Universidade Federal do Rio de Janeiro

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DINÂMICA DA PLATAFORMA CONTINENTAL NAS BAÍAS DE ILHA GRANDE E SEPETIBA VIA ANINHAMENTO DE MODELO NUMÉRICO COSTEIRO A MODELO NUMÉRICO OCEÂNICO

SONIA LUCIA SARTORI CAVALCANTE

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.



ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DINÂMICA DA PLATAFORMA CONTINENTAL NAS BAÍAS DE ILHA GRANDE E SEPETIBA VIA ANINHAMENTO DE MODELO NUMÉRICO COSTEIRO A MODELO NUMÉRICO OCEÂNICO

SONIA LUCIA SARTORI CAVALCANTE

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação e pesquisa de Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Oceânica

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro Março de 2010

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DINÂMICA DA PLATAFORMA CONTINENTAL NAS BAÍAS DE ILHA GRANDE E SEPETIBA VIA ANINHAMENTO DE MODELO NUMÉRICO COSTEIRO A MODELO NUMÉRICO OCEÂNICO

Sonia Lucia Sartori Cavalcante

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph. D.

Prof. Afonso de Moraes Paiva, Ph. D.

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D. Sc.

Prof. Joseph Harari, D. Sc.

Prof. Ricardo de Camargo, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL MARÇO DE 2010 Cavalcante, Sonia Lucia Sartori

Estudo da Influência da Dinâmica da Plataforma Continental nas Baías de Ilha Grande e Sepetiba Via Aninhamento de Modelo Numérico Costeiro a Modelo Numérico Oceânico/ Sonia Lucia Sartori Cavalcante – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVII, 129 p.: il.; 29,7 cm

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 121-127.

 Modelagem hidrodinâmica de regiões costeiras e estuarinas 2. Maré Meteorológica. 3. Ondas de Plataforma Continentais 4. Baías de Ilha Grande e Sepetiba. I. Rosman, Paulo Cesar Colonna II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica III. Título.

Aos meus saudosos pais, e aos meus queridos Marcelo, Rafael e Eric,

sempre presentes no meu coração

AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas que me acompanharam nesse longo percurso, que merecem um especial agradecimento. Elas se mostraram sempre dispostas a ajudar e a apoiar, tendo contribuído de diversas formas para a condução desta pesquisa. Cito algumas e peço desculpas às que não pude mencionar diretamente. A todas meu especial e carinhoso agradecimento.

Ao meu orientador, por toda a sua disponibilidade, atenção e orientação, pelo constante incentivo e valiosas sugestões, além da amizade durante todo o período. Obrigada por "multiplicar" o seu conhecimento e compartilhar seu talento.

Aos membros do Comitê avaliador, prof. Joseph, Ricardo e Parente, pelas sugestões e críticas que em muito contribuíram para a produção do trabalho final, e Prof. Afonso e Prof. Audálio, pelas valiosas sugestões e críticas durante o desenvolvimnto da pesquisa. A todos os professores do programa, que me auxiliaram no aprofundamento de meus conhecimentos, em especial ao Cláudio, Parente, Enise, Benoit e Suzana, meus especiais agradecimentos.

À querida Marise, sempre prestativa e alegre, à amiga Valéria, com sua incansável vontade de dividir sua experiência, aos meus colegas de turma, Nanda, Luana, Gava, Rodrigo, e todos os demais, com quem realizei as primeiras trocas e experiências, tão importantes para meu desenvolvimento na engenharia costeira. Aos colegas do laboratório Teodósio, Gustavo, Natalie, Marcelo Cabral, Daniel, Clarisse, e tantos outros, pelo convívio e troca de idéias, inclusive a Daniel Alves que juntamente com Guilherme, me auxiliaram no uso do Linux e Ferret para a obtenção das informações do HYCOM. Ao Felipe Chaves pela disponibilização de sua base de dados do SISBAHIA, à Patrícia pelos auxílios prestados e a todos os demais amigos do programa, Marquinhos, Carla, Iranilson, Léo (*in memorian*), e tantos outros pelo agradável convívio durante o período.

Ao amigo Chen, por toda a valiosa ajuda e constante disponibilidade, ao Cte Moraes Rezende por ter autorizado o Chen a me fornecer sua base de dados do POM da PC-SE, e ao Alexandre Coelho pelas valiosas discussões sobre o assunto. Á professora Josefa, da UERJ, pelo fornecimento pronto do material que dispunha da região e pelo seu interesse no desenvolvimento deste trabalho. Ao prof Albano da DHN e ao Jean do CHM, pelas produtivas discussões, e ao Cte Alenquer por todo o prestativo apoio.

À Marinha do Brasil por ter me fornecido uma oportunidade ímpar de desenvolvimento pessoal e profissional, e em particular à DHN e CHM onde toda a minha atividade

profissional se realizou, desde o período em que ainda estagiária galgava os primeiros degraus em direção ao conhecimento dos mistérios do mar. A disponibilidade dos dados do BNDO foi fundamental para o desenvolvimento da atual pesquisa, o que sei que representa um grande e coletivo esforço, mas que é recompensante, em vista da preciosidade que eles representam.

Ao HYCOM Consortium e ao NCEP pela disponibilidade de resultados de seus experimentos numéricos na internet, e à FEMAR pela disponibilização do catálogo de informações de maré online, facilitando o uso em aplicações de engenharia.

Agora, em especial, agradeço ao meu querido marido Marcelo por todo o seu amor, apoio, estímulo e compreensão durante o período, pois além de seus inúmeros momentos de "pãe", sempre acompanhou as evoluções do trabalho, dividindo comigo os momentos de angústia e de satisfação. Aos meus queridos filhos Rafael e Eric, por sua compreensão nas minhas necessárias ausências, e por alegrar meu cotidiano com suas presenças maravilhosas.

Finalmente agradeço a Deus pelos frutos que colhi.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.)

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DINÂMICA DA PLATAFORMA CONTINENTAL NAS BAÍAS DE ILHA GRANDE E SEPETIBA VIA ANINHAMENTO DE MODELO NUMÉRICO COSTEIRO A MODELO NUMÉRICO OCEÂNICO

Sonia Lucia Sartori Cavalcante

Março/2010

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman Programa: Engenharia Oceânica

Trabalhos anteriores na região das baías de Ilha Grande e Sepetiba (BIGS) buscaram representar a contribuição da maré astronômica, de rios e dos ventos locais na circulação hidrodinâmica, cujos efeitos causam correntes relativamente intensas na porção interior da baía de Sepetiba (BS), de até 60 cm/s, e mais fracas na baía de Ilha Grande (BIG), e no entorno da Ilha Grande (IG), com valores da ordem de 20 cm/s. Nas duas últimas regiões, as correntes de maré meteorológica, advindas dos efeitos subinerciais provenientes de ondas de plataforma continental (OPC), modulam as correntes de maré, com intensidades de até 60cm/s no Canal da IG, CIG, até 40cm/s na BIG, exercendo um papel preponderante na circulação local. Na BS representam um resíduo da ordem de 5 cm/s. Esta tese apresenta uma contribuição à descrição desses efeitos subinerciais, que são de fundamental importância para a caracterização completa da circulação na BIGS.

A metodologia consistiu na utilização dos resultados de simulações do modelo oceânico global HYCOM em alta resolução, em cenários de verão e inverno, para a representação dos efeitos da OPC na simulação costeira da BIGS no modelo SisBaHiA.

Os resultados, avaliados com dados *in situ* disponíveis, indicam que, no inverno, a circulação subinercial promove um incremento substancial da circulação nas entradas da BIG e SEP, e entorno da IG, com uma menor contribuição na BS. O T_{50} , ou tempo de renovação de 50% das águas na BIGS, reduziu-se à metade. No verão, as simulações mostram um acréscimo no transporte, porém com menor renovação diluição em relação ao inverno. Este estudo fornece uma maior eficiência na avaliação da circulação residual, de grande importância nos estudos de transporte de sedimentos, trajetória de poluentes, qualidade de água, etc.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A STUDY OF CONTINENTAL SHELF DYNAMICS INFLUENCE ON ILHA GRANDE AND SEPETIBA BAY BY NESTING A COASTAL NUMERICAL MODEL INTO AN OCEAN NUMERICAL MODEL

Sonia Lucia Sartori Cavalcante

March/2010

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman Departament: Ocean Engineering

Previous works in the region of Ilha Grande and Sepetiba Bay (BIGS) sought the representation of astronomical tide, rivers and local winds contributions in its circulation, whose effects cause relatively strong currents in the interior portion of Sepetiba's Bay (BS), up to 60 cm/s, and weaker in the Ilha Grande Bay (BIG) and around the Ilha Grande (IG), up to 20cm/s. In the last two places, meteorological tide currents, due subinercial effects from continental shelf waves (CSW), modulating astronomical tide currents, with intensity values up 60 cm/s, in the IG Channel and up to 40 cm/s in the BIG, playing a major rule in its circulation. In the BS the residual circulation has a magnitude of 5 cm/s or less. This thesis presents a contribution to the description of subinercial effects that are of fundamental importance for a better characterization of the BIGS circulation.

The methodology consisted in using results from the HYCOM global ocean model, grid of 1/12 °, in Summer and Winter scenarios, to represent CSW's effects into a coastal simulation of BIGS with the SisBaHiA model.

The results, evaluated against available *in situ* data, indicated that during the winter, the subinercial contribution caused a substantial increase of circulation in the BIG and the SEP entrances, and around IG, with a minor contribution into BS. The T_{50} , i.e. the time for renewal of 50% of the water into the BIGS, was reduced by a half. Summer's simulations showed an increase in transport, although with less renewal then in the winter. This study provides an adequate evaluation of the effects of residual circulation in the BIGS, which are very important for the studies concerning sediment transport, pollutants tracking, water quality, etc.

ÍNDICE

1.	OBJ	ETIVOS	1
2.	INTI	RODUÇÃO	3
3.	A RI	EGIÃO DE ESTUDO	12
3.1	As B	aías de Ilha Grande e Sepetiba	12
3.2	A Pla	ataforma continental sudeste	18
,	3.2.1	Corrente do Brasil (CB)	19
	3.2.2	A Tensão de cisalhamento do vento	25
•	3.2.3	Efeitos da Corrente Gravitacional Costeira	30
•	3.2.4	Considerações finais sobre a circulação na PC- S-SE do Brasil	36
4.	OS I	OADOS OBSERVACIONAIS	38
4.1	Anál	ise de Dados Pretéritos na Região e Proximidades	38
4.2	Infor	mações Pretéritas na PC Adjacente	47
5.	A M	ODELAGEM NUMÉRICA	52
5.1	Cons	iderações	53
-	5.1.1	Condições de contorno	56
:	5.1.2	Assimilação de dados	59
5.2	O mo	odelo oceânico	62
5.3	O mo	odelo costeiro	68
6.	RES	ULTADOS PRINCIPAIS	78
6.1	Simu	lações da circulação gerada pela maré astronômica	78
6.2	Simu	lações da circulação gerada pela maré astronômica e pelo nível do mar	•
	de in	verno	83
(6.2.1	Simulações da circulação com rebaixamento do nível do mar:	88
(6.2.2	Simulações da circulação com sobrelevação do nível do mar:	90

6	5.2.3	Circulação residual da simulação de maré meteorológica e maré	
		astronômica.	92
6	5.2.4	Transporte de partículas e tempo de residência da simulação de maré	
		astronômica com e sem maré meteorológica.	98
6.3	Sim	ulações da circulação gerada pela maré astronômica e pelo nível do mar	
	de v	erão	104
6	5.3.1	Simulações da circulação hidrodinâmica	105
6	5.3.2	Transporte de partículas e tempo de residência da simulação de maré	
		meteorológica no verão.	109
6.4	Con	siderações Finais	112
7.	CON	VCLUSÕES	117
8.	REC	COMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	119
9.	REF	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.121
ANI	EXO I	– Resultados complementares da modelagem numérica	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da região de estudo: O complexo de baías de Ilha Grande e Sepetiba, obtido de: acesso em 20/03/2010 ao site:	2
Figura 2 – Imagem do Google Maps® eTrecho da Carta Náutica editada pela DHN abrangendo a região de estudo. À oeste a baía de Ilha Grande (BIG), ao centro a ilha Grande e a leste a baía de Sepetiba (BS). Nota-se o contraste morfológico das baías, onde se observam maiores profundidades em BIG e apenas na entrada da BS. A cor azul escuro indica a região de profundidades menores do que 10m, azul claro entre 10 e 20m e em branco maiores do que 20m	5
Figura 3 – Principais corredores brasileiros de transporte de carga marítima. Fonte: © 2002 Atlas Geográfico do Brasil – Editora Melhoramentos Ltda. – Cartografia: Maps World Direitos para Internet reservados ao UOL – http://www.uol.com.br/atlas, acesso em 20/03/2010	6
Figura 4 – Cobertura sedimentar da baía da Ilha Grande segundo o diâmetro médio. Modificado de MAHIQUES, 1987 (apud MARQUES, 2004). Nota-se o contraste de distribuição entre a BIG, com predominância de areia fina, e na entrada da BS com maior presença de areia grossa.	
Figura 5 – Mapa com a classificação dos sedimentos do fundo segundo o diâmetro médio, elaborada por MARQUES (2004), compondo os dados BAMPETRO com informações de MAHIQUES (1987). Também se nota em detalhe o contraste de distribuição de areia fina na BIG, com predominância de areia grossa na BS	
Figura 6 – Rosa dos ventos da estação de Piraquara (esquerda) e da reanálise do NCEP/NCAR no ponto de 23,8°S e 43,5°W (direita) filtrados com filtro passa baixa de 40h , referentes ao período de fevereiro de 2003 a agosto de 200 (adaptado de MENEZES, 2007)	14
Figura 7 – Estatística de ventos observados na Pedra Pelada (23º 03' 11,5" S e 44º 25' 14,2" W) no verão (fev-mar2004) à esquerda e no inverno (outubro-2003), à direita pela COPPETEC, onde se nota as direções preferenciais N-NE e S-SW (ROLDÃO, 2004).	15
Figura 8 – Padrões de ventos observados pela COPPETEC na entrada da Pedra Pelada (23 ⁰ 03' 11,5" S e 44 ⁰ 25' 14,2" W) em outubro de 2003, onde se nota a presença de brisas marinhas e uma dominância de ventos de quadrante sul (ROSMAN, 2004)	16
Figura 9. Mapa de distribuição espacial das principais correntes oceânicas de superfície na região da Bacia do Atlântico Sul (Fonte: SCHMITZ, 1996, apud CASTRO et al. 2006)	
Figura 10. Representação esquemática da circulação oceânica no Oceano Atlântico Sudoeste ao nível de 250 metros de profundidade. Essa camada é representativa para o escoamento da ACAS (Fonte: STRAMMA & ENGLAND, 1999, apud CASTRO et al. 2006)	21
Figura 11. Trajetória dos derivadores analisados por Assireu et al. (2003),mostrando a presença de vórtices anticiclônicos ao largo de Santa Catarina (ASSIREU et al., 2003, apud FRAGOSO, 2004).	
Figura 12. Campo de vorticidade relativa (s ⁻¹) e velocidade em superfície obtida na simulação do modelo para janeiro de 1999 (FRAGOSO,2004).	
Figura 13. Imagem de sensor AVHRR dos vórtices da Corrente do Brasil (Cabo Frio e Cabo de São Tomé) de fevereiro de 2001 – Cortesia de J.A> Lorenzzetti (INPE) apud CALADO & SILVEIRA, 2006. Escala em °C	
Figura 14. Modelo de feição para vórtice assimétrico (Eddy feature Model - EFM), parâmetros e um exercício de aplicação usando valores climatológicos de Tis and Tib. (T no lado inshore, superfície e fundo), seg.CALADO & SILVEIRA, 2006. Escala em °C	24
Figura 15. Climatologia da tensão de cisalhamento do vento para a costa brasileira (dyn/cm ²) para os meses de janeiro (esquerda) e julho (direita). Fonte: CASTRO & MIRANDA (1998)	
Figura 16. Imagem de temperatura da superfície do mar (AVHRR-NOAA) mostrando a ressurgência costeira na plataforma continental sudeste do Brasil (cores azuis). As nuvens são marcadas em branco e seus valores são de 8°C (fonte: RODRIGUES & LORENZZETTI, 2001)	

Figura 17 a- Distribuição de temperaturas médias na superfície obtidas pela climatologia realizada por Rezende (2003)	31
Figura 18 b- Distribuição de salinidades médias na superfície obtidas pela climatologia realizada por Rezende (2003)	32
Figura 19- Correntes simuladas no POM considerando apenas gradientes de densidade, onde se observa a presença de um fluxo para norte contíguo à costa até o norte da baía de Guanabara, por COELHO (2008)	32
Figura 20- Correntes simuladas no POM considerando gradientes de densidade e vento médio de verão, onde se observa a presença de um fluxo para norte contíguo à costa até Cabo Frio, por COELHO (2008)	33
Figura 21- Temperaturas médias anuais de AVHRR: resolução de 9x9 km, para o período de 1987 a 1998, seg Castro et al. 2006	34
Figura 22- Índice de Oscilação Sul (IOS). Fonte: IRI/IDEO Climate Data Library obtido de CASTRO et al (2006)	35
Figura 23- Campos de TSM médios para todo o período analisado, seg Castro et al. (2006)	35
Figura 24- Valores de intensidade de anomalias de TSM, associadas ao principal padrão da (EOF 1) espacial (médias mensais) de CASTRO et al. (2006). Nota-se que as anomalias são bem menores acima da latitude de 24°S, no litoral paulista, onde se espera que haja uma menor influência da penetração de águas mais frias no período de inverno, oriundas do sul.	36
Figura 25 – Séries da componente U (leste-oeste), acima e componente V (norte-sul), abaixo, de correntes observadas em dois níveis (a 5 e a 10 de profundidade), durante o período de agosto de 1975 no CIG - canal de comunicação entre a BIG e BS. A linha vermelha (verde) é a velocidade promediada com filtro de médias moveis de 25h, no ponto de 10m (5m). Não se nota variação relevante na corrente média entre os níveis observados, entretanto é notável a superioridade do valor da intensidade da corrente, em relação ao nível médio do mar simultâneo (magenta) observado na Ilha Fiscal, filtrado com média móvel de 25h.	40
Figura 26 – Séries de componentes zonal (E-W) e meridional (N-S) de correntes na estação BIG, brutas e filtradas com médias móveis de 30h	41
Figura 27 – Séries de componentes zonal (E-W) e meridional (N-S) de correntes na estação SEP, brutas e filtradas com médias móveis de 30h	41
Figura 28 – Séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes nas estações BIG e SEP, e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h	42
Figura 29 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de inverno de 2001, na estação BIG e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.	42
Figura 30 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de inverno de 2001, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h	43
Figura 31 – Séries de componentes zonal (E-W) e meridional (N-S) de correntes na estação BIG, brutas e filtradas com médias móveis de 30h	44
Figura 32 – Séries de componentes zonal (E-W) e meridional (N-S) de correntes na estação SEP, brutas e filtradas com médias móveis de 30h	44
Figura 33 – Séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes nas estações BIG e SEP, e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h	45
Figura 34 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de verão de 2001, na estação BIG e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h	45

Figura 35 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de verão de 2001, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h	46
Figura 36 - Séries temporais simultâneas de nível d'água medido na Ilha Fiscal (em cima nas figuras); (A) verão e no outono (B) componente longitudinal da corrente e temperatura da água (colorido) medidas ao longo da coluna d'água junto ao difusor do ESEI no inverno de 1997. Obs 1.: 1,0 m na escala vertical de profundidades equivale a 0,1 m/s na velocidade da corrente. Obs 2: Todas as séries foram submetidas a um filtro Lanczos 40 horas para facilitar a visualização (CARVALHO, 2003).	49
 Figura 37 - Séries temporais simultâneas de nível d'água medido na Ilha Fiscal (em cima nas figuras); (A) inverno e na primavera (B) componente longitudinal da corrente e temperatura da água (colorido) medidas ao longo da coluna d'água junto ao difusor do ESEI no inverno de 1997. Obs 1.: 1,0 m na escala vertical de profundidades equivale a 0,1 m/s na velocidade da corrente. Obs 2: Todas as séries foram submetidas a um filtro Lanczos 40 horas para facilitar a visualização (CARVALHO, 2003). 	50
Figura 38- Trajetórias da bóia do PNBOIA (Programa Nacional de Bóias) e das bóias simuladas nos experimentos com e sem assimilação (linha pontilhada) em um período de 10 dias do mês de maio de 1999 (FRAGOSO, 2004):	60
Figura 39 – Domínio discretizado do modelo costeiro da região de BIGS, com o padrão de batimetria em metros e os pontos em vermelho correspondem aos nós do modelo oceânico POM. (extraído de Cavalcante e Rosman, 2008).	63
Figura 40 –Componentes de correntes modeladas U (W-E) e V (S-N) da entrada da baía de Ilha Grande (EBIG) em azul, Baía de Sepetiba (BS) em verde e canal da Ilha Grande (CIG).em amarelo e laranja, e série de nível médio simultânea proveniente da Ilha Fiscal (com defasagem de 4h corrigida) em vermelho, e nível médio modelado em rosa. (Cavalcante e Rosman, 2008)	64
Figura 41 –Velocidade média da coluna (vetores) e elevação em cm (escala de cores) resultante de simulaçÃO da PC SE-S com o SisBaHiA 2DH. Nota-se uma circulação predominante para o sul em razão do gradiente de pressão oriundo da divergência presente na costa, provavelmente devida a um regime persistente de vetos de NE.	65
Figura 42 –Localização dos pontos contendo informações de ventos de reanálise-II da NCEP utilizados na simulação da 2DH da PC SE-S com o SisBaHiA. Foram utilizadas informações de 6/6h de agosto de 2001.	65
Figura 43 – Comparação das séries temporais de elevação simuladas no SisBaHiA, advindas da simulação da hidrodinâmica 2DH resultante da atuação de ventos de reanálise-II do NCEP (cor azul) para 2001 e dados de nível do mar da Ilha Fiscal simultâneos filtrados (cor vermelha). Nota-se uma razoável coerência entre a elevação modelada e a observada nas proximidades	66
Figura 44 – Elevações do HYCOM nos pontos S e N mais próximos à costa e SW e SE ao largo, que compõem o campo de elevações prescrito na fronteira aberta do modelo costeiro SisBaHiA, e a comparação com o nível médio filtrado com filtro de Thompson de 40h simultâneo, da Ilha Fiscal-RJ	67
Figura 45 – Elevações do HYCOM nos pontos S e N mais próximos à costa e SW e SE ao largo, que compõem o campo de elevações prescrito na fronteira aberta do modelo costeiro SisBaHiA, e a comparação com o nível médio filtrado com filtro de Thompson de 40h simultâneo, da Ilha Fiscal-RJ	67
Figura 46 – Elevações do HYCOM nos pontos S e N mais próximos à costa e SW e SE ao largo, que compõem o campo de elevações prescrito na fronteira aberta do modelo costeiro SisBaHiA, e a comparação com o nível médio filtrado com filtro de Thompson de 40h simultâneo, da Ilha Fiscal-RJ	68
Figura 47 – Domínio da BIGS modelado no SisBaHiA. As cores representam os valores de profundidade e a malha discretizada em elementos finitos é apresentada com o traçado de linhas internas.	

Figura 48 – Mapa de altura de rugosidade equivalente (m) prescrita no SisBaHiA para o cálculo da tensão de cisalhamento do fundo	73
Figura 49 – Amplitudes e fases em relação a Greenwich da componente harmônica M2, na simulação numérica da maré astronômica na PC-SE brasileira. (seg. Harari,1985)	75
Figura 50 – Estações maregráficas extraídas do catalogo da FEMAR, utilizadas na calibração da maré astronômica, a oeste Piraquara, ao centro Castelhanos, e à direita Ilha da Madeira	
Figura 51–Séries temporais de elevação de maré astronômica, simuladas no SisBaHiA (azul), e previsão harmônica da elevação de maré (vermelho) na estação de Piraquara na BIG	
Figura 52–Séries temporais de elevação de maré astronômica, simuladas no SisBaHiA (azul), e previsão harmônica da elevação de maré (vermelho) na estação de Catelhanos na IG	
Figura 53–Séries temporais de elevação de maré astronômica, simuladas no SisBaHiA (azul), e previsão harmônica da elevação de maré (vermelho) na estação da Ilha da Madeira – Porto de Sepetiba.	
Figura 54 – Campos de velocidades resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA em ocasião de meia maré enchente na quadratura	
Figura 55 – Campos de velocidades resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA em ocasião meia maré enchente na sizígia	
Figura 56 – Campos de velocidades resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA em ocasião meia maré vazante de quadratura	80
Figura 57 – Campos de velocidades resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA em ocasião meia maré vazante de sizígia	80
Figura 58 – séries temporais de elevação resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA na estação de Ilha da Madeira na baía de Sepetiba	81
Figura 59 – circulação residual para um ciclo em regime de quadratura (A) e sizígia (B), resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA. A presença ou não de afluxos de rios não causa diferenças visíveis, afetando ligeiramente apenas a região próxima à descarga fluvial, cujo local está indicado na seta a NE da BS	82
Figura 60- Séries de elevações (m) resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica do mês de agosto de 2003 na fronteira aberta FA (amarelo), em BIG (vermelho), Ilha da Madeira (verde claro), Piraquara (azul) e fundo da BS (verde médio). Nota-se que as elevações das séries em BIG foram próximas aos valores da FA e no fundo da BS chegaram a atingir valores 50% maiores do que na FA. As medições na Ilha Fiscal IF, pontos vermelhos, mostram resultados bastante próximos aos simulados, tendo sido corrigidas em defasagem de 40 minutos	
Figura 61- Séries de componente de correntes leste-oeste (U- m/s) em azul e norte-sul (V-m/s) em verde, resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica do mês de agosto de 2003, na estação de BIG (A), CIG(B) e SEP (C), entrada da Baía de Ilha Grande. Em vermelho a série de elevações simultâneas observada na Ilha Fiscal (FISC-m).	
Figura 62 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes simuladas em agosto de 2003, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h	86
Figura 63 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes simuladas em agosto de 2003, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h	87
Figura 64- Campos de correntes resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica no mês de agosto de 2003. Resultados para ½ maré enchente em quadratura (acima) e sizígia (abaixo), durante o rebaixamento do nível médio do mar	89
Figura 65- Campos de correntes resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica no mês de agosto de 2003. Resultados para ½ maré vazante para quadratura (acima) e sizígia (abaixo), durante o rebaixamento do nível médio do mar	90

Figura 66- Campos de correntes resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica no mês de agosto de 2003. Resultados para ½ maré enchente para quadratura (acima) e sizígia (abaixo), durante a sobrelevação do nível médio do mar. Ressalta-se que a leste a recirculação é devida a efeitos de descontinuidade da fronteira aberta, que não afetam o domínio interior modelado, nas entradas e interior da BIGS.	
Figura 67- Campos de correntes resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica no mês de agosto de 2003. Resultados para ½ maré vazante para sizígia (acima) e quadratura (abaixo), durante a sobrelevação do nível médio do mar. Ressalta-se que a leste a recirculação é devida a efeitos de descontinuidade da fronteira aberta, que não afetam o domínio interior modelado, nas entradas e interior da BIGS	
Figura 68- Resultado da circulação residual em período de sobrelevação do nível médio do mar, para situação de sizígia (acima) e quadratura (abaixo). Ressalta-se que a leste a recirculação é devida a efeitos de descontinuidade da fronteira aberta, que não afetam o domínio interior modelado, nas entradas e interior da BIGS.	
Figura 69- Resultado da circulação residual em período de sobrelevação do nível médio do mar, para situação de sizígia (acima) e quadratura (abaixo). Escala das setas de velocidade indicadas pelas cores. As diferenças entre as situações de quadratura e sizígia não foram relevantes, como visto na figura anterior	
Figura 70- Resultado da circulação residual diária em período de rebaixamento do nível médio do mar, para situação de quadratura (acima, dia 05/08/2003) e sizígia (abaixo, dia 14/08/2003). Escala das setas de velocidade indicadas pelas cores	
Figura 71- Resultado da circulação residual diária em período de rebaixamento do nível médio do mar, para situação de quadratura (acima, dia 05/08/2003) e sizígia (abaixo, dia 14/08/2003). Escala das setas de velocidade indicadas pelas cores. As diferenças entre as situações de quadratura e sizígia não foram relevantes, como visto na figura anterior. Ressalta-se que ao sul da BS os valores maiores de circulação residual próximas à porção mais estreita da restinga, são apenas devidas à interpolação, pois não se observam vetores de maior intensidade acompanhando tais feições	
Figura 72- Medições de correntes médias nos pontos S1, S2 e S3 nas proximidades da enseada de Itaorna, filtradas em 30h, apresentadas por CAVALCANTE & ROSMAN (2009), para análise da circulação residual em outubro de 2003, comparada aos valores do nível médio do mar na Ilha Fiscal, em vermelho. Vx é a componente leste-oeste e Vy é a componente norte-sul.	
Figura 73-Distribuição inicial de partículas lançadas.na BIGS, no instante inicial de simulação lagrangeana, utilizada em todas as simulações, com base na hidrodinâmica da maré astronômica e da maré somada ao nível médio. As cores se referem apenas às regiões de origem das partículas.	
Figura 74-Distribuição de partículas por região, em vermelho BIG e em verde BS, após 30 dias de simulação lagrangeana, para hidrodinâmica da maré astronômica. Nota-se que apenas nas regiões das entradas de BIG e BS houve um transporte mais efetivo para fora da região de origem (regiões em branco representam as correspondentes à saída de partículas em direção ao oceano aberto.	100
Figura 75-Distribuição de partículas por região, em vermelho BIG e em verde BS, após 30 dias de simulação lagrangeana, para hidrodinâmica da maré astronômica somada ao nível médio de agosto de 2003. A porcentagem de partículas que saiu do domínio foi de 14%.A recirculação antihorária residual observada nos resultados hidrodinâmicos promoveu o deslocamento de partículas originadas na BS (vermelhas e verdes) no interior da BIG (azul)	100
Figura 76- Tempo de residência para 90 dias de simulação (ciclo mensal de hidrodinâmica da maré astronômica). Os fundos das baías apresentam maiores tempos de residência	101
Figura 77-Tempo de residência da simulação de 90 dias com referência no mês de agosto de 2003, com ocorrência de três frentes frias de periodicidade de 7 dias e sobrelevação de aproximadamente 20cm. O fundo da BIG apresenta tempos de residência menores do que os apresentados com a simulação hidrodinâmica da maré astronômica, e há um deprécimento de outerre de Uha Casa de	102
aecr scimo em todo o entorno da lina Grande	102

Figura 78-Distribuição inicial das concentrações da simulação euleriana com valor unitário no interior da BIGS e nulo no exterior	
Figura 79-Concentrações resultantes de simulação de transporte Euleriano após um período de 90 dias, com referência na hidrodinâmica da maré do mês de agosto de 2003	
Figura 80- Concentrações resultantes de simulação de transporte Euleriano após um período de 5 dias,com referência no mês de agosto de 2003, com ocorrência de três frentes frias de periodicidade de 7 dias e sobrelevação de aproximadamente 20cm	
Figura 81- Campo de velocidades e elevação (m) do dia 04/03/2004 – simulada no HYCOM, correspondente a um período de rebaixamento do nível do mar. Escala de vetores: 1mm equivale a 10cm/s.	105
Figura 82- Campo de velocidades e elevação (m) do dia 07/03/2004 – simulada no HYCOM, correspondente a um período de sobrelevação do nível do mar. Escala de vetores: 1mm equivale a 10cm/s.	106
Figura 83- Séries de componente de correntes leste-oeste (U- m/s) em azul escuro e norte-sul (V- m/s) em azul claro, resultantes da simulação de maré meteorológica na estação de BIG, entrada da Baía de Ilha Grande. Em magenta a série de elevações no ponto BIG e em vermelho a série de elevações simultâneas de nível filtrado com filtro de Thompson de 40h da Ilha Fiscal (FISC-m).	
Figura 84- Séries de componente de correntes leste-oeste (U- m/s) em azul escuro e norte-sul (V- m/s) em azul claro, resultantes da simulação de maré meteorológica na estação de SEP, entrada da baía de Sepetiba. Em magenta a série de elevações no ponto SEP e em vermelho a série de elevações simultâneas de nível filtrado com filtro de Thompson de 40h da Ilha Fiscal (FISC-m).	
Figura 85 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de modeladas do verão de 2004, na estação BIG e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h	107
Figura 86 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de modeladas do verão de 2004, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h	
Figura 87-Distribuição de partículas por região, em vermelho BIG e em verde BS, após 30 dias de simulação lagrangeana, para hidrodinâmica da maré meteorológica com início em 17 de fevereiro de 2004. A porcentagem de partículas que saiu do domínio foi de 12%	
Figura 88-Tempo de residência da simulação de 90 dias com referência no ciclo de um mês de 15 de fevereiro a 16 de março de 2004, com ocorrência de cinco frentes frias de periodicidade de três a seis dias e sobrelevação de aproximadamente 10cm	
Figura 89-Concentrações da simulação euleriana de 5 dias com referência no ciclo de um mês de 15 de fevereiro a 16 de março de 2004, com ocorrência de cinco frentes frias de periodicidade de três a seis dias e sobrelevação de aproximadamente 10cm. A distribuição inicial foi de valor unitário para o interior da BIGS e nulo no exterior	
Figura 90-Concentrações resultantes da simulação euleriana com referência no ciclo de hidrodinâmica de maré astronômica (vermelho), maré e nível de inverno de 2003 (azul) e verão de 2004 (verde), para as estações no interior da BS, na Ilha da Madeira (A) e no fundo da BS (B), no extremo leste e no interior da BIG, Piraquara (C). A contribuição do nível do mar não é significativa na diluição da BIGS	
Figura 91-Concentrações resultantes da simulação euleriana com referência no ciclo de hidrodinâmica de maré astronômica (vermelho), maré e nível do inverno de 2003 (azul) e verão de 2004 (verde), para as estações BIG (A), CIG (B) e SEP (C). A contribuição do nível do mar é substancial para a diluição da BIGS, reduzindo em até 50% o tempo de diluição de metade da concentração inicial.	

1. Objetivos

O complexo de baías de Ilha Grande e Sepetiba situa-se no Estado do Rio de Janeiro, no litoral brasileiro (Figura 1), e possui uma elevada relevância sócio-econômica. Tem sido objeto de diversas investigações ao longo dos últimos anos, visando o conhecimento de sua hidrodinâmica e da distribuição de suas propriedades, principalmente em termos da contribuição da maré astronômica. Os estudos tem tido bastante sucesso na representação da circulação e transporte de propriedades na porção interior da baía de Sepetiba. A maior dificuldade que se tem encontrado está na representação da hidrodinâmica da baía de Ilha Grande e do seu entorno, onde os efeitos da maré astronômica são muito pequenos comparados aos efeitos oriundos de frequências subinerciais¹, advindos da plataforma continental adjacente.

O objetivo desta tese é avaliar a influência dos fatores físicos subinerciais, presentes na circulação e nas propriedades termohalinas da plataforma continental, na dinâmica da região da baía de Ilha Grande e Sepetiba, utilizando aninhamento de modelo costeiro a modelos oceânicos hidrodinâmicos da plataforma continental.

Na ótica da engenharia costeira, a relevância desta pesquisa está em possibilitar que as simulações costeiras, normalmente realizadas em corpos d'água semi fechados, possam se estender a regiões mais externas, incorporando os efeitos advindos dos processos de oceano aberto, característicos da dinâmica da PC, dentro do mesmo padrão elevado de precisão normalmente presente na simulação nas regiões interiores, a um custo computacional e operacional mínimo.

Do ponto de vista da oceanografia, esta pesquisa visa possibilitar a descrição adequada da dinâmica de circulação da região de Ilha Grande e Sepetiba, agregando ao conhecimento presente da influência da maré astronômica, de descargas fluviais e de ventos locais, a contribuição dos efeitos subinerciais oriundos da plataforma continental adjacente. Esta composição de efeitos fornece um cenário mais realista da dinâmica reinante nestes corpos.

¹ O período subinercial é aquele que refere aos fenômenos cuja escala temporal é maior do que o período inercial T_i , que é definido por: $T_i = 2\pi/f$, onde, $f = 2\Omega \text{sen}\phi$ é denominado parâmetro de Coriolis, Ω é a velocidade angular de rotação da terra, $\Omega = 7.292 \times 10{\text{-}}5/\text{s}$, ϕ é a latitude local.

Para alcançar os objetivos gerais foram desenvolvidos as seguintes etapas:

- Análise dos dados observacionais disponíveis e geração de padrões de representação esperados para a região de estudo.
- Implementação de um modelo costeiro na região de interesse com características adequadas à necessária representação dos efeitos desejados.
- Avaliação da representatividade dos modelos oceânicos em escala de bacia ou escala global com vistas a representar os efeitos das ondas de plataforma continentais subinerciais no modelo costeiro.
- Realização do acoplamento do modelo oceânico selecionado ao modelo costeiro e analise das principais contribuições advindas destes efeitos.



© 2002 Atlas Geográfico do Brasil – Editora Melhoramentos Ltda. Direitos para Internet reservados ao UOL – http://www.uol.com.br/atlas .¶

© 2002 Atlas Geográfico do Brasil – Editora Melhoramentos Ltda. Direitos para Internet reservados ao UOL – http://www.uol.com.br/atlas

Figura 1 – Mapa de localização da região de estudo: O complexo de baías de Ilha Grande e Sepetiba, obtido de: acesso em 20/03/2010 ao site: http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl 1250536157.xls,

2. Introdução

As regiões costeiras são locais de grande importância econômica e social, pois nelas se concentra a maioria populacional dos países que possuem litoral, e em geral representam uma importante fonte de recursos vivos e não vivos. No Brasil 80% da população se concentra a menos de 200 km do litoral, assim como 93% da produção industrial 78% da receita e 85% do consumo de energia elétrica das principais cidades (SERAFIM, 2006).

As inúmeras atividades econômicas e industriais desenvolvidas em seu entorno e no domínio marítimo adjacente representam um grande atrativo para a concentração de mão de obra, de forma direta ou por meio de serviços secundários que se tornam necessários.

Embora essas regiões tenham uma relevância indiscutível, o conhecimento da hidrodinâmica e dos processos reinantes ainda são objeto de constante investigação. Isso se deve ao fato de que a dinâmica da circulação e das propriedades de massas de água nesses locais é extremamente complexa, com elevado grau de vulnerabilidade aos efeitos antropogênicos e de causas naturais, e uma modificação no ambiente pode causar alterações dinâmicas e vice-versa.

Em termos espaciais há uma complexidade natural das características geométricas do corpo costeiro, traduzidas em suas margens, de natureza bastante variada, e em um fundo muitas vezes esparsamente mapeado, com uma considerável variabilidade.

Os impactos sofridos por essas regiões, causados por fatores naturais ou antropogênicos na região litorânea advêm tanto de regiões interiores, pelos rios e afluentes das margens, como de sua embocadura, onde se dá a comunicação com o oceano aberto. De forma geral, a influência destes fatores naturais é de difícil caracterização e abrange escalas espaço-temporais bastante diversas. Os fenômenos naturais atuantes possuem uma ampla faixa de abrangência, contendo eventos com periodicidade de segundos (ondas de gravidade superficiais) até tendências de centenas de anos (comportamento do nível médio do mar).

Os efeitos das alterações antrópicas podem se fazer sentir no ambiente de forma direta, por meio de despejo de efluentes de origem diversa, orgânicos ou industriais, que podem causar restrições em outros usos da água, como para esporte e lazer. De forma indireta tais efeitos podem ser percebidos, por exemplo, através de obras costeiras e operações de dragagem, que alteram a dinâmica do transporte de substâncias e distribuição dos sedimentos, podendo causar impactos na ocupação urbana do litoral.

A vulnerabilidade do litoral também apresenta um desafio na mitigação de possíveis impactos ambientais que possam ocorrer, gerando a necessidade de estudos preventivos de ações antrópicas ou naturais, como por exemplo, derramamentos de óleo ou resíduos industriais, erosão ou assoreamento, etc. Um maior conhecimento da região representará uma ação mais efetiva para minimizar os efeitos adversos.

Muitas vezes as obras costeiras exercem um papel fundamental na estabilização e busca de equilíbrio das regiões costeiras sob efeitos de agentes naturais que podem ser impactantes no local. Sendo necessária a intervenção, os estudos para a concepção das ações devem abranger todas as escalas temporais envolvidas na evolução dos processos naturais em si.

Todos os aspectos discutidos acima fornecem uma dimensão da dificuldade envolvida no adequado conhecimento da dinâmica das regiões costeiras, que requer um monitoramento contínuo e abrangente. Quanto melhor se dá esse conhecimento, maior o favorecimento do planejamento de uso sustentável dos locais, permitindo que possam ser realizadas inúmeras atividades, sem que seja necessário impor restrição demasiada a um determinado uso, ou permitir que haja prejuízo de uns em relação a outros.

A região das baías de Ilha Grande e Sepetiba (BIGS), situada no litoral do Rio de Janeiro, tem uma grande relevância socioeconômica, abrigando um dos maiores pólos siderúrgicos da América do Sul, um terminal petrolífero, e duas usinas nucleares, estando a terceira em processo de construção, portanto de grande necessidade de conhecimento para seus diversos usos decorrentes. Embora tenha sido objeto de investigação de alguns autores nos últimos anos, sua dinâmica de forma integrada, ainda não foi adequadamente descrita.

No capítulo 3, item 3.1, serão apresentados os diversos aspectos da BIGS, composta pela baía de Ilha Grande (BIG) a oeste, e pela baía de Sepetiba (BS) a leste. Um dos fatores notáveis é o contraste em que as baías apresentam entre si, em termos de suas características físicas. A BIG é mais profunda e amplamente comunicada com o mar aberto, e o interior da BS é mais raso e abrigado (Figura 2).

Na BS os efeitos de correntes de marés são muito representativos na circulação local, o que não se observa no caso da baía da Ilha Grande (BIG), onde as correntes de maré astronômica são pouco intensas (SIGNORINI, 1980) e fortemente moduladas pelas variações do nível médio do mar, advindas da região oceânica adjacente. As variações de nível médio na BS, pouco afetam as correntes marinhas provavelmente causando apenas efeitos de flutuações homogêneas de nível (CAVALCANTE & ROSMAN, 2008).





Figura 2 – Imagem do Google Maps® eTrecho da Carta Náutica editada pela DHN abrangendo a região de estudo. À oeste a baía de Ilha Grande (BIG), ao centro a ilha Grande e a leste a baía de Sepetiba (BS). Nota-se o contraste morfológico das baías, onde se observam maiores profundidades em BIG e apenas na entrada da BS. A cor azul escuro indica a região de profundidades menores do que 10m, azul claro entre 10 e 20m e em branco maiores do que 20m.

Finalmente, ressalta-se que tanto a BS quanto a BIG tem sido estudadas de forma setorizada, considerando principalmente os efeitos de marés astronômicas, descargas fluviais e ventos locais como em ROSMAN(2004) e CERRONE(2008).

A BIGS está contida na porção central da plataforma continental sudeste (PC-SE), que representa um setor da costa de grande importância sócio econômica. Tem sido intensamente investigada e possui uma grande relevância por abrigar as principais regiões metropolitanas do país.com um importante eixo industrial, e consequentemente com substancial densidade demográfica. Suas características físicas principais serão discutidas no capítulo 3 item 3.2, ressaltando-se aqui apenas alguns aspectos.

A região sudeste abriga 4 dos 5 maiores portos brasileiros em movimentação, de acordo com o anuário estatístico de 2009 da Agência Nacional de Transporte Aquaviários², A Figura 3 apresente as principais regiões portuárias do Brasil, tendo sido a atividade da região sudeste em 2008 responsável pela exportação de 744 bilhões de dólares americanos (US\$), de acordo com os dados do Ministério de Desenvolvimento.



Figura 3 – Principais corredores brasileiros de transporte de carga marítima. Fonte: © 2002 Atlas Geográfico do Brasil – Editora Melhoramentos Ltda. – Cartografia: Maps World Direitos para Internet reservados ao UOL – http://www.uol.com.br/atlas, acesso em 20/03/2010

² http://www.antaq.gov.br/Portal/estatisticasanuario.asp#

A dinâmica da PC está fortemente relacionada à influência recebida pelos forçantes meteorológicos nela atuantes, ou seja, os sistemas de ciclones e anticiclones atmosféricos. A ação dos ventos na PC pode ocasionar convergência ou divergência de fluxo na costa, gerando uma sobrelevação ou rebaixamento do nível do mar. Esse efeito se superpõe à influência de correntes na porção externa da PC, próxima ao talude continental, e eventuais fluxos na porção interna da PC advindos de águas costeiras.

Ao longo dos anos, diversas ferramentas têm sido desenvolvidas para a compreensão dos processos reinantes na dinâmica das regiões costeiras, em sua resposta aos diversos agentes. As observações diretas, antes discretas e esparsas no tempo e no espaço, atualmente já podem ser realizadas em perfilagens contínuas na coluna d'água, como , com o uso de perfiladores acústicos de correntes, ou mesmo em uma maior abrangência espacial, como o caso dos radares que medem as ondas direcionais e correntes superficiais numa extensão de até 200 km da costa.

A observação direta, por meio da coleta de dados "in situ", tão necessária aos estudos dos processos decorrentes de exposição aos agentes naturais, em regiões costeiras, ainda é muito custosa e restrita. Estando as regiões sujeitas a influências de origem remota ou local, seja por meio dos efeitos oriundos da propagação da maré astronômica e meteorológica, e do aporte de massas d'água de origem continental ou oceânica, seja por meio de interações com a atmosfera, principalmente por ação dos ventos e precipitação, os efeitos envolvem uma ampla faixa de escalas espaciais e temporais a serem monitoradas de forma simultânea.

A interação dos diversos efeitos atuantes nas regiões costeiras ocasiona os resultados observados na circulação e distribuição das propriedades termohalinas e de nutrientes, que também precisam ser observados, para sua melhor compreensão. O monitoramento dos inúmeros parâmetros de causas e efeitos é fundamental para os estudos costeiros, com a necessária abrangência espacial e de longa duração. A impossibilidade de se cobrir toda a gama de causas e efeitos gera as incertezas remanescentes no conhecimento do comportamento destes corpos d'água.

Técnicas de sensoriamento remoto por meio de satélites tem se tornado muito desenvolvidas, e já se pode contemplar importantes contribuições na região costeira, principalmente no campo de propagação de ondas de gravidade curtas e no campo de temperatura da superfície do mar para estudos de ressurgência e de plumas de estuários,

como apresentado por SOUZA (2005) (*apud* CASTRO *et al.* 2006). Ressalta-se, entretanto, que apesar de possuírem uma grande abrangência espacial, ainda possuem restrições em termos de detalhamento espacial e temporal em diversas aplicações costeiras, aliado ao fato das informações serem apenas superficiais, salvo algumas exceções como, por exemplo, em aplicações para obtenção de batimetria em águas rasas.

Os dados observacionais e as informações de sensores remotos, quando disponíveis, podem ser utilizados em modelos numéricos, para a simulação da resposta dos ambientes costeiros aos agentes atuantes, considerando suas peculiaridades geométricas. As técnicas numéricas tem sido, ultimamente, amplamente utilizadas, e foram contempladas por um fabuloso desenvolvimento nas últimas décadas. Hoje em dia representam uma ferramenta fundamental para a necessária abrangência espaço-temporal das regiões costeiras.

Embora os modelos numéricos hidrodinâmicos sejam poderosos aliados no avanço do conhecimento das regiões costeiras e oceânicas, a modelagem numérica está longe de ser uma tarefa trivial, mesmo com o aumento de recursos computacionais, os quais ainda estão muito aquém do que seria necessário para a modelagem adequada de fluidos geofísicos. Ademais, essa modelagem está atrelada ao conhecimento das forçantes e seus efeitos, bem como de condições iniciais e de contorno (WANG, 1990, ROSMAN, 2004, DIKE, 2001, etc.).

Os modelos hidrodinâmicos possuem restrições em relações aos recursos computacionais em face do domínio a ser modelado. Quanto menor for o espaçamento de grade, menor será a escala de discretização temporal e maior será o tempo necessário de processamento computacional. Com isso, se o domínio for extenso, a simulação acaba sendo feita em escalas de discretização grosseiras, dificultando a simulação de processos físicos mais complexos. Os processos físicos reinantes, também contribuem para um considerável acréscimo do custo computacional, por representarem a necessidade de inclusão de equações adicionais para a representação de seus efeitos na simulação numérica.

As limitações da modelagem numérica também são representadas pela necessidade de se impor fronteiras artificiais na região modelada. No caso de contornos sólidos, normalmente adota-se a prescrição dos valores de fluxo normal nulo, mas no caso de contornos denominados abertos, é necessário manter a continuidade da solução, permitindo que os processos advindos de regiões fora do domínio modelado possam ser representados nessa região de interface. O capítulo 5 apresenta uma discussão sobre os aspectos da modelagem numérica.

A investigação da região de BIGS, como um sistema, depende da avaliação da atuação dos fenômenos reinantes na PC adjacente, associados às variações de nível médio do mar, devidos à maré meteorológica. Na BS os efeitos de marés astronômicas, ventos e descargas fluviais são bastante conhecidos, e a resposta do nível médio está relacionada a um efeito "pistão", gerando uma sobrelevação ou subelevação homogênea no domínio, pouco afetando as correntes marinhas no local. A BIG, por sua vez, mais amplamente comunicada com a PC apresenta correntes de maré mais fracas e uma forte modulação das mesmas em razão das oscilações do nível médio, cujo efeito ainda não foi adequadamente caracterizado, na BIG e no canal de comunicação com a BS, o canal da Ilha Grande (CIG).

Os dados observados representativos disponíveis em BIGS são apresentados e discutidos no capítulo 4, mas a adequada caracterização se dá de uma forma mais abrangente quando é possível se lançar mão da de técnicas de modelagem numérica para o estudo da região. Entretanto, conforme discutido no capítulo 5, ao se simular a dinâmica da região por meio de um modelo numérico, guardadas todas as peculiaridades da técnica, os dados observados são fundamentais para a avaliação dos resultados.

Quando a simulação costeira é realizada, as informações das forçantes podem estar contidas na fronteira aberta ou nas interfaces do modelo com a costa, o fundo e a superfície livre. A prescrição nos contornos abertos da variabilidade temporal do nível do mar de forma homogênea normalmente é suficiente para representar efeitos de propagação de ondas, especialmente de maré astronômica. Normalmente é possível se obter uma resposta adequada da circulação local, como é feito usualmente nos modelos costeiros de regiões abrigadas, com resultados bastante satisfatórios, como na baía de Paranaguá, modelada por OLIVEIRA (2001), CAVALCANTE & ROSMAN (2007),na baía de Todos os Santos, por BARROSO (2009), Baía de Guanabara, por OLIVEIRA (1998), dentre muitos outros.

No sistema BIGS, onde o domínio aberto da BIG é mais amplo e francamente exposto à PC adjacente, torna-se importante considerar a variabilidade espacial, do nível médio do mar, além da variação temporal (CAVALCANTE & ROSMAN, 2008). Os fenômenos de PC representam escalas horizontais espaciais de extensão longitudinal à costa de algumas centenas de quilômetros, e escala horizontal transversal confinada à largura da PC, desde

algumas dezenas de quilômetros até poucas centenas de quilômetros (CSANADY,1984). Essa variabilidade do campo de elevações de longo período da PC normalmente é capturada de forma bastante satisfatória em modelos oceânicos que visam estudos deste tipo de dinâmica, com forçantes meteorológicas adequadamente descritas, mas que por sua vez também tem um domínio normalmente restrito à capacidade computacional, e quando não são globais, também necessitam de informações de modelos de maior escala nas fronteiras abertas.

Portanto o estudo da BIGS se faz necessário através da utilização dos resultados de simulação do modelo oceânico em modelo costeiro, que será aqui denominada de aninhamento de um sentido, uma vez que o modelo costeiro recebe as informações do modelo de maior escala, mas seus resultados não interferem no domínio de maior escala. Na literatura pode ser chamado de "dowscaling", ou interação de uma via, dentre outras expressões, como discutido no capítulo 5. Quando ocorre a transferência de informações em ambas as simulações, ocorre o aninhamento bidirecional.

Os dados observacionais da BIGS, retrabalhados e preparados para a utilização nas avaliações das simulações numéricas, são apresentados no capítulo 4, na forma de um mosaico, com alguns pontos estratégicos, para diversas ocasiões, sempre relacionados ao nível médio do mar, disponível de forma contínua na estação de observação permanente do nível do mar da Ilha Fiscal, próxima à região de estudo. Os dados da BIGS foram utilizados para as avaliações do modelo costeiro, e a estação da Ilha Fiscal teve fundamental importância para a avaliação dos modelos de dinâmica de PC. Foram analisados os comportamentos básicos esperados no local, e os dados forneceram um grande auxílio para avaliação da capacidade dos modelos em representar a dinâmica da região.

No Capítulo 5.3 são apresentados os aspectos gerais referentes à metodologia da modelagem numérica. Inicialmente é apresentada a implementação do modelo costeiro da região de BIGS, com sua fronteira estendida de forma a permitir a correta prescrição do campo de nível médio do mar advindo do modelo de PC.

Os resultados principais são apresentados no capitulo 6, onde são apresentadas as simulações apenas com os efeitos de maré astronômica, e as que contém as informações de maré meteorológica do modelo oceânico de dinâmica de PC, selecionado para o experimento. Os resultados de simulações de trocas de massas de água por meio de

trajetórias de partículas, entre a BIG e SEP e a interação com a fronteira aberta mostram que é mister incorporar com precisão os efeitos de ondas de PC na contabilização da dinâmica da BIGS.

As simulações de maré meteorológica foram feitas para o mês de agosto de 2003, representativo do inverno, e para o período representativo de verão, no mês de fevereiro de 2004. Os resultados de inverno mostraram uma boa representatividade da dinâmica da região, em termos qualitativos, o que também se observou no período de verão, embora este último possua uma gama de fatores contribuintes maior, e portanto requer uma investigação mais aprofundada.

Finalmente são apresentadas as conclusões no capítulo 7, referentes aos avanços adquiridos quando da utilização da modelagem aninhada, e realçados alguns aspectos relativos às limitações ainda existentes para a completa caracterização da região de BIGS.

A incorporação das informações termohalinas da massa d'água, com a avaliação dos modelos oceânicos em relação à representabilidade no fornecimento deste campo, nas fronteiras abertas, poderão permitir a extensão do campo de investigação, inclusive em termos de aspectos tridimensionais da distribuição destas propriedades, o que é sugerido no capítulo 8, juntamente com a necessidade de se efetuar levantamentos de dados "in situ" para validação dos estudos.

Com esta pesquisa espera-se ter contribuído para um avanço no conhecimento da dinâmica da região da BIGS e com isso fornecer mais uma ferramenta de gestão e manejo de uso na região.

3. A região de estudo

Este capítulo apresenta os principais aspectos da região de estudo, baseadas em estudos e pesquisas desenvolvidas anteriormente.

3.1 As Baías de Ilha Grande e Sepetiba

O complexo de baías Ilha Grande e Sepetiba (BIGS) situa-se no litoral brasileiro, estado do Rio de Janeiro, entre os paralelos de 23° e 23,5°S e os meridianos de 43,5° e 44,5°W, na porção central da PC sudeste (Figura 1). Possui uma intensa atividade de pesca e lazer, sendo o turismo um grande atrativo na região. No entorno de Sepetiba há diversas atividades industriais e minerais que são escoadas pelo porto de Sepetiba, que possui terminais de escoamento de carvão, minérios e de containeres para carga geral, e além disso uma malha ferroviária que liga a região a outros estados próximos (Minas Gerais e São Paulo). As atividades industriais passadas foram causadoras de grandes impactos ambientais devido aos dejetos industriais, com conseqüências ainda atuais. Esta região tem sido amplamente estudada, e também avaliada em termos da legislação atual para sua expansão. Um exemplo a ser citado é o EIA RIMA apresentado para a autorização da implementação do porto sudeste (CERRONE,2008).

A baía de Sepetiba (BS) é um corpo raso, com presença de canais mais profundos, voltados principalmente para a navegação, e recebe uma importante contribuição de aporte fluvial (Figura 2). Situada a oeste de uma extensa região de baixada, é protegida do oceano adjacente por um cordão arenoso, denominado restinga da Marambaia, que termina em um estreito canal de ligação com a Ilha Grande (~10km). Possui também uma comunicação com a baía de Ilha Grande (BIG) por meio de um canal entre o continente e a Ilha Grande (CIG) de largura aproximada de 4km.

A baía de Ilha Grande possui uma franca comunicação com o oceano aberto, e o canal que liga o continente até a Ilha Grande tem aproximadamente 20km. As profundidades na baía seguem um comportamento equivalente ao da PC, reduzindo-se apenas nas proximidades das margens. Completamente cercada por uma região bastante montanhosa, que faz parte da Serra do Mar, tem um aporte fluvial pouco significativo, com pequena presença de rios às suas margens. Nesta tese os domínios referidos para cada baía estão na Figura 2.



Figura 4 – Cobertura sedimentar da baía da Ilha Grande segundo o diâmetro médio. Modificado de MAHI-QUES, 1987 (apud MARQUES, 2004). Nota-se o contraste de distribuição entre a BIG, com predominância de areia fina, e na entrada da BS com maior presença de areia grossa.



 Figura 5 – Mapa com a classificação dos sedimentos do fundo segundo o diâmetro médio, elaborada por MARQUES (2004), compondo os dados BAMPETRO com informações de MAHIQUES (1987).
 Também se nota em detalhe o contraste de distribuição de areia fina na BIG, com predominância de areia grossa na BS.

A distribuição sedimentar da BIGS foi apresentada por MAHIQUES, 1987 (*apud* MARQUES, 2004), onde novamente se observa um contraste na presença de sedimentos (Figura 4), e complementada por MARQUES (2004) que fez uso do banco de dados de tipo de fundo da BANPETRO (Figura 5).

A região é caracterizada por um clima tropical úmido, com um inverno seco e ameno e um verão mais chuvoso. Na PC adjacente os ventos são predominantes de NE nos períodos de presença do Anticiclone do Atlântico Sul, e provenientes de SW na ocorrência de frentes frias associadas aos Ciclones Extratropicais. A orografia da região confere uma particularidade da presença de ventos na região de BIG, como descrito por MENEZES (2007). Na enseada de Itaorna, interior da BIGS, os ventos do período de fevereiro de 2003 a agosto de 2004 apresentam uma relevante orientação no sentido norte-sul atribuída pelo autor ao efeito das montanhas circundantes, diferentemente da orientação apresentada nas informações de reanálise do NCEP, de um ponto próximo na PC adjacente, onde o autor obtém valores de orientação NE-SW (Figura 6), tendo os últimos apresentado uma melhor correlação com o nível médio do mar no interior da BIGS, enseada de Itaorna, observado no mesmo período.



Figura 6 – Rosa dos ventos da estação de Piraquara (esquerda) e da reanálise do NCEP/NCAR no ponto de 23,8°S e 43,5°W (direita) filtrados com filtro passa baixa de 40h , referentes ao período de fevereiro de 2003 a agosto de 200 (adaptado de MENEZES, 2007).



Figura 7 – Estatística de ventos observados na Pedra Pelada (23º 03' 11,5" S e 44º 25' 14,2" W) no verão (fev-mar2004) à esquerda e no inverno (outubro-2003), à direita pela COPPETEC, onde se nota as direções preferenciais N-NE e S-SW (ROLDÃO, 2004).

Os dados da COPPETEC (2004) adquiridos em outubro de 2003 e fevereiro a março de 2004, sem a filtragem de baixa frequência, mostram essa predominância do sentido N e S no interior da BIGS, entrada da baía da Ribeira, nas proximidades de Itaorna (Figura 7) e na Figura 8 pode-se observar o comportamento do vetor do vento em outubro de 2003, com a presença marcante das brisas marinhas.

Em termos de circulação, esta região também apresenta um contraste muito importante apontado inicialmente por SIGNORINI (1980). A porção oeste (baía de Ilha Grande) possui um padrão de circulação de correntes de maré astronômica fracas, moduladas por correntes mais intensas associadas a escalas de tempo maiores. Os efeitos de correntes geradas por efeitos de marés astronômicos observados na porção leste, baía de Sepetiba (BS) se apresenta de forma intensa, como ocorre na maior parte dos estuários. A BS possui um comprimento ressonante com a componente de maré M4, o que favorece a ocorrência de correntes de maré mais intensas.



Figura 8 – Padrões de ventos observados pela COPPETEC na entrada da Pedra Pelada (23º 03' 11,5" S e 44º 25' 14,2" W) em outubro de 2003, onde se nota a presença de brisas marinhas e uma dominância de ventos de quadrante sul (ROSMAN, 2004).

O comportamento "quase permanente" que modula a fraca corrente de maré presente na BIG já havia sido objeto de investigação no passado por parte de diversos autores, além de SIGNORINI (1980), tendo este último ressaltado a impossibilidade de adequada explicação sem a presença de séries de observações de correntes com durações no mínimo cinco vezes maiores do que as de maior comprimento até então disponíveis, no caso, uma série de 15 dias observada pela Diretoria de Hidrografía e Navegação (DHN), em uma localização próxima ao canal de comunicação entre BIG e BS (CIG), nas lâminas d'água a 5m da superfície e a 3m do fundo.

Sem que houvesse evidências de contribuição de ventos locais, o autor supramencionado apontou a possibilidade para a tendência de circulação horária na Ilha Grande aos efeitos de gradiente de densidade, o que nos experimentos numéricos de FRAGOSO (1999) se mostrou pouco provável. Este último realizou teste numérico para o efeito de enfraquecimento dos ventos típicos de nordeste da plataforma continental, devido à orografia escarpada da região, e verificou uma tendência de empilhamento da coluna d'água na porção oeste, gerando um gradiente de pressão que favorece a existência de um fluxo de oeste para leste, mas não investigou o aspecto da variabilidade da atuação destes ventos nas ocasiões de invasões de frentes frias, quando a direção dos ventos provém do quadrante S-SW, e não efetuou comparações com observações "in situ".

Utilizando a mesma série temporal de correntes apresentada por SIGNORINI (1980), coletada pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) por 15 dias, no CIG, em agosto de 1975, nas proximidades da superfície e do fundo, ALVES (2003) levantou as informações de elevação do nível do mar para o mesmo período na Ilha Fiscal, situada a uma distância de aproximadamente 50 km da entrada da BIG, e verificou que a circulação de baixa frequencia no entorno da Ilha Grande representava uma resposta das elevações subinerciais na embocadura da BIG. Ele aplicou um modelo unidimensional de propagação de ondas longas e conservação de volume, no trecho da entrada da BIG e canal CIG, forçado apenas com o nível médio do mar observado para o mesmo período da informação correntométrica, considerando uma celeridade da onda calculada por meio da defasagem encontrada entre as estações de nível do mar de Ilha Fiscal e Cananéia.

O modelo utilizado pelo autor supracitado é bastante incipiente para representar uma região de grande complexidade como a BIGS, tendo fornecido apenas um forte indicativo de que a contribuição das ondas de plataforma continental é fundamental para a avaliação do padrão de circulação no canal da Ilha Grande, por ter obtido uma resposta qualitativamente representativa, embora subestimada quantitativamente, do padrão de correntes observado em CIG.

Partindo de um conjunto de medições realizadas pelo CHM (Centro de Hidrografia da Marinha), nas entradas de alguns estuários na PC-SE, as análises estatísticas apresentadas por VALENTE *et al.* (2001) indicaram que na embocadura da BIGS o padrão de correntes não apresentava a alternância observada na entrada da BS, onde os efeitos da maré astronômica eram mais evidentes.

A propagação de ondas de plataforma (OPC) no interior da BIG evidenciou-se ser a principal responsável pelo padrão de circulação apresentado em CIG, para o período avaliado, porém ainda persistindo a dificuldade da caracterização da região, em função da disponibilidade de medições, ainda esparsas e de curta duração. A seguir será brevemente discutida a dinâmica da PC adjacente à área de estudo.

3.2 A Plataforma continental sudeste

A PC-SE, além de englobar a região de BIGS, contém outras regiões de grande importância sócio-econômica e industrial, e com importantes terminais portuários, como exemplo em São Sebastião, Santos e Rio de Janeiro. Graças a isso seus estudos remontam a algumas décadas, e são inúmeros, resultando em um razoável conhecimento dos processos nela reinantes, mesmo diante das dificuldades existentes na árdua e custosa tarefa de coleta de dados.

Na PC há necessidade de se realizar fundeios por períodos de tempo razoavelmente longos, durante meses, e enfrentar desafios logísticos e de mentalidade marítima, e.g. vandalismo. As antigas técnicas de inferência de correntes geostróficas por meio do conhecimento de propriedades físico químicas da água do mar, não podem ser aplicadas nesta região de elevada dinâmica espacial e temporal, e perfilagens de correntômetros no casco de navios também são de difícil interpretação, dada a elevada variabilidade das correntes.

A seguir discute-se aspectos sobre o conhecimento atual da dinâmica da PC-SE. Maiores detalhes podem ser obtidos em CASTRO *et al.* (2006), REZENDE (2003), COELHO (2008), etc.

Na região S-SE, os efeitos hidrodinâmicos podem ser agrupados em termos das principais contribuições representadas pelos efeitos da Corrente do Brasil, principalmente por meio de sua atividade de mesoescala, via meandramentos e vórtices, pelos efeitos da tensão de cisalhamento do vento atuante sobre a plataforma e pelos efeitos de correntes de densidade originadas pela descarga de estuários. Estes efeitos ocorrem de forma acoplada, porém serão discutidos separadamente. Para a melhor compreensão de algumas descrições serão apresentadas as principais massas d'água que compõem a PC-SE, apresentadas na

Tabela 1.
Nome	temperatura°C	salinidade UPS
AT (Água Tropical)	T > 20	S > 36.4
ACAS (Água Central do Atlântico Sul)	T < 20	34 < S < 36,4
AC (Água Costeira)		S < 34

Tabela 1 : Intervalos termo-halinos das massas d´água da PC, adaptado de CASTRO et al. (2006).

A Água Tropical (AT) é transportada na camada superficial da Corrente do Brasil (CB), ocupando os primeiros duzentos metros, fluindo para a direção sul, e presente principalmente na porção mais externa da plataforma continental, ou plataforma externa. A Água Central do Atlântico Sul (ACAS) é também transportada pela CB em subsuperfície, e no período de primavera e verão exerce uma intrusão no fundo, ocupando uma extensa região da plataforma média, porção central da plataforma, e algumas vezes a porção interna da plataforma, podendo aflorar em regimes de vento favoráveis ao fenômeno de ressurgência. A Água Costeira (AC) é resultante da mistura das águas de origem de descargas continentais com águas oceânicas, normalmente presente na plataforma interna, podendo estar representada por correntes de densidade que fluem para fora da costa e sofrem a deflexão de Coriolis, gerando um escoamento para o norte da costa (CASTRO *et al*, 2006, COELHO, 2008).

3.2.1 Corrente do Brasil (CB)

A CB é uma corrente de contorno oeste que compõe a porção superior oeste do sistema de giros do Atlântico Sul, fluindo ao longo do talude continental, e seu comportamento médio pode ser observado em superfície, referente à AT, na Figura 9 atingindo profundidade de até 250m, referente à ACAS, na Figura 10. Ressalta-se o fato de que a contribuição da ACAS ocorre apenas para latitudes ao sul de 20°S. Ao norte desta latitude a CB transporta apenas a AT.

Na região SE, a costa sofre inflexão na região do Cabo de São Tomé, norte do estado do RJ, e a PC e apresenta um alargamento em direção ao sul, estendendo-se longitudinalmente até 200 km em sua porção central. Neste trecho a CB sofre meandramentos e forma vórtices ao longo de seu percurso.

A CB na PC externa pode promover aporte mais superficial de águas que ocupam maiores profundidades, mais frias e menos salinas (ACAS), quando da ocorrência de vórtices

ciclônicos³, através da "sucção" de camadas provenientes do fundo. Se os vórtices são anticiclônicos, ocorre o bombeamento de águas mais quentes superficiais (AT) para o fundo. As atividades de mesoescala da CB são objeto de inúmeros estudos observacionais e numéricos, dentre os quais se citam alguns.

CASTELÃO *et al.* (2004) realizaram experimentos numéricos confrontados com observações, e verificam, na região de Cabo Frio, a ocorrência de um vórtice ciclônico oriundo da Corrente do Brasil. Este é uma importante fonte de contribuição da ACAS tornando-a mais rasa e disponível para compor o mecanismo de ressurgência que ocorre na região, em condições de vento favorável.



Figura 9. Mapa de distribuição espacial das principais correntes oceânicas de superfície na região da Bacia do Atlântico Sul (Fonte: SCHMITZ, 1996, apud CASTRO *et al.* 2006).

³ Circulação ciclônica é com o mesmo sentido da rotação da terra, que no hemisfério sul é horário e no hemisfério norte é anti-horário. A circulação anti-ciclônica corresponde ao sentido inverso ao de rotação da terra, sendo portanto, anti-horário no hemisfério sul e horário no hemisfério norte.



Figura 10. Representação esquemática da circulação oceânica no Oceano Atlântico Sudoeste ao nível de 250 metros de profundidade. Essa camada é representativa para o escoamento da ACAS (Fonte: STRAMMA & ENGLAND, 1999, apud CASTRO *et al.* 2006).

FRAGOSO (2004) utilizou o modelo numérico POM e aplicou técnicas de simulação conduzida utilizado dados de bóias de deriva, para incorporação dos efeitos de meandramentos e formação de vórtices da CB. Utilizou resultados de um modelo global em uma grade regional e modelou um vórtice na altura de Florianópolis, detectado por dados de derivadores lagrangeanos em 1993 (Figura 11). Um exemplo dos resultados alcançados por meio de sua modelagem é apresentado na Figura 12.



Figura 11. Trajetória dos derivadores analisados por Assireu *et al.* (2003),mostrando a presença de vórtices anticiclônicos ao largo de Santa Catarina (ASSIREU *et al.*, 2003, *apud* FRAGOSO, 2004).



Figura 12. Campo de vorticidade relativa (s-1) e velocidade em superfície obtida na simulação do modelo para janeiro de 1999 (FRAGOSO,2004).

CALADO & SILVEIRA (2006) propõem o uso de modelos de feição⁴ elaborados a partir de dados observacionais, para a modelagem de vórtices. O modelo proposto aplica-se a vórtices e à modelagem de plumas de ressurgência, causadas pelo vento atuante na PC, a serem discutidas posteriormente. Os autores aplicaram a metodologia aos dois vórtices recorrentes em Cabo Frio e Cabo de São Tomé, generalizando a teoria anteriormente existente, para estes vórtices anti-simétricos. A partir da imagem de satélite da Figura 13 apresentaram o esquema da Figura 14.



Figura 13. Imagem de sensor AVHRR dos vórtices da Corrente do Brasil (Cabo Frio e Cabo de São Tomé) de fevereiro de 2001 – Cortesia de J.A> Lorenzzetti (INPE) apud CALADO & SILVEIRA, 2006. Escala em °C.

⁴ O modelo de feições, também denominado modelo paramétrico, é uma ferramenta estatística para obtenção de características tridimensionais de feições oceanográficas, e.g. plumas de ressurgência ou vórtices, obtidas a partir do processamento de dados "in situ". As feições visam representar fenômenos de mesoescala de dificil simulação numérica, resultantes de uma complexa atuação de processos físicos.



Figura 14. Modelo de feição para vórtice assimétrico (Eddy feature Model - EFM), parâmetros e um exercício de aplicação usando valores climatológicos de Tis and Tib. (T no lado inshore, superfície e fundo), seg.CALADO & SILVEIRA, 2006. Escala em °C.

CASTRO *et al.* (2006) mencionam, além das feições de vórtices recorrentes no Cabo de São Tomé e de Cabo Frio, a ocorrência de vórtices também na Bacia de Santos, provavelmente devidos aos efeitos de inflexões na costa e da topografia local.

Os autores acima apresentaram um trabalho realizado pelo INPE, empregando médias de imagens de TSM, obtendo características estatísticas dos principais vórtices que ocorrem na CB (Tabela 2) na PC-SE e proximidades.

Vórtice/Região	Verão	Primavera	Outono	Inverno	Temp. Média
Vitória			30,00	27,50	28,75
S. Tomé	64,00	52,50	33,00	47,00	49,13
C. Frio	94,62	85,50	99,23	103,70	95,76
Sta. Marta		60,00	67,50	72,00	66,50
Média	79,31	66,00	57,43	62,55	

Tabela 2. Estatística de vórtices gerados principalmente devido a processos de instabilidade baroclínica, causada por cisalhamento vertical das correntes na coluna d'água sobre o talude, e à forte mudança de orientação da linha de costa. Diâmetro médio (Km) de vórtices frontais da CB, seg.

3.2.2 A Tensão de cisalhamento do vento

No item anterior foi apresentada a distribuição das massas d'água advindas na contribuição da CB e principalmente seus meandros e vórtices. Entretanto, atuando sobre essa distribuição de massas que se compõe com a contribuição continental que será discutida no item a seguir, existe a atuação dos ventos na PC que determinam o comportamento da circulação, e são responsáveis pela sua dinâmica e variabilidade.

Os ventos possuem uma variabilidade que está fortemente vinculada à combinação dos eventos representados pela presença do anticiclone atmosférico do Atlântico Sul, que proporciona a persistência de ventos NE de intensidade média, no litoral, com as invasões episódicas dos sistemas frontais representados por células atmosféricas ciclônicas, que se caracterizam pela presença na costa de ventos intensos de quadrante SW.

Os sistemas frontais se deslocam em direção ao norte na costa sudeste, provenientes do sul, podendo algumas vezes se deslocar em direção ao oceano profundo, ou mesmo permanecer estacionários em algum trecho do litoral. O comportamento dos sistemas frontais difere nos períodos de verão, quando os eventos são mais freqüentes e menos intensos, e no inverno, são menos freqüentes, porém com maior intensidade de ventos. Essas diferenças sazonais se refletem na média, quando se observa no verão a maior presença de ventos de NE, o que no inverno não se mostra evidente devido à maior intensidade dos ventos dos sistemas frontais.

Na costa brasileira os ventos médios de verão são provenientes do quadrante lestenordeste, nas latitudes entre 15°S e 35°S e ao sul de do paralelo de 35°S passam a dominar ventos de oeste-sudoeste. Durante o inverno, a faixa de ventos de leste-nordeste fica confinada mais ao norte, entre 15°S e 25°S (Figura 15). A costa S-SE, e eventualmente a sul do NE é afetada pela passagem de frentes frias, que provocam a rotação dos ventos para sudoeste com períodos de 4 a 7 dias (WAINER & TASCHETO,2006; CASTRO & MIRANDA, 1998; TORRES JR., 1995 e STECH & LORENZZETTI, 1992 apud FRAGOSO, 2004).



Figura 15. Climatologia da tensão de cisalhamento do vento para a costa brasileira (dyn/cm²) para os meses de janeiro (esquerda) e julho (direita). Fonte: CASTRO & MIRANDA (1998).

Em correspondência aos modelos clássicos de convergência e divergência na costa, devido ao transporte de Ekman que se faz à esquerda da direção do vento, as ocasiões de passagem de frente fria associadas à ocorrência de ventos de quadrante sul ocasionam uma sobrelevação do nível do mar devido à convergência na costa, enquanto a persistência de ventos de quadrante norte causam um rebaixamento do nível do mar, devido à divergência do fluxo na costa. Tais eventos são mais efetivos durante a atuação do vento paralelo à costa (CSANADY, 1984).

A alternância dos ventos é o responsável direto pela ocorrência das variações do nível do mar associadas às marés meteorológicas. As regiões de subsidência e de convergência na costa, devido à passagens de sistemas frontais, correspondem ao comportamento observado nas ondas de plataforma continental (OPC), que são responsáveis pela propagação da energia subinercial na costa sudeste, cuja propagação se faz para o norte, deixando a costa à esquerda. Em latitudes médias, segundo CASTRO *et al.* (2006), os períodos naturais de ocorrência são entre 2 e 15 dias, dentro dos períodos de oscilação do vento, e as ondas são geradas aproximadamente entre Cananéia e o norte do Paraná, por ser uma região de em que a componente longitudinal da tensão de cisalhamento do vento tem variância máxima.

Os fenômenos em consequência dos efeitos das tensões de cisalhamento do vento têm sido estudados de forma intensa, principalmente na plataforma SE brasileira, a citar o estudo por meio de modelo numérico e observações por CASTRO (1985), do efeito no canal de São Sebastião – SP da componente barotrópica resultante da alternância da tensão de cisalhamento do vento ao longo da PC, em consequência ao deslocamento de frentes frias. Cita-se também o estudo da estratificação do canal de São Sebastião por meio de modelagem da PC com médias termohalinas sazonais e forçantes meteorológicas feita por SILVA (2001).

As ocasiões de divergência na costa têm sido abordadas em inúmeros estudos de ressurgência em Cabo Frio, quando a água superficial, normalmente ocupada pela AC, pode ser afastada para o largo, dando lugar à ACAS, na camada subjacente, formando plumas de ressurgência na superfície. Um exemplo de estudo na região foi o de RODRIGUES & LORENZZETTI (2001), em que os autores aplicaram um modelo de elementos finitos em duas camadas para um vento constante, num estudo da influência do contorno de costa e da batimetria sobre a ocorrência de ressurgência na plataforma, tendo sido a simulação do modelo comparada ao evento registrado na imagem de satélite da

Figura 16. REZENDE (2003) realizou o estudo da intrusão de ACAS no período do verão por meio de modelagem da PC-SE, com climatologia de temperatura e salinidade do projeto REVIZEE, e ventos sinóticos, obtendo resultados médios coerentes com as observações.

Devido à maior proximidade da CB no verão e primavera, a ACAS e AT se encontram mais próximas da costa, fazendo com que os ventos de quadrante NE, favoráveis à ressurgência, causem uma intrusão da ACAS em direção à costa, o no caso inverso uma intrusão da AT. Quando ocorre a convergência, as águas superficiais fluem em direção à costa, causando a ocupação de águas superficiais provenientes de regiões mais afastadas, que sofrem subsidência e mistura com a AC, como descrito em COELHO (2008) e CASTRO (1996) (*apud* CASTRO *et al.* 2006).

Nos períodos de inverno, no lugar da ocupação de ACAS observada na primavera e verão, quando há persistência de ventos de quadrante NE, favoráveis à ressurgência, ocorre a intrusão sub-superficial de AT em direção à costa. Isso se deve ao fato de que ao ocorrer o afastamento das águas superficiais no inverno, com a diminuição da estratificação vertical de densidade e um maior resfriamento das águas costeiras, a ACAS não tem energia

suficiente para vencer o empuxo necessário para uma intrusão mais profunda. Na situação de vento favorável à ressurgência, na impossibilidade de penetração da ACAS, por continuidade, a AT é levada em direção a costa, imediatamente abaixo da camada de Ekman superficial (~10m), CASTRO *et al.* 2006).



Figura 16. Imagem de temperatura da superfície do mar (AVHRR-NOAA) mostrando a ressurgência costeira na plataforma continental sudeste do Brasil (cores azuis). As nuvens são marcadas em branco e seus valores são de 8°C (fonte: RODRIGUES & LORENZZETTI, 2001).

Os autores mencionados no parágrafo anterior apresentaram resultados de um trabalho realizado pelo INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais). Neste trabalho foram processadas 128 imagens de TSM, Temperatura da Superfície do Mar, de alta resolução, 1x1 Km, durante o período de junho de 1993 a junho de 1999, englobando a região de 20°S a 30°S e 39°W a 49°W. Uma média de 30 imagens por estação do ano esteve disponível. Os resultados deste trabalho também estão apresentados a seguir, onde a interpretação das imagens realizada pelos autores forneceu características observadas em superfície da ocorrência de plumas de ressurgência, dentre as feições mais importantes do conjunto de imagens. A compilação dos resultados destas análises é apresentada na.Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5.

Região	Verão	Primavera	Outono	Inverno	Temp. Média
Vitória	20,5	20,5	21,1	20,3	20,6
S. Tomé	19,9	19,0	19,9	20,8	19,9
C. Frio	18,9	17,1	19,5	18,7	18,5
Sta. Marta	20,0	17,2	17,0		18,1
Temp. Média	19,8	18,4	19,4	19,9	

Tabela 3. Estatística sazonal de temperaturas médias, em °C, nas plumas frias de ressurgência costeira (CASTRO *et al.*, 2006).

Tabela 4. - Estatística sazonal de temperaturas mínimas, em °C, nas plumas de ressurgência costeira (CASTRO *et al.*, 2006).

Região	Verão	Primavera	Outono	Inverno	Temp. Mínima
Vitória	18,0	19,0	18,5	19,5	18,0
S. Tomé	17,0	18,0	17,0	20,5	17,0
C. Frio	16,0	15,0	16,0	17,0	15,0
Sta. Marta	18,0	15,5	17,0		15,5
Temp. Mínima	16,0	15,0	16,0	17,0	

Região	Verão	Primavera	Primavera Outono		Extensão. Média
Vitória	163,00	127,50	131,25	97,50	129,81
S. Tomé	72,95	69,00	58,13	52,50	63,15
C. Frio	104,42	125,83	102,50	85,00	104,44
Sta. Marta	125,00	115,00	75,00		105,00
Ext. Média	116,34	109,33	91,72	78,33	

Tabela 5. Estatística sazonal de extensão longitudinal média em Km das plumas de .ressurgência costeira (CASTRO *et al.*, 2006).

3.2.3 Efeitos da Corrente Gravitacional Costeira

A contribuição da AC também é muito relevante na PC sul e sudeste. Essa massa d'água é composta pela mistura entre a água de origem continental devido à descarga de rios com as massas d'água de origem oceânica (AT e ACAS). Sua presença é muito importante na plataforma interna, devido à presença de regiões estuarinas com grande contribuição fluvial.

CASTRO *et al.* (2006) apontam as frentes oceânicas como um ramo de estudos emergente e importante, tendo em vista serem regiões de intensa troca de propriedades e de grande importância para as espécies marinhas. Os autores mencionam a existência de estudos de frentes estuarinas, com evidências de plumas formadas na região leste da baía de Sepetiba e no complexo estuarino de Santos-Bertioga. CASTRO 1996 (apud CASTRO *et al.* 2006) apresentou resultados de quatro cruzeiros de verão e três de inverno, realizados no embaiamento de Ubatuba entre 1985 e 1988, onde ocorre uma variabilidade interanual na mistura da AC, de origem continental, e as já mencionadas, AT quente e salina, e ACAS fria. O autor chama a atenção para a grande variabilidade de comportamento das massas d'água e a grande dificuldade de se estabelecer um comportamento médio.

REZENDE (2003) elaborou uma climatologia de verão na região sudeste da PC, (Figura 18) a partir da qual foi observada a presença de uma corrente gravitacional na plataforma interna estendendo-se até a Ilha Grande, utilizando-se uma simulação numérica. O autor observou que este fluxo predominante para NE pode ser reforçado ou revertido para SW, pela ação persistente de ventos de SW/NE, respectivamente. COELHO (2008) realizou experimentos numéricos de verão na PC-SE, onde obteve o campo de correntes médias

geradas no modo diagnóstico do POM⁵ por diferenças de densidade, com base na climatologia de dados médios de temperatura e salinidade de verão elaborada pelo autor supracitado. Nota-se na Figura 19 a presença marcante da corrente de densidade fluindo para norte até o Rio de Janeiro, e a presença de um vórtice horário em frente à região de BIGS. Ao simular a circulação sob efeito de ventos médios de verão, predominantes do quadrante NE, a corrente se torna-se mais fraca em superfície, mas no restante da coluna d'água mantém sua contribuição, apresentando características similares ao experimento sem a contribuição do vento médio, com correntes ligeiramente inferiores, como pode ser visto na Figura 20.

O experimento numérico acima visou avaliar a atuação de ventos médios, na PC, não tendo sido submetido a uma calibração para cenários específicos. Mesmo assim foi possível dimensionar a importância desta circulação em direção ao norte contígua à costa. Foi possível também verificar a necessidade de obtenção de séries temporais a serem analisadas em conjunto com as informações climatológicas já apresentadas nos estudos de modelagem numérica, para uma caracterização mais precisa desta contribuição no verão.



Figura 17 a- Distribuição de temperaturas médias na superfície obtidas pela climatologia realizada por Rezende (2003).

⁵ Modo diagnóstico do Princeton Ocean Model refere-se obtenção do campo de correntes resultante do campo de temperatura e salinidade presentes na região.



Figura 18 b- Distribuição de salinidades médias na superfície obtidas pela climatologia realizada por Rezende (2003).



Figura 19- Correntes simuladas no POM considerando apenas gradientes de densidade, onde se observa a presença de um fluxo para norte contíguo à costa até o norte da baía de Guanabara, por COE-LHO (2008).



Figura 20- Correntes simuladas no POM considerando gradientes de densidade e vento médio de verão, onde se observa a presença de um fluxo para norte contíguo à costa até Cabo Frio, por COELHO (2008).

Na porção sul da plataforma continental sudeste, somada à contribuição dos estuários locais existe a contribuição de águas frias provenientes da PC sul. Estudos observacionais realizados através do monitoramento das propriedades físico-quimicas indicam que ao sul a PC é fortemente condicionada pela intrusão de águas frias do rio da Prata, que recebe uma contribuição adicional da lagoa dos Patos (MIRANDA, 1972 *apud* CASTRO & MIRANDA 1998; CIOTTI *et al.*, 1995; LIMA *et al.*, 1996 *apud*. SOARES & MÖLLER, 2001). A massa d'água com salinidade de 33 UPS e temperaturas de 13°C, se desloca em direção norte e possui um ciclo sazonal pronunciado, com um deslocamento máximo para norte no inverno austral. Acredita-se que esta corrente é uma continuação da corrente costeira observada na costa da Argentina, segundo CASTRO & MIRANDA (1998).

A corrente gravitacional pode interagir com os efeitos das forçantes meteorológicas, segundo a análise de séries temporais obtidas em fundeios de correntômetros realizados na plataforma continental sul, efetuada por ZAVIALOV *et al.* (2002), na PC sul. Os autores descrevem a presença na PC sul, no inverno, um decréscimo na intensidade das correntes, que os autores atribuem à estratificação da coluna d'água estável devido ao afluxo de águas menos salinas na superfície. que inibem a troca turbulenta nas camadas d'água

subjacentes. Também mencionam a presença de um fluxo permanente na direção norte, na PC-sul, de alguns centímetros por segundo, mesmo com a tensão de cisalhamento do vento atuando de forma contrária, importante no período de inverno.

CASTRO *et al.* (2006) apresentam um resultado obtido também por meio de imagens de satélite, desta vez obtendo-se médias mensais de TSM com resolução de 9x9 km do PODAAC (Physical Oceanography Distributed Arctive Archive Center), no período de 1987 a 1998. Os autores ressaltam um maior contraste termal na porção sul devido à intrusão meridional de águas frias (Figura 21), que anos de "El Niño" do período, indicados pelos fortes valores negativos do índice de SOI (Southern Oscillation Index) da Figura 22, ocorreu em menor intensidade. Observa-se, entretanto, que a variabilidade inter-anual não foi muito significativa no período.



Figura 21- Temperaturas médias anuais de AVHRR: resolução de 9x9 km, para o período de 1987 a 1998, seg Castro *et al.* 2006.



Figura 22- Índice de Oscilação Sul (IOS). Fonte: IRI/IDEO *Climate Data Library* obtido de CASTRO *et al* (2006).

Os resultados de TSM médios, em temos mensais, são apresentados na Figura 23. A partir de abril observa-se o início da intrusão meridional das águas frias, que atinge sua máxima extensão em julho, passando a sofrer um recuo progressivo na primavera. Os sinais mais visíveis de ressurgência são no período de dezembro.



Figura 23- Campos de TSM médios para todo o período analisado, seg Castro et al. (2006).

Os padrões de variabilidade foram investigados pelos autores por meio do uso de funções empíricas ortogonais, extraindo a média e apresentando os três primeiros modos, que explicaram 52% de toda a variância presente no conjunto de imagens. O primeiro modo

explicou 38% da variância total, associado principalmente à intrusão das águas frias na parte sul do domínio, estendendo-se até as imediações da ilha de São Sebastião (Figura 24), com ciclo principalmente na faixa anual, havendo também a presença de uma pequena variabilidade interanual com ciclos de 6 anos e 29 meses.



Figura 24- Valores de intensidade de anomalias de TSM, associadas ao principal padrão da (EOF 1) espacial (médias mensais) de CASTRO *et al.* (2006). Nota-se que as anomalias são bem menores acima da latitude de 24°S, no litoral paulista, onde se espera que haja uma menor influência da penetração de águas mais frias no período de inverno, oriundas do sul.

3.2.4 Considerações finais sobre a circulação na PC- S-SE do Brasil

Nos itens anteriores foram descritas as principais contribuições que compõem a dinâmica da PC-SE. Existem inúmeros estudos que buscam abordar a influência dos fenômenos subinerciais da PC em algumas regiões do litoral, como exemplo, em São Paulo, no canal de São Sebastião investigado por SILVA (1995,2001) entre outros, e em Santos, investigado por HARARI & GORDON (2001), dentre diversos autores. No compêndio contido em CASTRO *et al.* (2006) pode-se verificar a elevada gama de investigações existentes ao longo dos últimos anos nestas regiões.

Os estudos mais recentes em Santos realizados por HARARI (2009), se estendendo a toda a região estuarina, utilizando o modulo costeiro do modelo numérico POM⁶, aninhado ao mesmo modelo em escala do Atlântico Sul, forçado com resultados do atmosférico NCEP-NCAR⁷ e forçantes astronômicas, teve as simulações hidrodinâmicas calibradas com séries de observação de correntes no interior do estuário, distribuídas ao longo da região. O modelo refinado implementado no interior do estuário para avaliação do transporte de sedimentos, visando atividades de dragagens incluiu efeitos de maré astronômica e meteorológica na região.

A utilização de modelos atmosféricos refinados na região costeira tem apresentado grande importância para contabilizar os efeitos orográficos nas variáveis meteorológicas, e.g. ventos e precipitação. CAMARGO (2009) apresentou uma melhoria significativa na representação de evento extremo de sobrelevação do nível do mar na região de Santos, somando-se aos efeitos astronômicos e meteorológicos remotos, os provenientes do aumento da precipitação local e consequentemente do maior aporte de água doce, além de melhor representar os efeitos orográficos de canalização dos ventos. Com isso realizou um experimento em que a resposta de nível do mar se tornou mais próxima dos valores observados na região, durante o período de investigação.

CARVALHO (2003) realizou estudos da circulação na plataforma interna do Rio de Janeiro, visando a avaliação da operação de emissários submarinos e dispôs de uma valorosa série temporal anual de correntes e temperaturas em diversos níveis, nas proximidades da Baía de Guanabara, RJ (a 70 km a leste da entrada da baía de Sepetiba). As séries foram obtidas ao longo do ano de 1997- início de 1998, com ADCP, perfilador acústico de correntes, e termistores distribuídos a cada 2m ao longo da coluna d água de um ponto com profundidade de 28m, e num outro ponto próximo, de profundidade de 26m, apenas para o período de verão de 1997.

O autor efetuou uma ampla análise estatística e espectral, discutindo os resultados e relacionando-os a outras fontes de dados a eles correlacionados. De um modo geral os resultados das análises espectrais indicaram que no período analisado as correntes de maior energia foram as contidas na faixa de frequencia subinercial, tendo as correntes de maré e as inerciais apresentado valores cerca de uma ordem de grandeza menores. Em termos da variabilidade anual, nota-se uma maior energia das correntes no período de

⁶ "Princetom Ocean Model",

⁷ National Center for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research

inverno, inclusive suas intensidades acompanham quantitativamente as observadas no nível médio do mar.

As discussões apresentadas pelo autor, agrupadas por estações do ano, fornecem inúmeras informações, que, apesar de se referirem ao ano de 1997 e início de 1998, cobrem a variabilidade distribuída ao longo do ano observado, mostrando aspectos importantes presentes na resposta subinercial da PC interna do Rio de Janeiro em relação a forçantes sinóticas, e como se modificam no decorrer do ano.

4. Os dados observacionais

4.1 Análise de Dados Pretéritos na Região e Proximidades

A disponibilidade de informações a respeito das variabilidades do NMM se dá através das estações permanentes de observação do nível do mar que compõem a rede mundial GLOSS (*Global Sea Level Observing System*). Na costa SE existem as estações de Cananéia - SP, Ilha Fiscal – RJ e Macaé – RJ. Na Ilha Fiscal (latitude 22,9S e longitude 43,17W), que é a estação mais próxima da BIGS, situada cerca de 50 km a leste da embocadura da BS, os dados disponíveis vão desde 1963 até 1986 e de 1988 até o presente momento.

As coletas de dados na região de BIGS, referentes a séries de comprimento iguais ou maiores do que 15 dias se referem à séries temporais de correntes na superfície e fundo coletadas no CIG em agosto de 1975 pela DHN, citadas por SIGNORINI (1980), e em 2001 pelo CHM, citadas por VALENTE *et al.* (2001).

Nas séries obtidas em 2001 pelo CHM, alguns resultados estatísticos para as séries brutas são apresentados na Tabela 7, pelos autores supracitados. Efetuando-se a filtragem com o filtro de Thompson com janela de 40h, das componentes norte-sul e leste-oeste das correntes, e da elevação do nível na estação da Ilha Fiscal (situada a 70km a leste da BS), foi possível analisar de forma mais satisfatória os efeitos subinerciais. A posição das estações se encontra na Tabela 6.

As séries filtradas de BIG, SEP e CIG foram apresentadas para o período de inverno em CAVALCANTE & ROSMAN (2008), mostrando uma elevada coerência tanto em termos de fase como de intensidade do nível com as componentes meridionais na BIG e CIG, e uma resposta muito modesta na BS, onde a predominância foi dos efeitos de maré

astronômica. São reapresentadas aqui no período de inverno na Figura 25 a Figura 27, e no verão de 2001, por meio da Figura 31 e Figura 32. No canal observa-se uma considerável intensificação das correntes, no sentido do alinhamento do mesmo.

Tabela 6 - Posição das estações de nível e de correntes utilizadas no presente	trabalho.
--	-----------

Estações	Latitude	Longitude	Prof. Local (m)
Ilha Fiscal (FISC)	22 ° 53,8'S	043°09,9'W	nível
Baía de Sepetiba (SEP)	23°06,7'S	044°03,2'W	correntes
Baía de Ilha Grande (BIG)	23°15,9'S	044°25,9'W	correntes
Canal da Ilha Grande (CIG)	24°10,0'S	044°13,8'W	correntes

Tabela 7 - Resultados estatísticos para o período inverno-primavera em BIG e SEP. (adaptado de. VA-LENTE *et al*, 2001).

	Componente longitudinal à costa	Componente Transversal à costa	Componente longitudinal à costa	Componente Transversal à costa	
BIG	Supe	erfície	Fu	undo	
Valor Mínimo (m/s)*	- 0,36	- 0,34	- 0,51	- 0,39	
Valor Máximo (m/s)*	0,86	0,32	0,64	0,36	
Média Aritmética (m/s)	- 0,02	- 0,01	- 0,01	- 0,01	
Desvio Padrão (m/s)	0,17	0,08	0,14	0,09	
Variância (m²/s²)	0,02	0,01	0,02	0,01	
SEP	Supe	erfície	Fundo		
Valor Mínimo (m/s)*	- 0,58	- 0,23	- 0,42	- 0,18	
Valor Máximo (m/s)*	0,53	0,27	0,39	0,21	
Média Aritmética (m/s)	<- 0,01	<- 0,01	0,01	< 0,01	
Desvio Padrão (m/s)	0,13	0,07	0,11	0,05	
Variância (m²/s²)	0,02	< 0,01	0,01	< 0,01	

* o valor mínimo e máximo negativo corresponde respectivamente ao valor máximo para a direção sul na componente longitudinal e para oeste na componente transversal da corrente.





Figura 25 – Séries da componente U (leste-oeste), acima e componente V (norte-sul), abaixo, de correntes observadas em dois níveis (a 5 e a 10 de profundidade), durante o período de agosto de 1975 no CIG - canal de comunicação entre a BIG e BS. A linha vermelha (verde) é a velocidade promediada com filtro de médias moveis de 25h, no ponto de 10m (5m). Não se nota variação relevante na corrente média entre os níveis observados, entretanto é notável a superioridade do valor da intensidade da corrente, em relação ao nível médio do mar simultâneo (magenta) observado na Ilha Fiscal, filtrado com média móvel de 25h.



Figura 26 – Séries de componentes zonal (E-W) e meridional (N-S) de correntes na estação BIG, brutas e filtradas com médias móveis de 30h.



Figura 27 – Séries de componentes zonal (E-W) e meridional (N-S) de correntes na estação SEP, brutas e filtradas com médias móveis de 30h.



Figura 28 – Séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes nas estações BIG e SEP, e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.



Figura 29 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de inverno de 2001, na estação BIG e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.



SEP	Pee	Puu	Peu	Pvv	Pev
Int.de confiança de 95%	0.2420	0.0077	0.0351	0.0177	0.0537

Figura 30 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de inverno de 2001, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.

As séries acima mencionadas foram comparadas a medições de nível do mar simultâneas na Ilha Fiscal, como já apresentados por CAVALCANTE & ROSMAN (2008), indicando uma coerência significativa entre ambas, no período de inverno, tendo sido mais evidenciada na estação BIG, como pode são apresentados das séries e dos espectros das componentes de velocidade e da elevação na Figura 28 e Figura 29, e em menor contribuição na estação SEP, na Figura 30.

As séries de verão contidas na Figura 31 a Figura 33 sugerem a existência de um fluxo persistente na direção NE em BIG e na direção SE, em SEP, com intensidades médias de 5 cm/s, que se anulam nos episódios de rebaixamento do nível do mar. Na BIG há alguns episódios de maior intensidade, que coincidem com ocasiões de rebaixamento do nível, no início e no final do período de medições. Este período de medições indica a presença de interações mais complexas, e merece uma investigação mais detalhada com a promoção de uma nova coleta de dados, abrangendo as regiões da entrada e interior das baías, bem

como o monitoramento das propriedades termohalinas, que nessa época do ano são bastante importantes no local, e com o monitoramento dos agentes atuantes (rios, ventos, pluviosidade, etc).



Figura 31 – Séries de componentes zonal (E-W) e meridional (N-S) de correntes na estação BIG, brutas e filtradas com médias móveis de 30h.



Figura 32 – Séries de componentes zonal (E-W) e meridional (N-S) de correntes na estação SEP, brutas e filtradas com médias móveis de 30h.

44



Figura 33 – Séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes nas estações BIG e SEP, e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.



Figura 34 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de verão de 2001, na estação BIG e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.



Figura 35 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de verão de 2001, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.

No verão podem-se observar menores magnitudes nos valores de subsidência ou sobrelevação do nível médio do mar, bem como correntes muito menos intensas do que as observadas no inverno. Na Figura 33, a resposta da componente zonal da estação BIG, que no inverno apresentava o mesmo comportamento em relação às variações nas oscilações do nível do mar simultâneo, no verão apresentou ocasiões em que as fase se tornam opostas, ou seja, onde em ocasião de sobrelevação se observou correntes dirigidas para o sul, com valores negativos.

Os espectros da Figura 34 e Figura 35 ainda mostraram uma estreita relação entre as componentes de velocidade e a elevação, entretanto com valores de amplitude bem mais reduzidos. Cabe ressaltar que a qualidade das análises espectrais ficaram comprometidas devido ao curto período de duração das séries, o que ocasionou uma dificuldade na definição dos picos de energia em baixa frequência.

Os dados concernentes às campanhas de inverno foram então utilizados para avaliar os resultados alcançados nas simulações numéricas, no sentido de se buscar respostas de magnitude das componentes leste-oeste e norte-sul na proporção da elevação do nível médio simultâneo, que no caso de BIG são da mesma ordem de grandeza, e na CIG, a componente leste-oeste apresenta valores amplificados em relação ao nível médio, e a componente norte-sul é menos significativa, o que se aplica também às componentes de BS.

No verão a correlação se tornou menos evidente, onde as intensidades se apresentaram bem menores, com episódios de correlação negativa. A indisponibilidade de dados em CIG permitiu apenas a verificação da modelagem nas regiões nas estações da entrada das baías, BIG e SEP.

4.2 Informações Pretéritas na PC Adjacente

As discussões acerca das informações disponíveis na PC adjacente à BIGS foram feitas com base nas análises feitas por CARVALHO (2003), de séries temporais correntométricas e de temperatura no litoral, na plataforma interna do Rio de Janeiro. Esta região é bastante próxima à entrada da BS, distando em aproximadamente 50 km do complexo BIGS, tendo sido consideradas, portanto, como representativas da dinâmica da PC adjacente à região de BIGS. Foram efetuadas durante um ano e dois meses, e sua discussão foi apresentada sazonalmente. A seguir serão reproduzidos os resultados mais pertinentes para a presente pesquisa, que embora não tenham sido utilizados diretamente na avaliação dos resultados permitem um bom conhecimento do comportamento subinercial esperado em termos de circulação e da presença de massas d'água. A análise foi feita de forma conjunta com informações dos vetores filtrados de intensidade da corrente, nível do mar e temperatura, e associada ao comportamento esperado na PC exposto nos itens anteriores.

Para o ano de 1997, no verão, a ACAS ocupou a plataforma interna durante quase todo o período, sofrendo retração na metade do outono, surgindo em um breve episódio no final do inverno e em diversas ocasiões da primavera, sua presença ficou evidenciada. Embora haja apenas dados de temperatura, os valores abaixo de 20°C são forte indicadores de sua presença, principalmente tendo ocorrido em períodos de primavera e verão, ocasiões em que não se observa a penetração de águas frias de origem na PC sul, na região SE.

Os eventos de sobrelevação do nível do mar foram menos intensos, com alturas menores do que 20 cm, no verão e primavera, e a resposta das correntes subinerciais se mantêm ligeiramente menor em intensidade, ou ausentes, nas ocasiões da ocupação da ACAS. Na PC SE a composição dos efeitos de inibição na resposta das correntes aos forçantes meteorológicos, devido à presença das águas mais frias e devido à corrente costeira estuarina ainda são objeto de pesquisa. O efeito da ACAS é bastante evidente, quando se observa um decréscimo na intensidade das correntes, na presença de suas águas mais frias, como observado na Figura 36 A. Nas séries apresentadas por CARVALHO (2003), além deste enfraquecimento nos valores de intensidade, devidos provavelmente à presença da ACAS, não foi observada nenhuma persistência de fluxo no verão, sendo uma provável evidência de que o fluxo devido à corrente costeira estuarina, não possui relevância ao norte da BIGS, ou seja, nas proximidades do Rio de Janeiro, onde foram efetuadas as coletas acima descritas.

No outono e inverno, a sobrelevação já é maior, até 40 a 50 cm de altura, e as correntes ligeiramente mais intensas, com aproximadamente 30 cm/s. A reposta das correntes manteve-se coerente visualmente tanto em termos de fase como de intensidade com as oscilações de nível médio do mar. Ressalta-se novamente que esta correlação em termos de intensidade foi menor nas ocasiões de presença da ACAS.

Os resultados, apresentados pelo autor, foram similares aos verificados nas análises das séries temporais de correntes do CHM de 2001, onde as intensidades da corrente de inverno, assim como os níveis, possuem valores maiores, e as correntes no verão se apresentam consideravelmente menores, embora sempre correlacionadas com o comportamento do nível médio do mar, ainda que em menor correspondência em termos de intensidade, indicando uma maior influência de efeitos baroclínicos na circulação, advindos da presença da ACAS.

Em algumas ocasiões de verão nas séries de BIG de 2001, houve episódios de inversões da corrente, em termos da fase, em relação ao nível médio do mar, indicando a possibilidade de um efeito local de recirculação causando provavelmente pelas interações entre a corrente estuarina costeira e a circulação de verão caracterizada pela contribuição das oscilações do nível do mar associadas às OPC, sob a influência do efeito de circulação baroclínica associada às frentes de temperatura originadas pela intrusão da ACAS, e retração da mesma, dando lugar à AT. Esta composição de efeitos ainda requer investigação mais aprofundada.



(B)

Figura 36 - Séries temporais simultâneas de nível d'água medido na Ilha Fiscal (em cima nas figuras); (A) verão e no outono (B) componente longitudinal da corrente e temperatura da água (colorido) medidas ao longo da coluna d'água junto ao difusor do ESEI no inverno de 1997. Obs 1.: 1,0 m na escala vertical de profundidades equivale a 0,1 m/s na velocidade da corrente. Obs 2: Todas as séries foram submetidas a um filtro Lanczos 40 horas para facilitar a visualização (CARVALHO, 2003).



Figura 37 - Séries temporais simultâneas de nível d'água medido na Ilha Fiscal (em cima nas figuras); (A) inverno e na primavera (B) componente longitudinal da corrente e temperatura da água (colorido) medidas ao longo da coluna d'água junto ao difusor do ESEI no inverno de 1997. Obs 1.: 1,0 m na escala vertical de profundidades equivale a 0,1 m/s na velocidade da corrente. Obs 2: Todas as séries foram submetidas a um filtro Lanczos 40 horas para facilitar a visualização (CARVA-LHO, 2003).

Para a melhor compreensão deste efeito de comportamento diferenciado das correntes nos períodos de verão, primavera, outono e inverno são necessárias campanhas de medições mais abrangentes de correntes e do campo termohalino da região, e na PC adjacente, inclusive para avaliar quantitativamente os resultados de modelo oceânico na simulação da dinâmica, considerando os efeitos de variabilidade espaço temporal no campo de temperatura e salinidade.

Os dados existentes permitem concluir que há uma boa correspondência entre os valores de níveis e intensidades de correntes no inverno, tanto em termos de fase como de intensidade, como esperado em condições de homogeneidade de densidade na coluna de água. Na região do canal de Ilha Grande (CIG) há uma evidente correlação no inverno e não há informação disponível acerca de seu comportamento fora do período de agosto.

Para fins da presente tese, em vista dos dados disponíveis até o presente momento, buscou-se avaliar a simulação do modelo costeiro no cenário de inverno, por meio do padrão de resposta de intensidades de correntes comparado à magnitude das elevações, do nível médio tendo em vista estarem diretamente correlacionadas, como se observa dos espectros cruzados obtidos na Figura 29 e Figura 30. Com isso espera-se obter velocidades em BIG com intensidades equivalentes aos valores de sobrelevação do nível do mar, e em CIG espera-se encontrar correntes com intensidades representando o dobro ou o triplo das existentes em BIG.

No cenário de verão esperou-se um comportamento menos coerente das componentes de corrente simuladas, com as elevações observadas no período, possuindo as primeiras magnitudes menores do que os valores observados nas segundas, tanto na BIG quanto em SEP, devido à presença de efeitos baroclínicos, resultantes da presença de massas de água com diferentes densidades. Além disso, é possível observar que há uma importância relevante da circulação costeira estuarina, nas proximidades da BIG. No canal, por ausência de observações disponíveis no verão, não é possível inferir nenhum comportamento esperado, mas tendo em vista uma resposta menos intensificada nas entradas das baías, é provável que a amplificação das correntes no canal seja significativamente menor.

5. A modelagem numérica

A modelagem numérica é uma ferramenta que tem se desenvolvido muito nos últimos anos, em seus diversos campos de aplicação, e tem representando um recurso fundamental para o estudo de dinâmica de processos e seus efeitos nos ambientes naturais. Um modelo conceitual correto, e uma base de dados mais próxima da realidade buscada, permitem que os efeitos avaliados de forma pontual, por meio de observações "in situ" locais, possam ser extrapolados ou interpolados nas demais regiões do domínio de interesse.

HAIDVOGEL & BECKMANN (1998) fizeram um estudo comparativo de diversos modelos oceânicos cada qual com um método diferente de discretização espacial de grade (diferenças finitas, elementos finitos e modelos espectrais), diversos métodos numéricos de discretização das equações, diferentes tipos de grades verticais, por exemplo: modelos que seguem a topografia do fundo em coordenadas sigma, ou que acompanham as linhas de densidade, ou, isopicnais, etc. Os autores ressaltam que, apesar de alcançarem bons resultados, os modelos precisam ser desenvolvidos no sentido de se estudar os oceanos como uma unidade única. Por meio de um acoplamento de modelos de diferentes escalas, é possível partir da circulação global, seguindo para modelos regionais acoplados em escala de bacia, chegando até a circulação estuarina.

A evolução da modelagem multi-escala com modelos de diferentes escalas acoplados, baseados em grades não estruturadas ou semi-estruturadas, é um caminho para o futuro em que se deseja obter um resultado máximo de cada modelagem realizada. O acoplamento de modelos, em várias escalas, permite que sejam resguardadas as características físicas principais modeladas em cada escala abordada, dentro dos limites de resolução espacial e temporal e de tempo computacional, a eles inerentes, possibilitando a troca entre escalas na fronteira de interface. O acoplamento realizado apenas no sentido da maior escala para a menor escala será aqui denominado de aninhamento⁸, referindo-se ao processo de refinamento⁹, ou seja, de partir de escalas maiores para menores. A interação em dois sentidos pode ser necessária, principalmente quando se deseja estudar os efeitos continentais na PC, e neste caso o acoplamento bilateral deve ser feito nos dois sentidos, i.e, de grande escala para pequena escala e vice-versa.

⁸ O aninhamento em ligua inglesa é muitas vezes referido como "nesting".
⁹ Na língua inglesa refinamento é referido por "downscaling".

A representação de regiões costeiras em geral é muito facilitada com o uso de modelos costeiros com discretização não estruturada, que permite representar com grande facilidade a complexidade da geometria da costa, com reentrâncias e ilhas, e gradientes de batimetria, além de fornecerem resultados mais precisos para domínios pequenos, compensando seu maior custo computacional. Embora tenham sido mais utilizados para aplicações de engenharia, tem tido crescente importância em oceanografia, principalmente em locais com geometria crítica, como por exemplo, no talude continental (HAIDVOGEL & BECKMANN, 1999).

Os autores supracitados também mencionam a necessidade fundamental de parametrizar corretamente a turbulência e os processos de mistura do oceano e ressaltam a importância de sistemas de observação costeiros, para a avaliação quantitativa sistemática dos modelos costeiros.

5.1 Considerações

A formulação básica para os problemas na plataforma continental e em regiões costeiras consiste no conjunto de equações de quantidade de movimento e de continuidade de volume com a aproximação hidrostática (filtragem de ondas de gravidade superficiais), e de Boussinesq (as flutuações de densidade são mantidas apenas nos termos de empuxo). A densidade está acoplada às equações anteriores por meio da equação de estado da água do mar que a relaciona aos valores de temperatura, salinidade. A pressão também compõe esta equação, mas possui importância relevante a profundidades maiores do que 1000m. Com isso se torna necessário acrescentar ao sistema as equações de conservação de temperatura e salinidade. Toda a formulação pode ser obtida em diversos livros texto e podem ser vistas no guia de referência técnica do modelo costeiro SisBaHiA¹⁰ (ROSMAN, 2007).

A solução numérica das equações governantes do problema requer prescrição de condições de contorno na superfície, correspondentes às forçantes na interface ar/mar, por exemplo, as tensões de cisalhamento do vento e fluxos de calor e sal, e no fundo, por exemplo, a prescrição de velocidade nula no fundo ou de tensões de atrito exercidas no escoamento pelo fundo. Nos contornos laterais, existem interfaces terra-mar, onde a velocidade do fluxo normal à fronteira é prescrita, sendo nula nos contornos de terra ou prescrita a vazão de rios, e a fronteira aberta, onde o domínio modelado é encerrado

¹⁰ www.sisbahia.com.br

"artificialmente". No caso das fronteiras abertas, as variáveis devem atravessar a fronteira sem sofrer reflexão, e devem receber os valores correspondentes ao domínio externo contíguo à região modelada.

Além do conhecimento das forçantes, condições iniciais e de contorno, são necessárias parametrizações dos efeitos de escalas não resolvíveis. No SisBaHiA a parametrização horizontal da turbulência é feita através de técnicas de filtragem gaussiana, anisotrópicas e com larguras de filtro pequenas, comparadas às menores escalas resolvíveis do problema. A difusividade na vertical é feita pelo modelo de viscosidade turbulenta. Maiores detalhes são obtidos no link: <u>www.sisbahia.coppe.ufrj.br/</u>.

Em alguns modelos oceânicos como POM¹¹ e o HYCOM¹² são utilizados modelos de difusividade horizontal homogêneos, com o coeficiente de mistura horizontal de Smagorinsky, sendo a difusividade vertical calculada com equações complementares para o transporte da energia cinética e transporte da escala de comprimento de mistura como, por exemplo, o modelo de Mellor e Yamada, que foi adotado na implementação do POM, na região da PC-SE feita por REZENDE (2003). Este último pode ser também utilizado pelo HYCOM, que também possui o modelo KPP, K-Profile Parametrization que fornece uma parametrização dos processos físicos da camada de mistura, calculando o perfil de difusividade na coluna d'água, sendo mais eficiente do que os modelos de fechamento turbulento. Maiores detalhes do modelo HYCOM podem ser obtidos no link: http://www.hycom.org/hycom/overview.

O cálculo da tensão de atrito pode ser feito de acordo com a amplitude de rugosidade equivalente ao tipo de sedimento presente no fundo, variando dinamicamente com a altura da coluna d'água. Pode variar espacialmente, como é feito no SisBaHiA, ou através da adoção de um valor único de coeficiente de atrito para a região modelada, como ocorre na maioria dos modelos oceânicos, onde os efeitos de atrito de fundo tem uma importância reduzida em face da altura da coluna d'água modelada. As tensões e fluxos na superfície são parametrizadas em função da prescrição da distribuição espacial e temporal das variáveis meteorológicas conhecidas, sendo os fluxos de calor sensível, latente e de

¹¹ PRINCETON OCEAN MODEL

¹² Modelo oceânico de coordenadas verticais híbridas.
quantidade de movimento calculados por meio de fórmulas que parametrizam estas trocas por meio de quantidades mensuráveis¹³.

As condições iniciais podem ser fornecidas por meio de um estado previamente conhecido, ou esperado, podendo algumas vezes ser o modelo ser iniciado a partir do repouso, caso isso não ocasione impacto indesejável no início da simulação. Quanto mais próxima a condição inicial, do resultado esperado na simulação, menor o tempo necessário para que o modelo possa atingir um estado de equilíbrio, ou, entrar em regime.

As condições de contorno algumas vezes incorporam efeitos de forçantes remotas, como por exemplo, no caso de maré astronômica e meteorológica, através da prescrição dos valores de elevação nas fronteiras abertas dos modelos. Por esse motivo, principalmente em modelos costeiros, o fornecimento correto das condições de contorno é fundamental para a correta simulação dos processos que ocorrem no interior da região de interesse.

Para um problema bem posto, num escoamento subcrítico, onde as velocidades do escoamento são muito menores do que a celeridade¹⁴ da onda em águas rasas, é necessário prescrever na fronteira de efluxo uma variável, e na fronteira de afluxo, duas variáveis DAUBER & GRAFFE (1970) (*apud* ROSMAN (1989).

O processo de migração de escalas maiores para menores representa um auxílio para minimização de erros, e estes processos já foram investigados por meteorologistas desde o início dos anos 70, tendo sua discussão se iniciado com CHARNEY (1962) (*apud.* CHEN & MIKAODA, 1974), que propôs a prescrição da velocidade normal em todas as fronteiras abertas e vorticidade potencial nas fronteiras de afluxo, e na discussão de CHEN (1971) (*apud.* CHEN & MIKAODA, 1974) discute o processo de acréscimo da ordem da equação discretizada, gerando condições de contorno "computacionais", que demandam que a solução seja extrapolada do interior para o exterior do domínio.

CHEN & MIKAODA (1974) propõe um método de prescrição de condição de contorno por eles denominado de pseudo características, onde é feita a prescrição das velocidades normais à fronteira no efluxo, obtidas por meio da extrapolação dos valores no interior do modelo, e prescrição das elevações e componente de velocidade tangencial no afluxo. Os

¹³ Na língua inglesa as equações de parametrização de fluxos na interface ar-mar por meio de quantidades mensuráveis são denominadas "bulk aerodynamic formula".

¹⁴ Celeridade é dada por \sqrt{gH} , sendo g = 9,81 m/s², a aceleração da gravidade, e H a profundidade local. Um valor típico de celeridade em uma profundidade média de 10 m é de aproximadamente 10m/s, aproximadamente uma ordem de grandeza superior aos valores de velocidade dos escoamentos nas regiões costeiras

resultados foram comparados com a condição de Dirichlet¹⁵, com prescrição de elevações e velocidades no afluxo e efluxo, que demandam a utilização de uma filtragem local na fronteira de interface, devido ao fato de haver uma super especificação das variáveis. Os resultados foram equivalentes entre essas condições.

BLAYO & DEBREU (2005) reportam a grande dificuldade em se estabelecer os afluxos e efluxos em um escoamento onde essas características serão variáveis no tempo, durante a simulação. Os objetivos principais na prescrição de condições de contorno aberto (CCA) são de esvaziar as informações que chegam à fronteira aberta, e incorporar um conhecimento extra do domínio externo ao modelado, tornando a solução do interior compatível. Dada a complexidade do ambiente oceânico, e a diversidade de aplicabilidades, os autores consideram que ainda não há uma solução perfeita para o problema.

São inúmeras as pesquisas referentes aos diversos tipos de condições de contorno, e sua adequada implementação ainda representa um vasto campo de pesquisa. De forma geral, a maneira mais adequada de garantir uma menor interferência nas regiões de descontinuidade do problema está atrelada ao conhecimento do domínio adjacente, e à garantia de que as ondas geradas no domínio possam sair do mesmo, sem interferirem na solução final do problema.

A discussão a seguir será feita em relação às fronteiras ditas "ativas", onde se pressupõe o conhecimento do domínio subjacente.

5.1.1 Condições de contorno

Flather em 1975 desenvolveu uma combinação de formulação da equação de radiação para fronteiras passivas¹⁶ com a equação da continuidade, propondo uma condição de radiação modificada, que contabiliza no afluxo a incidência normal de ondas livres no interior do domínio de integração, e no efluxo permite a propagação das diferenças existentes entre os valores do interior e os valores do contorno, causando uma ligeira alteração na velocidade advectiva da variável que sai, evitando que haja uma possível reflexão. É uma condição não linear, e sua formulação é dada por:

¹⁵ Dirichlet é uma condição onde as variáveis elevação e velocidades são prescritas na fronteira aberta de forma variável durante a simulação.

¹⁶ Fronteiras passivas são referidas às que não se tem informação do domínio exterior e se deseja apenas propagar as ondas presentes na solução interna sem que haja reflexão.

$$U = U_0(t) \pm \frac{C}{H} [\eta - \eta_0(t)]$$
(1)

Onde: $\eta_0 e^{-U_0}$ são os valores prescritos da elevação e velocidade normal ao contorno aberto, $U e^{-\eta}$ são valores correspondentes ao interior do modelo, $C = \sqrt{gH}$ é a velocidade de propagação de ondas longas, g é a gravidade, H é a profundidade total (sendo a local somada à elevação).

Outra condição amplamente utilizada é a técnica de relaxação. HAIDVOGEL E BECKMANN (1999) descrevem esta técnica como uma parametrização de trocas advectivas através das fronteiras abertas por uma fonte/sorvedouro local da propriedade desejada (quantidade de movimento, calor ou sal), com o objetivo de restaurar a solução numérica a um valor de referência nos contornos, minimizando perturbações indesejadas.

A condição é dita de relaxação¹⁷ quando os valores prescritos são gradualmente relaxados aos valores em escala maior, pela introdução de termos restauradores na equação do movimento, por exemplo, BRYAN & HOLLAND, 1989 *apud* HAIDVOGEL & BECKMANN, 1999. Originalmente desenvolvido para o aninhamento unilateral, o esquema de relaxação de MARTINSEN & ENGEDAHL, 1987, *apud* PALMA & MATANO, 1998, restaura as variáveis prognósticas a um valor de referência, dentro de regiões especificadas, cuja formulação é apresentada na equação(2), Sendo α o parâmetro de relaxação, sendo $\alpha = 1$, no contorno aberto e nulo no limite inferior da região de transição), $\phi_0(U_0, \eta_0, \overline{S}, \overline{T})$ são valores conhecidos das variáveis, e $\tilde{\phi}(\widetilde{U}, \widetilde{\eta}, \widetilde{S}, \widetilde{T})$ são os valores calculados pelo modelo. O parâmetro de relaxação deve variar suavemente e a solução fora do domínio deve ser bem conhecida.

$$\phi = \alpha \phi_0 + (1 - \alpha) \widetilde{\phi} \tag{2}$$

O parâmetro α foi descrito da forma abaixo para a realização dos testes dos autores acima, para os pontos de grade de relaxação de 1 a NN.

$$\alpha(I) = 1 - \tanh(0, 5(I - 1)), I = 1, 2, \dots, NN$$
(3)

No caso do desconhecimento das variáveis do domínio externo, a relaxação pode tomar a forma de camada esponjosa, adotando-se valores nulos no domínio externo como foi

¹⁷ Relaxação na língua inglesa é referida também como "nudging".

descrita por ISRAELI E ORZAG (1981), *apud* PALMA E MATANO (1998). Esta condição também é chamada de decaimento newtoniano/viscoso, por ser normalmente associada a um acréscimo gradual de viscosidade na região de transição da fronteira, justificado pelo fato de haver uma necessidade de aumento dos efeitos dissipativos devido ao aumento da escala modelada no domínio externo, e um conseqüente decréscimo da capacidade de capturar a energia dos fenômenos de menor escala. Essa condição tem sido utilizada com sucesso, porém requer uma grande quantidade de pontos adicionais nas proximidades do contorno, e pode deformar ondas que atravessam o contorno na direção transversal ao mesmo.

BLAYO & DEBREU (2005) em sua revisão de condições de contorno sob o ponto de vista de equações características, concluem que as condições de contorno de Dirichlet devem ser evitadas devido ao fato de que a informação de saída não corresponde ao estado interno do modelo. Os métodos de radiação também não são apropriados, por considerarem apenas as ondas individualmente, e não a complexidade do fluido. O método de relaxação leva a solução do modelo em direção ao estado externo, por meio de uma região de transição com dissipação crescente. Embora mais grosseiro, oferece melhores resultados em aplicações reais, ocasionando um acréscimo no custo computacional devido à necessidade do acréscimo de uma região adicional de transição na modelagem.

No caso de modelos de elementos finitos o domínio é divido em subáreas e são impostos, a este domínio, leis de conservação de massa e quantidade de movimento. As condições de contorno estão incluídas nas matrizes, juntamente com os nós internos e, portanto, devem ser incluídas de forma a manter a diagonalização da matriz. Para o modelador o fato mais conveniente é que as condições de contorno estejam implícitas nas equações do modelo, entretanto requerem tanta cautela quanto no caso de diferenças finitas, em que as condições de contorno são descritas separadamente (DYKE, 2001).

LORENZZETTI & WANG (1986), apud WANG (1990), aplicaram uma condição de esponja adaptada aos contornos abertos em um modelo de grade não estruturada em duas camadas, para o estudo da ressurgência na bacia SW do Atlântico Norte, sem especificação de valores externos dentro do domínio. Segundo DYKE (2001) esta condição tem sido usada com sucesso, porém grandes variações de viscosidade nos contornos podem causar alguma reflexão e requer um grande número de pontos de grade nas proximidades do contorno. Também pode causar deformação nas ondas que atravessam a região tangencial à fronteira, devido à variação espacial do decaimento.

58

No modelo SisBaHiA, as condições de contorno abertas de afluxo são obtidas pela prescrição dos valores de elevação, e da direção preferencial da corrente, que pode ser normal à fronteira aberta, ou prescrita. Os valores de intensidade são calculados internamente no modelo em toda a interface do domínio aberto, durante todo o tempo de integração, e no efluxo a direção das correntes pode ser prescrita, ou mantida a direção do fluxo no interior. Os valores de concentração de substâncias também são fornecidos para todo o período de integração, podendo ser utilizado um tempo de transição para graduar a contribuição da concentração que sai imediatamente do domínio, com a dos valores prescritos advindos da região externa, em todos os pontos da grade do contorno aberto.

Para as variáveis de saída, o SisBaHiA permite que as velocidades e concentrações de efluxo saiam do domínio com a velocidade calculada internamente no modelo. As elevações são sempre consideradas como valores predeterminados.

Os valores de fronteira, juntamente com as forçantes, determinarão a resposta de circulação no interior do domínio. Existe um esquema de relaxação implementado no SisBaHiA, na forma denominada absorção de dados, que permite que os valores de velocidade conhecidos possam ser especificados, inclusive na fronteira aberta, equivalente à relaxação e será abordado com mais detalhes no próximo item.

Longe das fronteiras abertas também é possível prescrever fontes ou sorvedouros de substâncias ou propriedades, de forma variada no espaço e variável no tempo. São inúmeros os estudos de transporte de substâncias advindos do conhecimento da hidrodinâmica, cada qual com processos físicos específicos para o tipo de problema abordado. Maiores detalhes podem ser obtidos na referência técnica do modelo SisBaHiA, ROSMAN (2007).

5.1.2 Assimilação de dados

A técnica consiste em incorporar à solução fornecida pelo modelo, as informações provenientes de dados de velocidades e de propriedades (temperatura e salinidade) da massa d'água, sejam eles "in situ" (bóias oceanográficas fixas ou de deriva) ou remotos (provenientes de imagens de sensores remotos orbitais temáticos), como por exemplo de elevação e temperatura da superfície do mar.

ROBINSON *et al.* (1998) descreveram, em seu capítulo sobre assimilação de dados em modelos oceânicos, diversas técnicas de assimilação. Os autores mencionam que estas

técnicas na oceanografia possuem apenas alguns anos de existência, têm origem na engenharia e meteorologia.

As limitações existentes na modelagem de processos dinâmicos no oceano, seja devido a incertezas nas condições iniciais e de contorno, seja na dificuldade de parametrizar fenômenos em multi-escala, fazem com que a técnica de assimilação de dados represente uma ferramenta fundamental para a simulação numérica do oceano. Na Figura 38 é apresentado o resultado obtido por FRAGOSO (2004) na simulação numérica do POM¹⁸, aninhado ao modelo global MOM¹⁹, que com assimilação usando a técnica de relaxação newtoniana para dados de bóias de deriva e de sensores termais obteve bons resultados na circulação simulada.



Figura 38- Trajetórias da bóia do PNBOIA (Programa Nacional de Bóias) e das bóias simuladas nos experimentos com e sem assimilação (linha pontilhada) em um período de 10 dias do mês de maio de 1999 (FRAGOSO, 2004):

As simulações numéricas em regiões costeiras normalmente atendem às diversas escalas de fenômenos, e a técnica de assimilação normalmente se restringe apenas ao uso de métodos inversos para a correção de fases e amplitudes de constantes harmônicas de maré nos contornos abertos, durante o processo de calibração. No interior do domínio, normalmente a prescrição correta das forçantes e da geometria são suficientes para a correta representação da dinâmica da região.

O modelo costeiro SisBaHiA dispõe de recurso de absorção, onde os resultados do modelo são influenciados por valores determinados, que podem ser oriundos de observações "in situ", ou por meio de resultados de modelos numéricos de maior escala nos contornos

¹⁸ Princeton Ocean Model

¹⁹ Modular Ocean Model

abertos. Segundo ROSMAN (2003) a absorção de valores não afeta a conservação de massa. Sua formulação é dada por:

$$\beta U_i^{n+1} = X_i^{n+1} + P \left(\beta U_i^0 - X_i^{n+1} \right)$$
(4)

onde β é o coeficiente da equação de movimento discretizada no tempo, nas direções horizontais, X_i^{n+1} representa todos os demais termos da equação de movimento na direção i, discretizados no tempo, U_i^0 é o valor a ser absorvido de forma ponderada, e *P* é o peso de ponderação, variado no espaço, com valor entre 0 e 1.

A função de ponderação pode ser dada por:

$$P_{1} = P_{\max} \left[1 - \left(\frac{|x - x_{c}|}{dC_{2}} \right)^{\alpha} \right] \left[1 - \left(\frac{|y - y_{c}|}{dL_{2}} \right)^{\alpha} \right]$$

$$P_{1} = P_{\max} \left[1 - \left(\frac{|x - x_{c}|^{\alpha}}{dC_{2}} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{|y - y_{c}|^{\alpha}}{dL_{2}} \right) \right]$$
(5)

onde x, y são as coordenadas do nó que receberá absorção ponderada; x_c , y_c são as coordenadas do centróide da região de absorção, dC e dL são respectivamente o comprimento e a largura da região de absorção; α é o expoente entre 0 e 10; recomendado entre 0,5 e 2,0, e o peso de ponderação encontra-se nos limites: $0 \le P \le P_{\text{max}} \le 1,0$ (ROSMAN, 2003). Alternativamente, os valores de pesos de ponderação podem ser inseridos manualmente no modelo, de forma ao usuário inserir a região de absorção de acordo com suas necessidades específicas.

As técnicas para a utilização das condições de contorno e assimilação de dados estão interrelacionadas. ZANG *et al.* (2003) utilizaram uma técnica de assimilação de dados para a prescrição de condições de contorno barotrópicas de elevação para um modelo barotrópico de hidrodinâmica de marés, como já mencionado anteriormente. De forma similar, o esquema de absorção proposto por ROSMAN (2007) pode ser utilizado como forçante nos contornos abertos na forma de condução de resultados em uma região do interior do domínio do modelo, cujos resultados podem ser vistos em CAVALCANTE & ROSMAN (2008 e 2009), onde a prescrição das elevações nos contornos abertos foi eficiente na simulação de efeitos subinerciais.

Nesta tese, foi utilizada a técnica de absorção de valores de velocidades referentes a contribuições que não estão presentes na simulação do modelo oceânico, no caso a circulação gravitacional que ocorre no verão da PC-SE, que surge na forma de um fluxo médio que interage com os fenômenos que ocorrem devido à dinâmica inerente à PC, que se traduzem principalmente na alternância de situações de divergência e convergência de fluxo na costa, associadas às flutuações do vento sinótico, como será posteriormente detalhado. A relaxação de valores de velocidade da corrente ao longo da fronteira aberta do modelo costeiro foi feita durante todo o período da simulação.

Esse recurso permite, portanto, contornar a limitada abrangência de modelos costeiros em representar fenômenos de escala espacial maior do que seu domínio e variações temporais mais lentas, como o caso da circulação gravitacional, que por sua vez também não são capturados em modelos oceanográficos de PC de forma satisfatória, como ocorre em relação às oscilações do nível médio do mar

5.2 O modelo oceânico

Os modelos oceânicos que possuem uma boa representatividade dos efeitos reinantes na PC são aqueles que representam adequadamente a dinâmica discutida no item 3.2, abrangendo a diversidade de efeitos e interações dos agentes atuantes ao longo de todo o ano.

A eficiência dos modelos oceânicos está ligada diretamente à capacidade de implementação os efeitos dos forçantes na resolução espacial e temporal necessária para o fenômeno de interesse, e do adequado conhecimento das condições iniciais e de contorno, que incluem as variáveis dinâmicas (elevações e velocidades) e o campo termohalino. Somados a esses fatores se segue a já mencionada restrição na discretização do domínio, que muitas vezes tem que se manter de forma grosseira para atender às limitações de custo computacional e operacionais.

O conhecimento das condições iniciais e de contorno, nas regiões da plataforma continental, para sua prescrição no modelo oceânico não é uma tarefa fácil. A dinâmica oceânica é muito complexa, e muitas vezes se torna necessário o uso de ferramentas

adicionais, como as discutidas anteriormente, de assimilação de dados ou utilização de modelos de feição, para permitir uma melhor representatividade da dinâmica da região.

A representatividade da dinâmica dos modelos oceânicos na PC-SE para o campo de elevações das proximidades da BIGS foi avaliada em CAVALCANTE & ROSMAN (2008), utilizando o modelo POM na forma implementada por REZENDE *et al* .(2004) e os resultados indicaram que o modelo oceânico subestimou em mais de 50% o campo de elevações em comparação com as informações de elevações disponíveis na Ilha Fiscal para o mesmo período de simulação (agosto de 2003).



Figura 39 – Domínio discretizado do modelo costeiro da região de BIGS, com o padrão de batimetria em metros e os pontos em vermelho correspondem aos nós do modelo oceânico POM. (extraído de Cavalcante e Rosman, 2008).



Figura 40 –Componentes de correntes modeladas U (W-E) e V (S-N) da entrada da baía de Ilha Grande (EBIG) em azul, Baía de Sepetiba (BS) em verde e canal da Ilha Grande (CIG).em amarelo e laranja, e série de nível médio simultânea proveniente da Ilha Fiscal (com defasagem de 4h corrigida) em vermelho, e nível médio modelado em rosa. (Cavalcante e Rosman, 2008).

Alguns testes de modelagem foram realizados implementando-se o SisBaHiA© na PC-SE, utilizando-se a base de dados utilizada em REZENDE *et al*.(2004), acrescida dos valores de batimetria da região da BIGS, apenas na avaliação da resposta barotrópica da PC-SE utilizando-se informações de reanálise do NCEP (National Center of Environmental Prediction). para o ano de 2001, e nas condições de contorno foram prescritas elevações nulas. Os resultados nas proximidades da BIGS também apresentaram os campos de elevação subestimados em até 30%, algumas vezes chegando a 50%, com algumas diferenças em fase. Cabe ressaltar que foram feitas simulações em outros períodos, e as respostas de nível nem sempre apresentaram uma correspondência tão evidente com os dados de elevação observados da Ilha Fiscal, como se obteve na simulação de 2001. Os resultados são estreitamente dependentes da qualidade dos forçantes atmosféricos disponíveis para a simulação, e se o domínio é extenso o suficiente para contabilizar os efeitos mais energéticos da dinâmica da PC.



Figura 41 –Velocidade média da coluna (vetores) e elevação em cm (escala de cores) resultante de simulaçÃO da PC SE-S com o SisBaHiA 2DH. Nota-se uma circulação predominante para o sul em razão do gradiente de pressão oriundo da divergência presente na costa, provavelmente devida a um regime persistente de vetos de NE.



Figura 42 –Localização dos pontos contendo informações de ventos de reanálise-II da NCEP utilizados na simulação da 2DH da PC SE-S com o SisBaHiA. Foram utilizadas informações de 6/6h de agosto de 2001.



Figura 43 – Comparação das séries temporais de elevação simuladas no SisBaHiA, advindas da simulação da hidrodinâmica 2DH resultante da atuação de ventos de reanálise-II do NCEP (cor azul) para 2001 e dados de nível do mar da Ilha Fiscal simultâneos filtrados (cor vermelha). Nota-se uma razoável coerência entre a elevação modelada e a observada nas proximidades.

O modelo de previsão de maré meteorológica operado pelo IAG-USP –Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para uso acadêmico, implementado em toda a região do Atlântico Sul, e refinado na PC S, SE, E, NE, N e extremo N, com forçantes atmosféricas do NCEP (National Centers for Environmental Predition), que possuem informações acerca da contribuição da maré meteorológica e astronômica foram avaliados no período de agosto de 2008 e 2009, por meio de resultados fornecidos por CAMARGO (comunicação pessoal) e apresentou valores superestimados em aproximadamente 30%.

O consórcio do modelo global de coordenadas verticais híbridas, HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) disponibiliza na internet (http://www.hycom.org/) resultados diários de simulações globais, em alta resolução (1/12°), que representa espaçamentos de grade média de 7km. As forçantes atmosféricas de 3/3h são provenientes do modelo atmosférico operado pela marinha norte americana, Navy Operational Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS), que inclui tensão de cisalhamento, intensidade do vento e fluxo de calor e precipitação. Constam rodadas sem assimilação de dados, do período de janeiro de 2003 a abril de 2007 e rodadas com assimilação de informações de imagens de satélites, desde novembro de 2003 até o presente. O consórcio recomenda o uso das simulações com assimilação a partir de setembro de 2008, uma vez que antes disso ocorreu um desvio nos valores de temperatura em sub-superfície, em diversas regiões do

globo. O modelo constitui uma importante fonte de informação de maré meteorológica, com resultados disponíveis dentro de 48h acerca da data de simulação.

O campo de elevações do modelo, para o período de agosto de 2003, foi comparado às observações da Ilha Fiscal para o mesmo período, e os valores estão apresentados na Figura 44. As curvas coloridas de maior amplitude correspondem à pontos de localização mais próxima da costa na BIGS. e a linha mais forte vermelha é a elevação observada na Ilha Fiscal De fato, nas OPC a elevação decresce monotonicamente em direção ao largo, e os valores ao largo são menores do que os mais próximos à costa. Na Figura 45 se apresentam os resultados para a simulação de fevereiro a março de 2003. Em ambas a simulação se observa que o nível ficou subestimado em 30% aproximadamente.



Figura 44 – Elevações do HYCOM nos pontos S e N mais próximos à costa e SW e SE ao largo, que compõem o campo de elevações prescrito na fronteira aberta do modelo costeiro SisBaHiA, e a comparação com o nível médio filtrado com filtro de Thompson de 40h simultâneo, da Ilha Fiscal-RJ.



Figura 45 – Elevações do HYCOM nos pontos S e N mais próximos à costa e SW e SE ao largo, que compõem o campo de elevações prescrito na fronteira aberta do modelo costeiro SisBaHiA, e a comparação com o nível médio filtrado com filtro de Thompson de 40h simultâneo, da Ilha Fiscal-RJ.

As rodadas mais recentes do modelo HYCOM global em alta resolução, foram avaliadas de forma a fornecer uma perspectiva mais atual da disponibilidade de seus resultados. Do período em que foram feitas as simulações presentes nesta tese até o atual momento, houveram aprimoramentos no modelo, inclusive a assimilação de informações de elevação e de temperatura da superfície do mar advindas de imagens de satélite, e diferentes parametrizações de turbulência. No período de agosto de 2009, os resultados apresentaram em algumas ocasiões magnitudes equivalentes às observadas na Ilha Fiscal, em termos de elevação do nível do mar, mas ainda apresentando a tendência a subestimar os valores de elevação (Figura 46). Nota-se com isso uma excelente perspectiva de obtenção de resultados mais precisos nas simulações costeiras, com a melhoria da resposta, ao menos barotrópica, da simulação do modelo HYCOM, provavelmente devida ao uso de um modelo numérico atmosférico operado pela marinha norte-americana, que é acoplado ao oceânico.



Figura 46 – Elevações do HYCOM nos pontos S e N mais próximos à costa e SW e SE ao largo, que compõem o campo de elevações prescrito na fronteira aberta do modelo costeiro SisBaHiA, e a comparação com o nível médio filtrado com filtro de Thompson de 40h simultâneo, da Ilha Fiscal-RJ.

5.3 O modelo costeiro

O modelo costeiro implementado na região foi o módulo 2DH de hidrodinâmica do SisBaHiA, que compõe a ferramenta básica para os estudos hidrodinâmicos. Posteriormente seus resultados foram diretamente aplicados aos modelos de transporte lagrangeano e euleriano SisBaHiA.

A formulação básica 2DH consiste no conjunto de equações de Navier-Stokes e de continuidade, com aproximação hidrostática e de Boussinesq. As equações do modelo

utilizado, são apresentadas de forma resumida, selecionando textualmente trechos de ROSMAN (2007). Detalhes completos das equações tridimensionais, bem como esquemas numéricos adotados podem ser vistos na Referência Técnica do SisBaHiA disponível em www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção *x*:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial (H \overline{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \overline{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} \left(\tau_x^s - \tau_x^B \right) + 2\Phi \operatorname{sen} \theta V - \frac{U}{H} \Sigma q$$
(6)

Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial (H \overline{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \overline{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} \left(\tau_y^s - \tau_y^B \right) - 2\Phi \operatorname{sen} \theta U - \frac{V}{H} \Sigma q$$
(7)

Nas equações (6) e (7), U(x, y, t) e V(x, y, t) são as velocidades nas direções x e y respectivamente, e $z = \zeta(x, y, t)$ as elevações da superfície livre, $\overline{\rho}$ é a densidade da água promediada na coluna na vertical, τ_i^s e são as tensões de atrito na superfície livre e no fundo, respectivamente. As tensões são dadas por:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i ; [i = 1, 2]^{20}$$
(8)

onde ρ_{ar} é a densidade do ar, C_D é o coeficiente de arraste do vento, W_{10} é o valor local da velocidade do vento medida 10 metros acima da superfície livre, e ϕ_i é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção x_i . O coeficiente de arraste do vento, C_D , pode ser determinado a partir de uma série de fórmulas empíricas. A fórmula adotada no modelo SisBaHiA é a apresentada por Wu em 1982:

$$C_D = (0.80 + 0.065W_{10}) \times 10^{-3}; [W_{10} \text{ em m/s}]$$
 (9)

A tensão de atrito no fundo é calculada através da seguinte expressão:

²⁰ A notação indicial está sendo usada. Assim, i = 1 representa a componente x, e i = 2 a componente y.

$$\tau_i^B = \rho_o \beta U_i \quad [i = 1, 2] \tag{10}$$

onde o parâmetro β depende da maneira em que o módulo 2DH seja empregado. Se for desacoplado do modelo tridimensional é dado pela lei quadrática:

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2} \tag{11}$$

o coeficiente de Chézy, C_h é, definido como:

$$C_{h} = 18\log_{10}\left(\frac{12H}{2\varepsilon}\right) = 18\log_{10}\left(\frac{6H}{\varepsilon}\right)$$
(12)

Onde 2ϵ é a altura da rugosidade equivalente do fundo, sendo ϵ a amplitude. Para leito com transporte de sedimentos os valores são entre 0.0070m< ϵ <0.0500m.

Se o módulo 2DH for acoplado com o módulo 3D, o parâmetro β depende da velocidade de atrito característica u*, que é função do perfil de velocidade 3D. Nesse caso, tem-se:

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u_*| \tag{13}$$

As tensões turbulentas são formuladas através de técnicas de filtragem, e o modelo de turbulência é dado por:

$$\frac{\overline{\tau}_{ij}}{\rho_o} = \underbrace{\frac{\Lambda_k^2}{24} \left(\left| \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| \right)}_{\text{termos de filtragem}} + \underbrace{\left(D_H + D_V \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)}_{\text{difusão turbulenta e dispersão horizontal}} \tag{14}$$

onde como no caso anterior, i, j = 1, 2 e k = 1, 2, e 3, com k = 3 correspondendo ao tempo t, (neste contexto $x_3 = t$). Os parâmetros $\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k$ são escalas de largura de filtragem **local** na dimensão x_k , sendo α_k constantes de calibração. O valor de α_k calibra a quantidade de dissipação dada pelos termos de filtragem. Valores usuais para α_k estão entre 0.25 e 2.0, e na maioria das vezes o valor 1.0 fornece bons resultados.

A formulação da equação de transporte da substância C é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_{i} \frac{\partial C}{\partial x_{i}} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\left[D_{ij} + \frac{\Lambda_{j}^{2}}{12} \left| \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x_{j}} \right) + \Sigma R :.$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_{i} \frac{\partial C}{\partial x_{i}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(D_{ij} + \frac{\Lambda_{j}^{2}}{12} \left| \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} \right| \right)}{u_{i}'} \frac{\partial C}{\partial x_{j}} + \left(D_{ij} + \frac{\Lambda_{j}^{2}}{12} \left| \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} \right| \right) \frac{\partial^{2} C}{\partial x_{j}^{2}} + \Sigma R :.$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left(u_{i} - u_{i}' \right) \frac{\partial C}{\partial x_{i}} = \underbrace{\left(D_{ij} + \frac{\Lambda_{j}^{2}}{12} \left| \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} \right| \right)}{u_{i}'} \frac{\partial^{2} C}{\partial x_{j}^{2}} + \Sigma R$$

$$(15)$$

Como indicado no esquema acima, as "velocidades difusivas" são de fato função da variação espacial da difusividade turbulenta. Portanto o processo difusivo se divide em duas partes: uma que acrescenta incerteza à advecção e outra estritamente difusiva. Na abordagem lagrangeana cada partícula é transportada por advecção, com uma velocidade na escala resolvível u_i , e sofre um desvio aleatório da sua advecção resolvível devido a velocidades difusivas u_i , sendo ainda sujeita à difusão. A posição das partículas é obtida por expansão em séries de Taylor em função das posições nos dois

Na abordagem euleriana, a equação de transporte da substância C é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = -\frac{C}{H} (q_{P} - q_{E}) + \frac{(C_{Ia} - C)}{H} q_{Ia} + \Sigma R + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(\underbrace{H \left[D_{xx} + \frac{\Lambda_{x}^{2}}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right]}_{T_{xx}} \frac{\partial C}{\partial x} + \underbrace{H \left[D_{xy} + \frac{\Lambda_{y}^{2}}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right]}_{T_{xy}} \frac{\partial C}{\partial y} + \underbrace{H \frac{\Lambda_{t}^{2}}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right|}_{T_{xx}} \frac{\partial C}{\partial t} \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(\underbrace{H \left[D_{yx} + \frac{\Lambda_{x}^{2}}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right]}_{T_{yy}} \frac{\partial C}{\partial x} + \underbrace{H \left[D_{yy} + \frac{\Lambda_{y}^{2}}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right]}_{T_{yy}} \frac{\partial C}{\partial y} + \underbrace{H \frac{\Lambda_{t}^{2}}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right|}_{T_{yy}} \frac{\partial C}{\partial t} \right) \right)$$

$$(16)$$

onde, *C* é a concentração da substância de interesse, q_P , q_E e q_I são valores dados de vazões por unidade de área²¹, e.g. [m³/s/m²], respectivamente, de precipitação, evaporação

²¹ Tais vazões são funções de (x, y, t). Note que $q_P \ge 0$; $q_{Ia} \ge 0$ e $q_E \le 0$. Está presumido que as concentrações nos fluxos de precipitação e evaporação são nulas. No caso de fluxos por infiltração, apenas afluxos com concentração $C_{Ia} \ne C$ tem efeito efetivo na concentração. Os efluxos por infiltração não alteram a con-

e infiltração e ΣR é o somatório das reações cinéticas consideradas, fontes e sumidouros. D_{ij} é o termo que representa os coeficientes de difusão e dispersão horizontal. Como no caso da equação de quantidade de movimento 2DH, $\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k$ são as escalas de largura de filtragem local na dimensão x_k e α_k são parâmetros de calibração. O valor de α_k calibra a quantidade de dispersão e difusão fornecida pelos termos de filtragem. Valores usuais para α_k estão na faixa de 0.25 a 2.0, e na maioria das vezes o valor 1.0 fornece bons resultados.

A região de estudo (BIGS) teve sua fronteira aberta estendida em aproximadamente 50 km da comunicação com o mar aberto, e foi discretizada por meio de uma malha em elementos finitos quadráticos, num total de 2512 nós numa área aproximada de 14.475 milhões de km² (Figura 47). A batimetria foi obtida de cartas náuticas, assim como o contorno de costa, editadas pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação), compostas com informações de batimetria digital do CHM, Centro de Hidrografia da Marinha.

Os valores da rugosidade de fundo foram extraídos das informações de tipo de fundo, seguindo uma correspondência gradual de valores desde 0,03 para areia grosa até 0,01 para argila grossa. O mapa de distribuição á apresentado na Figura 48.

centração pois, presumidamente, teriam a mesma concentração da coluna de água, isto é, $C_{Ie} = C$, consequentemente, tal termo não aparece pois ($C_{Ie} - C$) = 0. Não confunda alteração na concentração com balanço de massa! A massa resulta da integração da concentração no volume. Assim sendo, efluxos por infiltração alteram a massa pois diminuem o volume, mas não alteram a concentração. Repare que se o fluxo resultante em uma coluna de água de área unitária e altura *H*, fosse o efluxo por infiltração, o valor de *H* diminuiria no tempo, indicando a perda de massa, mas o valor de *C* permaneceria o mesmo.



Figura 47 – Domínio da BIGS modelado no SisBaHiA. As cores representam os valores de profundidade e a malha discretizada em elementos finitos é apresentada com o traçado de linhas internas.



Figura 48 – Mapa de altura de rugosidade equivalente (m) prescrita no SisBaHiA para o cálculo da tensão de cisalhamento do fundo.

Os modelos de propagação de maré astronômica indicam que na região da BIGS não há uma variação significativa de fase e amplitude da componente M2, que é a mais energética, como pode ser visto dos resultados apresentados por HARARI (1985), que se encontram na Figura 49.

A FEMAR (Fundação para Estudos do Mar) disponibiliza na sua biblioteca digital informações de estações maregráficas costeiras de todo o litoral brasileiro, contendo informações de amplitude e fase de componentes de maré obtidas por meio de observações maregráficas realizadas por determinados períodos, normalmente de duração de um mês, ao longo dos últimos 50 anos. As estações aqui utilizadas se encontram na Tabela 8 e apresentadas na Figura 50.

A calibração da resposta do modelo SisBaHiA aos efeitos da maré astronômica foi feita por meio do método inverso, onde a partir das medições da estação Castelhanos, mais externa, vide Tabela 8,, foi calculado o valor de atenuação necessário para a prescrição das constantes harmônicas de maré na fronteira aberta, de forma a se obter a resposta no interior coerente com as informações das estações maregráficas interiores. No domínio modelado a melhor resposta obtida foi por maio da prescrição as constantes de Castelhanos com uma redução de 5% nas componentes diurnas, 10% nas semi-diurnas e 40% nas terdiurnas e quaterdiurnas.

As comparações entre as séries temporais astronômicas referentes às marés previstas via constantes da FEMAR²² e as modeladas no SisBaHiA através da prescrição, na fronteira aberta, da previsão de maré com as constantes harmônicas de maré calibradas, podem ser vistas na Figura 53. Buscou-se na calibração a distribuição do erro de forma a melhor representar espacialmente as marés em todo o complexo de baías. Deve-se salientar que as comparações tem uma interpretação restrita, tendo em vista o fato de terem sido feitas previsões com as constantes obtidas em períodos de observação curtos e bastante diferenciados ao longo do tempo, sendo as possíveis diferenças um reflexo de modificações na geometria do fundo e das margens, que podem causar diferenças principalmente nas respostas das componentes de maré não lineares (componentes de pequeno fundo), resultantes das interações entre as componentes de maré²³.

²² Fundação para Estudos do Mar : http://www.femar.com.br/

²³ (a componente de maré de menor período é a M3 (componente lunar terdiurna), a partir desta seguem-se as componentes de pequeno fundo.

Outra dificuldade na representatividade da comparação reside no fato de que os períodos de observação utilizados para a obtenção das constantes harmônicas foram de apenas um mês, o que dificulta a separação e a correta análise de componentes de maré de longo período, puras e de pequeno fundo. Para se efetuar uma correta calibração seria fundamental dispor de observações atualizadas de nível do mar, com duração de pelo menos um ano, e abrangência espacial na região.

De uma forma geral as diferenças entre as previsões harmônicas de maré e de elevações modeladas foram bastante pequenas, raramente ultrapassando 10 cm, veja Figura 51 a Figura 53, mesmo na estação mais interior da baía de Sepetiba, a de Piração. Para a finalidade da presente tese, cujo foco principal está no efeito no nível médio do mar, a calibração foi considerada satisfatória, embora em aplicações específicas sabe-se que essas diferenças podem se manter menores do que 1cm, como em ROSMAN(2004) e MARTINS (2006), dentre outros, principalmente com grades mais refinadas e com informações de batimetria e de contorno de costa atualizadas em relação às observações de elevação do nível do mar.



Figura 49 – Amplitudes e fases em relação a Greenwich da componente harmônica M2, na simulação numérica da maré astronômica na PC-SE brasileira. (seg. Harari,1985).

Tabela 8: Estações maregráficas utilizadas no modelo SisBaHiA, na calibração de maré astronômica da região de BIGS, e suas coordenadas na projeção UTM.

Estação	UTM (E)	UTM (N)
Piraquara - BIG	557044,47	7455264,92
Castelhanos -IG	592783,97	7438919,83
Ilha da Madeira -BS	617927,21	7464690,70



Figura 50 – Estações maregráficas extraídas do catalogo da FEMAR, utilizadas na calibração da maré astronômica, a oeste Piraquara, ao centro Castelhanos, e à direita Ilha da Madeira.



Figura 51–Séries temporais de elevação de maré astronômica, simuladas no SisBaHiA (azul), e previsão harmônica da elevação de maré (vermelho) na estação de Piraquara na BIG.



Figura 52–Séries temporais de elevação de maré astronômica, simuladas no SisBaHiA (azul), e previsão harmônica da elevação de maré (vermelho) na estação de Catelhanos na IG



Figura 53–Séries temporais de elevação de maré astronômica, simuladas no SisBaHiA (azul), e previsão harmônica da elevação de maré (vermelho) na estação da Ilha da Madeira – Porto de Sepetiba.

A prescrição dos valores de nível médio do mar foi feita por meio da soma dos valores de elevação da maré astronômica com os valores de nível do mar obtidos do modelo oceânico HYCOM ao longo da fronteira aberta, cujos resultados foram apresentados anteriormente (Figura 44), e nos experimentos de nível médio, apenas com a prescrição dos valores de elevação do HYCOM.

No verão, para simular a presença da corrente gravitacional costeira, foram feitos os testes com a relaxação na fronteira aberta de uma componente de direção nordeste de intensidade de 10 cm/s, implementada de forma homogênea e constante. Este valor foi baseado na obtenção de uma velocidade residual de 5 cm/s nos dados observados no verão, na Figura 33 e no fato de ter sido observada uma corrente residual nesta direção no período de verão, na simulação diagnóstica de REZENDE (2004) e COELHO (2008).

6. Resultados principais

Todo o procedimento de pré-processamento descrito no item anterior foi aplicado às simulações, que são aqui descritas, referentes aos resultados de simulação da circulação gerada apenas por efeito da maré astronômica, e posteriormente contabilizando os efeitos do campo de elevações de nível médio. As simulações referentes ao nível médio foram realizadas para os períodos de inverno e verão, e seus resultados discutidos à luz das informações existentes em relação aos dados "in situ". Os mapas de resultados foram apresentados nas proximidades da região de interesse, longe das fronteiras abertas do domínio modelado, onde os resultados sofrem iterferência da descontinuidade da fronteira.

6.1 Simulações da circulação gerada pela maré astronômica

As simulações realizadas em relação aos efeitos de maré astronômica apresentados nas figuras que se seguem, evidenciam o efeito já amplamente discutido de resposta diferenciada de intensidade de correntes na BIG e na BS. As correntes de maré enchente chegam a 40 cm/s na quadratura, até 60 cm/s na sizígia, na BS, como pode ser visto na Figura 54 e Figura 55, enquanto que na BIG os valores máximos são de até 20 cm/s na entrada. Nas correntes de maré vazante, tanto em sizígia quanto em quadratura os valores são próximos de 40 cm/s, em SEPe até 10 cm/s na BIG. Nota-se uma assimetria entre a vazante (menos intensa e de maior duração) e a enchente (mais intensa e de menor duração), que é confirmada observando-se a Figura 58.



Figura 54 – Campos de velocidades resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA em ocasião de meia²⁴ maré enchente na quadratura.



Figura 55 – Campos de velocidades resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA em ocasião meia maré enchente na sizígia.

²⁴ Meia maré refere-se a metade do período compreendido entre a preamar e baixamar, no caso da vazante e entre a baixamar e preamar na enchente.



Figura 56 – Campos de velocidades resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA em ocasião meia maré vazante de quadratura.



Figura 57 – Campos de velocidades resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA em ocasião meia maré vazante de sizígia.



Figura 58 – séries temporais de elevação resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA na estação de Ilha da Madeira na baía de Sepetiba.

Os valores das velocidades residuais, para ciclos de sizígia e quadratura, considerando apenas os efeitos astronômicos e acrescentando os efeitos de descarga fluvial, estão apresentados na Figura 59. Os efeitos de descarga fluvial se mostraram pouco relevantes na circulação residual, nas simulações adotando o valor médio de 86 m³/s para o rio que apresentou a principal contribuição, que foi o canal de São Francisco do Sul de acordo com CYNARA *et al.*(2006), representando a principal contribuição da região, na Baía de Sepetiba. Maiores detalhes acerca da contribuição fluvial na região da Baía de Sepetiba podem ser obtidos em MOLISANI *et al.* (2006).

Os resultados demonstram que os efeitos de maré astronômica e de descarga fluvial são originam valores muito baixos de correntes de circulação residual, com valores de até 1 cm/s. Os efeitos de vento local não foram investigados, uma vez que no interior da região o efeito predominante é de contribuição de brisas, entretanto podem acarretar em alguma contribuição adicional em períodos maiores, caso sejam observadas persistências de ventos em períodos superiores aos diurnos.

Com isso se espera que os efeitos de circulação residual advindos do campo de nível médio sejam preponderantes sobre os efeitos de circulação residual de maré e de descarga fluvial, e serão apresentados alguns resultados de simulação com efeitos de maré modulados pelas variações do nível médio, em situação de inverno e verão.



Figura 59 – circulação residual para um ciclo em regime de quadratura (A) e sizígia (B), resultantes da simulação de maré astronômica no SisBaHiA. A presença ou não de afluxos de rios não causa diferenças visíveis, afetando ligeiramente apenas a região próxima à descarga fluvial, cujo local está indicado na seta a NE da BS.

6.2 Simulações da circulação gerada pela maré astronômica e pelo nível do mar de inverno

A simulação da circulação total, maré astronômica somada à maré meteorológica, na BIGS, com o modelo costeiro SisBaHiA, foi feita com a prescrição na fronteira aberta da maré astronômica calibrada, somada à contribuição de nível médio advinda do modelo oceânico HYCOM para o mês de agosto de 2003, já apresentada anteriormente na Figura 44.

Os resultados são apresentados na forma de séries temporais nos pontos coincidentes aos das observações pretéritas, e por meio do campo de vetores de velocidades, com isolinhas de intensidade, em todo o domínio modelado, afastado das regiões próximas às fronteiras.

As séries temporais de elevações e de correntes em BIG, SEP e CIG, podem ser vistas na Figura 60 e Figura 61 e comparadas às séries representativas de inverno, Figura 25 e Figura 28. Os níveis apresentam valores coerentes, porém com algumas diferenças de amplitudes, que podem chegar a 30 cm. Os espectros de amplitude confirmam as afirmações anteriores, na Figura 62 e Figura 63. Nota-se que em BIG as correntes possuem intensidade coerente com as séries observadas, tanto em relação às intensidades da corrente de maré quanto em relação à modulação do nível do mar observado, sendo esse último subestimado, em relação aos valores de elevação observados na estação da Ilha Fiscal. Tal comportamento é esperado uma vez que o campo de elevações do nível médio provenientes do HYCOM estava subestimado, conforme havia sido apresentado na discussão de modelo oceânico e na Figura 44.

A amplificação dos valores de correntes no CIG também apresenta coerência, embora também com valores menos intensos no tocante à modulação do nível médio, devido ao fato do campo de elevações estar subestimado. Há uma contribuição menos significativa da componente norte-sul, que realmente é esperada no local.

Na observação em Sepetiba, nota-se uma resposta de corrente de maré similar às observadas, com intensidades da componente norte-sul maiores do que as componentes leste-oeste, e uma modulação do nível médio coerente com o observado.

Existem inúmeros fatores que podem causar maiores diferenças entre as simulações, e os dados observados. A disponibilidade de dados foi insuficiente para uma efetiva



calibração, pois foi baseada em medições realizadas em épocas muito distintas (1975 e 2001), com equipamentos diversos. As incertezas em relação às medições de 1975, da

Figura 60- Séries de elevações (m) resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica do mês de agosto de 2003 na fronteira aberta FA (amarelo), em BIG (vermelho), Ilha da Madeira (verde claro), Piraquara (azul) e fundo da BS (verde médio). Nota-se que as elevações das séries em BIG foram próximas aos valores da FA e no fundo da BS chegaram a atingir valores 50% maiores do que na FA. As medições na Ilha Fiscal IF, pontos vermelhos, mostram resultados bastante próximos aos simulados, tendo sido corrigidas em defasagem de 40 minutos.

CIG são consideráveis, pois o correntômetro utilizado em 1975 era do tipo EKMAN, lançado a bordo do navio, que permanecia à deriva, efetuando a coletas nos níveis desejados. Sua localização é próxima de um canal dragado, que pode sofrer sedimentações e alterações que podem ser relevantes em termos da representabilidade do modelo das condições de fundo na época das medições. Um estudo de sedimentação no canal TEBIG pode ser verificado em BELO *et al.* (2002). Já as medições de 2001 foram realizadas com correntômetros ANDERAA do tipo rotor, fundeados em dois níveis de profundidade.

Para fins da presente tese, que foi uma avaliação da contribuição da circulação de baixa frequência, foi utilizada a informação do nível médio da Ilha Fiscal simultâneo ao perído das simulações, como referência para as resultados alcançados, que foram simulados em períodos diversos ao das medições.

Para alcançar uma maior precisão, inclusive da resposta da circulação aos forçantes de alta frequência representados pela maré astronômica e ventos locais, é necessário garantir a reprodução da batimetria, dos contornos de terra, dos tipos de fundo na modelagem com refinamento adequado para a reprodução dos efeitos observados nas

medições. As medições necessitam ser simultâneas, abrangentes e de duração compatível para capturar os principais fenômenos modelados.







Figura 61- Séries de componente de correntes leste-oeste (U- m/s) em azul e norte-sul (V-m/s) em verde, resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica do mês de agosto de 2003, na estação de BIG (A), CIG(B) e SEP (C), entrada da Baía de Ilha Grande. Em vermelho a série de elevações simultâneas observada na Ilha Fiscal (FISC-m).



BIG	Pee	Puu	Peu	Pvv	Pev
Int. de confiança de 95%	0.2526	0.0474	0.1092	0.0446	0.1055

Figura 62 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes simuladas em agosto de 2003, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.



Figura 63 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes simuladas em agosto de 2003, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.

Os campos de velocidades apresentaram os comportamentos similares aos observados na simulação de maré astronômica, que se adicionam aos efeitos da circulação causada pelas variações no nível do mar.

No item 3.2 foi discutida a contribuição do regime de ventos da PC na geração de ondas de plataforma continentais (OPC) subinerciais, gerando um comportamento alternante na circulação ao longo da costa. As correntes seguem em direção ao norte durante os episódios de sobrelevação do nível do mar, durante as passagens de frentes frias, com ventos de sul-sudoeste e as correntes seguem para sul nas ocasiões de vento de nordeste, de tempo bom, favoráveis ao rebaixamento do nível do mar devido à divergência que ocorre na costa.

Sendo os eventos de sobrelevação e rebaixamento de aspecto menos regulares e simétricos do que as marés astronômicas, buscou-se apresentar eventos de

características similares, tanto em termos de magnitude, quanto em termos do gradiente de elevação. As simulações a seguir apresentadas são ilustrativas destas ocasiões mencionadas.

6.2.1 Simulações da circulação com rebaixamento do nível do mar:

O rebaixamento do nível do mar corresponde ao cavado da OPC, em que as correntes são dirigidas ao sul, entram pela BS, passam pelo CIG e saem na embocadura da BIG. As intensidades não se alteram de forma significativa nos diferentes regimes de maré, como se pode observar na Figura 64 e Figura 65. Novamente, se observam na BS maiores intensidades das correntes de enchente do que de vazante, e no canal a circulação se dá sempre no sentido leste-oeste, no sentido coerente com o de rebaixamento do nível médio na PC, de leste para oeste.

Prevalece visualmente a contribuição da circulação de maré astronômica, evidenciandose, entretanto, um aumento da circulação no CIG, promovido pelo acréscimo do efeito de circulação devido ao nível médio do mar.



Figura 64- Campos de correntes resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica no mês de agosto de 2003. Resultados para ½ maré enchente em quadratura (acima) e sizígia (abaixo), durante o rebaixamento do nível médio do mar.



Figura 65- Campos de correntes resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica no mês de agosto de 2003. Resultados para ½ maré vazante para quadratura (acima) e sizígia (abaixo), durante o rebaixamento do nível médio do mar.

6.2.2 Simulações da circulação com sobrelevação do nível do mar:

Durante a passagem de frentes frias as correntes assumem no canal uma direção oesteleste, e as correntes de maré continuam apresentando as mesmas características já descritas anteriormente, a enchente com correntes mais intensas e do que as de vazante como se observa na Figura 66 e Figura 67.


Figura 66- Campos de correntes resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica no mês de agosto de 2003. Resultados para ½ maré enchente para quadratura (acima) e sizígia (abaixo), durante a sobrelevação do nível médio do mar. Ressalta-se que a leste a recirculação é devida a efeitos de descontinuidade da fronteira aberta, que não afetam o domínio interior modelado, nas entradas e interior da BIGS.



Figura 67- Campos de correntes resultantes da simulação de maré meteorológica e astronômica no mês de agosto de 2003. Resultados para ½ maré vazante para sizígia (acima) e quadratura (abaixo), durante a sobrelevação do nível médio do mar. Ressalta-se que a leste a recirculação é devida a efeitos de descontinuidade da fronteira aberta, que não afetam o domínio interior modelado, nas entradas e interior da BIGS.

6.2.3 Circulação residual da simulação de maré meteorológica e maré astronômica.

Para averiguar os resultados obtidos anteriormente, onde as comparações entre as simulações apenas de maré astronômica com as de maré meteorológica indicam que os

efeitos apenas se superpõem, não havendo interações entre as mesmas, foram calculadas as circulações residuais em simulações puramente de maré meteorológica, onde se nota que os resultados são equivalentes (apêndice 1).

Embora os eventos de sobrelevação e rebaixamento, apresentados na Figura 68 a Figura 71, tenham apresentado características de maior ou menor intensidade, a região de maior influência ficou no entorno da Ilha Grande e nas entradas da BIG e BS. As baixamares meteorológicas do período estão centradas na ocorrência de sizígia e quadratura máximos, não tendo ocorrido a mesma situação para a preamar meteorológica, onde buscaram-se os valores mais próximos de quadratura e sizígia, porém correspondentes à região de transição.

Nota-se que no interior da baía de Sepetiba, os efeitos foram maiores na região próxima ao canal de navegação até a ilha Guaíba e no entorno da Ilha Grande. Na restinga da Marambaia, os resultados da Figura 71 mostram um ligeiro acréscimo de velocidades que nos valores do campo de isolinhas, sem a presença de vetores de maior intensidade,. Tal fato se deve a restrições do interpolador do programa utilizado, o SURFER, nesta região de borda muito estreita. Novamente, vale ressaltar que a comparação entre quadratura e sizígia para sobrelevação ficou prejudicada devido ao fato de não ter havido preamares meteorológicas coincidentes com períodos de sizígia ou quadratura máximos.

Na BIG há indícios de que haja uma influência na porção superior oeste, na enseada de Itaorna, quando em ocasiões de sobrelevação do nível as correntes se apresentam no sentido oeste-leste, indicando haver uma região de recirculação local. Padrões similares de circulação residual foram encontrados em CAVALCANTE & ROSMAN (2009), no período de outubro de 2003, em simulações realizadas por meio do aninhamento de modelo costeiro SisBaHiA refinado na região da enseada de Itaorna, com modelo HYCOM, para avaliação da circulação subinercial. Um fato relevante é que esta recirculação é mais evidente nas ocasiões de sobrelevação do nível do mar, sendo menos intensas nas ocasiões de rebaixamento, em padrão similar ao dos dados observados em outubro de 2003, onde as correntes na ocasião de rebaixamento se apresentam valores reduzidos, como é apresentada na Figura 72.

Nota-se ainda da Figura 69, que em sobrelevação do nível médio, há formação de uma célula de circulação anti-horária principal no interior da BIG e de duas células secundárias também anti-horárias ao sudoeste e a noroeste da BIG. Em períodos de

rebaixamento ocorre uma recirculação anti-horária na BIG em menor intensidade e sem ocorrência de vórtices secundários.



Figura 68- Resultado da circulação residual em período de sobrelevação do nível médio do mar, para situação de sizígia (acima) e quadratura (abaixo). Ressalta-se que a leste a recirculação é devida a efeitos de descontinuidade da fronteira aberta, que não afetam o domínio interior modelado, nas entradas e interior da BIGS.



Figura 69- Resultado da circulação residual em período de sobrelevação do nível médio do mar, para situação de sizígia (acima) e quadratura (abaixo). Escala das setas de velocidade indicadas pelas cores. As diferenças entre as situações de quadratura e sizígia não foram relevantes, como visto na figura anterior.



Figura 70- Resultado da circulação residual diária em período de rebaixamento do nível médio do mar, para situação de quadratura (acima, dia 05/08/2003) e sizígia (abaixo, dia 14/08/2003). Escala das setas de velocidade indicadas pelas cores..



Figura 71- Resultado da circulação residual diária em período de rebaixamento do nível médio do mar, para situação de quadratura (acima, dia 05/08/2003) e sizígia (abaixo, dia 14/08/2003). Escala das setas de velocidade indicadas pelas cores. As diferenças entre as situações de quadratura e sizígia não foram relevantes, como visto na figura anterior. Ressalta-se que ao sul da BS os valores maiores de circulação residual próximas à porção mais estreita da restinga, são apenas devidas à interpolação, pois não se observam vetores de maior intensidade acompanhando tais feições.



Figura 72- Medições de correntes médias nos pontos S1, S2 e S3 nas proximidades da enseada de Itaorna, filtradas em 30h, apresentadas por CAVALCANTE & ROSMAN (2009), para análise da circulação residual em outubro de 2003, comparada aos valores do nível médio do mar na Ilha Fiscal, em vermelho. Vx é a componente leste-oeste e Vy é a componente norte-sul.

6.2.4 Transporte de partículas e tempo de residência da simulação de maré astronômica com e sem maré meteorológica.

Nos itens anteriores foi observado que a principal contribuição da circulação residual advém da parcela das oscilações do nível médio do mar. Para melhor avaliar a contribuição desta circulação residual de maré meteorológica no incremento do transporte de substâncias, e de trocas de massas d'água entre as baías e o oceano adjacente, foram feitos experimentos utilizando-se o modelo de transporte lagrangeano que compõe o SisBaHiA©. Para tal, cada baía foi preenchida por partículas de coloração distinta, um grupo para a BIG e outro para BS, e o oceano adjacente foi mantido sem preenchimento. Utilizando-se os resultados hidrodinâmicos apenas com o efeito da maré astronômica e com o efeito da maré meteorológica acrescido, foi avaliado o transporte lagrangeano resultante, após 30 dias de simulação.

Os resultados são apresentados nas figuras que se seguem. Na primeira hora de simulação observa-se a distribuição inicial das partículas, que se apresenta de forma similar para a simulação com base na maré astronômica e meteorológica (Figura 73). Após 30 dias é muito relevante a diferença entre a distribuição das partículas apenas com efeito da maré astronômica (Figura 74) e com efeito da maré meteorológica acrescido (Figura 75). Apenas com efeito da maré astronômica se dá uma maior renovação na BS, e não ocorrem trocas significativas de partículas na região do canal (CIG). Adicionando-se o efeito da maré meteorológica é substancial a troca promovida no entorno da Ilha Grande, e nas embocaduras, e bastante significativa nas baías.

As células de recirculação observadas na simulação hidrodinâmica de inverno, promovem um incremento no transporte nas áreas afetadas por essas regiões, e as regiões claras indicam locais onde as partículas saíram do domínio.



Figura 73-Distribuição inicial de partículas lançadas.na BIGS, no instante inicial de simulação lagrangeana, utilizada em todas as simulações, com base na hidrodinâmica da maré astronômica e da maré somada ao nível médio. As cores se referem apenas às regiões de origem das partículas.



Figura 74-Distribuição de partículas por região, em vermelho BIG e em verde BS, após 30 dias de simulação lagrangeana, para hidrodinâmica da maré astronômica. Nota-se que apenas nas regiões das entradas de BIG e BS houve um transporte mais efetivo para fora da região de origem (regiões em branco representam as correspondentes à saída de partículas em direção ao oceano aberto.



Figura 75-Distribuição de partículas por região, em vermelho BIG e em verde BS, após 30 dias de simulação lagrangeana, para hidrodinâmica da maré astronômica somada ao nível médio de agosto de 2003. A porcentagem de partículas que saiu do domínio foi de 14%. A recirculação antihorária residual observada nos resultados hidrodinâmicos promoveu o deslocamento de partículas originadas na BS (vermelhas e verdes) no interior da BIG (azul). Utilizando-se o módulo de cálculo do tempo de residência do modelo de transporte lagrangeno do SisBaHiA, uma nova comparação entre os efeitos de maré astronômica e meteorológica foi feita por meio de uma simulação de 90 dias, utilizando os resultados hidrodinâmicos na forma de ciclos mensais. A distribuição das curvas mostra que o efeito da maré meteorológica causa uma diminuição no tempo de residência muito representativa, como pode ser observado da comparação entre a Figura 76 e Figura 77, no interior da BIG e no entorno da Ilha Grande.

Uma outra maneira de avaliar as trocas promovidas pelos regimes de circulação da BIGS é através da utilização de um modelo de transporte euleriano²⁵, que embora desacoplado com a hidrodinâmica, mostra a tendência de mistura entre as massas d'água. O modelo utilizado foi o que consta no pacote SisBaHiA, utilizando como hidrodinâmica base as simulações apenas com maré, e com maré acrescida do nível médio do mar, para uma condição inicial de concentração unitária nas entradas e interior da BIG e BS, e na região exterior e contornos abertos com concentração nula.



Figura 76- Tempo de residência para 90 dias de simulação (ciclo mensal de hidrodinâmica da maré astronômica). Os fundos das baías apresentam maiores tempos de residência.

²⁵ O Módulo Euleriano do SisBaHiA utiliza a formulação de equações de transporte eulerianas, com a velocidade de advecção dada pela obtida na simulação hidrodinâmica, e os coeficientes de dispersão e difusão são selecionados de acordo com as propriedades da substância modelada. O módulo de qualidade de água do SisBaHiA também está disponível para uso na modelagem transporte e difusão de temperatura, sal, oxigênio dissolvido, etc



Figura 77-Tempo de residência da simulação de 90 dias com referência no mês de agosto de 2003, com ocorrência de três frentes frias de periodicidade de 7 dias e sobrelevação de aproximadamente 20cm. O fundo da BIG apresenta tempos de residência menores do que os apresentados com a simulação hidrodinâmica da maré astronômica, e há um decr´scimo em todo o entorno da Ilha Grande.



Figura 78-Distribuição inicial das concentrações da simulação euleriana com valor unitário no interior da BIGS e nulo no exterior.

Nota-se nos resultados da simulação de 90 dias referente à hidrodinâmica da maré astronômica, que a mistura é bastante expressiva em toda a região, permanecendo ainda concentrações ligeiramente maiores no interior da BS e na porção NW da BIG (Figura 79). Na inclusão dos efeitos de maré meteorológica na hidrodinâmica, a diluição é mais significativa em ambas as baías (Figura 80). Estes resultados auxiliam na análise qualitativa dos resultados e foram utilizados de forma a comparar os efeitos. Não foram calibrados com dados "in situ" e, portanto, necessitam de uma avaliação para usos específicos de seus resultados.



Figura 79-Concentrações resultantes de simulação de transporte Euleriano após um período de 90 dias, com referência na hidrodinâmica da maré do mês de agosto de 2003.



Figura 80- Concentrações resultantes de simulação de transporte Euleriano após um período de 5 dias,com referência no mês de agosto de 2003, com ocorrência de três frentes frias de periodicidade de 7 dias e sobrelevação de aproximadamente 20cm.

6.3 Simulações da circulação gerada pela maré astronômica e pelo nível do mar de verão

As simulações do período de verão foram feitas com a prescrição na fronteira aberta de apenas o nível médio do mar, tendo em vista ser o principal agente na circulação subinercial da região. As Figura 81 e Figura 82 apresentam os resultados de simulações para períodos de rebaixamento e sobrelevação, respectivamente, e observa-se que mesmo com a alternância do comportamento do nível o padrão de correntes na região frontal à BIGS predomina na direção oeste-leste (ou norte-sul).

Não se observa nas simulações do HYCOM a presença do fluxo gravitacional dirigido para norte, como observado nos campos climatológicos apresentados em REZENDE (2003) e COELHO (2008), elaborados a partir de dados do programa REVIZEE²⁶. Inicialmente devido ao fato de que o campo de temperatura e salinidade do modelo global HYCOM não possuir assinatura de fluxo para norte devido à descarga estuarina,

²⁶ O programa REVIZEE é não governamental e visa a Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva brasileira.

como pode ser observado na Figura 81 e Figura 82. Outro fator se refere à contribuição fluvial, que no modelo HYCOM é feita na forma de uma contribuição média mensal, provavelmente sem o detalhamento necessário para a correta caracterização das contribuições de verão na PC sudeste. Para a simulação do efeito da circulação gravitacional costeira presente no verão da PC-SE, foi feita uma relaxação de uma componente oeste-leste de 10cm/s ao longo de toda a fronteira aberta, de forma homogênea e constante.

6.3.1 Simulações da circulação hidrodinâmica

Os resultados das simulações hidrodinâmicas são apresentados em séries temporais nos pontos coincidentes com as medições pretéritas, juntamente com os valores das séries observadas de nível do mar da Ilha Fiscal no período, filtradas for meio de filtro de Thompson de 40h, da Figura 83 a Figura 84. A avaliação dos resultados pode ser feita de forma comparativa com os dados obtidos em 2001, no período de verão (Figura 33), nas estações de BIG (entrada da BIG) e SEP (entrada da BS), uma vez que existem informações disponíveis no CIG apenas para o período de inverno.



Figura 81- Campo de velocidades e elevação (m) do dia 04/03/2004 – simulada no HYCOM, correspondente a um período de rebaixamento do nível do mar. Escala de vetores: 1mm equivale a 10cm/s.



Figura 82- Campo de velocidades e elevação (m) do dia 07/03/2004 – simulada no HYCOM, correspondente a um período de sobrelevação do nível do mar. Escala de vetores: 1mm equivale a 10cm/s.



Figura 83- Séries de componente de correntes leste-oeste (U- m/s) em azul escuro e norte-sul (V-m/s) em azul claro, resultantes da simulação de maré meteorológica na estação de BIG, entrada da Baía de Ilha Grande. Em magenta a série de elevações no ponto BIG e em vermelho a série de elevações simultâneas de nível filtrado com filtro de Thompson de 40h da Ilha Fiscal (FISC-m).



Figura 84- Séries de componente de correntes leste-oeste (U- m/s) em azul escuro e norte-sul (V-m/s) em azul claro, resultantes da simulação de maré meteorológica na estação de SEP, entrada da baía de Sepetiba. Em magenta a série de elevações no ponto SEP e em vermelho a série de elevações simultâneas de nível filtrado com filtro de Thompson de 40h da Ilha Fiscal (FISC-m).



Figura 85 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de modeladas do verão de 2004, na estação BIG e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.



Figura 86 – Espectro de amplitude das séries de componentes U-zonal (E-W) e V-meridional (N-S) de correntes de modeladas do verão de 2004, na estação SEP e nível médio E simultâneo da FISC, filtrados com médias móveis de 30h.

Nota-se das séries temporais que no caso de SEP, as correntes tem pequena intensidade e são moduladas pelo nível médio do mar, como nas observações de 2001 da Figura 33. Na estação BIG foi reproduzida a circulação residual observada em 2001, no verão, obtida por meio do acréscimo do efeito da corrente gravitacional introduzida na simulação. Ainda se observa uma tendência de reversão do fluxo na ocasião de períodos de intenso rebaixamento de nível do mar, como também foi observado em algumas ocasiões, durante as observações de verão de 2001. Próximo do dia 24 de fevereiro, durante um evento de sobrelevação do nível, o transporte de Ekman normalmente induziria a uma corrente positiva, para nordeste, e a simulação apresentou correntes na direção oposta. Tais recirculações se devem provavelmente à uma recirculação ocasionada pela interação deste fluxo induzido pelo transporte de Ekman, com a corrente gravitacional costeira. O período de verão apresenta uma maior complexidade e requer um estudo mais aprofundado. Faz-se necessário um levantamento de dados simultâneo de variáveis dinâmicas e do campo termohalino, para que toda a contribuição possa seja melhor avaliada. De posse dos dados de campo será possível avaliar e melhorar a contabilização dos efeitos baroclínicos advindos do campo termohalino, realizando-se o aninhamento de um modelo costeiro baroclínico tridimensional, ao modelo oceânico que tenha apresentado em sua avaliação a melhor resposta na representação do campo termohalino da PC adjacente, além dos campos de elevação e de velocidades. O modelo SisBaHiA dispõe de um modulo bidimensional baroclínico, e o tridimensional está em desenvolvimento.

6.3.2 Transporte de partículas e tempo de residência da simulação de maré meteorológica no verão.

Tendo em vista os resultados das simulações observados no item anterior terem apresentado característica bastante distinta aos resultados obtidos na simulação de inverno, principalmente com a introdução da corrente gravitacional costeira ainda pouco estudada na PC, são apresentados a seguir os resultados do modelo lagrangeano de transporte decorrente da hidrodinâmica simulada.

O procedimento adotado foi o mesmo descrito para a simulação de inverno, onde a BIG foi preenchida por partículas vermelhas, e a BS por partículas verdes, sendo sua distribuição inicial dada pela Figura 73, anteriormente apresentada.

O período da simulação dos primeiros 30 dias compreendeu a ocorrência de cinco frentes frias, com periodicidade de 3 a 6 dias e com sobrelevações acerca de 10cm. Os resultados da distribuição de partículas se encontram na Figura 87 e quando comparados aos resultados de inverno, pode-se notar uma mior renovação de águas na BS e na BIG, e uma maior presença de regiões advindas da PC adjacente (regiões brancas).



Figura 87-Distribuição de partículas por região, em vermelho BIG e em verde BS, após 30 dias de simulação lagrangeana, para hidrodinâmica da maré meteorológica com início em 17 de fevereiro de 2004. A porcentagem de partículas que saiu do domínio foi de 12%.

Com relação ao tempo de residência esta maior renovação também pode ser observada pelos menores tempos de residência no entorno da Ilha Grande, comparando-se o resultado já apresentado da simulação de inverno (Figura 77) com o da simulação de verão em ciclo mensal de início em 17 de fevereiro (Figura 88).



Figura 88-Tempo de residência da simulação de 90 dias com referência no ciclo de um mês de 15 de fevereiro a 16 de março de 2004, com ocorrência de cinco frentes frias de periodicidade de três a seis dias e sobrelevação de aproximadamente 10cm.

A variabilidade sazonal não parece ser tão relevante na renovação da BIG e SEP quanto a inclusão dos efeitos de nível médio do mar na hidrodinâmica do sistema de baías.

A simulação euleriana também demonstra um grande incremento na diluição devido às trocas promovidas pela contribuição da maré meteorológica, resultando em menores concentrações finais na BIG e SEP (Figura 89). Novamente, as diferenças em relação ao comportamento observado no inverno indicam uma diluição ligeiramente menor, e novamente ressalta-se o fato de que tais simulações não foram submetidas à calibração, tendo apenas um efeito de demonstração qualitativa dos efeitos.

A imposição da velocidade no contorno aberto do modelo causou uma inibição na diluição no interior da BIGS e é necessária uma investigação mais aprofundada para a avaliação deste efeito, utilizando-se para isso um acoplamento baroclínico.



Figura 89-Concentrações da simulação euleriana de 5 dias com referência no ciclo de um mês de 15 de fevereiro a 16 de março de 2004, com ocorrência de cinco frentes frias de periodicidade de três a seis dias e sobrelevação de aproximadamente 10cm. A distribuição inicial foi de valor unitário para o interior da BIGS e nulo no exterior.

6.4 Considerações Finais

As simulações realizadas apenas com os efeitos de maré mostram uma maior circulação, transporte e trocas de massas de água no interior da BS e nas entradas da BIG e BS. Os efeitos da dinâmica da PC se mostraram bem evidentes durante o inverno, promovendo um acréscimo na circulação e consequentemente, no transporte e trocas de massas de água, considerando apenas os efeitos da propagação de OPC na PC contígua, cujos efeitos são preponderantes na dinâmica da PC neste período.

No verão, a dinâmica da PC contém uma influência direta das OPC, embora elas tenham uma contribuição menor em termos de sobrelevação/rebaixamento do nível do mar, comparativamente ao período de inverno, quando as frentes frias são bem mais intensas, causando eventos quantitativamente muito mais significativos.

Para o período de verão, a simulação barotrópica apenas do efeito das OPC, como feito no inverno, não representaria de forma adequada a circulação neste período, que como foi apresentado anteriormente (Figura 33), possui uma resposta de correntes menos intensa, em relação aos valores observados de sobrelevação/rebaixamento do NMM.

A simulação mais adequada para o período de verão demandaria a disponibilidade de modelos oceânicos com uma boa representatividade das OPC e da contribuição da CB,

na disponibilização de águas mais frias de origem subtropical, e da corrente costeira de descarga estuarina. A partir de então, seria viável partir para o aninhamento baroclínico, i.e., considerando os gradientes de densidade na massa de água, para buscar no modelo costeiro um resultado de modelagem em escalas espaciais mais detalhadas.

As avaliações realizadas nos modelos oceânicos indicam que ainda não foi atingido o estágio em que possam ser atendidas de forma satisfatória as representações da dinâmica da PC, principalmente na sua porção mais interna, representando ainda uma fonte de investigação para futuros desenvolvimentos.

A imposição de uma velocidade representativa do efeito da circulação estuarina foi uma estratégia para tentar contabilizar sua possível contribuição, o que de fato demonstrou que este procedimento levou a resultados numéricos próximos aos observados nos dados "in situ" da entrada das baías. Entretanto, ressalta-se o fato de que a indisponibilidade de dados de correntes no canal da Ilha Grande no verão mantém ainda a incerteza quanto à consistência dos resultados numéricos alcançados. Serão apresentados aqui, portanto, apenas de forma qualitativa, como um indicador da circulação.

A Figura 90 apresenta uma comparação dos efeitos de diluição observados em estações interiores de BS e BIG, e a Figura 91 apresenta a diluição nas estações das entradas da BS e BIG e no CIG, referentes às simulações eulerianas realizadas utilizando como base os resultados hidrodinâmicos de maré astronômica, e de níveis de inverno e verão.

Os resultados exemplificando uma diluição de 50% são resumidos na Tabela 9, onde é possível notar o incremento promovido nas trocas de massas de água, quando da inclusão dos efeitos de flutuaçes de NMM, notadamente no inverno. Nas estações interiores há uma redução de 1 dia em relação à diluição da maré astronômica e da flutuação de NMM de inverno. No canal da Ilha Grande esta redução de tempo de diluição é de até 3 dias.



Figura 90-Concentrações resultantes da simulação euleriana com referência no ciclo de hidrodinâmica de maré astronômica (vermelho), maré e nível de inverno de 2003 (azul) e verão de 2004 (verde), para as estações no interior da BS, na Ilha da Madeira (A) e no fundo da BS (B), no extremo leste e no interior da BIG, Piraquara (C). A contribuição do nível do mar não é significativa na diluição da BIGS.



Figura 91-Concentrações resultantes da simulação euleriana com referência no ciclo de hidrodinâmica de maré astronômica (vermelho), maré e nível do inverno de 2003 (azul) e verão de 2004 (verde), para as estações BIG (A), CIG (B) e SEP (C). A contribuição do nível do mar é substancial para a diluição da BIGS, reduzindo em até 50% o tempo de diluição de metade da concentração inicial.

Tabela 9 – Dias referentes ao percentual de 50% de diluição referente à simulação euleriana de transporte e de trocasde massas de água com concentrações iniciais nulas no exterior da BIGS e concentrações unitárias em seu interior.

	Tempo (dias) de diluição em 50%		
Estações	Maré astronômica	Nível de Inverno	Nível de Verão
1-I. Madeira	6	5	8
2- Fundo_BS	6	5	8
3 - Piraquara	6,5	5,5	8,5
4 - Entrada BIG	4	3	3
5 - Entrada BS	3	1,2	2,5
6 - CIG	6	3	8,5

7. Conclusões

A região de BIGS apresentou uma resposta fortemente influenciada pelos efeitos meteorológicos, como esperado pelos indícios de investigações anteriores, e este trabalho confirmou que não é possível obter uma resposta satisfatória da hidrodinâmica da região sem considerar o campo de variabilidade da maré meteorológica, principalmente na baía de Ilha Grande.

Os efeitos de sobrelevação do nível do mar, mais intensos no inverno, ocasião em que também se espera que a contribuição da maré meteorológica seja mais relevante na modulação da circulação gerada por efeito da maré astronômica, causaram um substancial acréscimo na circulação no entorno da Ilha Grande, formando células de recirculação anti-horárias na região de BIG. Os efeitos de acréscimo na circulação da BS foram pouco notáveis.

As simulações do modelo oceânico HYCOM, embora subestimando o campo de elevações, se mostraram adequadas para o fornecimento das condições de contorno para a região de estudo, principalmente em relação aos padrões de inverno. No período de verão o modelo não apresentou uma adequada representatividade da ocorrência da corrente gravitacional. Dentre os modelos avaliados foi o que apresentou melhores resultados em termos de sua resposta barotrópica.

As observações "in situ" forneceram um grande auxílio na avaliação da resposta do aninhamento, embora ainda persista a necessidade de se obter dados simultâneos no canal da Ilha Grande e nas entradas das baías, principalmente no verão. Nas regiões interiores, a recirculação observada em medições realizadas pela COPPETEC também fornecem indícios sobre a importância de medições mais localizadas em aplicações específicas.

O módulo do modelo costeiro SisBaHiA de transporte lagrangeano forneceu ferramentas bastante eficientes para a representação do efeito da circulação hidrodinâmica residual no acréscimo do transporte passivo de substâncias. Os resultados mostraram que a circulação gerada apenas pela maré astronômica promove um transporte mais efetivo apenas nas entradas das BIG e BS, e o acréscimo do efeito da maré meteorológica promove um maior transporte, inclusive com uma maior saída de partículas do domínio inicial, na BIG e no entorno da Ilha Grande. No fundo da BS a situação se mantém pouco alterada. No verão também se observa um maior transporte

residual, promovendo uma maior saída das partículas do domínio, em todo o entorno da Ilha Grande, e também na BS, como no inverno.

Os resultados referentes ao módulo de transporte e difusão euleriana, do modelo costeiro SisBaHiA, indicam que há um acréscimo da capacidade de renovação, causada pelo acréscimo do efeito da circulação residual, e novamente com efeito mais notável no entorno da Ilha Grande e nas entradas das baías, com redução em até 50% do tempo de renovação, no inverno. No verão os resultados do modelo indicam um aumento do tempo de renovação, provavelmente devido às correntes residuais terem uma menor intensidade, causando uma provável inibição no processo de trocas difusivas.

O uso de relaxação de valores de velocidade no modelo costeiro SisBaHiA permitiu representar efeitos não contabilizados no modelo oceânico, da corrente gravitacional longitudinal à costa, devida à contribuição dos estuários vizinhos, conforme já discutido anteriormente. Esse procedimento permitiu obter resultados na simulação de verão mais próximos do que os apresentados nas observações de 2001, que apontaram a presença de correntes pouco intensas e com resíduo para o norte, especialmente na BIGS.

Os resultados de verão, entretanto, talvez possam ser mais bem avaliados por meio de um acoplamento baroclínico, havendo a disponibilidade de um modelo oceânico representativo da resposta barotrópica e dos efeitos de intrusão de massas de água frias, e da frente estuarina. De posse de observações "in situ" no interior da BIG, em particular no canal da Ilha Grande, e em suas entradas, será possível avaliar esta contribuição de maneira mais efetiva.

8. Recomendações para futuras pesquisas

A presente tese foi desenvolvida com uma considerável restrição na disponibilidade de observações "in situ". A primeira e mais importante recomendação é a de promover observações simultâneas e abrangentes em termos espaciais e de duração suficientemente longa, com no mínimo 60 dias, que permitam caracterizar os efeitos de contribuições subinerciais na circulação, que se mostraram muito relevantes na região.

Uma observação cobrindo o ano todo não seria suficiente para capturar a variabilidade interanual, embora seja bastante enriquecedora para a análise dos processos, logo, regiões costeiras sujeitas a efeitos de processos de longo período devem ser monitoradas, se possível, de modo contínuo, ou pelo menos até que os modelos oceânicos e meteorológicos alcancem uma precisão suficiente que atenda às simulações costeiras.

Recomenda-se investigar os efeitos hidrodinâmicos considerando variações no campo termohalino, pois embora sendo mais relevantes no verão, que coincide com um período em que os efeitos de longo período são representados por correntes de menor intensidade, tem sua contribuição na circulação residual. Podem ser investigados por meio do acoplamento baroclínico tridimensional, desde que sejam levantados dados observacionais de correntes e propriedades termohalinas nas entradas e no interior da região de forma simultânea, juntamente com observações meteorológicas.

Os resultados obtidos na presente tese apontam para a possibilidade da utilização desta metodologia para outras regiões sob influência de efeitos de maré meteorológica, inclusive em regiões onde as fronteiras abertas se estendem na PC.

Os resultados também abrem campo para estudos climatológicos de efeitos de longo prazo dos processos decorrentes de forçantes meteorológicos, abrangendo escalas interanuais, utilizando as informações históricas de simulação do modelo oceânico, no aninhamento de modelo costeiro em simulações de longo período de regiões interiores. Nesse caso o modelo oceânico seria uma fonte de informação de maré meteorológica por meio de reanálise, à semelhança das informações meteorológicas de reanálise que os modelos atmosféricos tem disponibilizado aos usuários, cada vez com uma maior precisão.

Finalmente, recomenda-se considerar os efeitos estudados nessa tese em todas as aplicações que envolvam transporte de substâncias passivas. Modelos de transporte de sedimentos, normalmente acoplados a modelos de propagação de ondas e de transporte litorâneo, podem quantificar a contribuição do transporte residual e simular seus efeitos em longo período.

9. Referências bibliográficas

- ALVES, A.R., 2003, Correntes associadas à propagação de ondas longas. Aplicação ao canal da Baía da Ilha Grande (RJ), Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação, Niterói, RJ, Brasil.
- ARENTZ, M.F.R., 2009, A Modelagem Hidrodinâmica como Auxílio à Navegação no Canal Norte do Estuário do Amazonas. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BARROSO, 2009, 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 de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BELO, W. C.; DIAS, G. T. M., SPERLE, M. 2002, O fundo marinho da baía da Ilha Grande, RJ: o relevo submarino e a sedimentação no canal central. Rev. Bras. Geof. [online], vol. 20, n.1, pp. 5-15.
- BLAYO, EL., DEBREU, L., 2005, Revisiting open boundary conditions from the point of view of characteristic variables, Ocean Modelling 9 (2005) 231–252.
- BLUMBERG, A. F., MELLOR, G. L, 1987, "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*", *N Heaps (ed), Coastal and Estuarine Sciences*, Series 4, A.G.U. pp1-16.
- CALADO, L., GANGOPADHYAY, A., SILVEIRA, I. C. A., 2006, "Feature-Oriented Regional Modeling of the Brazil Current System". In: Ocean Sciences Meeting Proceedings, Honolulu, Havaí, EUA.
- CAMARGO, R., 2009, Palestra ministrada na mesa redonda sobre ondas e marés Aplicações e Previsões, VIII OMAR-SAT – VIII Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite, IEAPM, Arraial do Cabo, RJ, Brasil, novembro de 2009.
- CARVALHO, J..L. B., 2003, Modelagem e análise do lançamento de efluentes através de emissários submarinos, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ,Brasil.
- CASTELAO, R.M., CAMPOS E.J.D., MILLER J.L.,2004, "A Modelling Study of Coastal Upwelling Driven by Wind and Meanders of the Brazil Current", *Journal of Coastal Research*, pp. 20.3 662-671

- CASTRO,B. M., 1985, Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter, Ph.D. dissertation, University of Miami, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, Florida, USA
- CASTRO,B. M., 1996. Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo, tese de livre docência, IOUSP, São Paulo, SP, Brasil.
- CASTRO, B. M., MIRANDA, L.B., 1998." Physical oceanography of the Western Atlantic continental shelf located between 48N and 348S". In: Robinson, A.R., Brink, K.H. (eds.), *The Sea*, vol. 11. John Wiley, New York, pp. 209-251.
- CASTRO, B. M. DE, LORENZZETTI, J. A., SILVEIRA, I. C. A. DA & MIRANDA,
 L. B., 2006. Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São
 Tomé (RJ) e o Chuí (RS), In: Rossi-Wongtschowski,C.L.D.B, Madureira, L.S.P.
 (eds) do livro *O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil.* Capítulo 1, Editora da Universidade de
 São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- CAVALCANTE, S. L. S., ROSMAN, P.C.C. 2007. Simulação da circulação residual na baía de Paranaguá, painel, VII Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite, (VII OMAR-SAT) – Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM, Arraial do Cabo – RJ, Brasil, agosto de 2007.
- CAVALCANTE, S. L. S., ROSMAN, P.C.C. 2008 "Subtidal Response of Ilha Grande Bay (RJ, Brazil) to Continental Shelf Adjacent Dynamics - Preliminary Results", painel, I Seminário de Modelagem Oceanográfica, Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM, Arraial do Cabo – RJ, Brasil, Setembro de 2008.
- CAVALCANTE, S. L. S., ROSMAN, P.C.C. 2009.,"Avaliação da circulação residual no complexo de baías de Ilha Grande e Sepetiba (BIGS) via aninhamento a modelo global oceânico de modelo costeiro primavera de 2003, Exposição.Oral, VIII Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite, (VIII OMAR-SAT) Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira IEAPM, Arraial do Cabo RJ, Brasil, Novembro de 2009.
- CERRONE, B., SANTOS, F., FRAGOSO, M., PELLEGRINI, J.,2008, Modelagem de Material Particulado – Dragagem – Baía de Sepetiba – LLX. Anexo 10 do EIA 2331, PROOCEANO, Rio de Janeiro, RJ.

- CHEN, J., MIKAODA, K.1974: "A Nested Grid Computation for the Barotropic Free Surface Atmosphere".*Monthly Weather Review*, vol. 102 pp. 181:190
- COELHO, A. L., 2008. Resposta da Plataforma Continental Sudeste a ventos sazonais e sinóticos de verão: estudos numéricos. Tese de D.Sc., IOUSP, São Paulo, SP, Brasil.
- CSANADY,G.T., 1984, *Circulation in the Coastal Ocean*. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht,USA.
- CUNHA, C. L. N., ROSMAN. P.C.C., FERREIRA,A.P., MONTEIRO,T.C.N.2006." Hydrodynamics and water quality models applied to Sepetiba Bay" *Continental Shelf Research* 26 (2006) 1940–1953.
- DYER, K. R., 1997, *Estuaries: A physical Introduction*, Second edition, Jonh Wiley & Sons, New York, USA.
- DYKE, P., 2001, *Coastal and Shelf Sea Modelling*,.ed. Kluver Academic Publishers, EUA, 260p.
- FLATHER, R.A. AND DAVIES, A.M., 1975, "The Application of Numerical Models to Storm Surge Prediction". In: Report 16, Institute of Oceanographic Sciences, Bidston Observatory.
- FRAGOSO, M. R., 1999. Estudo numérico da circulação marinha da região das baías de Sepetiba e Ilha Grande (RJ). Dissertação de M.Sc., IOUSP, São Paulo, SP, Brasil.
- FRAGOSO, M. R., 2004. Um Modelo Numérico da Circulação Oceânica para as Bacias Leste e Sudeste do Brasil. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- HARARI, J., 1985. Desenvolvimento de um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional linear, para a simulação e previsão da circulação na plataforma brasileira, entre 23º e 26 º. Boletim do Instituto Oceanográfico, S. Paulo, 33(2):159:191.
- HARARI, J., GORDON, M., 2001. Simulações numéricas da dispersão de substâncias no porto e baía de Santos, sob ação de ventos e marés. *Revista brasileira de recursos hidricos* V.6 n°4 115–131.
- HARARI, J., CAMARGO, R., 2003. "Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24_S 46_W).", *Continental Shelf Research* 23 (2003) 1598 1597–1613.

- HARARI, J., 2009. Palestra ministrada na mesa redonda sobre Circulação Costeira e Estuarina – Aplicações e Previsões no VIII OMAR-SAT – VIII Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite, IEAPM – Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ, Brasil, Novembro de 2009.
- HAIDVOGEL, D.B., BECKMANN, A, 1998: "Numerical Models of the Coastal Ocean". In: Brink, K. H. e Robinson, A. R.(eds), *The Sea*", Volume 10, p 457-482, John Wiley and Sons, Inc.
- HAIDVOGEL, D.B., BECKMANN, A., 1999. "Numerical Ocean Circulation Modeling", In: Series On Environmental Science And Management. v.2, Imperial College Press, Londres, Inglaterra.
- HODUR, R.M., 1996, "The Naval Research Laboratory's Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS), *Monthly Weather Review*, vol. 125 pp.1414-1430.
- LORENZZETTI, J.A., WANG, J.D., 1986, "On the use of wave absorbing layers in the treatment of open boundaries in numerical coastal circulation models", *Applied Mathematical Modelling* 10, pp. 339-345. (apud WANG, 1990).
- MARTINS, F. C., 2008, Influência de Correntes na Plataforma Adjacente na Hidrodinâmica das Baías da Ilha Grande e Sepetiba, RJ- Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MARQUES, D. O., 2004. Circulação e Distribuição dos Sedimentos de Fundo na Baía da Ilha Grande – RJ, Monografia de Bacharelado em Oceanografia da UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MENEZES, D. C., 2007. Contribuições Metodológicas para a Análise de Flutuações Atmosféricas e Oceanográficas de Baixa Freqüência na Costa do Estado do Rio de Janeiro, Dissertação de M.Sc. ,COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MILLER, R.N., 2007, *Numerical Modeling of Ocean Circulation*, Cambridge University Press, UK.
- MIRANDA, L.B., 1982. Análise de massas de água da plataforma continental e região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) à ilha de São Sebastião (SP). Tese de livre-docência, IOUSP, São Paulo, SP, Brasil..
- MOLISANI, M.M., KJERFVE, B., SILVA, A.P., LACERDA, L.D.2006, "Water discharge and sediment load to Sepetiba Bay from an anthropogenically-altered drainage basin, SE Brazil", *Journal of Hydrology*, pp. 331, 425–433

- MÖLLER, O.O., PIOLA, A.R., 2004, Relatório do cruzeiro La Plata de verão, FURG, Rio Grande, RS, Brasil..
- ODDO, N., PINARDI, 2008, "Lateral open boundary conditions for nested limited area models: A scale selective approach" / *Ocean Modelling*, 20: 134–156
- OLIVEIRA, L. A., 1998, Geração de Cartas de Correntes em Recintos Portuários através de Modelagem Computacional. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- OLIVEIRA, F. C. T., 1998, Estudos de Correntes de Maré no Complexo Estuarino da Baía de Paranaguá, PR. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PALMA, E.D., MATANO, R.P., 1998, "On the implementation of passive open boundary conditions for a general circulation model: The barotropic mode", *Journal of Geophysical Research*, pp.103:1319-1341.
- PIOLA, A. R., MÖLLER, O. O., MUELBERT, J. H., 2003, "The Plata winter cruise report", FURG, Rio Grande, RS, Brasil.
- REZENDE, J. H. M. 2003. Intrusões da Água Central do Atlântico Sul na Plataforma Continental Sudeste durante o verão. Tese de D.Sc., IOUSP, São Paulo, SP, Brasil.
- REZENDE, J. H. M., FONTES, R. F. C., SILVA, L. S., 2004, Simulação Numérica da circulação Oceânica Forçada por Ventos Sinópticos na Plataforma Continental Sudeste Brasileira, painel, *II Simpósio Brasileiro de Oceanografia*, IOUSP, São Paulo, SP, Brasil.
- ROBINSON, A. R., LERMUSIAUX, P. F. J., SLOAN III, N. Q., 1998, "Data Assimilation", In: Brink, K. H. e Robinson, A. R, *The Sea*, Volume 10, pp. 541-595, John Wiley and Sons, Inc, USA.
- RODRIGUES, R. R., LORENZZETTI, J. A.,2001, "A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling", *Continental Shelf Research* 21 : 371-394,
- ROLDÃO, J.S.F. 2004, Estudo das Condições Meteo-oceanográficas nas Proximidades da Central Nuclear Alm. Álvaro Alberto (Angra dos Reis). *Relatório Técnico da COPPETEC*– PEC-5331, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROSMAN, P. C. C., 1987. *Modeling shallow water bodies via filtering techniques*. Ph.D. Dissertation, Massachussets Institute of Technology (MIT), USA.

- ROSMAN, P. C. C.,1998, Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Métodos Numéricos em Recursos Hídricos, Volume 3, pp 231-343, Brasil
- ROSMAN, P. C. C., 2007. Referência Técnica do SisBaHiA SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL, Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, , Disponível na internet no site: www.sisbahia.coppe.ufrj.br ,Rio de Janeiro, Brasil.
- ROSMAN, P.C.C, 2004. "Environmental Aspects Concerning Angra 3, RJ Thermal and Morphological Impacts in Praia Brava and Vicinities". *Relatório Técnico da COPPETEC*– PENO-4841, Rio de Janeiro, 39p.
- SERAFIM, C. F. S., 2006. História : ensino fundamental e ensino médio : a importância do do mar na história do Brasil in Coleção Explorando o ensino, Volume 13 ed. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, Brasília, DF
- SIGNORINI, S. R., 1980 (a), "A Study of the circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba Part I: A Survey of the circulation based on experimental field data" *Boletim do Instituto Oceanográfico*, São Paulo, v 29 n°1 p 41-55.
- SIGNORINI, S. R., 1980 (b). "A Study of the circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba, Part II: An assessment to the tidally and wind-driven circulation using a finite element numerical model.", *Boletim do Instituto Oceanográfico*, São Paulo, v 29 n°1 p 57-68.
- SILVA, L. S. 1995. Condições Oceanográficas no Canal de São Sebastião: fevereiro de 1994 a março de 1995. Dissertação de M.Sc., IOUSP, São Paulo, SP, Brasil.
- SILVA, L. S. 2001. Estudo Numérico da Circulação e da Estrutura Termohalina no Canal de São Sebastião. Tese de D.Sc., IOUSP, São Paulo, SP, Brasil.
- SOARES, I., MÖLLER, O., 2001, "Low Frequency currents and water mass spatial distribution on the Sothern Brazilian Shelf", *Continental Shelf Research*, vol.21:pp. 1785-1814.
- VALENTE, M.H. M., MELLO, M. J. O. C., MALUF, V. C., 2001, Caracterização dos parâmetros físicos da costa sudeste brasileira. *Anais Hidrográficos da DHN*, tomo LVIII 95-115.
- WAINER, I., TASCHETO, A. ,2006, Climatologia da região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: Rossi-Wongtschowski,C.L.D.B e Madureira, L.S-P.(eds), *O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região*
Sudeste-Sul do Brasil, Capítulo 2, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

- WANG, J.D., CONNOR, J.J., 1975, "Mathematical modeling of near coastal circulation" *Technical Report 200, R.M. Parsons Laboratory*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- WANG, J. D , 1990, "Numerical Modelling of Bay Circulation". In: Le Mehaute, Bernard, e Daniel M. Hanes (eds), *The Sea*, Vol 9-B, 1033-1066 John Wiley and Sons, Inc, USA.
- XAVIER, A.G. 2002 Análise da Hidrodinâmica da Baía de Todos o Santos (BA), Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- ZAVIALOV, P., MÖLER, O., CAMPOS, E. 2002. "First direct measurements of currents on the continental shelf, of Southern Brazil", *Continental Shelf Research*, vol 22, pp.1975–1986



ANEXO I – Resultados complementares da modelagem numérica

Ilustração 1 - Correntes simuladas no SisBaHiA com prescrição na fronteira aberta do campo de elevações do HYCOM. Baixamares meteorológicas dos dias 05 (acima) e 14/08/2003 (abaixo).





Ilustração 2 Correntes simuladas no SisBaHiA com prescrição na fronteira aberta do campo de elevações do HYCOM. Preamares meteorológicas dos dias 11 (acima) e 18/08/2003 (abaixo). Nota-se na fronteira a leste um efeito de recirculação local causado por interferência da fronteira aberta.

Livros Grátis

(<u>http://www.livrosgratis.com.br</u>)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração Baixar livros de Agronomia Baixar livros de Arquitetura Baixar livros de Artes Baixar livros de Astronomia Baixar livros de Biologia Geral Baixar livros de Ciência da Computação Baixar livros de Ciência da Informação Baixar livros de Ciência Política Baixar livros de Ciências da Saúde Baixar livros de Comunicação Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE Baixar livros de Defesa civil Baixar livros de Direito Baixar livros de Direitos humanos Baixar livros de Economia Baixar livros de Economia Doméstica Baixar livros de Educação Baixar livros de Educação - Trânsito Baixar livros de Educação Física Baixar livros de Engenharia Aeroespacial Baixar livros de Farmácia Baixar livros de Filosofia Baixar livros de Física Baixar livros de Geociências Baixar livros de Geografia Baixar livros de História Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura Baixar livros de Literatura de Cordel Baixar livros de Literatura Infantil Baixar livros de Matemática Baixar livros de Medicina Baixar livros de Medicina Veterinária Baixar livros de Meio Ambiente Baixar livros de Meteorologia Baixar Monografias e TCC Baixar livros Multidisciplinar Baixar livros de Música Baixar livros de Psicologia Baixar livros de Química Baixar livros de Saúde Coletiva Baixar livros de Servico Social Baixar livros de Sociologia Baixar livros de Teologia Baixar livros de Trabalho Baixar livros de Turismo