constituem a área de proteção ambiental de Guapimirim. A BG já sofreu diversos aterros com objetivo de aumentar a área urbana, como os da praia do Flamengo e da Ilha do Fundão, o que diminuiu em 10% sua área interna de espelho d'água (Kjerfve, 1997).



Figura 2: Imagem de satélite da Baía de Guanabara. Fonte: <http://www.saberweb.com.br/praias-do-brasil/baias-do-brasil/images/baia-de-guanabara.jpg>.

A profundidade da BG varia entre 58 e 0,1 metros. As maiores profundidades são encontradas no canal de navegação e as menores em sua porção norte. Kjerfve *et al.* (1997) apresentaram uma distribuição hipsométrica de profundidades, demonstrando a contribuição percentual das profundidades para a baía (Fig. 3). Desse gráfico se conclui a grande contribuição de cotas inferiores a 10 m para a região.

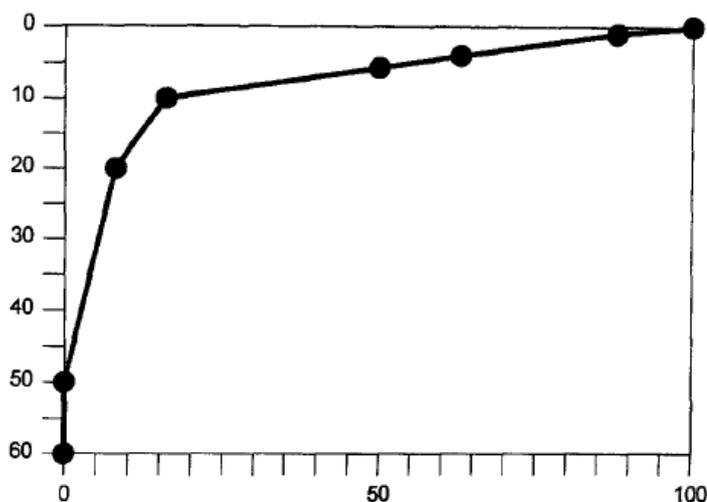


Figura 3: Distribuição hipsométrica de profundidades, adaptado de Kjerfve et al. (1997). O eixo X representa a porcentagem e o eixo Y representa a profundidade, em metros.

A profundidade média segundo Kjerfve (1997) é de 5,7m, menor do que a proposta por Amador (*apud* Bérqamo, 2006) de 7,6m. Tal disparidade pode ser atribuída a escolha arbitrária do limite sul da baía, o primeiro escolhendo como limite a reta entre o forte de São João e a fortaleza de Santa Cruz e o segundo uma reta entre as praias de Itaipú e de Copacabana. A partir da base de dados batimétricos criada neste trabalho e adotando o limite sul da BG como proposto por Amador, a profundidade média encontrada é de 7.9m.

Encontra-se rodeada de maciços montanhosos litorâneos e escarpas da serra do mar. Sua forma atual é reflexo da sua formação geológica (depressão tectônica no Cenozóico), da evolução do nível do mar (afogamento marinho no Pleistoceno) e dos aterros recentes (ação humana no último século) (Kjerfve, 1997; Bérqamo, 2006). A topografia do fundo é reflexo do aporte sedimentar, transporte e deposição pelas correntes, responsável pela suavização da topografia (Sema, 1998, *apud* Bérqamo, 2006).

A hidrodinâmica da BG é fortemente influenciada pela maré. Apresenta maré mista com predominância semidiurna. A altura média da maré na região é de 0,7m, e alturas em torno de 1,1m e 0,3m são observadas na

primavera, em períodos de sizígia e quadratura, respectivamente (Kjerfve et al. 1997). Possui 20 estações maregráficas no seu interior, contando com as estações de Copacabana e de Itaipú (Fig. 4).

Segundo estudo realizado por Bérghamo (2006) no qual foram realizadas campanhas oceanográficas na BG, as oscilações das correntes na região se apresentam com características semidiurnas. Nesse mesmo estudo, foram encontrados valores de corrente, na componente longitudinal, na entrada da baía, na ordem de $-0,5\text{m s}^{-1}$ e $0,7\text{m s}^{-1}$ em período de quadratura, no inverno, e $-0,6\text{m s}^{-1}$ e $0,8\text{m s}^{-1}$ em período de sizígia, também no inverno (velocidade < 0 significa corrente vazante).



Figura 4: Localização das estações maregráficas no interior da BG, segundo Catálogo de Informações Maregráficas Brasileiras (FEMAR, 2000).

Apesar de ser dominada pelo regime de marés, o vento é um importante fator de alteração das correntes, principalmente no transporte superficial em locais mais abrigados e com menores profundidades (Vilela, 1992; Rosman, 2001; Sampaio, 2003).

A BG sofre influência da atuação de processos meteorológicos de diversas escalas espaciais e temporais,

localmente e remotamente gerados como, por exemplo, anticiclones subtropicais do Atlântico Sul, frentes frias, ciclones extratropicais, brisas marítimas e brisas terrestres, brisas de montanha e circulação local (JOURDAN, 2007).

Jourdan (2007), utilizou dados horários de direção e intensidade para caracterizar a distribuição horizontal do vento na região metropolitana do Rio de Janeiro. Os dados das estações do aeroporto do Galeão e do Santos Dumont, foram obtidos através de observações METAR, no período de 2002 a 2006, totalizando 36188 e 36098 observações, respectivamente.

A direção e intensidade do vento possui grande variância no interior da BG (Fig. 5). A estação do aeroporto Santos Dumont, localizada próxima à entrada da BG, apresenta na sua composição diária um padrão norte-sul evidente, já a estação do aeroporto do Galeão, os ventos de sudeste e leste são mais significativos (JOURDAN, 2007), demonstrando a significativa variabilidade espacial do campo de vento e indicando a complexidade na representação deste forçante em um modelo hidrodinâmico da BG.

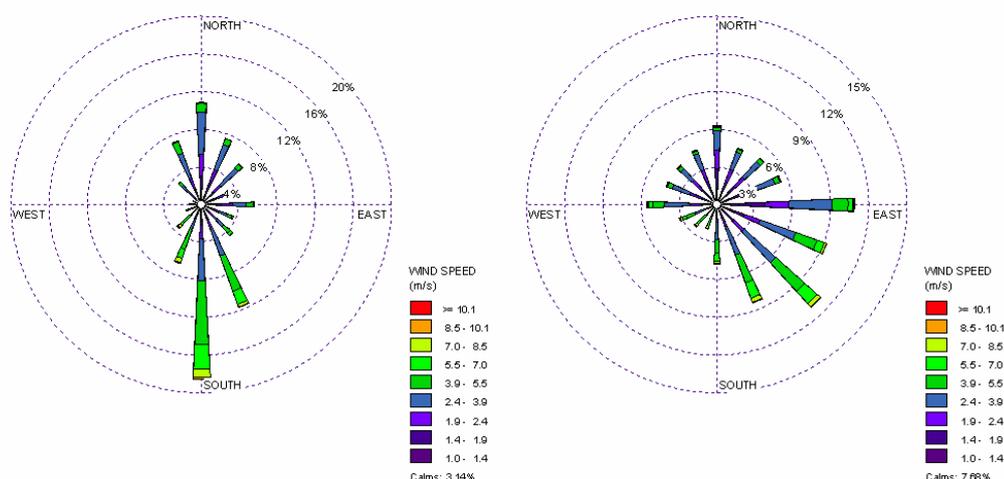


Figura 5: Rosa dos ventos anual das estações do Santos Dumont e do Galeão, respectivamente. Retirado de Jourdan (2007).

O período da madrugada e manhã é caracterizado pela predominância da componente norte, enquanto que o período da

tarde e noite é caracterizado pela predominância de ventos da componente sul. Esse padrão observado sugere uma modulação através do mecanismo de brisa terrestre e marítima (Op. cit., 2007) (Fig. 6).

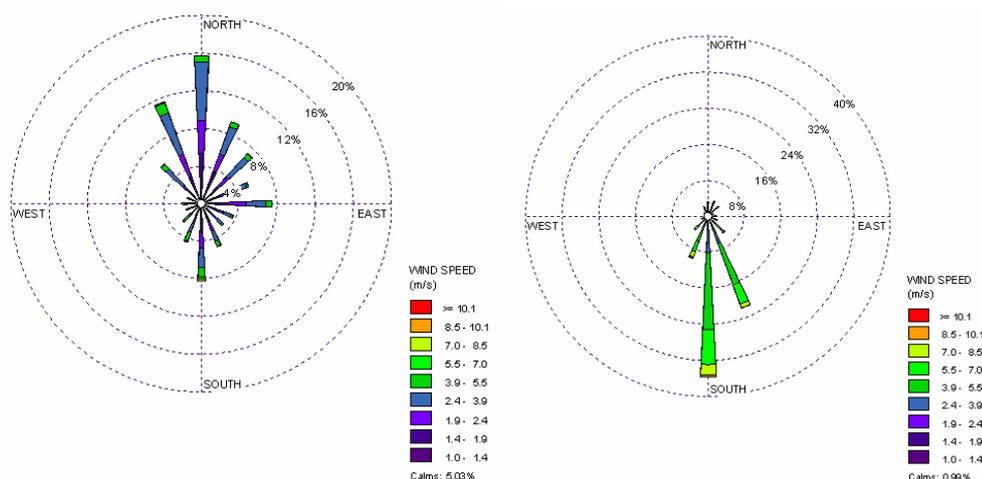


Figura 6: Rosa dos ventos do aeroporto Santos Dumont, nos períodos da madrugada e da tarde, sugerindo o sinal da brisa terrestre e marítima, respectivamente. Retirado de Jourdan (2007).

Este padrão da circulação atmosférica em baixos níveis é interrompido quando há influência da entrada de sistemas frontais na região que, apesar de ocorrerem durante todo o ano, no período entre junho e agosto (inverno) ocorrem com maior frequência, atingindo uma média de 13 frentes, com intervalos de 6 dias entre sistemas frontais consecutivos (KJERFVE, 1997). Durante a passagem de frentes, a intensidade do vento frequentemente ultrapassa 10 m/s, podendo atingir mais de 25 m/s, fluindo de Sudoeste e persistindo por 12-24 horas em média (VILELA, 1992).

2 Metodologia

O presente trabalho utiliza a modelagem numérica computacional como método de investigação da hidrodinâmica da BG, logo, a metodologia apresentada neste documento consiste

basicamente na descrição do modelo e dos passos necessários à implementação do mesmo. Pode-se dividir a metodologia da modelagem em 3 partes básicas: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

À parte da implementação do modelo hidrodinâmico, realizou-se uma pesquisa bibliográfica a cerca da hidrodinâmica da BG, da modelagem numérica computacional em si, do modelo utilizado (Princeton Ocean Model), e da linguagem de programação na qual ele está desenvolvido (Fortran).

2.1 O Modelo

Foi escolhido o modelo Princeton Ocean Model (POM), modelo de domínio público, desenvolvido no *Atmospheric and Oceanic Sciences Program* da universidade de Princeton e no *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)* da *National Ocean and Atmosphere Agency (NOAA)* (BLUMBERG & MELLOR, 1987).

O POM é bem conhecido e amplamente utilizado (BOCK, 2010; FRAGOSO, 1999; TAKANAKA, 2006; SILVA, 2005) o que assegura a viabilidade do trabalho. A seguir, são descritas as principais características do modelo, como apresentadas por Fragoso (1999):

- Equações governantes primitivas
 - Movimento nas direções zonal e meridional..
 - Aproximação hidrostática.
 - Continuidade de volume.
 - Estado da água do mar.
 - Conservação de Sal e Calor.
- Equações primitivas resolvidas pelo método de diferenças finitas.
- Sistema de coordenadas sigma, onde a coordenada cartesiana vertical z é substituída pela coordenada sigma. Esse método permite ao modelo uma melhor representação

dos efeitos do relevo de fundo e do contorno de costa sobre a circulação.

- Parametrização dos termos turbulentos realizada utilizando o modelo de fechamento turbulento de segunda ordem de Mellor e Yamada (1982).
- Esquema de integração *Leap-Frog* (centrado no tempo e no espaço).
- Esquema de discretização utilizando grade do tipo C de Arakawa.
- Técnica de separação de modos, na qual as equações do movimento são separadas em modo externo e modo interno, permitindo que sejam utilizados intervalos de tempo (Δt) diferentes na integração do modelo. Como a velocidade da onda externa é bem maior do que da onda interna, esta técnica permite significativa economia no tempo de processamento e não compromete a estabilidade do modelo, já que satisfaz a condição de Courant-Friedrichs-Levy (CFL).

2.2 Pré-Processamento

2.2.1 Batimetria

A aplicação de um modelo hidrodinâmico numérico em alta resolução espacial exige, entre outros passos, a elaboração de um mapa batimétrico digital em alta resolução espacial. Para tal, foi adotada a resolução espacial uniforme de 30 metros.

Para que a representação da batimetria seja mais próxima da realidade e não contenha muitos pontos de extrapolação durante a interpolação, a base de informação batimétrica deve ter uma resolução próxima à do modelo batimétrico a ser construído. Devido ao fato, foi necessário recorrer às folhas de bordo (FB).

Folhas de Bordo são utilizadas na confecção das cartas náuticas e consistem basicamente da plotagem das informações

batimétricas coletadas ao longo de uma campanha hidrográfica (Fig. 7), contendo portanto maior densidade de informações do que uma carta náutica, sendo uma fonte de informação mais adequada ao projeto proposto.



Figura 7: Folha de Bordo no 1511-002-82, representando a entrada da BG.

Deve-se lembrar que as FB utilizadas são de anos diferentes, e a mais recente data de 1987, podendo existir pequenas defasagens. Figueiredo et.al. (2008) realizaram um estudo na BG e concluíram, entre outras coisas, que a taxa de sedimentação é da ordem de 0,5-1,0 cm/ano. Além disso, aterros e outras obras de estruturas costeiras alteraram, em algumas regiões, significativamente a batimetria, como na criação do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Antônio Carlos Jobim, o Galeão, no início da década de 60 (KAUFMANN, 2009), como demonstrado na figura 8.



Figura 8: Folha de bordo de 1961 (linha preta), sobreposta a carta náutica 1501 (colorida), demonstrando área de aterro na porção noroeste da Ilha do Governador.

2.2.1.1 Aquisição

As folhas de bordo foram obtidas no arquivo técnico do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) localizado na Ponta da Armação, em Niterói. Mediante um pedido formal de utilização para fins acadêmicos, foram gentilmente cedidas pela MB.

Foi feita uma triagem das folhas de bordo existentes para a região, com a utilização dos mapas índices, com os seguintes critérios:

1. Data das folhas, ou seja, selecionaram-se as mais recentes dentre as possíveis.
2. Otimização do esforço, ou seja, selecionou-se o menor número de folhas possível que cobrissem toda a área, sem muitos trechos superpostos

Para os pequenos trechos onde não foi possível obter folhas de bordo, utilizou-se cartas náuticas para o preenchimento das falhas. A relação das FB e cartas náuticas utilizadas encontra-se na tabela 1, assim como as informações cartográficas das mesmas.

Tabela 1: Folhas de Bordo e Cartas Náuticas utilizadas no processo de digitalização da batimetria.

Numeração	FB/Cartas	Escala	Projeção	Datum
1	1500-05-71	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
2	1511-03-79	1:2 000	UTM	Córrego Alegre
3	1512-07-77	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
4	1532-01-79	1:2 500	Mercator	Córrego Alegre
5	1511-02-82	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
6	1511-01-87	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
7	1511-02-87	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
8	1511-03-87	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
9	1511-04-87	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
10	1512-01-83	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
11	1512-02-83	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
12	1512-03-83	1:2 000	UTM	Córrego Alegre
13	1512-04-83	1:5 000	UTM	Córrego Alegre
14	1512-05-83	1:5 000	UTM	Córrego Alegre
15	1512-06-83	1:5 000	UTM	Córrego Alegre
16	1512-07-83	1:5 000	UTM	Córrego Alegre
17	1512-07-83	1:10 000	UTM	Córrego Alegre
18	1500-04-61	1:10 000	Mercator	Córrego Alegre
19	1501	1:50 000	Mercator	WGS-84
20	1512	1:20 000	Mercator	WGS-84
22	1513	1:20 000	Mercator	WGS-84

2.2.1.2 Digitalização

A digitalização das folhas de bordo foi feita com o software ArcGIS, no laboratório de geografia cartográfica (GeoCart) da UFRJ, sob a responsabilidade do professor doutor Paulo Menezes.

A digitalização consiste em tornar as informações contidas em uma imagem em informações acessíveis ao computador, contendo informações de latitude, longitude e batimetria (x, y e z).

Ao final do trabalho, foram digitalizados 79.324 pontos com informações batimétricas (Fig. 9). Foi utilizada a projeção UTM e o Datum Córrego Alegre durante todo o processo.

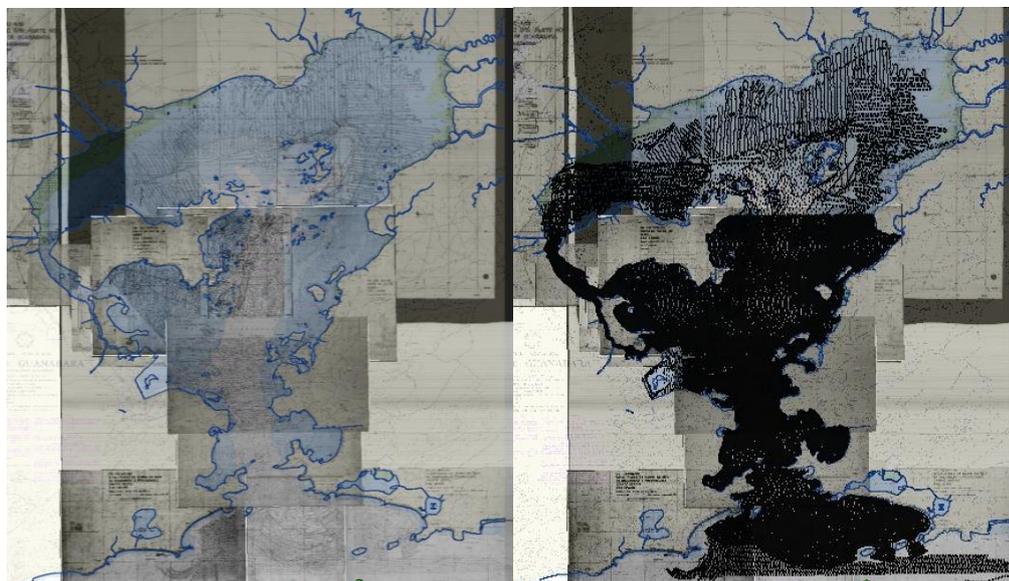


Figura 9: A esquerda, mosaico de folhas de bordo sobreposto à carta náutica 1501 e à linha de costa. A direita, pontos com informação batimétrica digitalizados sobrepostos à figura da esquerda.

2.2.1.3 Linha de Costa

A linha de costa da BG foi obtida através da digitalização de uma imagem da LandSat V (Fig.10), que possui resolução espacial de 30 metros, oriunda do projeto Rede de Informações para a Gestão da Baía de Guanabara (2002), cedida pelo Laboratório GeoCart. Será utilizada em conjunto com os pontos batimétricos na interpolação dos dados.

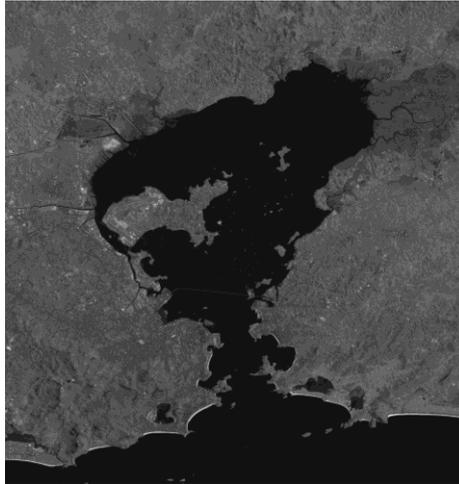


Figura 10: Imagem LandSat V utilizada na digitalização da linha de costa.

2.2.1.4 Confeção da Malha Batimétrica

Os pontos batimétricos em conjunto com a linha de costa foram interpolados com software ArcGIS, com método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighted). Para tal, foi criada uma máscara para pontos em terra contendo zeros, de forma que a interpolação não extrapolasse os limites devidos. Suavizou-se a batimetria gerada com a utilização de uma rotina no Matlab.

Foi gerada uma grade de latitude e longitude regular, com 30 metros de resolução, com as seguintes dimensões: 1078 pontos no eixo Y e 906 pontos no eixo X.

2.2.2 Forçantes

Para representar os cenários hidrodinâmicos mais característicos da BG, foram utilizados como forçantes para o modelo a maré e o vento.

Devido ao enfoque deste trabalho, o efeito baroclínico decorrente da descarga fluvial não foi considerado. Segundo Santos (1995, *apud* SAMPAIO, 2003) a descarga fluvial na BG não é suficiente para modificar o padrão de circulação da mesma, pois a razão entre o deflúvio de água doce e o prisma de maré durante

24 horas, denominado razão de fluxo, é inferior a 5%, o que indica que a maré é o principal forçante da dinâmica da BG (BÉRGAMO, 2006).

Nos próximos tópicos serão descritos o tratamento e a análise dos dados referentes aos forçantes.

2.2.2.1 Maré

Segundo Siqueira (2002), marés astronômicas sintéticas geradas a partir das principais constantes harmônicas de uma estação maregráfica representativa, podem ser aplicadas em simulações numéricas (BÖCK, 2010 ; FRAGOSO, 1999 ; SAMPAIO, 2003 ; VILELA 1992).

Porém, para que a maré seja utilizada como forçante de um modelo, deve-se conhecer suas características físicas no local, tal como se dá a sua propagação para o interior da região a ser modelada. Após essa análise deve-se obter a série temporal de valores da elevação da superfície livre do mar na região de interesse e então adequá-la ao formato de entrada do modelo (BOCK, 2010, FRAGOSO, 1999). Para isso, foram realizados os seguintes passos:

- Seleção das estações a serem utilizadas. Foram escolhidas as estações de Copacabana e Itaipú (Fig. 11), por melhor representarem as características da onda de maré na região da entrada da BG.
- Obtenção da tábua de maré (constantes harmônicas) no Catálogo de Informações Maregráficas Brasileiras (FEMAR, 2000), referentes às duas estações escolhidas.
- Reconstituição da série de valores de elevação do nível do mar a partir do programa PACMARÉ (FRANCO, 2009) para as duas estações.

- Interpolação espacial linear para a imposição da maré, de forma a representar a defasagem observada nas séries de maré das duas estações escolhidas, na fronteira sul do modelo.

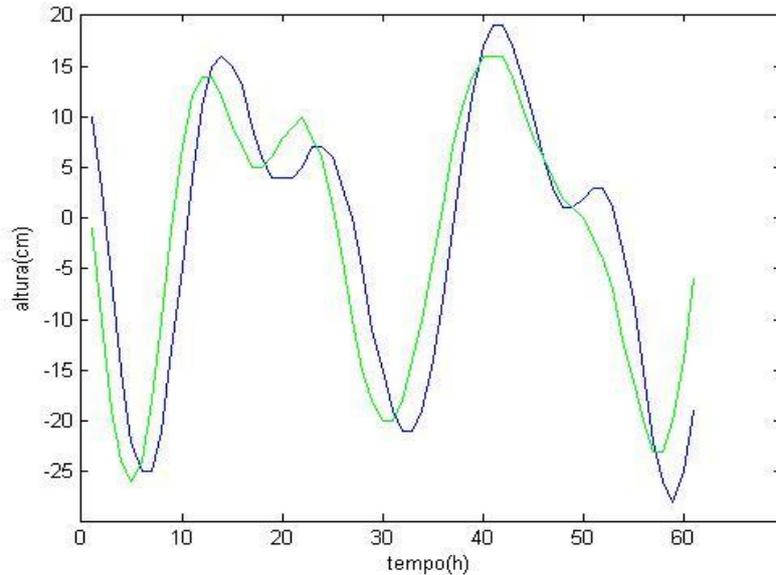


Figura 11: Comparação entre a maré de Itaipú (verde) e Copacabana (azul). Notam-se dois ciclos diários de maré de quadratura tipicamente semi-diurna com desigualdades.

2.2.2.2 Vento

Serão utilizados dados de vento modelados, dessa forma busca-se melhor representar o campo de vento sobre a região, pois, como exposto na seção 1.4, existe significativa variabilidade espacial da direção e intensidade do vento no interior da BG.

Os dados serão extraídos do modelo regional MM5 (*Mesoscale Model 5th generation*), utilizado pela Força Aérea Brasileira no projeto PNTar (Previsão Numérica do Tempo em alta resolução) e desenvolvido pelo LAMMA/UFRJ. O modelo utiliza a técnica de grades aninhadas. No âmbito do projeto BG, foi desenvolvida pela equipe responsável pela modelagem atmosférica

uma grade aninhada de 1 km de resolução para a Baía de Guanabara. (Fig. 12).

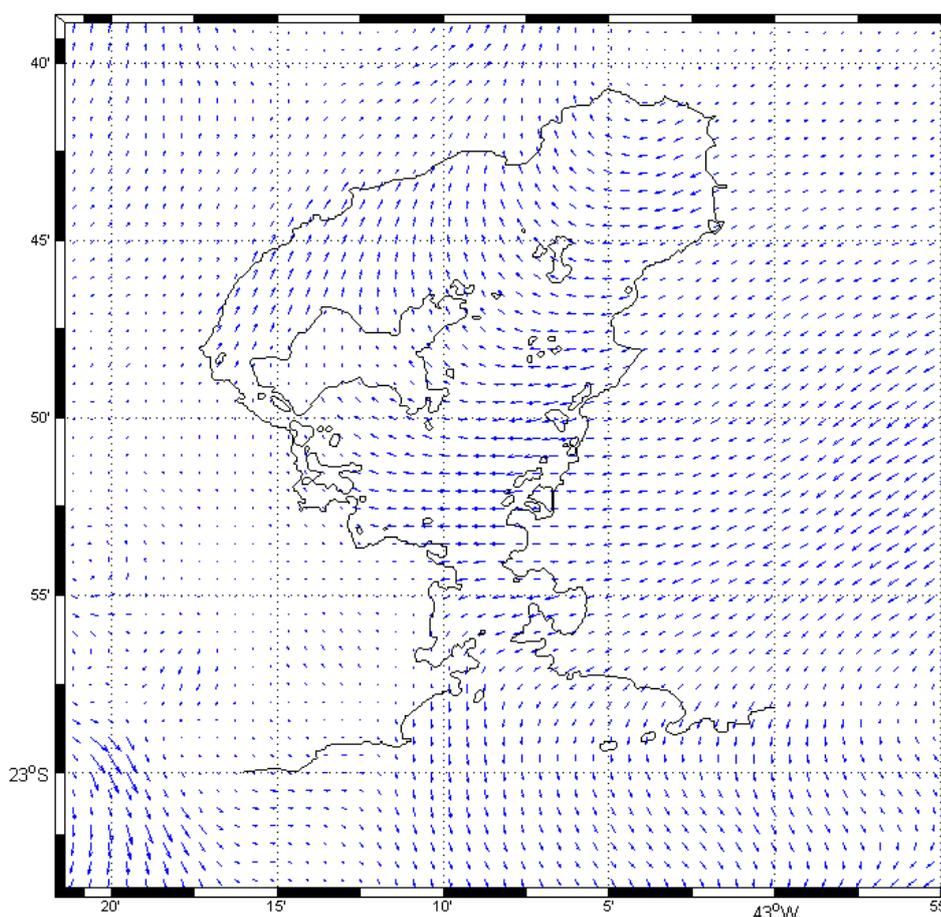


Figura 12 : Exemplo do resultado do modelo atmosférico MM5, utilizado na modelagem hidrodinâmica da BG. Resolução espacial de 1 Km.

O campo extraído do modelo atmosférico foi interpolado para a grade do modelo hidrodinâmico utilizando-se o método de interpolação linear.

2.3 Implementação

2.3.1 Cenário

A escolha do cenário ambiental é justificada pela realização no dia de lançamentos de derivadores, oriundos do projeto BG, na Baía de Guanabara. Dessa forma, além de analisar o tema proposto no trabalho, pode-se utilizar tais dados para analisar o desempenho do modelo implementado.

Foi escolhido o dia 17 de junho de 2010 e foram realizados dois experimentos, um considerando unicamente a influência da maré e outro considerando a influência conjunta da maré e do vento.

No mês do experimento, a lua esteve em fase de quarto-minguante no dia 04, lua nova no dia 12, quarto crescente no dia 19 e cheia no dia 26. Na figura 13 está representado a série temporal de maré (maregrama) para todo o mês de junho de 2010 e em detalhe o dia 17. Neste dia, apresentando amplitude máxima de de 63 centímetros, máximo de 24 e mínimo de -39 centímetros.

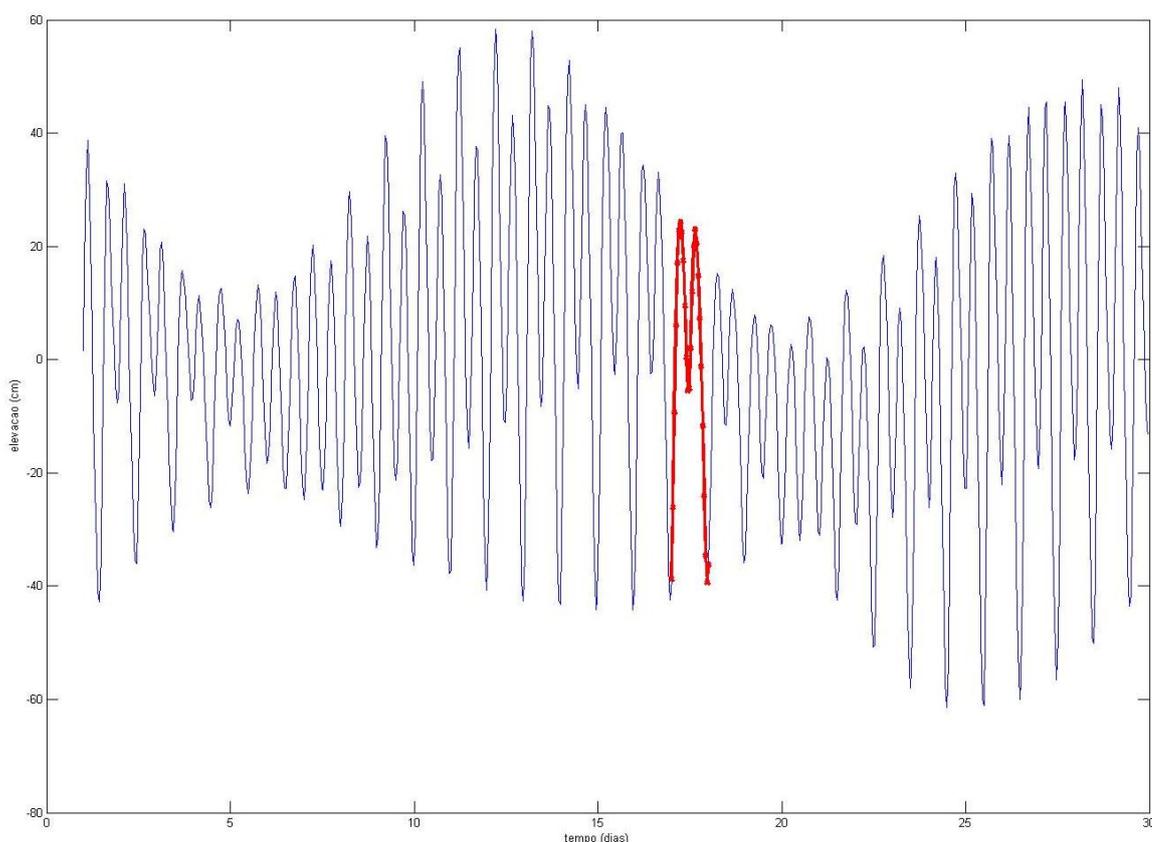


Figura 13 - – Maregrama do mês de Junho de 2010. Em detalhe o dia 17.

Em relação as condições meteorológicas sinópticas de grande escala, o dia 17/06/2010 foi marcado pela influencia da Alta Subtropical do Atlantico Sul (ASAS) sobre o estado do Rio de Janeiro durante todo o dia, propiciando poucas nuvens (Fig. 14) e ventos do quadrante norte de baixa intensidade (Fig. 15).

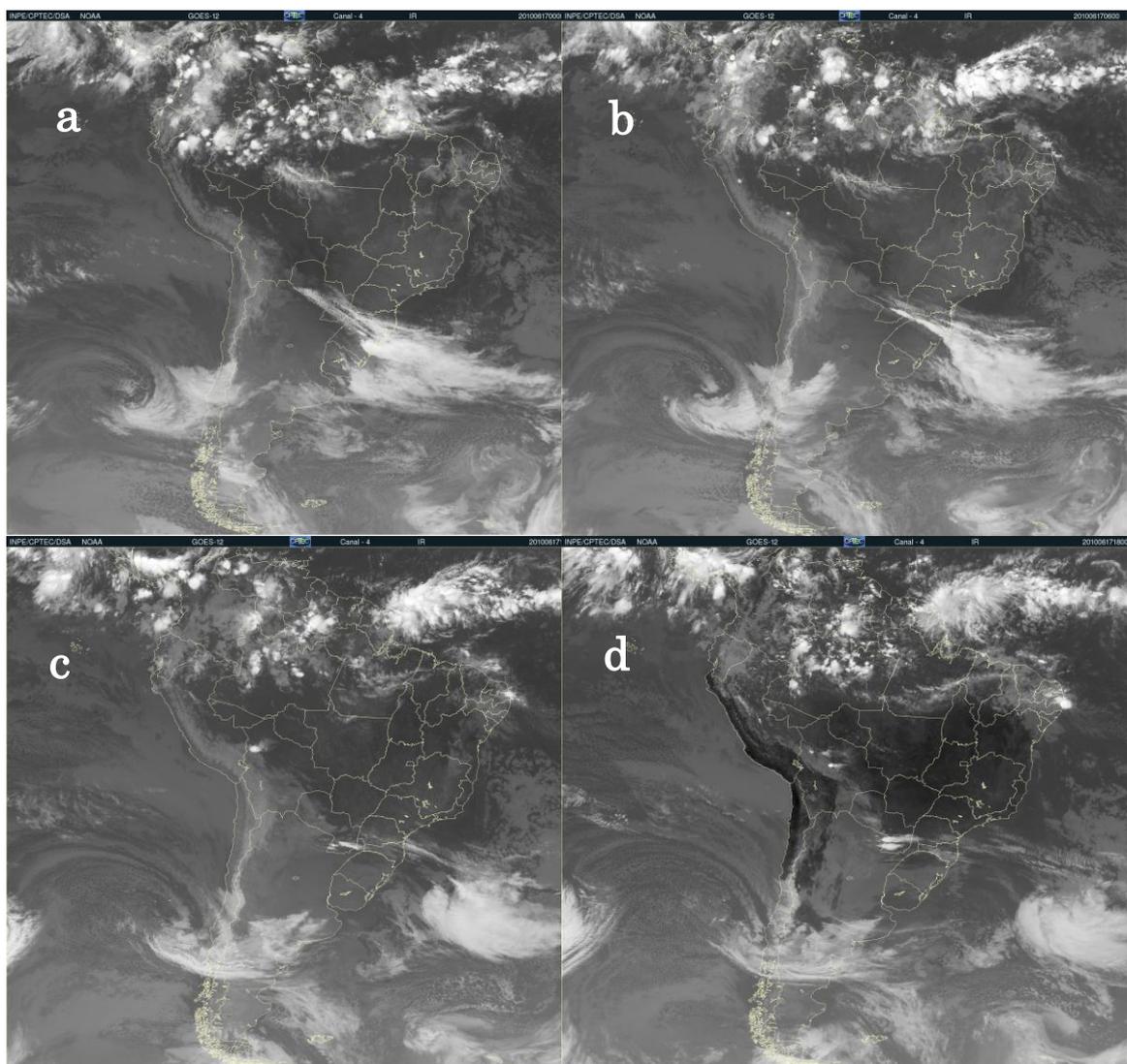


Figura 14 - Imagens do Satélite GOES-12 no canal infravermelho do dia 17/06/2010. a) 00Z, b)06Z, b) 12Z, d)18Z

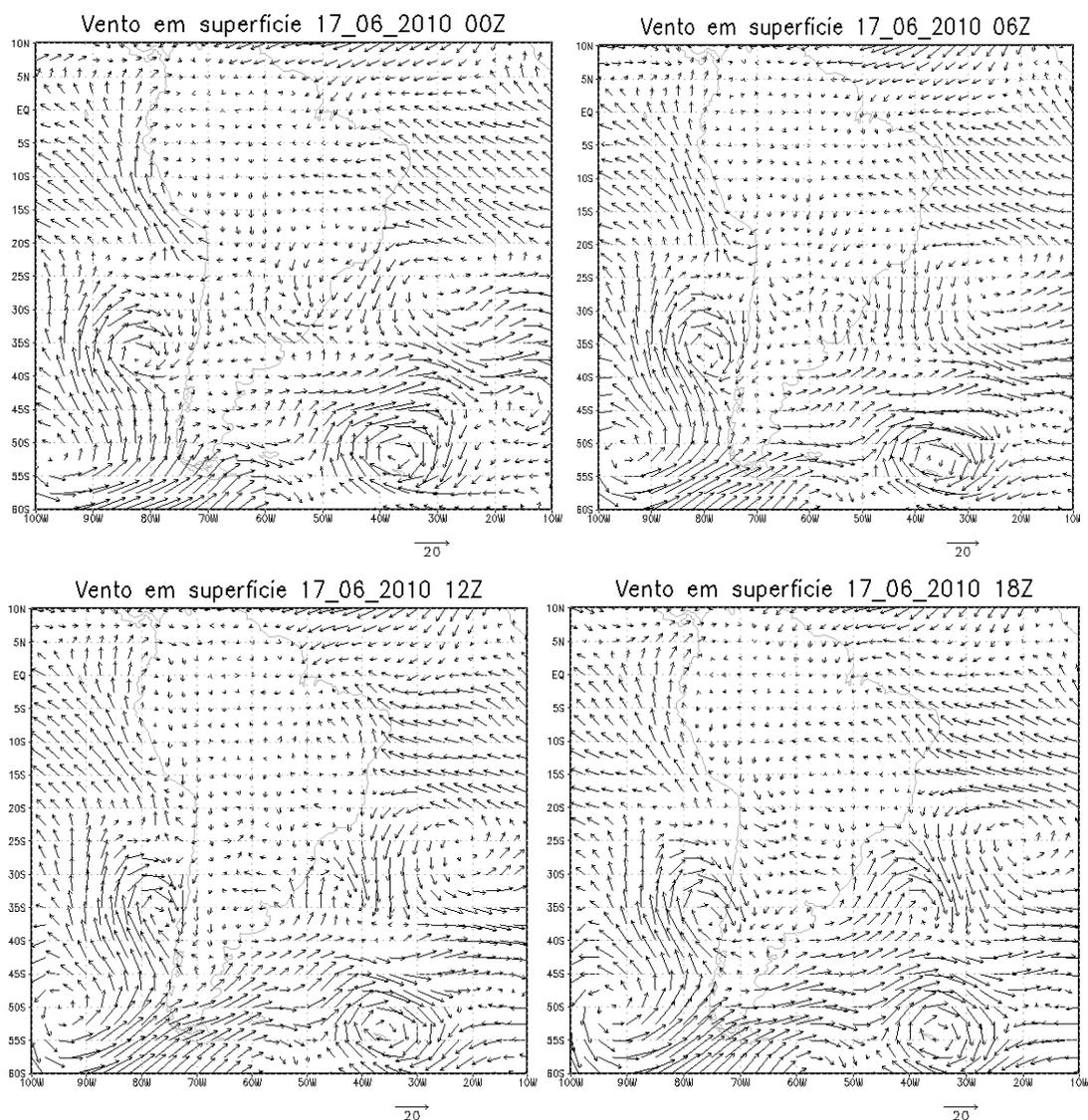


Figura 15 – Campo de vento em superfície para o dia 17, nas horas 00, 06, 12 e 18 Zulu. Dados de reanálise do NCEP/NCAR.

Já em escala regional, a partir de execução do modelo atmosférico regional aplicado para a região de interesse, o campo de vento sobre a BG apresentou significativa variação durante o dia, com ventos predominantemente do quadrante norte até o fim da manhã e predominantemente do quadrante sul no período da tarde (Fig. 16).

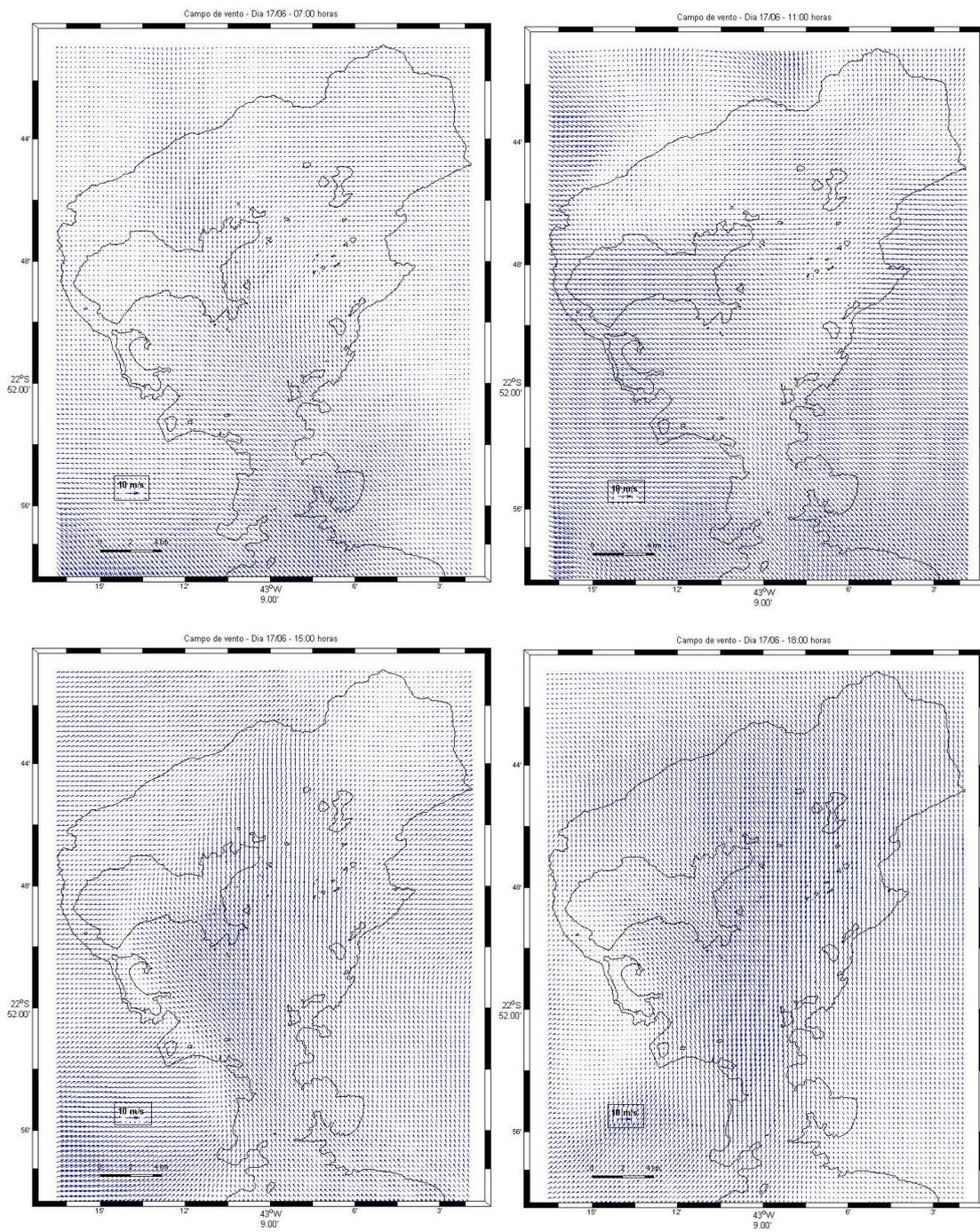


Figura 16 – Campo de vento a 10 metros sobre a Baía de Guanabara para os instantes 07, 11, 15 e 18 horas (hora local).

2.4 Estrutura de Análise dos resultados

Os resultados serão apresentados subdivididos em quatro partes, de forma a se observar a influência do vento sobre a hidrodinâmica da BG em quatro instantes distintos.

A seleção dos resultados gerados pelo modelo a serem analisados foi feita do seguinte modo: a partir da série temporal de energia cinética total foram selecionados 4 instantes consecutivos mais próximos dos mínimos e máximos. Tais instantes correspondem aproximadamente aos instantes de preamar, maré vazante, baixamar e maré enchente para um ponto específico da BG, o Forte da Batalha (Fig. 17).

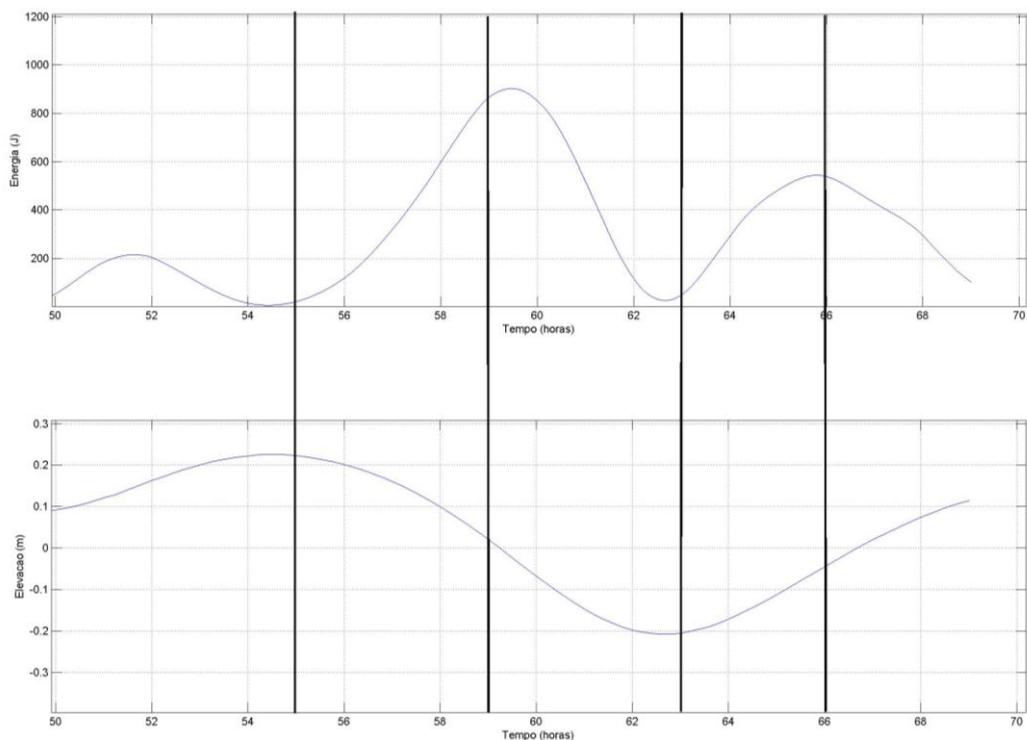


Figura 17 - Energia Cinética total (acima) e série de elevação da superfície livre para o Forte da Batalha (abaixo). Instantes escolhidos para análise marcados pela linha preta.

Devido ao fato de que o modelo foi programado para escrever os campos de saída em um intervalo de uma hora, não foi possível obter o momento exato de estofa de cheia e de vazante, tendo ficado estes entre dois instantes da saída do modelo. Deve-

se ressaltar também que a onda de maré apresenta defasagem espacial no interior da BG e portanto os pontos de máxima e mínima energia cinética total não correspondem ao mesmo instante (por exemplo, preamar e baixamar) no maregrama de dois pontos distintos da BG (Fig 18).

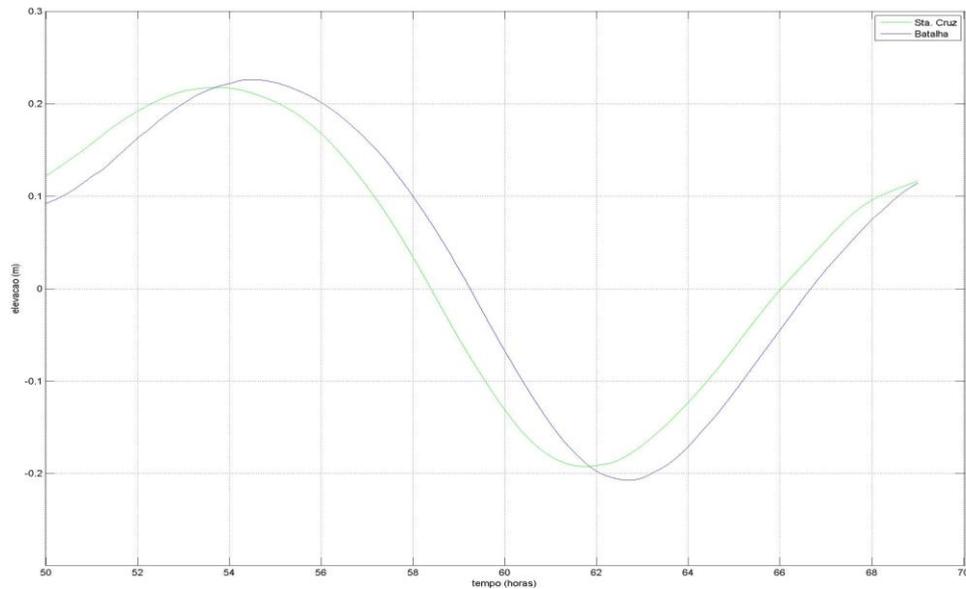


Figura 18 - Maregrama do forte da batalha (Azul) e Fortaleza de Santa Cruz (Verde).

Desta forma, os momentos escolhidos foram 07:00, 11:00, 15:00 e 18:00 horas para os momentos de preamar, maré vazante, baixamar e maré enchente, respectivamente.

Alguns resultados foram analisados setorizadamente. Foram definidos dois setores, Sul e Norte. Tais setores foram selecionados em função de diferenças de intensidade da corrente observadas em resultados anteriores (Fig. 19).

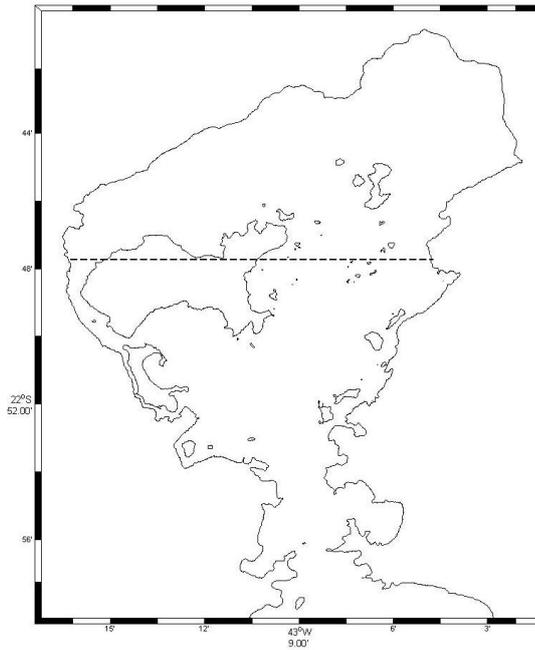


Figura 19 - Divisão da baía nos setores Sul e Norte. A linha tracejada indica a divisão.

Os campos de anomalia de elevação e anomalia de velocidade foram obtidos segundo as equações:

(eq. 2) Anomalia de elevação = (Campo de elevação com vento) - (Campo de elevação sem vento)

(eq. 3) Anomalia de velocidade zonal = (Campo de velocidade zonal com vento) - (Campo de velocidade zonal sem vento)

De forma análoga para a anomalia de velocidade meridional.

Os campos de percentual da influência do vento sobre a velocidade e elevação foram obtidos segundo as equações:

$$(eq. 4) \quad V_{rsv} = (u_{sv}^2 + v_{sv}^2)^{1/2}$$

$$(eq. 5) \quad V_{rcv} = (u_{cv}^2 + v_{cv}^2)^{1/2}$$

$$(eq. 6) \quad A_{vr} = V_{rcv} - V_{rsv}$$

$$(eq. 7) \quad A_{vrR} = A_{vr} * 100 / V_{rsv}$$

$$(eq. 8) \quad A_{el} = e_{lcv} - e_{lsv}$$

$$(eq. 9) \quad A_{elR} = A_{el} * 100 / e_{lsv}$$

Onde:

- V_{rsv} é a Velocidade resultante do experimento sem vento.
- u_{sv} é a componente u do experimento sem vento.
- v_{sv} é a componente v do experimento sem vento.
- Análogo para V_{rcv} , u_{cv} e v_{cv} .
- A_{vr} é anomalia da velocidade resultante.
- A_{vrR} é a anomalia relativa de velocidade resultante.
- A_{el} é a anomalia de elevação.
- e_{lcv} é o campo de elevação do experimento com vento.
- e_{lsv} o campo de elevação do experimento sem vento.
- A_{elR} é a anomalia relativa de elevação.

3 Resultados

3.1 Avaliação do desempenho do modelo

Foram escolhidos 5 pontos no interior da baía onde existem estações maregráficas (fig. 17), a saber, Praia de Itaipú, Forte de Santa Cruz, Ilha Fiscal, Boqueirão e Forte da Batalha, de onde foram realizadas reconstituições sintéticas da maré para o dia do experimento. Tais reconstituições foram então comparadas com séries temporais de elevação do nível do mar oriundas da modelagem realizada.

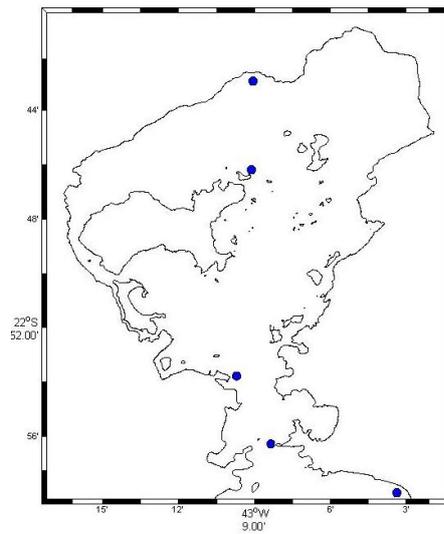
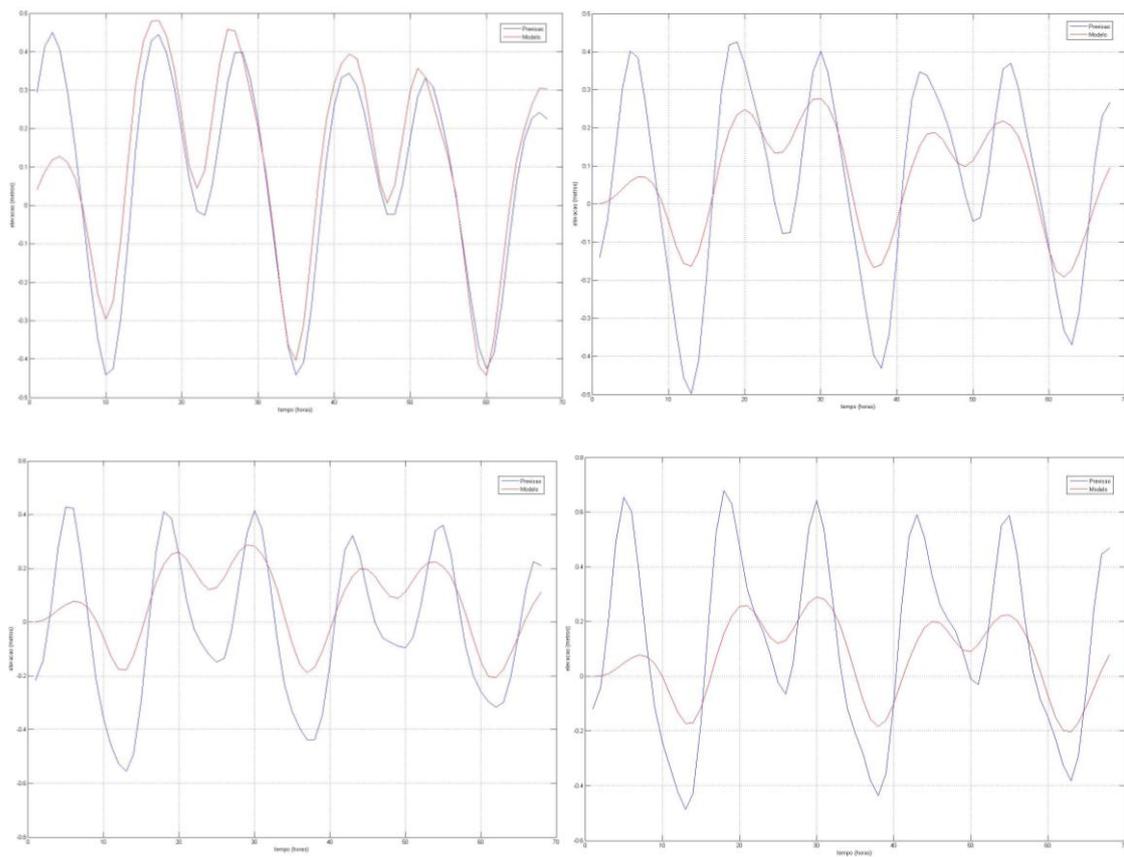


Figura 20 –Localização dos pontos de comparação da série de maré. De baixo para cima: Itaipú, Santa Cruz, Ilha Fiscal, Boqueirão e Forte da Batalha.



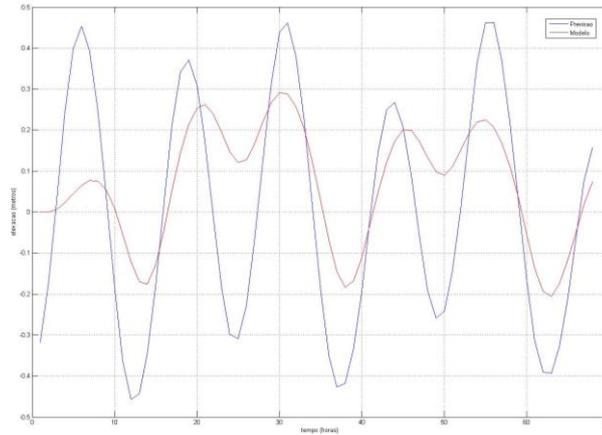


Figura 21 – Comparação entre saída do modelo (vermelho) e previsão de maré (azul). Acima a esquerda, Itaipú, acima a direita, Forte de Santa Cruz, no meio a esquerda, Ilha fiscal, no meio a direita, Boqueirão, em baixo, Forte da Batalha.

No dia do experimento, houve o lançamento de 4 derivadores no canal central da BG que, a deriva, enviam sinal de posição a cada 30 minutos. A partir da diferença de posição entre dois sinais consecutivos, a sua velocidade é estimada.

A velocidade dos derivadores foi comparada com a velocidade do modelo para os pontos onde as mesmas se encontravam, em cada instante (tabela x).

Tabela 2 - Comparação entre a velocidade dos derivadores e do modelo.

Hora	Derivador 1	Derivador 2	Derivador 3	Derivador 4	Modelo
11:00	0.7417	0.7417	0.7322	0.7322	0.0114
12:00	0.3908	0.3843	0.4189	0.3843	0.0323
13:00	0.4086	0.4118	0.4118	0.4118	0.0597
14:00	0.4086	0.4086	0.4003	0.4048	0.0907
15:00	0.4274	0.4624	-999.999	0.4425	0.1287
16:00	0.4356	0.4111	-999.999	0.4111	0.1186

3.2 Apresentação dos resultados

Como exposto no item 2.4, os resultados serão apresentados subdivididos em quatro instantes.

Abaixo, na tabela 3, encontram-se os resultados sumarizados que serão referenciados ao longo da apresentação dos resultados.

Tabela 3– Valores máximos e mínimos de u e v e médias da anomalia relativa de elevação e velocidade para os dois setores da BG analisados.

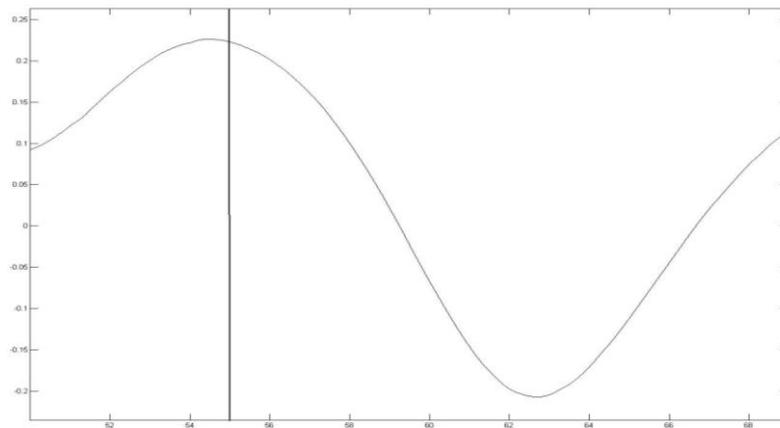
hora/parâmetros	u (máximo e mínimo)	v (máximo e mínimo)	Média da anomalia relativa de elevação		Média da anomalia relativa de velocidade	
			Sul	Norte	Sul	Norte
07:00	0.03 -0.01	0.71 -0.04	0.37%	0.65%	6%	55%
11:00	0.17 -0.08	0.04 -1.74	6%	9%	1%	3%
15:00	0.03 -0.06	0.06 -0.58	0.50%	0.70%	7%	44%
18:00	0.06 -0.13	1.07 -0.05	11%	5%	2%	4%

3.2.1 Instante 1 - 07:00

Neste instante, o estófo de maré cheia já havia passado e a água da BG começava a vaziar. O campo de velocidade apresentava velocidades zonais máximas de 0.03 e -0.01 m/s e meridionais de 0.71 e -0.04 m/s (Tabela 3).

O campo de vento encontrava-se de noroeste nas porções sul e noroeste da BG e fluindo de leste na porção nordeste da mesma (Fig. 21). A influência do vento sobre a velocidade foi significativa sobretudo na porção nordeste da BG (Fig. 22b, 22c e 22d). A direção da corrente também foi fortemente alterada pela influência do vento, principalmente na porção nordeste da BG, apresentando variações maiores que 90 graus (Fig. 23).

A média da anomalia relativa da velocidade resultante foi de 6% no setor sul e 55% no setor norte. A média da anomalia relativa de elevação foi de 0.37% no setor sul e 0.65% no setor norte (Tabela 3). Nota-se que o vento pouco influencia o campo de velocidade na porção sul da BG (Figura 22b).



Campo de vento - Dia 17/06 - 07:00 horas

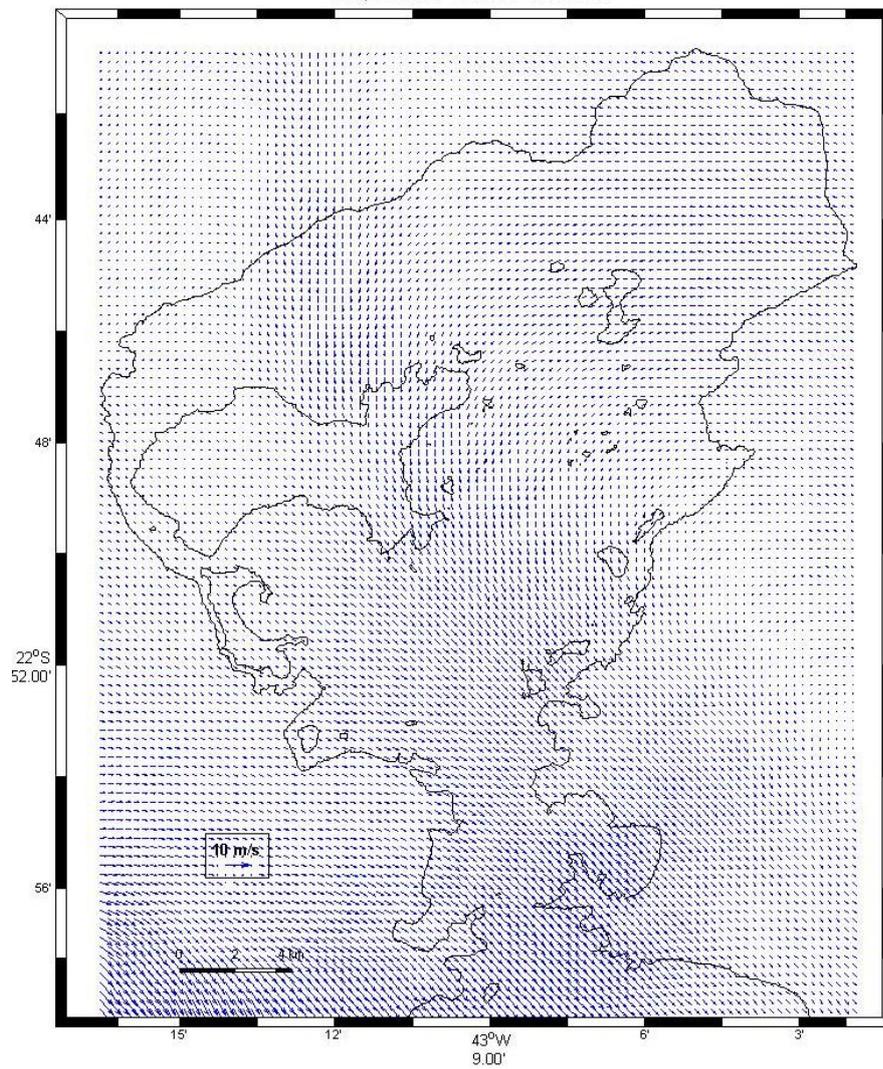


Figura 22 - Instante da maré (acima) e campo de vento para o 07:00 horas do dia 17/06/2010.

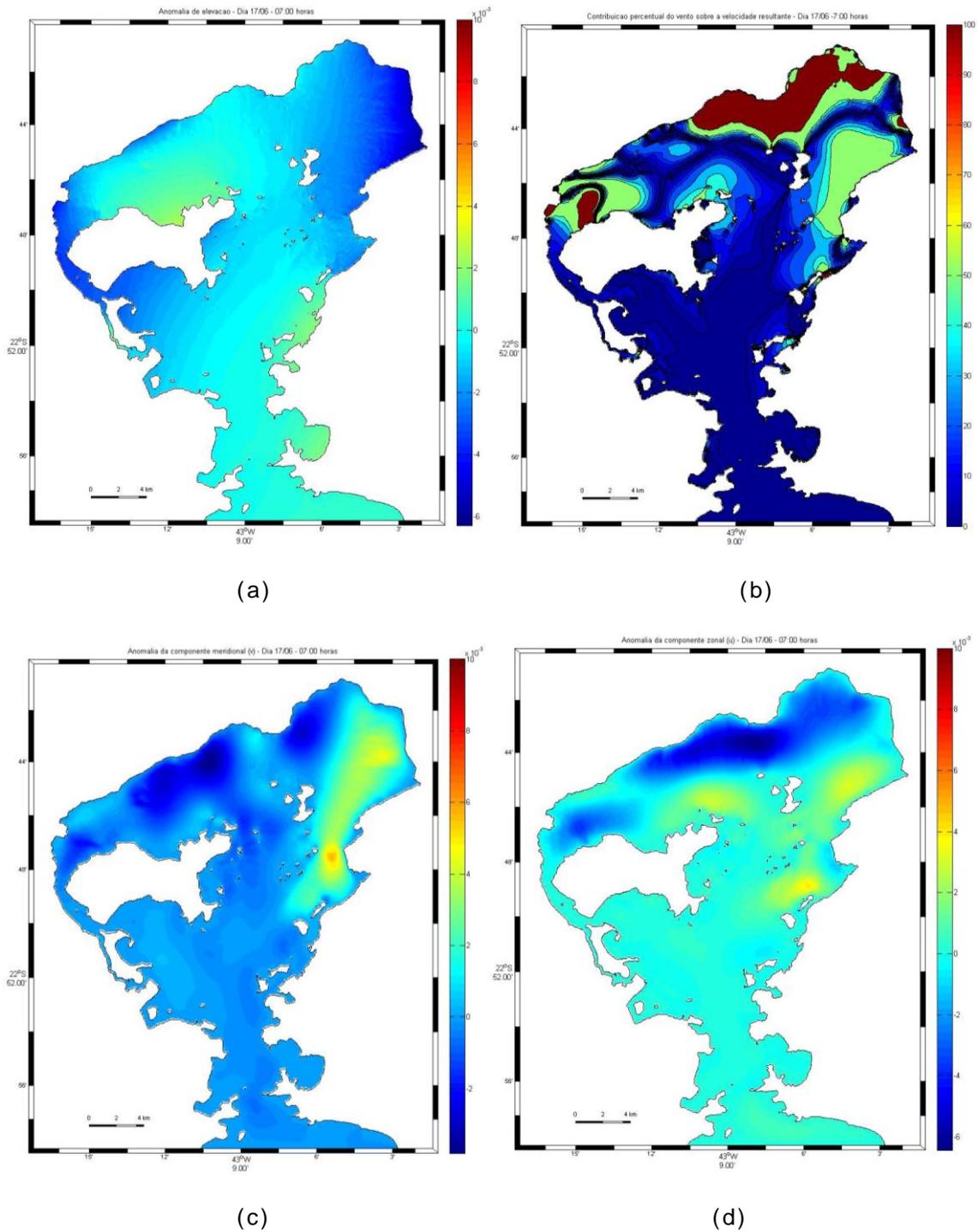


Figura 23 – (a) Campo de anomalia de elevação. (b) Campo percentual da influência do vento sobre a velocidade resultante da corrente. (c) Campo de anomalia da componente meridional de velocidade da corrente. (d) Campo de anomalia da componente zonal de velocidade

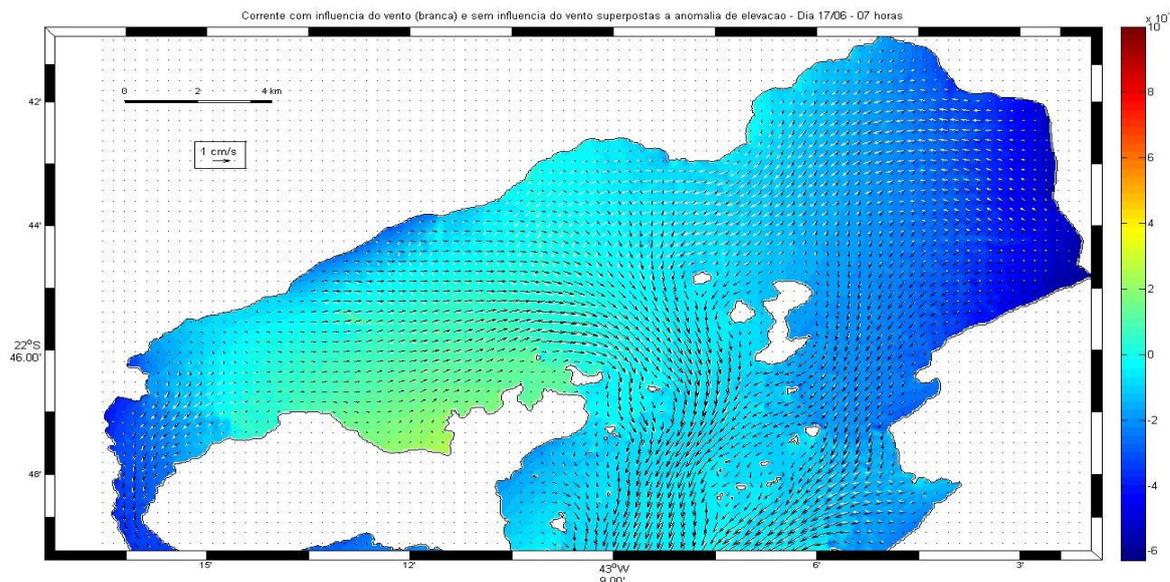


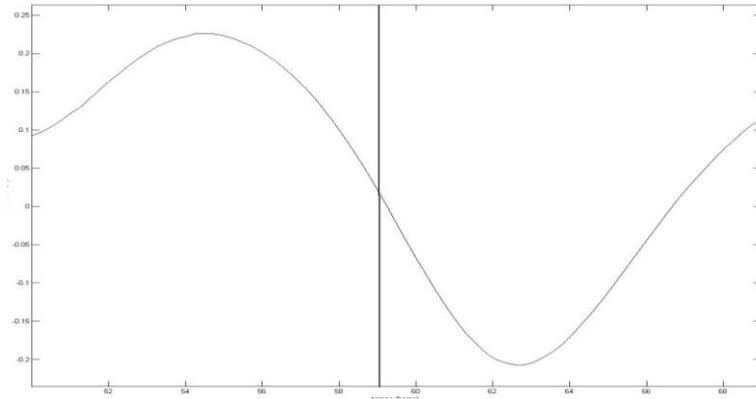
Figura 24 - Campo de corrente do experimento com vento (vetores brancos) superpostos ao campo de corrente do experimento sem vento (vetores pretos), superpostos ao campo de anomalia de elevação (abaixo).

3.2.2 Instante 2 – 11:00

Neste instante, o campo de velocidade apresentava velocidades zonais máximas de 0.18 e -0.08 m/s e velocidades meridionais máximas de 0.04 e -1.74 m/s (Tabela 3).

O campo de vento encontrava-se fluindo predominantemente de noroeste desde a ilha do governador até a entrada da BG, porém fluía de sudoeste na porção nordeste da mesma (Fig. 24). A direção da corrente praticamente não foi alterada pela influência do vento em nenhuma parte da baía sendo dominada claramente pela influência da maré (Fig. 26).

A média da anomalia relativa da velocidade resultante foi de 0.7% no setor sul e 3% no setor norte. A média da anomalia relativa de elevação foi de 6% no setor sul e 9% no setor norte (Tabela 3). Observa-se que a influência do vento sobre o campo de elevação é maior nesse instante de maré do que no instante de cheia.



Campo de vento - Dia 17/06 - 11:00 horas

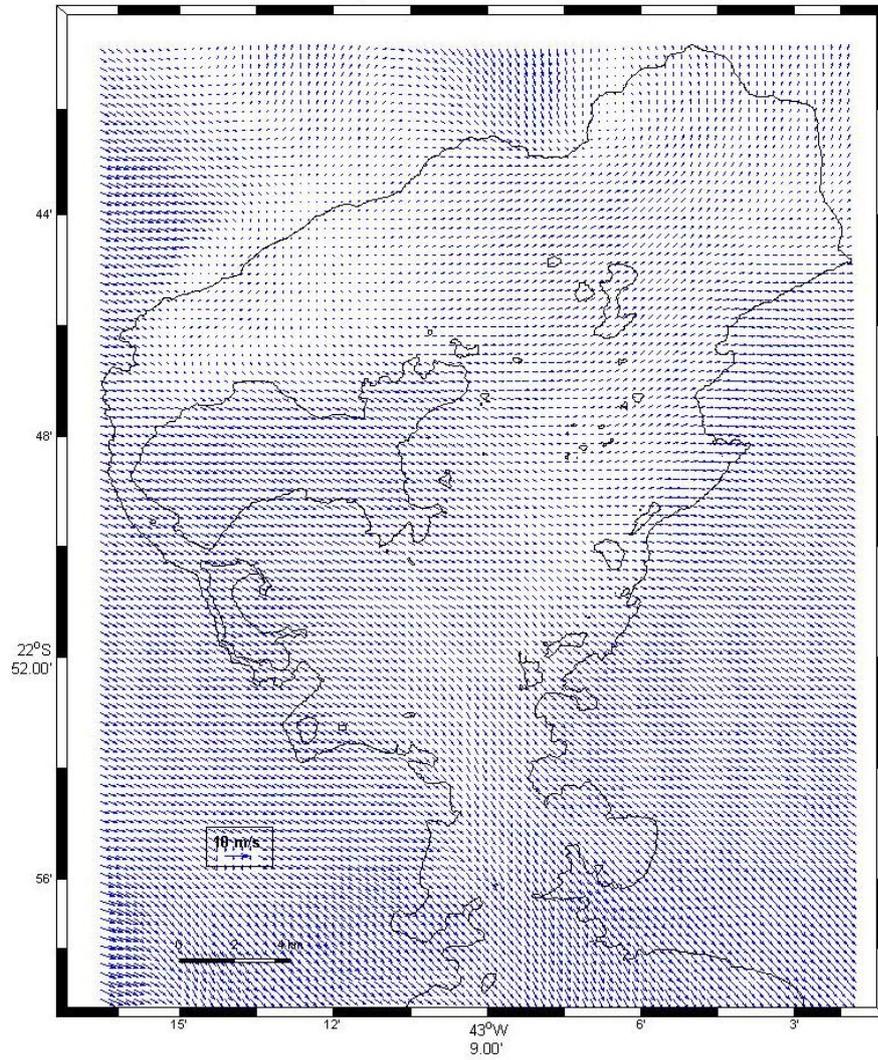


Figura 25 - Instante da maré (acima) e campo de vento para o 11:00 horas do dia 17/06/2010.

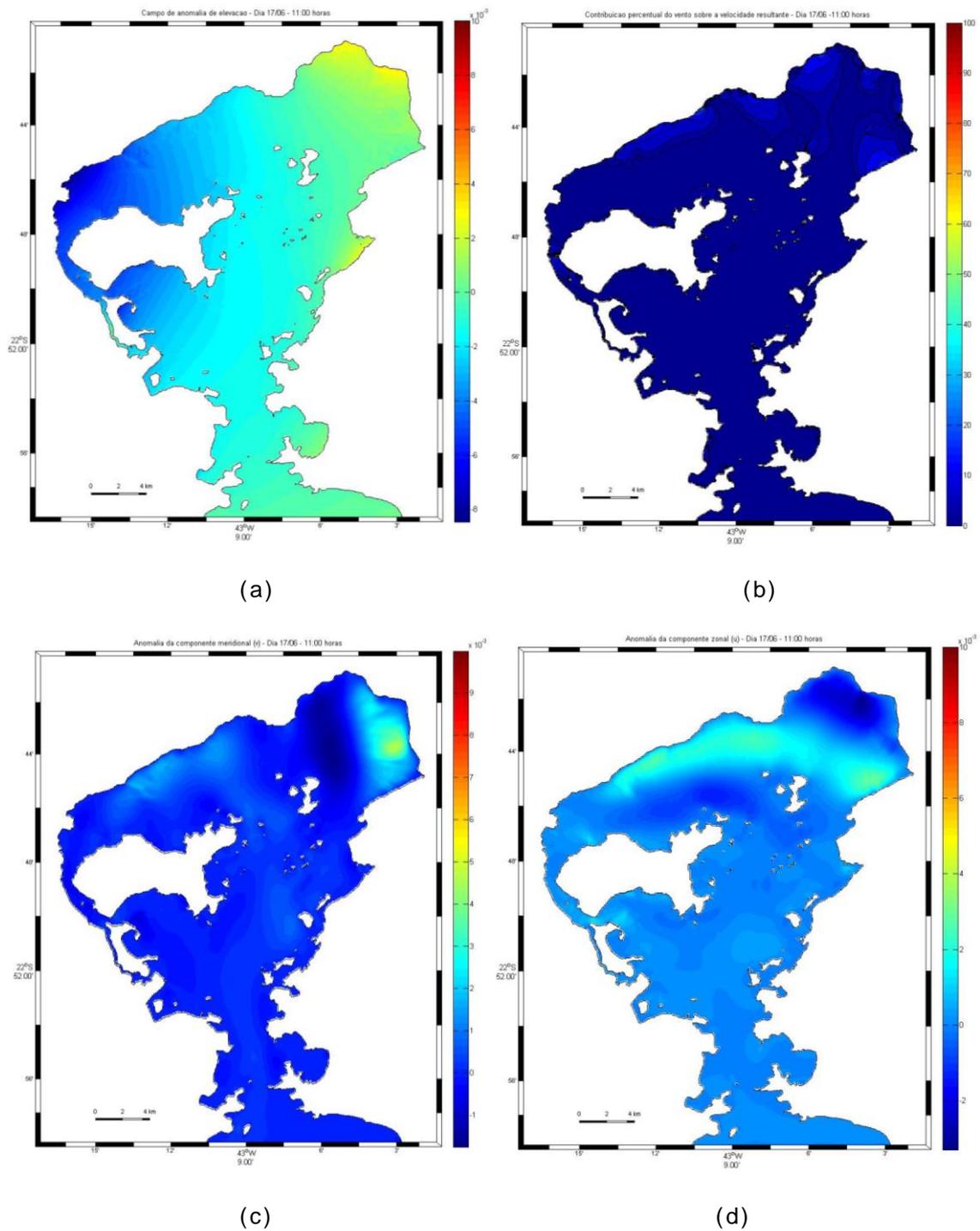


Figura 26 - (a) Campo de anomalia de elevação. (b) Campo percentual da influência do vento sobre a velocidade resultante da corrente. (c) Campo de anomalia da componente meridional de velocidade da corrente. (d) Campo de anomalia da componente zonal de velocidade

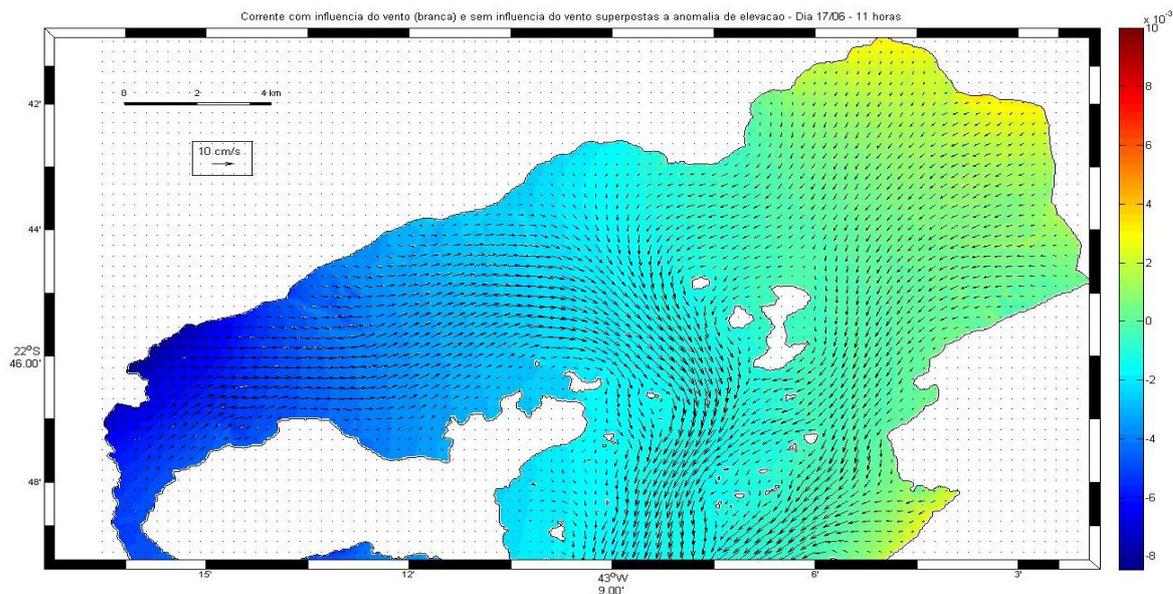


Figura 27 - Campo de corrente do experimento com vento (vetores brancos) superpostos ao campo de corrente do experimento sem vento (vetores pretos), superpostos ao campo de anomalia de elevação (abaixo).

3.2.3 Instante 3 – 15:00

O campo de velocidade nesse instante apresentava velocidades zonais máximas de 0.03 e -0.06 m/s e velocidades meridionais máximas de 0.06 e -0.5 m/s (Tabela 3).

O campo de vento encontrava-se fluindo predominantemente do quadrante sul por toda a baía (Fig. 27). A influência do vento sobre a velocidade foi significativa sobretudo na porção norte (Figs. 28b, 28c e 28d). A direção da corrente foi alterada pela influência do vento na porção nordeste e noroeste da BG, com alterações de até 180 graus em alguns pontos (Fig. 29).

A média da anomalia relativa da velocidade resultante foi de 7% no setor sul e 44% no setor norte. A média da anomalia relativa de elevação foi de 0.5% no setor sul e 0.7% no setor norte (Tabela 3).

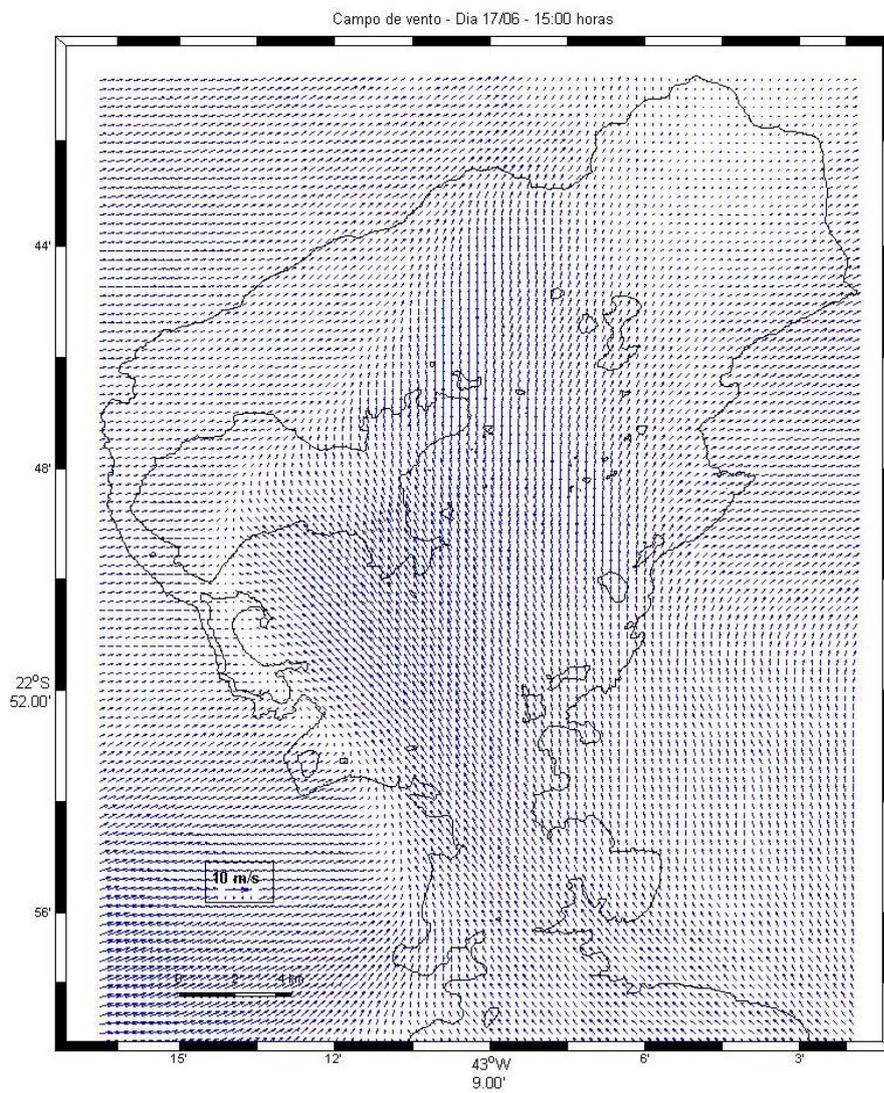
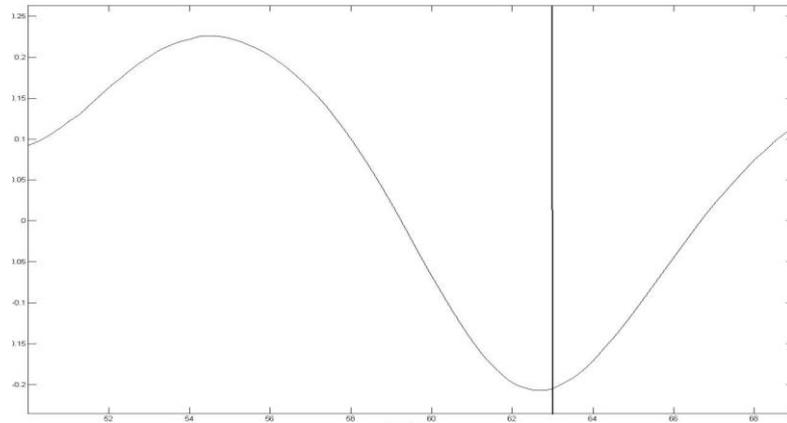


Figura 28 - Instante da maré (acima) e campo de vento para o 15:00 horas do dia 17/06/2010.

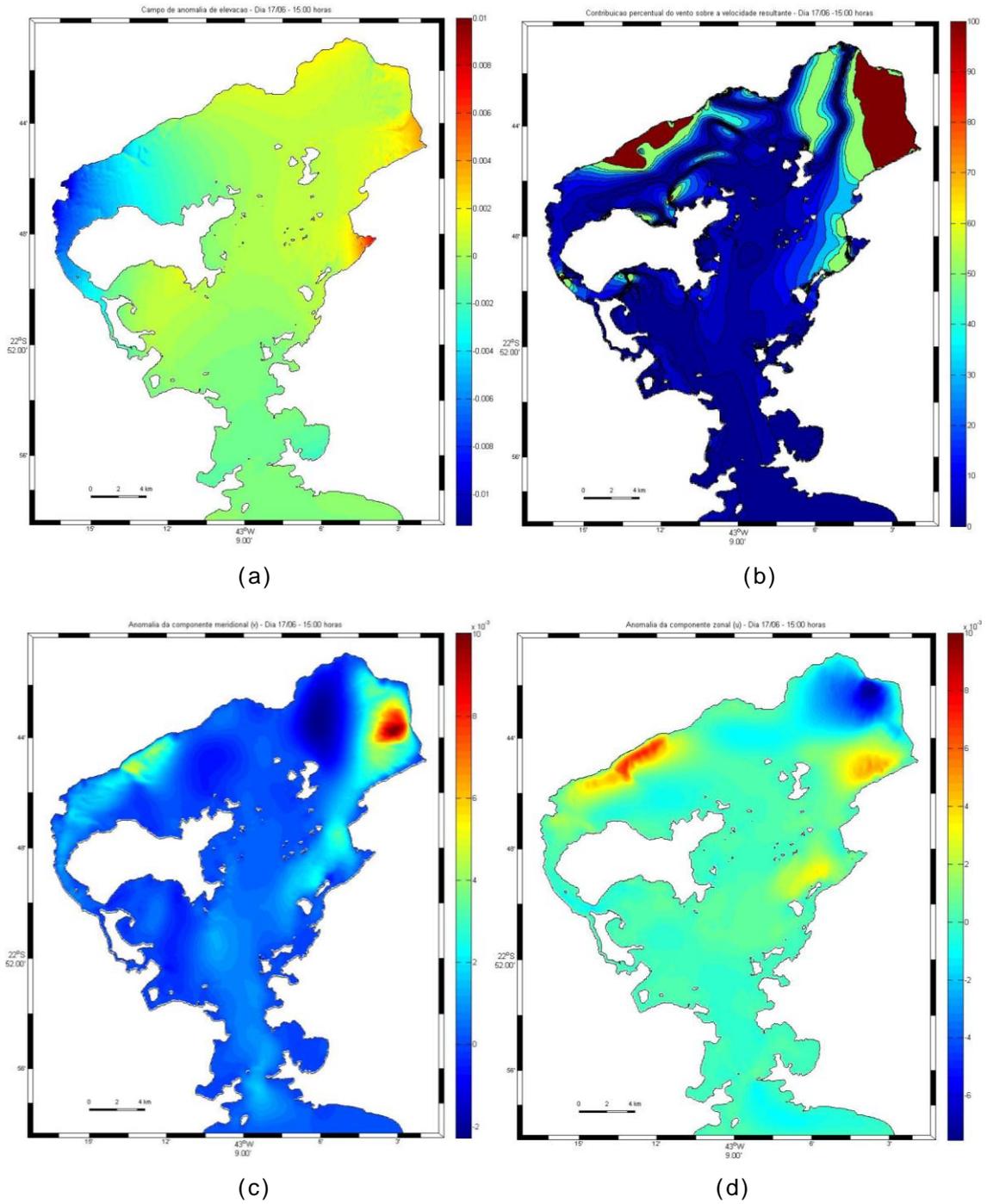


Figura 29 - (a) Campo de anomalia de elevação. (b) Campo percentual da influência do vento sobre a velocidade resultante da corrente. (c) Campo de anomalia da componente meridional de velocidade da corrente. (d) Campo de anomalia da componetne zonal de velocidade.

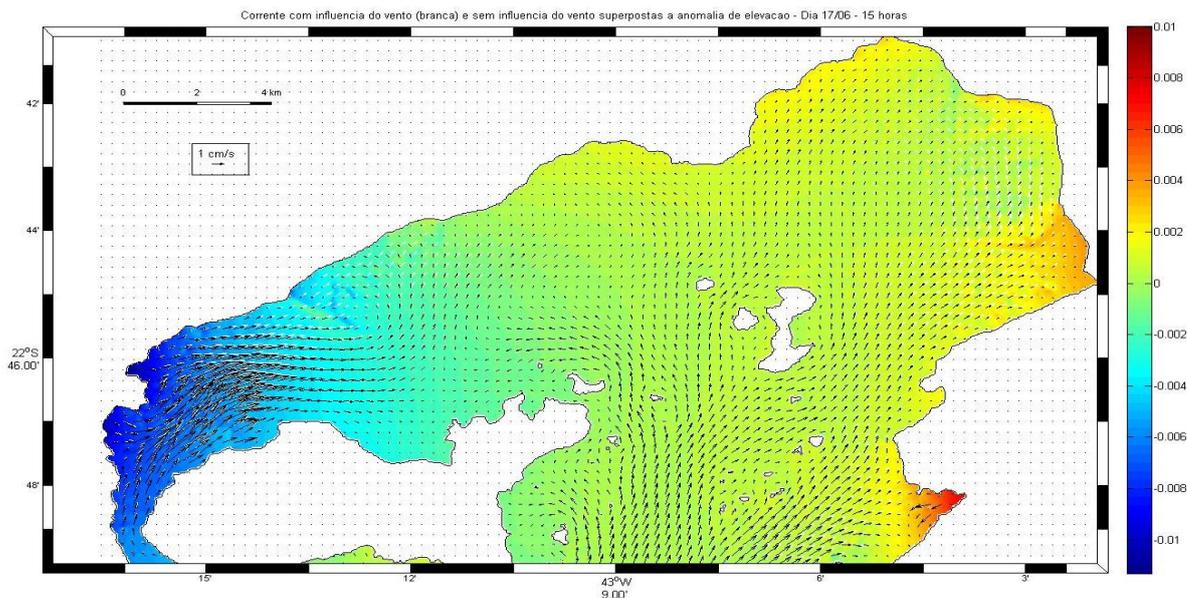


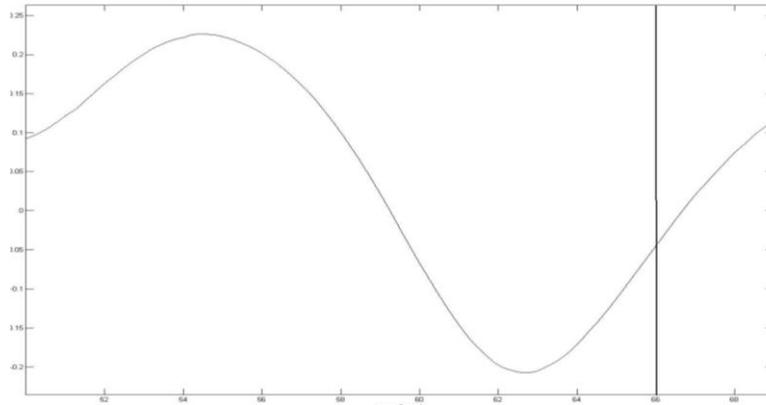
Figura 30 - Campo de corrente do experimento com vento (vetores brancos) superpostos ao campo de corrente do experimento sem vento (vetores pretos), superpostos ao campo de anomalia de elevação (abaixo).

3.2.4 Instante 4 – 18:00

O campo de velocidade nesse instante de maré apresentava velocidades zonais máximas de 0.06 e -0.13 m/s e velocidades meridionais máximas de 1.1 e -0.05 m/s (Tabela 3).

O campo de vento encontrava-se fluindo predominantemente do quadrante sul por toda a baía com maior intensidade relativamente ao instante anterior (Fig. 30). A influência do vento sobre a velocidade não foi significativa (Figs 31b, 31c e 31d). A direção da corrente não foi alterada pela influência do vento sendo dominada pela influência da maré (Fig. 32).

A média da anomalia relativa da velocidade resultante foi de 2% no setor sul e 4% no setor norte. A média da anomalia relativa de elevação foi de 11.2% no setor sul e 4.6% no setor norte (Tabela 3).



Campo de vento - Dia 17/06 - 18:00 horas

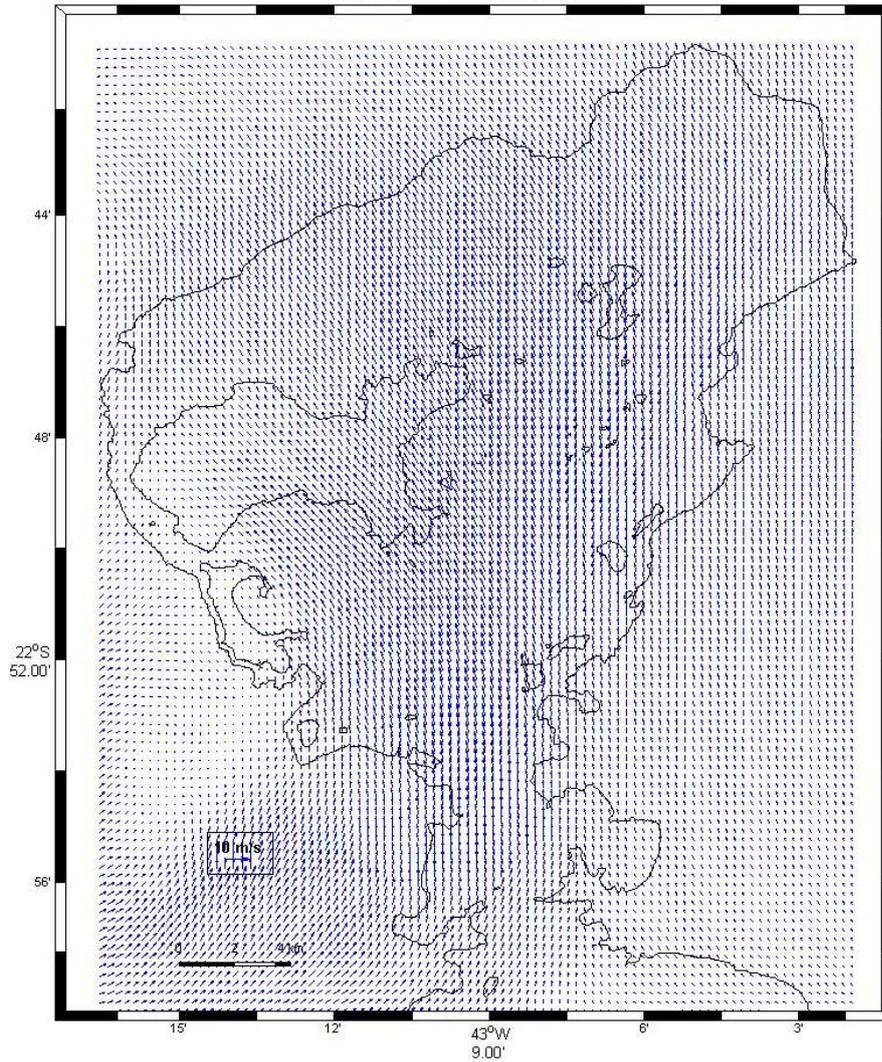


Figura 31 - Instante da maré (acima) e campo de vento para o 18:00 horas do dia 17/06/2010.

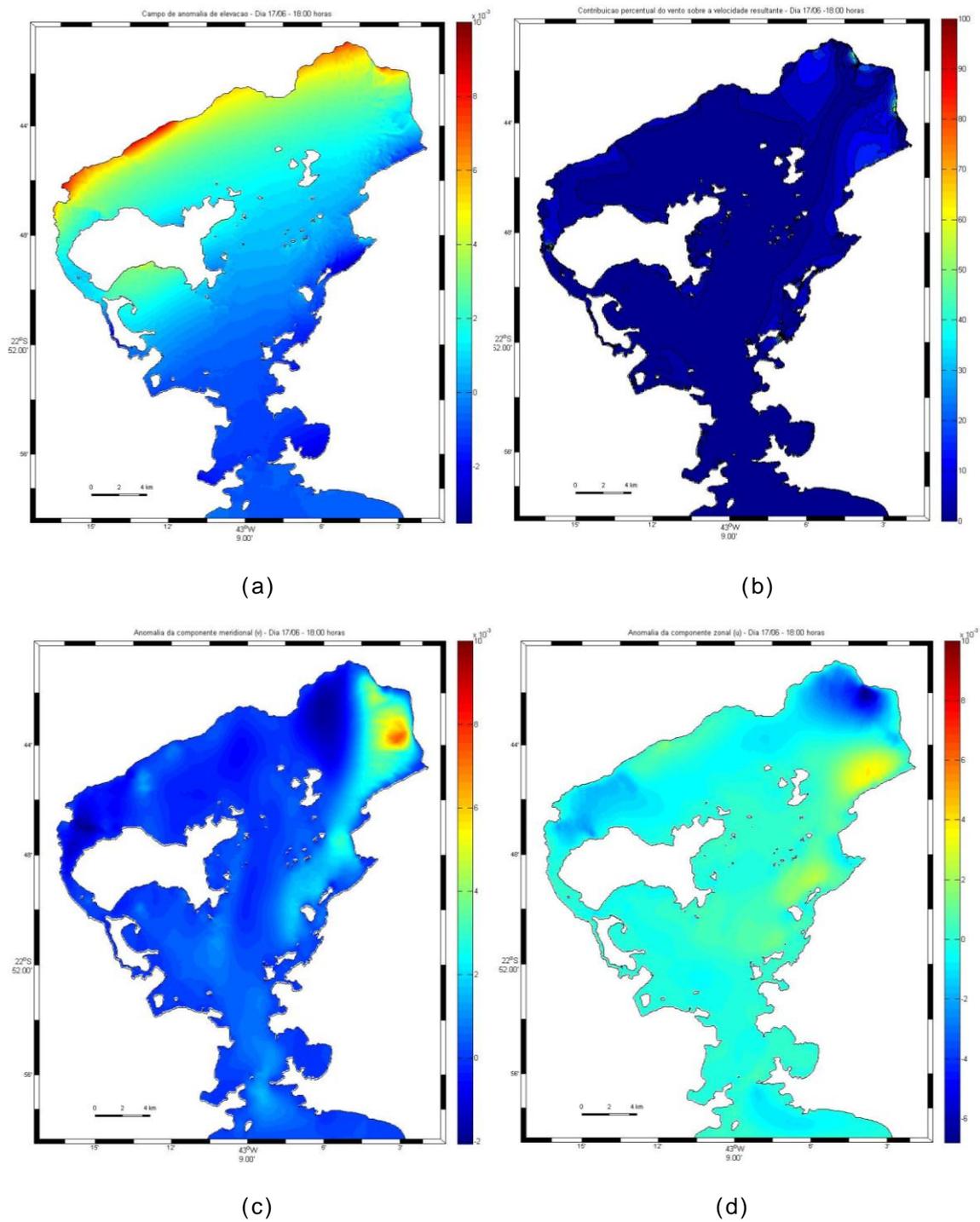


Figura 32 - (a) Campo de anomalia de elevação. (b) Campo percentual da influência do vento sobre a velocidade resultante da corrente. (c) Campo de anomalia da componente meridional de velocidade da corrente. (d) Campo de anomalia da componente zonal de velocidade.

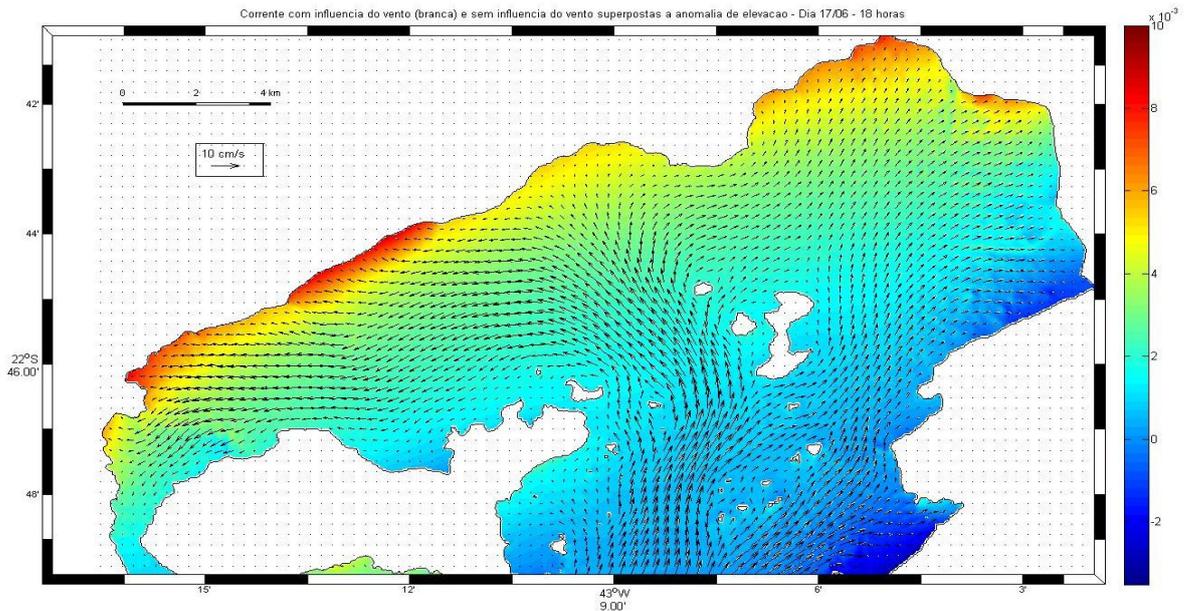


Figura 33 - Campo de corrente do experimento com vento (vetores brancos) superpostos ao campo de corrente do experimento sem vento (vetores pretos), superpostos ao campo de anomalia de elevação (abaixo).

4 DISCUSSÃO

A comparação do modelo com dados estimados de velocidade de corrente revelou que o modelo subestimou a velocidade para os pontos e instantes comparados. Tal fato pode estar associado à configuração barotrópica adotada no modelo e à possível necessidade de aferição de parâmetros do modelo como os coeficientes de viscosidade e difusão turbulenta.

Os valores de elevação da superfície livre, apesar de se apresentarem em fase com as séries previstas para as estações maregráficas analisadas, foram subestimados em amplitude pelo modelo. Tal fato pode ser explicado por detalhes da geometria da grade, como a batimetria, com a qual a onda de maré interage ao se propagar para o interior da BG. Além disso possíveis adaptações podem ser implementadas no esquema de imposição

da maré ao modelo (item 2.2.2.1), melhorando a representação desse forçante em seu contorno.

O campo de anomalia de elevação, em todos os momentos de maré analisados apresentou boa concordância com a direção e intensidade do vento, resultando no empilhamento de água nas fronteiras com o continente e com as ilhas.

Em todos os instantes, a influência do vento sobre os campos de anomalia de velocidade zonal e meridional foi observada de forma mais significativa na porção norte da BG, sobretudo na região nordeste, de baixas profundidades. É importante ressaltar que essa região apresenta profundidades muito pequenas, e que os levantamentos hidrográficos da região são escassos e antigos (ver item 2.2.1). Além disso, cabe ressaltar que a região recebe o aporte sedimentar direto de diversos rios, o que pode torná-la extremamente dinâmica do ponto de vista batimétrico.

Os maiores valores percentuais da influência do vento sobre o campo de elevação foram nos momentos de vazante e enchente (maior energia cinética total), talvez devido à influência conjunta da corrente gerada pela maré e pelo vento.

A significativa influência do vento sobre a direção e intensidade da corrente nos momentos de preamar e baixamar, na porção norte da BG pode ser explicada pelos baixíssimos valores de corrente (momentos próximos ao estofa) e pela baixa profundidade da região, sobretudo na porção nordeste.

Deve-se ressaltar que o vento imposto no experimento não representou nenhum evento atmosférico intenso, como a passagem de um sistema frontal, caso no qual poderiam ser observados valores maiores de anomalias de elevação e velocidade.

A simulação numérica de um cenário real, no qual variações espaço-temporais dos forçantes são representadas, nos fornece indicações de como a complexidade da interação entre os

forçantes pode gerar variações espaciais e temporais nas variáveis investigadas. Porém, devido a essa complexidade, muitas vezes torna-se difícil entender a relação de causa e efeito das variações espaciais e temporais ficando-se restrito à observação dos resultados. Por outro lado, torna-se interessante observar resultados inesperados. Por exemplo, no instante de maré vazante, a anomalia relativa do setor norte da BG (9%) foi maior do que do setor sul (6%), situação que se inverte no instante de maré enchente (5% e 11% no setor norte e sul, respectivamente). O fato observado demonstra uma possível interação entre os forçantes vento e maré de forma não uniforme na área modelada.

5 CONCLUSÕES

A seguir serão listadas as conclusões do presente estudo:

- A utilização da técnica de modelagem mostrou-se interessante para simular a interação entre dois forçantes, e satisfatória para a investigação proposta.
- O efeito do vento sobre a hidrodinâmica da BG neste experimento foi observado tanto na alteração do campo de elevação da superfície livre, quanto na alteração do campo de velocidade (direção e módulo).
- Nos instantes de preamar e baixamar a influência do vento foi mais intensa no campo de velocidade, enquanto que nos instantes de maré enchente e vazante foi mais intensa no campo de elevação.
- Nos instantes de preamar e baixamar, pode-se dizer que o campo de corrente na porção nordeste da BG foi dominado pela influência do vento, enquanto que nos instantes de enchente e vazante a influência da maré foi dominante em todo o domínio de estudo.

- O presente estudo indica que o campo de vento possui papel fundamental na hidrodinâmica da BG, alterando o campo de velocidade da porção norte durante os instantes de preamar e baixamar e alterando o campo de elevação da superfície livre durante os instantes de maré enchente e vazante. Dessa forma, estudos que visem o gerenciamento ambiental da BG devem obrigatoriamente considerar a influência do vento na própria hidrodinâmica da BG.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BÉRGAMO, A. L. 2006. 200p. **Características Hidrográficas, da Circulação e dos Transportes de Volume e Sal na Baía de Guanabara (RJ): Variações sazonais e Moduladas pela Maré.** Tese (Doutorado em Oceanografia Física), Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BLUMBERG, A. F.; MELLOR, G. L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. **Three-dimensional ocean models. American Geophysical Union**, p. 1-16. 1987.

BOCK, C. S. 2010. 100p. **Influência da Morfologia do Fundo na Hidrodinâmica da Baía de Guarajá (Pará).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CARVALHO, L. P. As águas da Guanabara: despoluir ou sanear. **Ciência Hoje**, v. 26, n. 155, p. 44-47. 1999.

FRAGOSO, M. R. 1999. 136p. **Estudo Numérico da Circulação Marinha da Região das Baías de Sepetiba e Ilha Grande.**

Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física), Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FRANCO, A. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. 2 ed. Niterói, RJ: D.H.N., 2009.

JOURDAN, P. 2007. 77p. **Caracterização do Regime de Ventos Próximo à Superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Monografia (Bacharel em Meteorologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

JOLY, G., PALAGANO, M., SILVA, R. M., JÚNIOR, A. R. T. Análise e Verificação Estatística das Simulações Numéricas de Alta Resolução para a Força Aérea Brasileira (FAB). In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2008, São Paulo.

JUNIOR, V. B. 2009. 176p. **Metodologia para Geração de Cartas de Correntes de Maré em Sistemas Estuarinos e Recintos Portuários com Aplicação na Baía de Todos os Santos, BA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

KAUFMANN, C. L. G. 2009. 150p. **Estudo Hidrodinâmico e de Qualidade de Água após Revitalização da Circulação do Canal do Fundão, Baía de Guanabara, RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

KJERFVE, B.; RIBEIRO, C. H. A.; DIAS, G. T. M.; FILIPPO, A. M.; QUARESMA, V. S. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 17, n. 13, p 1609-1643. 1997.

MALTA, F. S. 2005. 146p. **Estudo de Correntes de Maré do Complexo Estuarino da Baía de Guanabara - RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MELLOR, G. L. A. Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model. 2004. Disponível em: <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>. Acessado em: 06 de fevereiro de 2010.

MOLINARI, E. 2005. 56p. **Modelagem Numérica de Marés e Circulação Dirigida pelo Vento na Bacia de Santos**. Monografia (Bacharelado em Oceanografia), Centro Universitário Monte Serrat (UNIMOMTE), Santos.

MOURA, J. G. 1997. 140p. **Métodos Numéricos para solução de Modelos Simplificados de Circulação em Corpos D'água Rasos em Regime Permanente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PECLY, J. O. G. 2008. 278p. **Metodologia para Aquisição, Processamento e Análise de Dados Ambientais em Suporte à Modelagem Computacional Costeira e Estuarina**. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica), Coordenação dos

Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROSMAN, P. C. C. Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos. In _____. **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**. ABRH, 1997, v.3, cap. 6, p. 231-343.

ROSMAN, P. C. C. 2001. **Modelagem em Tempo Real para Planejamento de Ações Emergenciais**. Estudos Referentes ao Projeto do Duto PE-03, Baía de Guanabara, RJ

SAMPAIO, M. 2003. 189p. **Estudo de Circulação Hidrodinâmica 3D e Troca de Massas D'Água na Baía de Guanabara - RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SILVA, R. M. 2005. 72p. **Acoplamento dos Modelos de Área Limitada de Atmosfera (MM%) e Oceano (POM) e sua Aplicação ao Trecho Sudoeste da Bacia do Atlântico Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

STEWART, R. H. **Introduction To Physical Oceanography**. September 2008 Edition. Department of Oceanography, Texas A & M University, 2008.

TAKANAKA DE DECCO, H. 2006. 65p. **Implementação do Esquema de Áreas Alagáveis no Princeton Ocean Model**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 17, p. 11-23. 2005.

VILELA, C. P. 1992. 67p. **Investigação do Efeito de Vento na Circulação da Baía de Guanabara**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MIRANDA, L. B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. Edição de 2002. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.