Daniel Giancolli Ruffato

**Circulação na Plataforma Continental Interna e Média do Estado de São
Paulo durante o verão: estudos numéricos**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Física.

Orientador: Prof. Dr. Belmiro Mendes
de Castro Filho

São Paulo

2011

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

**Circulação na Plataforma Continental Interna e Média do Estado de São
Paulo durante o verão: estudos numéricos**

Daniel Giancolli Ruffato

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Ciências, Programa de Oceanografia Física.

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se tanto na Biblioteca do Instituto Oceanográfico da
Universidade de São Paulo quanto na Biblioteca Digital de Teses e
Dissertações da USP (BDTD).

Julgada em ____/____/____ por

Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

SUMÁRIO

Lista de Figuras	iv
Agradecimentos	xii
Resumo	xiii
Abstract	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 ÁREA DE ESTUDO	3
2.1 Plataforma Continental Sudeste Brasileira	3
2.1.1 Massas de água da PCSE	4
2.1.2 Frentes	5
2.1.3 Forçantes dos movimentos na PCSE	6
2.2 Plataforma Continental do Estado de São Paulo	13
2.2.1 Divisão da PCSP	13
2.2.2 Características gerais	16
2.3 Região de Interesse: Plataforma Continental Interna e Média do Estado de São Paulo	18
2.3.1 Circulação na PCISP e PCMSP	19
2.4 Estudos Numéricos Anteriores	21
3 HIPÓTESE E OBJETIVO	24
4 MATERIAIS E MÉTODO	25
4.1 Dados	25

4.1.1	Temperatura e salinidade	25
4.1.2	Vento	26
4.1.3	Maré	28
4.2	Modelo Numérico	28
4.2.1	Grade numérica	29
4.2.2	Condições de contorno	31
4.2.3	Validação do modelo	35
4.3	Experimentos Numéricos	35
4.3.1	Campos iniciais	35
4.3.2	Configuração do modelo	37
4.3.3	Experimentos	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	Experimento 1	41
5.1.1	Velocidade	43
5.1.2	Nível do mar	47
5.1.3	Temperatura	48
5.1.4	Salinidade	51
5.1.5	Densidade	54
5.2	Experimento 2	57
5.2.1	Velocidade	59
5.2.2	Nível do mar	63
5.2.3	Temperatura	64
5.2.4	Salinidade	67
5.2.5	Densidade	70

5.3 Experimento 3	73
5.3.1 Velocidade	75
5.3.2 Nível do mar	79
5.3.3 Temperatura	80
5.3.4 Salinidade	83
5.3.5 Densidade	86
5.4 Experimento 4	89
5.4.1 Velocidade	91
5.4.2 Nível do mar	95
5.4.3 Temperatura	96
5.4.4 Salinidade	99
5.4.5 Densidade	102
 6 CONCLUSÕES	 110
 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 111

Lista de Figuras

		Pag.
Figura 2.1	Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE) e área oceânica adjacente. Batimetria extraída do conjunto de dados ETOPO 1 (Amante & Eakins, 2008). Figura gentilmente cedida por Mazzini (2010).	4
Figura 2.2	Tensão de cisalhamento de vento (dynes/cm^2) na região oeste do Atlântico Sul, incluindo a PCSE, para os meses de janeiro (verão) e julho (inverno) a partir de dados históricos de Hellerman & Roseinstein, interpolados por Samuels & Cox (1987). Figura adaptada de Castro (1996).	8
Figura 2.3	Representação esquemática das regiões da Plataforma Continental Norte do Estado de São Paulo. A figura superior representa o clima de verão e a inferior, o clima de inverno. Onde, FHS: Frente Halina Superficial; FTP Frente Térmica Profunda; PCI: Plataforma Continental Interna; PCM: Plataforma Continental Média; PCE: Plataforma Continental Externa; QPC: Quebra da Plataforma Continental; CB: Corrente do Brasil. As profundidades estão expressas em metros e as distâncias em quilômetros (Castro, 1996).	15
Figura 2.4	Batimetria da área de estudo - Plataforma Continental do Estado de São Paulo - e as divisões das suas porções para o período de verão, indicadas pelas isóbatas de 30 e 80 metros e o limite de 180 m. Onde, PCISP: Plataforma Continental Interna do Estado de São Paulo; PCMSP: Plataforma Continental Média do Estado de São Paulo; e PCESP: Plataforma Continental Externa do Estado de São Paulo.	16
Figura 2.5	Região de interesse: Plataforma Continental Interna do Estado de São Paulo (PCISP) e Plataforma Continental Média do Estado de São Paulo (PCMSP). As isolinhas em branco indicam as isóbatas de 10 m, 20 m, 40 m, 50 m, 60 m, 70 m e 90 m, e as isolinhas em preto, as isóbatas de 30 m e 80 m, indicam os limites da PCISP e da PCMSP, respectivamente.	18
Figura 4.1	Tensão de cisalhamento (Pa) do vento climatológico no período de verão, utilizado nas simulações envolvendo a	27

forçante do vento. As linhas vermelhas indicam as isóbatas de 50 m, 200 m e 1000 m.

Figura 4.2	Domínio da grade numérica utilizada com a indicação das isóbatas de 20 m, 50 m, 100 m, 200 m, 500 m, 1000 m e 1900 m.	31
Figura 5.1	Área de estudo com a posição das radiais S1, S2 e S3 e as isóbatas de 30 m e 80 m.	38
Figura 5.2	Seções verticais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade e densidade convencional (kg/m^3) da estrutura termohalina utilizada na inicialização dos experimentos. Temperatura em Cananéia, Mongaguá e Ubatuba (A, B e C, respectivamente); salinidade em Cananéia, Mongaguá e Ubatuba (D, E e F); e densidade em Cananéia, Mongaguá e Ubatuba (G, H e I, respectivamente).	39
Figura 5.3	Energia cinética (m^2/s^2) do domínio do modelo numérico para os quatro experimentos realizados. Experimento 1: TS (curva preta); Experimento 2: TS + MARÉ (curva azul); Experimento 3: TS + VENTO (curva vermelha); e Experimento 4: TS + MARÉ + VENTO (curva verde).	40
Figura 5.4	Elevação da superfície do mar (m) (A) e correntes de maré (m/s) (B) às 12h do dia 12/01/2009.	40
Figura 5.5	Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	43
Figura 5.6	Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	44
Figura 5.7	Seções verticais das componentes de velocidade (m/s) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009. Componente u da velocidade da radial Cananéia (A), componente v da velocidade da radial Cananéia (B), componente u da velocidade da radial Mongaguá (C), componente v da velocidade da radial Mongaguá (D), componente u da velocidade da radial Ubatuba (E), componente u da velocidade da radial	45

Ubatuba (F).

Figura 5.8	Circulação verticalmente integrada (m/s), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 1. As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	46
Figura 5.9	Seção horizontal de elevação do nível médio do mar (m), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 1.	47
Figura 5.10	Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	48
Figura 5.11	Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	49
Figura 5.12	Seções verticais de temperatura (°C) do Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).	50
Figura 5.13	Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	51
Figura 5.14	Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	52
Figura 5.15	Seções verticais de salinidade do Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).	53
Figura 5.16	Seções horizontais de densidade convencional (kg/m ³) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	54
Figura 5.17	Seções horizontais de densidade convencional (kg/m ³) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	55
Figura 5.18	Seções verticais de densidade convencional (kg/m ³) do Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia	56

12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

Figura 5.19	Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	59
Figura 5.20	Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	60
Figura 5.21	Seções verticais das componentes de velocidade (m/s) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009. Componente u da velocidade da radial Cananéia (A), componente v da velocidade da radial Cananéia (B), componente u da velocidade da radial Mongaguá (C), componente v da velocidade da radial Mongaguá (D), componente u da velocidade da radial Ubatuba (E), componente u da velocidade da radial Ubatuba (F).	61
Figura 5.22	Circulação verticalmente integrada (m/s), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 2. As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	62
Figura 5.23	Seção horizontal de elevação do nível médio do mar (m), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 2.	63
Figura 5.24	Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	64
Figura 5.25	Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	65
Figura 5.26	Seções verticais de temperatura (°C) do Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).	66
Figura 5.27	Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m	67

(A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Figura 5.28	Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	68
Figura 5.29	Seções verticais de salinidade do Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).	69
Figura 5.30	Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	70
Figura 5.31	Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	71
Figura 5.32	Seções verticais de densidade convencional (kg/m^3) do Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).	72
Figura 5.33	Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	75
Figura 5.34	Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	76
Figura 5.35	Seções verticais das componentes de velocidade (m/s) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009. Componente u da velocidade da radial Cananéia (A), componente v da velocidade da radial Cananéia (B), componente u da velocidade da radial Mongaguá (C), componente v da velocidade da radial Mongaguá (D), componente u da velocidade da radial Ubatuba (E), componente v da velocidade da radial Ubatuba (F).	77
Figura 5.36	Circulação verticalmente integrada (m/s), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 3. As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m,	78

50 m e 80 m.

Figura 5.37	Seção horizontal de elevação do nível médio do mar (m), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 3.	79
Figura 5.38	Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	80
Figura 5.39	Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	81
Figura 5.40	Seções verticais de temperatura (°C) do Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).	82
Figura 5.41	Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	83
Figura 5.42	Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	84
Figura 5.43	Seções verticais de salinidade do Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).	85
Figura 5.44	Seções horizontais de densidade convencional (kg/m ³) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	86
Figura 5.45	Seções horizontais de densidade convencional (kg/m ³) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	87
Figura 5.46	Seções verticais de densidade convencional (kg/m ³) do Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).	88
Figura 5.47	Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A),	91

10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

Figura 5.48	Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	92
Figura 5.49	Seções verticais das componentes de velocidade (m/s) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009. Componente u da velocidade da radial Cananéia (A), componente v da velocidade da radial Cananéia (B), componente u da velocidade da radial Mongaguá (C), componente v da velocidade da radial Mongaguá (D), componente u da velocidade da radial Ubatuba (E), componente u da velocidade da radial Ubatuba (F).	93
Figura 5.50	Circulação verticalmente integrada (m/s), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 4. As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.	94
Figura 5.51	Seção horizontal de elevação do nível médio do mar (m), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 4.	95
Figura 5.52	Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	96
Figura 5.53	Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	97
Figura 5.54	Seções verticais de temperatura (°C) do Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).	98
Figura 5.55	Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).	99
Figura 5.56	Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).	100

- Figura 5.57 Seções verticais de salinidade do Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C). 101
- Figura 5.58 Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D). 102
- Figura 5.59 Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B). 103
- Figura 5.60 Seções verticais de densidade (kg/m^3) do Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C). 104

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos,

Ao meu orientador, Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho, pela orientação e pelos ensinamentos ao longo do mestrado.

Ao Dr. José Helvécio Moraes de Rezende pelo fornecimento dos dados da estrutura termohalina e da batimetria da área de estudo.

Ao Thiago Marques Coelho pelo grande apoio no desenvolvimento deste projeto.

Aos alunos, professores e funcionários do IOUSP, grandes parceiros nessa jornada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo concedida.

À minha Família.

Obrigado.

Resumo

Este trabalho teve por finalidade simular a hidrodinâmica da Plataforma Continental Interna do Estado de São Paulo (PCISP) e da Plataforma Continental Média do Estado de São Paulo (PCMSP) no período de verão, em resposta às forçantes do gradiente de densidade, do vento climatológico e das marés, através da implementação do modelo numérico hidrodinâmico tridimensional Regional Ocean Modeling System (ROMS). Os experimentos realizados mostraram que os efeitos da distribuição de densidade sobre o comportamento geral da circulação na PCISP e PCMSP são secundários quando comparados à circulação induzida pela tensão de cisalhamento do vento. Os resultados apontam que na PCISP e na PCMSP a componente de velocidade paralela à costa é dominada por forçantes de frequência subinercial, como o vento climatológico e o gradiente de densidade, enquanto que a componente normal, na direção normal à costa, é fortemente influenciada pela forçante de maré.

Abstract

The aim of this study was simulate the hydrodynamic of the Inner Continental Shelf of the State of São Paulo (PCISP) and of the Mid Continental Shelf of the State of São Paulo (PCMSP) during summer, in response to the density gradient forcing, to the climatological wind shear stress forcing and to the tide forcing, applying the tridimensional hydrodynamic numeric model Regional Ocean Modeling System (ROMS). The experiments performed showed the effects of the density distribution over the general circulation behavior in the PCISP and PCMSP are secondary compared with the induced climatological wind shear stress circulation. The results indicate that in the PCISP and in the PCMSP the component velocity parallel to the coast is dominated by subinertial frequencies forcing, as the climatological wind and the density gradient, while the component velocity perpendicular to the coast is strongly influenced by the tide forcing.

1 INTRODUÇÃO

A região costeira paulista tem sido objeto das mais diversas formas de atividade antrópica, tais como exploração pesqueira, tráfego marítimo, obras costeiras e oceânicas, turismo, indústria e, ainda, o desenvolvimento de grandes núcleos populacionais. Além da descarga de efluentes industriais e domésticos, lançados *in natura* através de uma rede de emissários submarinos e outros pontos de lançamento, o Complexo Estuarino de Santos-São Vicente ainda recebe a descarga de efluentes decorrentes das atividades portuárias. O Porto de Santos, localizado no Sistema Estuarino de Santos, é o maior porto do Brasil em volume de carga. Nas últimas décadas, a região portuária estuarina tem requerido dragagens do canal, tanto em função de processos de assoreamento, gerados pela ocupação humana e degeneração da vegetação das encostas da Serra do Mar decorrentes da poluição atmosférica, como pelo aumento do calado das embarcações. Estas dragagens, por sua vez, geram sérios problemas ambientais, devido à ressuspensão de sedimento e redistribuição de material poluente depositado no fundo. Assim, evidencia-se que o aporte de poluentes realizado em estuário e região costeira pode acarretar uma influência marcante sobre o ecossistema da plataforma continental adjacente.

Deve-se lembrar, ainda, a presença do Porto de São Sebastião, em processo de expansão, e do Terminal Marítimo Almirante Barroso (TEBAR), da PETROBRAS, ambos situados no Canal de São Sebastião. O TEBAR é o maior terminal de óleo da PETROBRAS. Assim, praticamente toda a plataforma continental interna do Estado de São Paulo está imersa em regiões onde as atividades industriais e comerciais costeiras e *off-shore* desenvolvem-se intensamente.

O transporte e a dispersão de substâncias e materiais presentes no ambiente marinho são primordialmente um reflexo do comportamento hidrodinâmico marinho, mais especificamente, das correntes marinhas. Desta

maneira, conhecimentos sobre a dinâmica do ambiente, através de medições e simulações das correntes marinhas, são de fundamental importância para estudos voltados à preservação dos ecossistemas e para o monitoramento ambiental. Além disso, conhecimentos detalhados sobre as correntes podem facilitar atividades de salvatagem, descontaminação e de combate a danos ambientais.

Em estudos e projetos envolvendo corpos de água naturais, bem como em aplicações visando à gestão e ao gerenciamento ambiental, a utilização de modelos numéricos é cada vez mais presente. Esses modelos permitem integrar informações espacialmente dispersas, interpolar informações para regiões nas quais não há medições, ajudar a interpretação de medições feitas em estações pontuais, propiciar entendimento da dinâmica de processos e prever situações simulando cenários.

Este trabalho tem a finalidade de estudar a hidrodinâmica da Plataforma Continental Interna do Estado de São Paulo (PCISP) e da Plataforma Continental Média da mesma região (PCMSP), durante o verão, em resposta à atuação da forçante baroclínica, mais intensa no período de verão, gerada por gradientes de densidade devido à drenagem continental e às descargas estuarinas, da forçante do vento, que induz a formação do jato costeiro e das marés. Desta forma, foram realizados quatro experimentos utilizando modelagem numérica que consideram a atuação e relevância de cada uma dessas forçantes atuando de forma isolada e em conjunto.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Plataforma Continental Sudeste Brasileira

A Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE) que se estende ao longo do Embaiamento de São Paulo, desde Cabo de São Tomé (40°58'W 21°59'S), no Rio de Janeiro, até o Cabo de Santa Marta (48°48'W 28°36'S), em Santa Catarina, possui características típicas de PC de regiões de latitudes médias.

A parte mais larga da PCSE, com 230 km, está localizada em frente a Santos, e as partes mais estreitas nas proximidades de Cabo Frio, com 50 km, e Cabo de Santa Marta, com 70 km. Seu comprimento é de aproximadamente 1100 km e com exceção de algumas poucas ilhas grandes, geralmente situadas próximas à costa, como a Ilha Grande, a Ilha de São Sebastião, a Ilha de São Francisco e a Ilha de Santa Catarina, e de muitas pequenas ilhas, situadas geralmente no interior de baías, a topografia da PCSE é suave, com as isóbatas dispendo-se paralelamente à linha de costa. A profundidade de quebra da plataforma continental varia entre 120 e 180 metros, e a área total da PCSE é de cerca de 150.000 km² (Zembrusky, 1979). Considerando uma profundidade média de 70 metros, Castro (1996) estimou, em primeira aproximação, o volume da PCSE com cerca de 10.000 km³.

Baseados em sua morfologia, podemos subdividir a área em duas partes: uma porção ao extremo norte da plataforma, Região de Campos, indo de Arraial do Cabo até Cabo de São Tomé, com orientação da linha de costa SW-NE, largura da PC variando entre 70 km e 100 km e apresentando as menores profundidades na quebra da plataforma (80 m a 100 m); e a porção ao sul de Cabo Frio, cuja linha de costa e as isóbatas mudam abruptamente de direção, orientando-se zonalmente (E-W), com considerável aumento na profundidade da quebra de plataforma (140 m a 180 m) e na largura da plataforma (70 km a 150 km).

Figura 2.1: Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE) e área oceânica adjacente. Batimetria extraída do conjunto de dados ETOPO 1 (Amante & Eakins, 2008). Figura gentilmente cedida por Mazzini (2010).

2.1.1 Massas de água da PCSE

Conforme estabelecido por Emilsson (1961), e mais tarde detalhado por vários outros autores, segundo Miranda (1982), as massas de água presentes na PCSE, talude e região oceânica adjacente são resultado da mistura entre:

- Água Costeira (AC): resultante da mistura da descarga continental de água com as águas da plataforma continental, apresenta a menor salinidade das águas da PCSE;
- Água Tropical (AT): quente e salina ($T > 20^{\circ}\text{C}$ e $S > 36,40$) transportada para o S-SW na camada superficial (0-200 m) da Corrente do Brasil

(CB), sobre o talude continental, nas proximidades da quebra da plataforma continental;

- Água Central do Atlântico Sul (ACAS): relativamente fria ($T < 20^{\circ} \text{C}$ e $S < 36,40$) transportada também para S-SW ao longo do talude na camada inferior da CB (200-500 m), próxima à quebra da plataforma continental.

A intrusão da ACAS na camada profunda da PCSE em direção à costa, durante o verão, favorece a interação entre essas três massas de água. Em contrapartida, sua retração em direção ao largo, no inverno, contribui para um padrão bimodal de mistura - AT+AC e AT+ACAS - que proporciona uma extensão da área de atuação e influência da AC a partir da costa, bem como a ocorrência de intrusões subsuperficiais da AT, do largo para a costa (Castro *et al.*, 1987).

2.1.2 Frentes

Castro (1996) identificou duas frentes na PCSE: a Frente Térmica Profunda (FTP), que separa as porções interna e média da PCSE, e a Frente Halina Superficial (FHS), que separa as regiões média e externa da mesma plataforma. Durante o inverno é difícil individualizar as duas regiões mais internas devido à pequena distância existente entre a FTP e a FHS.

A FTP está associada a intrusões em direção à costa da ACAS, transportada pela Corrente do Brasil (CB) nas proximidades do talude entre os níveis de 200 m e 500 m, aproximadamente. Uma fração dessa coluna penetra em direção à costa sobre a plataforma continental (Miranda, 1982). A FTP é formada na região que separa a água relativamente fria, identificada como ACAS, da água mais quente característica das zonas mais internas da plataforma. Consequentemente, a FTP separa, na camada profunda, águas de origem costeira de águas com origem oceânica. A FTP, na verdade, nada mais é do que a interseção da termoclina com o fundo, segundo Castro (1996).

A FHS é uma frente de quebra de plataforma continental. Duas massas de água de origens diferentes são nitidamente separadas pela FHS. Do lado interno da frente situam-se águas com influência da AC; do lado externo ocorre o predomínio da água transportada superficialmente pela Corrente do Brasil, a AT. Assim, à grosso modo, a FHS separa, na camada superficial, águas costeiras de águas oceânicas. Similarmente à FTP, a posição da FHS é dependente das intrusões da CB em direção à costa. Neste caso, porém, a água que invade a PC é a AT, ocupando a camada superficial da PCE.

2.1.3 Forçantes dos movimentos na PCSE

Conforme Castro (1996), “Os movimentos na maior parte da PCSE são forçados, em diferentes escalas de tempo, principalmente pelos ventos, pela ação da Corrente do Brasil e pelas marés. As forçantes dos movimentos podem ser divididas entre as que atuam diretamente sobre a PC (vento e variações espaciais e temporais de densidade) e as que são comunicadas desde o talude através da quebra da plataforma, como as marés, gradiente de pressão e trocas de massa.”

I. Forçantes meteorológicas

Uma característica marcante da dinâmica das plataformas continentais, principalmente das plataformas largas, é a resposta de suas águas à ação do vento. A circulação resultante depende da combinação entre a largura, estrutura termohalina e topografia com a intensidade, direção e persistência do vento. As características sazonais e sinóticas do campo de ventos mostram-se importantes para forçar movimentos, podendo as correntes geradas revelarem-se as mais energéticas da plataforma. Essas correntes na PCSE são, em geral, paralelas às isóbatas, para manter o balanço geostrófico na direção perpendicular à topografia (Castro, 1996 ; Castro & Miranda, 1998).

Dois sistemas meteorológicos principais condicionam a dinâmica das correntes na PCSE: a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e os Sistemas Meteorológicos Frontais (SMFs).

A ASAS é um sistema anti-ciclônico, de alta pressão, que apresenta temperatura e umidade relativamente altas. A configuração das linhas isobáricas da ASAS varia, inclusive sazonalmente (da Silva *et al.*, 1994). Segundo Castro (1996), a direção predominante dos ventos no verão é NE, mesma direção da linha de costa da região, na área costeira localizada entre 15°S e 25°S. Durante o inverno a banda de vento de E-NE fica restrita à latitudes de 20°S e 25°S, regiões ao sul dessas latitudes são forçadas por ventos de SW seguindo a continuação do giro ciclônico (Figura 2.2).

O outro sistema, em escala sinótica, os SMFs, ou frentes frias, são sistemas ciclônicos, de baixa pressão, que têm sua gênese associada ao desenvolvimento de ondas baroclínicas presentes nos ventos predominantes de oeste existentes no Oceano Pacífico Sul, entre 50°S e 60°S (Castro, 1996). Esses sistemas são responsáveis pela geração de ventos de direção predominantemente SW-NE, contrário ao padrão de vento médio da região.

Nos meses de verão, entre o norte e a parte central do domínio, os ventos médios sopram predominantemente de NE, a partir de onde giram, progressivamente e suavemente para ventos de E. Essa tendência mostra-se mais evidente na região da plataforma continental.

Nos meses de inverno, os ventos médios mudam de direção, mais abruptamente, ao longo do domínio, de NE para SE, ao mesmo tempo em que sua intensidade é reduzida, de maneira mais efetiva do que nos meses de verão, de forma que, enquanto a região norte da plataforma continental é submetida a ventos médios de NE, sua contraparte sul é forçada por ventos de SE, ainda que de menor intensidade.

Na escala sinótica, os sistemas frontais exercem marcante influência sobre a região. Esses sistemas apresentam deslocamento preferencial de SW para NE, ocorrendo ao longo do ano de 3 a 6 passagens pela região por mês, resultando em escalas de tempo entre 5 a 10 dias (Castro, 1996). A atuação efetiva desses sistemas ao longo de toda a extensão da PCSE se faz mais presente no inverno.

Figura 2.2: Tensão de cisalhamento de vento (dynas/cm^2) na região oeste do Atlântico Sul, incluindo a PCSE, para os meses de janeiro (verão) e julho (inverno) a partir de dados históricos de Hellerman & Roseinstein, interpolados por Samuels & Cox (1987). Figura adaptada de Castro (1996).

II. Corrente do Brasil

Segundo Castro (1996) “A Corrente do Brasil (CB), presente na parte mais externa da PCSE, domina com o seu momento a dinâmica da região. Sua formação dá-se basicamente a partir do ramo mais setentrional da Corrente Sul

Equatorial, o qual gira anticyclonicamente para o sul próximo a 10°S, alimentando o início da CB com cerca de 4 Sv (1 Sv = 106 m³/s) (Peterson & Stramma, 1990). Esse transporte relativamente pequeno quando comparado com outras correntes de limite oeste, flui para sudoeste, acompanhando a linha de quebra da plataforma continental, como uma corrente superficial rasa. O pequeno transporte de volume da CB fica evidente entre 12°S e 20°S, onde a maioria das estimativas para estações mais profundas que 200 m estão próximas a 5 Sv. Resultados de Miranda & Castro (1982) indicam transporte de 6,5 Sv através do paralelo 19°S, ao largo da isóbata de 200 m. Esses valores podem, porém, estar subestimados, pois conforme Stramma *et al.* (1990), ao sul de 15°S parte substancial do transporte da CB pode ocorrer na própria plataforma continental, em profundidades menores do que 200 m, devido ao alargamento desta última. Através de medições acústicas nas proximidades de Cabo Frio, Evans & Signorini (1985) obtiveram evidências de que cerca da metade do transporte de 11 Sv da CB ocorria na parte externa da plataforma continental localizada a oeste da isóbata de 200 m.”

Ainda segundo Castro (1996): “Imediatamente ao sul de Cabo Frio, no extremo norte da PCSE, a orientação da linha de costa muda abruptamente de NE-SW para E-W. A conservação da vorticidade potencial, então, força a CB a girar ciclonicamente para oeste, aproximando-se novamente da quebra da plataforma continental nas proximidades do paralelo de 24°S. Esse giro ciclônico pode ser observado nos dados hidrográficos de Signorini (1978), e em mapas termais de superfície obtidos a partir de sensores infravermelhos instalados em satélites (Lorenzzetti, 1994). A rotação da CB, em busca da região de transição entre a plataforma e o talude continentais, foi também modelada por Cirano & Campos (1996). Após penetrar na plataforma continental, cruzando as isóbatas quase perpendiculares, a CB gira anticyclonicamente para sudoeste, meandrando ao longo da margem interna do talude continental.”

Castro (1996) diz que: “Medições hidrográficas recentes na região situada entre aproximadamente 23°S e 24°S permitiram, através do cálculo

dinâmico, estimativas do transporte da CB de cerca de 7,3 Sv (Campos *et al.*, 1995). Cálculos anteriores mostraram transporte de cerca de 10 Sv nas proximidades da isóbata de 100 m (Stramma, 1989). Entre 24°S e 27°S, estimativas também recentes conduziram a valores de 7-8 Sv para o transporte da CB, sendo que cerca de 1/10 do mesmo ocorre sobre a plataforma continental (Gonçalves, 1993)."

III. Maré

Segundo Castro (1996): "As marés representam a resposta do oceano às forçantes gravitacionais astronômicas. Em plataformas continentais largas, entretanto, as oscilações do nível do mar e as correntes nas frequências astronômicas das marés, apresentam-se, em geral, como co-oscilações com o oceano profundo. Isto é, a maior parte da energia fica com as ondas excitadas na região costeira pelas oscilações globais do oceano profundo, sendo a comunicação estabelecida através do talude e da quebra da plataforma continental."

Oscilações na faixa de frequência de maré, ao longo da PCSE, tem sido estudadas há algum tempo. Mesquita & Harari (1983) apresentaram uma descrição das marés em Cananéia e em Ubatuba, baseando-se em um ano de valores horários do nível do mar. Entre as constituintes diurnas foram dominantes em Cananéia e Ubatuba, respectivamente, O_1 (0,110 e 0,109 m) e K_1 (0,065 e 0,059 m). Entre as constituintes semi-diurnas: M_2 (0,366 e 0,297 m) e S_2 (0,237 e 0,171 m). Todas essas constituintes apresentaram rotação anti-ciclônica, com exceção de O_1 .

Segundo Castro (1996): "Na PCSE, a constituinte M_2 da maré é a dominante nas oscilações do nível do mar, seguida pelas constituintes S_2 , O_1 e K_1 (Mesquita & Harari, 1983 ; Mesquita & Harari, 1987)". Segundo Castro (1996), no extremo norte da PCSE, as amplitudes na região do talude são da ordem de 0,3 m, continuando a decrescer até a área ao largo de Santa Marta, onde atingem apenas 0,1 m". Na plataforma continental externa, as

constituintes M_2 e S_2 também são dominantes nas oscilações do nível do mar (Mesquita & Harari, 1987).

Ainda segundo Castro (1996), existe ainda uma convergência de fase em direção às áreas centrais da PCSE. Assim, aparentemente, a onda da constituinte M_2 penetra na PCSE à partir de suas extremidades norte e sul, como duas ondas, uma propagando-se para SW, desde Cabo Frio, e a outra se propagando para NE, desde cerca de 27°S . Essas ondas com velocidades de fase opostas encontram-se nas proximidades de Santos (Harari & Camargo, 1994).

Correntes de maré

Alves (1992) em seu estudo na plataforma continental ao largo de Ubatuba, segundo Castro (1996) “observou que para as correntes paralelas à topografia, as correntes subinerciais são dominantes, contribuindo com cerca de 80% da variância. Para as componentes de corrente normais à topografia, por outro lado, aumenta significativamente a energia das correntes de maré: em todas as profundidades as correntes de maré normais à costa contribuíram com cerca de 40-50% da variância total. O autor observou que o comportamento das componentes M_2 e S_2 foi predominantemente barotrópico. As correntes das componentes O_1 e K_1 exibiram comportamento essencialmente baroclínico. A contribuição energética relativa das constituintes diurnas e semi-diurnas foi dependente da distância à costa e da profundidade. Próximo à costa e à superfície, a contribuição das constituintes semi-diurnas tornou-se mais importante. Para a posição mais afastada da costa, a contribuição relativa da energia das constituintes semi-diurnas tornou-se mais importante, essa importância aumenta com a profundidade. As oscilações do nível do mar medidas na costa e as correntes de maré das constituintes semi-diurnas apresentaram alto grau de coerência. A diferença de fase entre os movimentos manteve-se constante ao longo da coluna de água. O autor constatou também que os parâmetros descritores das elipses de corrente das

constituintes semi-diurnas dependiam da distância à costa. Variações sazonais importantes foram observadas apenas para as correntes das constituintes diurnas O_1 e K_1 . As elipses para as constituintes semi-diurnas foram sempre altamente polarizadas na direção normal à costa, tanto no fundeio de 40 m quanto no fundeio a 70 m, e em qualquer profundidade.”

Na região de estudo, Pereira & Castro (2007) observaram marés internas semi-diurnas nas proximidades da quebra da plataforma continental, com isotermas em meia profundidade oscilando com amplitudes de 30 m no verão e 20 m no inverno, e com periodicidade de aproximadamente 12 h. As velocidades mostraram uma inversão de fase entre a porção superior e a inferior da coluna da água, bem como boa correlação com a variabilidade temporal das isotermas. Pereira *et al.* (2006a, 2006b) através de resultados de modelos numéricos verificou o impacto da Corrente do Brasil nas correntes de maré baroclínica e na atividade de marés internas. A interação com a CB reduz a intensidade das correntes de maré interna, principalmente sobre a plataforma e talude superior.

Ruffato (2007) estudou correntes de maré barotrópica e baroclínica na porção norte da PCSE e quebra do talude continental, mais especificamente na região compreendida entre Ubatuba (SP) e Cabo Frio (RJ), utilizando dados observados do período de inverno dos anos de 2002 e 2003. O autor verificou que as componentes de maré mais energéticas foram, em ordem decrescente: M_2 , S_2 , K_1 , O_1 e M_3 . A velocidade máxima para a componente M_2 foi de 5 cm/s, e a circulação predominantemente anti-horária. Foram observadas correntes de maré interna das componentes diurnas, K_1 e O_1 com 3 cm/s; semi-diurnas, M_2 e S_2 com 8 cm/s e 3 cm/s respectivamente; e terdiurna, M_3 , relativamente menor.

2.2 Plataforma Continental do Estado de São Paulo

A Plataforma Continental do Estado de São Paulo (PCSP) está compreendida entre a Ponta da Joatinga ($44^{\circ}30'W$ $23^{\circ}18'S$) e a Ilha do Cardoso ($47^{\circ}57'W$ $25^{\circ}09'S$).

2.2.1 Divisão da PCSP

Utilizando o conceito de Frentes, definido no item 2.1.2 deste documento, Castro (1996) propôs a divisão da PCSP em três regiões: Interna, Média e Externa.

- Conforme Castro (1996) “Plataforma Continental Interna do Estado de São Paulo (PCISP): localiza-se entre a costa e a FTP. A largura da PCISP varia temporalmente, principalmente em escala sazonal: é mais estreita durante o verão, ficando entre 10-30 km, e mais larga durante o inverno, quando chega a atingir 40-80 km. Na estação quente o limite externo da PCISP situa-se entre as isóbatas de 20 m e de 40 m, e na estação fria entre aquelas de 50 m e 70 m.” A principal característica da PCISP é apresentar, durante todo o ano, influência das águas de baixa salinidade provenientes das descargas estuarinas. Assim, segundo Castro (1996) durante o verão, as temperaturas são maiores do que $21,0^{\circ}C$, sendo em geral maiores do que $22,0^{\circ}C$ e atingindo máximos de $27,0-28,0^{\circ}C$. As salinidades variam em geral entre 34,4 e 35,4. Durante o inverno, por outro lado, as temperaturas na PCISP são menores do que $23,0^{\circ}C$, em geral menores do que $22,0^{\circ}C$, atingindo mínimos de $19,0-20,0^{\circ}C$. Nessa última época do ano as salinidades variam bastante: foram observados máximos de 35,8 e mínimos de 33,4. Entretanto, salinidades menores do que 34,0 foram observadas apenas no inverno. Assim, ainda segundo Castro (1996), “durante o verão as águas da PCISP são em geral mais quentes, mais salinas e menos densas do que durante o inverno. Pode ser assumido, como valor limite típico para a temperatura, $22,0^{\circ}C$. Durante o verão, em geral, as temperaturas excedem esse valor, enquanto que, durante o inverno, ficam abaixo do mesmo.”

- Segundo Castro (1996) a “Plataforma Continental Média do Estado de São Paulo (PCMSP): localizada entre a FTP e a FHS, a PCMSP aparece de forma nítida no verão. Durante o inverno essa região da plataforma continental colapsa para dimensões muito reduzidas. Durante a estação em que está mais ativa, a PCMSP estende-se desde 10-30 km da costa até distâncias de aproximadamente 60-80 km, estando os seus limites interno e externo situados entre as isóbatas de 20-40 m e 70-90 m, respectivamente. No inverno a PCMSP ocupa uma faixa delgada, às vezes quase inexistente, compreendida grosseiramente entre 40-60 km e 60-80 km de distância da costa. A característica física básica da PCMSP é a alta estratificação, devida à presença de aguda termoclina sazonal. As temperaturas em geral ficam próximas a 22,0-24,0° C na superfície e 14,0-15,0° C no fundo, enquanto que a água de termoclina possui temperaturas compreendidas entre 18,0-22,0° C. As salinidades superficial e de fundo são de cerca de 35,0-35,4 e 35,6-35,8, respectivamente.”

- Segundo Castro (1996) a “Plataforma Continental Externa do Estado de São Paulo (PCESP): prolonga-se desde a FHS, ou do limite externo da PCMSP, até a quebra da plataforma continental. Em geral o limite interno da PCESP fica situado a distâncias da costa de 60-80 km, entre as isóbatas de 70 m e 90 m. A PCESP também apresenta estratificação vertical acentuada, embora a termoclina seja um pouco mais difusa do que na PCMSP durante o verão. Outra característica marcante da PCESP é a pequena variação sazonal das propriedades físicas. A temperatura e a salinidade superficial ficam próximas de 24,0° C e de 36,2, respectivamente, durante o verão, e de 22,0° C e 35,6 durante o inverno. Nas proximidades do fundo os valores permanecem muito próximos de 14,0° C e 35,4, respectivamente, durante todo o ano. A água de termoclina, observada na PCMSP durante os meses quentes, está sempre presente na PCESP.”

Rezende (2003) através de simulações prognósticas com o modelo POM, estudou a penetração da ACAS na PCSE durante o verão, concluindo que a divisão da porção norte da PCSP em PCI, PCM e PCE, realizada por Castro (1996), estende-se a toda zona da PCSE.

Figura 2.3: Representação esquemática das regiões da Plataforma Continental Norte do Estado de São Paulo. A figura superior representa o clima de verão e a inferior, o clima de inverno. Onde, FHS: Frente Halina Superficial; FTP Frente Térmica Profunda; PCI: Plataforma Continental Interna; PCM: Plataforma Continental Média; PCE: Plataforma Continental Externa; QPC: Quebra da Plataforma Continental; CB: Corrente do Brasil. As profundidades estão expressas em metros e as distâncias em quilômetros (Castro, 1996).

Considerando as características da estrutura termohalina para a divisão das porções da PCSP descritas no item 2.2.1, em conjunto com a análise do

campo termohalino climatológico utilizado neste estudo, foram definidos os limites da PCISP, PCMSP e PCESP para o período de verão em função da batimetria, indicados pelas isóbatas na cor preta e o limite de 180 m na Figura 2.4.

Figura 2.4: Batimetria da área de estudo - Plataforma Continental do Estado de São Paulo - e as divisões das suas porções para o período de verão, indicadas pelas isóbatas de 30 e 80 metros e o limite de 180 m. Onde, PCISP: Plataforma Continental Interna do Estado de São Paulo; PCMSP: Plataforma Continental Média do Estado de São Paulo; e PCESP: Plataforma Continental Externa do Estado de São Paulo.

2.2.2 Características gerais

Dottori (2001) e Dottori & Castro (2009) analisaram dados hidrográficos observados e de modelagem numérica hidrodinâmica que apontam uma plataforma continental com caráter essencialmente barotrópico, tanto para valores típicos de verão quanto para os valores típicos de inverno. A dinâmica

na área é amplamente dominada pela componente de vento paralela à costa, associada à forçante meteorológica, que força velocidades de corrente entre 0,1-0,2 m/s, em resposta a ventos entre 8-11 m/s, e velocidades perpendiculares relativamente menores. O primeiro modo barotrópico aumenta sua contribuição no meio da coluna de água enquanto no fundo domina o primeiro modo baroclínico.

Castro & Lee (1995) ao analisarem a variabilidade do nível do mar na PCSE forçada pelo vento, verificaram que próximo a Cananéia ocorrem as maiores amplitudes de variação. Velocidades para a Onda de Plataforma gerada pelos sistemas meteorológicos frontais foram determinadas em Arvoredo, Cananéia, Santos e Ubatuba variando entre 6m/s e 10 m/s. As perturbações atmosféricas na faixa de 9-12 dias propagam-se com velocidades de 12-14 m/s. A semelhança dessas velocidades com aquelas de Ondas de Plataforma Continental (OPC) levou os autores a sugerirem que poderia haver um mecanismo de ressonância entre a forçante (perturbação causada pelo vento) e a resposta (Onda de Plataforma) causando as maiores amplitudes em Cananéia. Dottori (2001) analisou dados observados e modelados no nível do mar e na quebra da PC que mostraram que a propagação das oscilações subinerciais tem características típicas de OPC, com amplitudes na costa muito maiores do que as amplitudes junto à quebra da PC, refletindo o confinamento típico de PCs largas.

Dottori (2001) fez a comparação entre as energias cinética e potencial nos resultados de experimentos numéricos por ele realizados. Valores para esta relação inferiores a 2 indicam um comportamento fortemente baroclínico e, superiores a 10, fortemente barotrópico (Brink, 1982). Nos experimentos onde foi utilizado vento paralelo à costa, esta relação foi superior a 26, e nos experimentos com vento perpendicular à costa, superior a 13. Isto mostra que a maior parte da energia assimilada pelas águas da PCSP, proveniente de forçantes de vento com características dos sistemas frontais, é encontrada na forma de energia cinética. Esta relação entre energia cinética e potencial é mais um indicativo do comportamento altamente barotrópico da PCSP.

2.3 Região de Interesse: Plataforma Continental Interna e Média do Estado de São Paulo

Este trabalho tem como foco o estudo da hidrodinâmica da Plataforma Continental Interna do Estado de São Paulo (PCISP) e da Plataforma Continental Média do Estado de São Paulo (PCMSP), durante o período de verão. Desta maneira, a região de estudo está compreendida entre a costa e o limite oceânico determinado pela isóbata de 100 m da Plataforma Continental do Estado de São Paulo (PCSP) .

Figura 2.5: Região de interesse: Plataforma Continental Interna do Estado de São Paulo (PCISP) e Plataforma Continental Média do Estado de São Paulo (PCMSP). As isolinhas em branco indicam as isóbatas de 10 m, 20 m, 40 m, 50 m, 60 m, 70 m e 90 m, e as isolinhas em preto, as isóbatas de 30 m e 80 m, indicam os limites da PCISP e da PCMSP, respectivamente.

2.3.1 Circulação na PCISP e PCMSP

Os movimentos, na maior parte da PCI são forçados, em diferentes escalas de tempo, principalmente pelos ventos, pelas marés e por gradientes de densidade (Castro *et al.*, 2006).

Segundo Castro & Miranda (1998), na PCSE a maior variância das correntes na PCI e PCM está concentrada em duas bandas de períodos: 3-7 dias e 9-15 dias, o mesmo das oscilações do vento e do nível do mar, sendo estas correntes altamente relacionadas com o vento nessas bandas.

As correntes preponderantes na PCISP são quase paralelas à costa e bidirecionais: ora fluem para NE, ora para SW (Castro, 1996). Quando os ventos mais frequentes, predominantes de E-NE estão soprando, o jato costeiro induzido pelo vento tem sentido SW, praticamente paralelo às isóbatas e à linha de costa. Quando os ventos sopram do sul, acompanhando os sistemas meteorológicos frontais (frentes frias), o jato costeiro desenvolve-se para NE, também quase paralelo às isóbatas e à linha de costa.

Castro (1996), analisou dados observados ao largo de Ubatuba e verificou na PCISP, durante o inverno, fluxo para SW, havendo eventos de inversão para NE. Valores típicos de intensidade de corrente foram da ordem de 0,20 m/s para SW e de 0,10 m/s, para NE. Segundo o autor, as componentes paralelas à costa são essencialmente barotrópicas, pois o primeiro modo ortogonal empírico é responsável por mais de 95% da variância. Nas componentes normais há um aumento da importância do segundo modo ortogonal empírico, que pode estar associado ao primeiro modo baroclínico. A coerência entre as correntes normais e a tensão de cisalhamento do vento foi marginalmente significativa para o correntógrafo de superfície nas bandas longa e curta e, para o correntógrafo de fundo da banda média. Já, na PCM, o autor verificou um fluxo predominante para SW, porém as inversões para NE são mais frequentes; a componente paralela é essencialmente barotrópica, e a componente normal, possui um grande cisalhamento vertical, sendo os modos baroclínicos de grande importância, podendo apresentar uma

estrutura em até 3 camadas. Na PCM, velocidades típicas de correntes foram da ordem de 0,3-0,2 m/s para SW, sendo relativamente menores nas inversões para NE.

Moreira (1998) analisou dados de fundeio na PCISP na radial de Praia Grande, no interior do Canal de São Sebastião, nas proximidades da Ilha Montão de Trigo (45°46'W 23°51'S) e ao norte de Ubatuba e concluiu que em toda a região definida por esses pontos, a circulação sofre grande influência do vento local ou remoto. Na região da Praia Grande foi observada significativa coerência entre a corrente registrada e o vento em todas as bandas de frequência. Os fundeios localizados ao sul e ao norte do Canal de São Sebastião apresentaram predominantemente sentidos opostos de correntes, sendo que ao sul do canal houve predominância da corrente fluindo para NE, enquanto que ao norte, a predominância foi para SW.

As correntes geradas por gradientes de densidade devidos às descargas estuarinas fluem deixando à costa à sua esquerda no hemisfério sul, devido ao balanço geostrófico. Assim, correntes geradas unicamente por esses gradientes de densidade fluem para NE ao longo da PCISP. O balanço entre o jato costeiro induzido pelo vento e a corrente baroclínica devida aos gradientes de densidade deve determinar a direção da corrente em cada instante na PCISP. Isso porque as correntes de maré, além de serem relativamente fracas na região (Alves, 1992 ; Castro & Miranda, 1998), são predominantemente perpendiculares à costa (Harari & Camargo, 1994 ; Pereira & Castro, 2007 ; Pereira *et al.*, 2007).

Exemplo típico da interação entre o jato costeiro e correntes baroclínicas devidas à variação espacial da densidade ocorre na parte norte da PCISP, no Canal de São Sebastião (CSS). Muitas vezes, no CSS, é observada circulação em duas camadas, típica do primeiro modo baroclínico (Castro, 1990 ; Fontes, 1995). A camada superficial dessa estrutura responde preponderantemente ao vento local, enquanto a camada inferior responde à força de gradiente de pressão baroclínica (Miranda & Castro, 1995).

Segundo Valente (1998), a circulação em toda a PCISP norte de São Paulo não é estritamente forçada pelo vento na região do CSS e próximo à Santos. Na região adjacente ao estuário de Santos, as correntes de maré, que são essencialmente barotrópicas e transversais à costa, possuem magnitudes mais significantes, de aproximadamente 0,06 m/s. Na região adjacente ao CSS, as correntes de maré apresentam magnitudes inferiores a 0,02 m/s.

À partir da análise de dados correntográficos observados, segundo Mazzini (2010), tanto na PCISP quanto na PCMSP, as componentes normais de correntes são regidas principalmente pelas marés, enquanto que as componentes paralelas são dominadas por forçantes em escalas subinerciais, como os ventos e os gradientes de densidade. As correntes subinerciais observadas na PCISP e PCMSP, são essencialmente geostróficas. E ainda que a circulação na região não seja homogênea, apresenta um sistema complexo de fluxos e contra-fluxos, havendo tendência de correntes sobre a PCMSP e a PCISP apresentarem sentidos opostos. Há também tendência das correntes na PCISP apresentarem sentido predominantemente para NE, enquanto que na PCMSP a direção predominante é para SW.

2.4 Estudos Numéricos Anteriores

Castro (1985) estudou numericamente a resposta hidrodinâmica barotrópica da PCSE ao vento climatológico típico de inverno e obteve que a resposta das correntes à forçante fica confinada na PC com escala de decaimento neperiano de 70-120 km da costa. A direção normal à costa é dominada pelo balanço geostrófico, enquanto na direção paralela à costa, ocorreu o balanço friccional, ou seja, equilíbrio entre a tensão de cisalhamento do vento e a tensão de cisalhamento com o fundo nas áreas mais costeiras.

Cirano & Campos (1996) realizaram um conjunto de simulações diagnósticas com o Princeton Ocean Model (POM), utilizando estruturas de densidades baseadas nos dados hidrográficos do projeto Circulação da Região Oceânica da Região Oeste do Atlântico Sul (COROAS) coletados nos períodos

de verão e inverno, entre Iguape e Ubatuba, estendendo-se da isóbata de 50 m até regiões oceânicas com mais de 2500 m de profundidade. Os campos de correntes obtidos de acordo com o esperado a partir de análises de estruturas termohalinas apresentam feições para a CB bastante similares em ambos os cruzeiros. Os autores sugeriram uma intrusão da AT sobre a plataforma continental na região entre Ubatuba e Santos, tanto durante o cruzeiro de verão quanto durante o cruzeiro de inverno.

Rezende (2003) implementou o POM, adaptando-o à Plataforma Continental Sudeste. O objetivo do autor foi estudar as intrusões da ACAS na região de estudo. Um resultado importante deste trabalho foi a constatação de que um vento de NE uniforme e impulsivo de 8 horas é suficiente para reverter o padrão de circulação na Plataforma Continental Interna.

Amor (2004) simulou correntes para o período de janeiro entre Cabo de São Tomé e Ilha de São Sebastião, utilizando uma versão simplificada do POM: a versão seccional denominada POM_{x-z} . Foram realizadas simulações diagnósticas com climatologia termohalina e vento médio mensal em seções transversais em frente a Macaé, Cabo Frio, Baía de Guanabara e Ubatuba. As correntes modeladas fluíram para SW em todas as seções, sendo mais fracas ao largo de Ubatuba, onde o vento climatológico apresentou menor intensidades.

Picarelli (2006), implementou o POM para a região costeira centro-sul do Estado de São Paulo e verificou que “Os mapas instantâneos de padrões de circulação de superfície, considerando as várias forçantes, indicam que há uma mudança significativa nas correntes de superfície, para NE, quando efeitos meteorológicos são considerados, tanto para o inverno quanto para o verão. Há uma tendência de alinhamento das correntes (principalmente de superfície) com a direção e sentido de atuação dos ventos, efeito notadamente marcante nos períodos de frente fria (ventos de S-SW), chegando a haver uma reversão no sentido das correntes em alguns casos. Junto à costa, as correntes mostraram-se praticamente paralelas a esta.

Coelho (2008) em simulações do vento típico de verão na região central da PCSE, entre Cananéia e a Ilha de São Sebastião, observou em superfície, entre as isóbatas de 30 e 50 metros, escoamento para NE, e entre as isóbatas de 50 m e 200 m, escoamento para SW, formando uma célula ciclônica entre Cananéia e Santos. Na profundidade de 10 m, foram observadas correntes para NE na PCI e para SW na porção da PCM, estendendo-se à PCE. Numa seção na radial de Santos, o autor verificou fluxos para NE em toda a coluna de água na PCI, com máximos de 0,15 m/s e na PCM, fluxos máximos para SW, em superfície, de aproximadamente 0,35 m/s. Na região da PCE, verificou escoamento para SW em toda a coluna de água. Em simulações da passagem de um sistema frontal típico de verão, o autor verificou que a região ao sul da Ilha de São Sebastião foi a que respondeu com maior intensidade à passagem do sistema. Na passagem do sistema meteorológico, as correntes superficiais na PCI em frente a Santos adquirem o dobro da intensidade, chegando a aproximadamente 0,25 m/s.

3 HIPÓTESE E OBJETIVO

A hipótese deste trabalho é que a circulação na PCISP e PCMSP é forçada, em diferentes escalas espaciais e temporais, pelo vento, pelas marés e por gradientes de densidade, devido à drenagem continental e à proximidade da costa.

O objetivo geral deste projeto é determinar a importância relativa de cada uma dessas três forçantes na resposta dinâmica da PCISP e PCMSP, durante o período de verão, utilizando técnicas de modelagem numérica, através da realização de experimentos com diferentes combinações dessas forçantes.

Como objetivos específicos, podemos mencionar:

- Implementar um modelo numérico hidrodinâmico;
- Verificar a resposta hidrodinâmica e a importância relativa de cada uma dessas forçantes atuando na região; e
- Analisar possíveis influências das correntes que ocorrem na PCMSP e PCESP, incluindo a Corrente do Brasil, sobre a dinâmica da PCISP.

4 MATERIAS E MÉTODO

Neste capítulo, são apresentados o conjunto de dados e o método utilizados para a redução e obtenção dos campos climatológicos iniciais e das forçantes para o período de verão de 2009, utilizados nas simulações numéricas. A seguir, são apresentadas as características básicas do modelo numérico Regional Ocean Modeling System (ROMS), da sua implementação para a área de estudo e das condições de contorno adotadas, bem como os experimentos numéricos realizados.

4.1 Dados

4.1.1 Temperatura e salinidade

A estrutura do campo termohalino utilizada nos experimentos numéricos é derivada da climatologia de verão para a PCSE obtida por Rezende (2003), que construiu essa climatologia a partir de dados de temperatura e salinidade disponíveis no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) compreendidos entre as latitude de 20°S e 32°S e o meridiano de 35°W e a costa, correspondentes aos meses de janeiro a março. Esses dados passaram por um processo de validação conforme a metodologia do Projeto Piloto Global de Temperatura e Salinidade, da Comissão Oceanográfica Internacional (GTSP), que consiste basicamente das seguintes fases:

(a) Identificação e eliminação de dados espúrios através da análise do diagrama T-S espalhado;

(b) Separação dos dados por níveis de observação (para obter seções horizontais representativas das diversas profundidades), por faixas de retas perpendiculares à costa e por faixa de isobatimétricas (que levam em consideração a profundidade local das estações); e

(c) Obtenção das médias e desvios padrão dos dados para cada um desses subconjuntos.

Essa climatologia do campo termohalino foi interpolada nas dimensões da grade do modelo numérico. Primeiramente, na dimensão horizontal (plano 0xy), utilizando-se o método linear, para todos os pontos da grade, resultando em uma climatologia com resolução horizontal regular de aproximadamente 2340 m x 2033 m. Em seguida, esses dados foram interpolados na dimensão vertical (eixo 0z) com resolução de 2 m, utilizando-se o método linear.

4.1.2 Vento

Os dados de vento foram extraídos do banco de dados do NCEP / NCAR (National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data.ncep.reanalysis.html>). Esses dados são o produto de um modelo numérico climático alimentado por dados qualificados de diferentes fontes: navios, aviões, estações meteorológicas, satélites, entre outros (Kanamitsu *et al.*, 1996).

O campo de vento climatológico representativo do mês de janeiro foi obtido a partir da média histórica de 1989 a 2009 das climatologias mensais para o mês de janeiro, disponíveis para a região de domínio do modelo - PCSE, de resolução regular de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Esse campo de vento foi, então, interpolado pelo método linear na dimensão horizontal (0xy) da grade do modelo numérico.

A tensão de cisalhamento do vento foi parametrizada por:

$$\tau = \rho_{ar} C_D V^2$$

Onde:

ρ_{ar} - densidade do ar

C_D - coeficiente de arrasto a 10 metros da superfície (não-dimensional), utilizado como $1,2 \times 10^{-3}$

V - módulo da velocidade do vento a 10 metros da superfície

Figura 4.1: Tensão de cisalhamento (Pa) do vento climatológico no período de verão, utilizado nas simulações envolvendo a forçante do vento. As linhas vermelhas indicam as isóbatas de 50 m, 200 m e 1000 m.

Na Figura 4.1 é possível observar a predominância dos ventos de NE em todo o domínio. Os maiores valores para a tensão de cisalhamento do vento, aproximadamente 0,08 Pa, ocorrem na região entre Cabo de São Tomé e Cabo Frio. Nessa região, nota-se também pouca variação espacial do vento, tanto na direção paralela à costa quanto na direção transversal. No restante do domínio existe uma tendência da tensão de cisalhamento do vento aumentar em direção ao largo. Na região entre Peruíbe e o sul de Paranaguá ocorre a intensificação da componente da tensão de cisalhamento perpendicular à costa. As regiões de PCI do domínio, de Cabo de Santa Marta até a Baía de Guanabara, concentram os menores valores de tensão de cisalhamento do vento com cerca de 0,01 Pa.

Apesar dos experimentos utilizarem um campo de vento climatológico estacionário, de certa forma idealizado, ainda assim, podem ser considerados representativos, em face da constância e persistência dos ventos nessa região durante o verão.

4.1.3 Maré

Nos experimentos envolvendo a forçante de maré, foram utilizados os dados do modelo regional de marés oceânicas do *Atlantic Ocean 2011 - Atlas*, um modelo que assimila dados dos satélites altimétricos TOPEX/Poseidon (T/P), Jason e ERS, e oferece dados de maré com resolução de $1^\circ/12$, considerando as constituintes de maré: M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_4 , MS_4 , MN_4 . As condições de bordas abertas deste modelo, foram obtidas do modelo global de marés oceânicas TPXO 7.1 (Egbert & Erofeeva, 2002), com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Nos experimentos numéricos envolvendo a forçante de maré, foram consideradas e extraídas somente as principais constituintes de maré para a região de estudo: M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , e M_4 .

4.2 Modelo Numérico

O modelo numérico utilizado é o *Regional Ocean Modeling System* – ROMS (Haidvogel *et al.*, 2008), que é um modelo hidrostático, de equações primitivas e superfície livre, que utiliza coordenadas horizontais ortogonais curvilíneas e coordenada vertical sigma-S (*terrain-following*), baseada no Rutgers University Model (SCRUM), descrito por Song & Haidvogel (1994), que é uma generalização da coordenada sigma, que permite resolução variável principalmente nas regiões de camada de Ekman de fundo e superfície e acomoda de forma aceitável a geometria da linha de costa e a topografia do fundo.

O ROMS resolve as equações primitivas hidrodinâmicas e termodinâmicas no sistema de coordenadas horizontais “*Earth-centered rotated Cartesian*”; considera a variação meridional do parâmetro de Coriolis (aproximação do plano β); assume aproximações de águas rasas e de Boussinesq, restringindo o efeito da perturbação de densidade à componente vertical da equação do momento.

Similar a outros modelos oceânicos (ex. POM, MICOM, POP, e SCRUM), o ROMS utiliza esquema explícito, com um passo de tempo menor para resolver elevação de superfície e momento barotrópico, e um passo de tempo maior para resolver temperatura, salinidade e momento baroclínico. Desta maneira é realizado um número finito de passos de tempo barotrópicos, onde cada passo baroclínico é efetuado, para desenvolver as equações de superfície livre e momento verticalmente integrado.

O ROMS é um código altamente moderno e modular escrito em F90/95. Utiliza pré-processamento C (CPP) para ativar as diversas opções físicas e numéricas. Muitos padrões de códigos têm sido estabelecidos para facilitar a leitura, manutenção e portabilidade do modelo. Todas as variáveis do modelo de estado são dinamicamente alocadas e passadas como argumento das rotinas computacionais.

Maiores detalhes sobre o ROMS podem ser obtidos em www.myroms.org.

4.2.1 Grade numérica

A grade numérica utilizada (Figura 4.2) compreende toda a Plataforma Continental Sudeste Brasileira, do Cabo de São Tomé (RJ) ao Cabo de Santa Marta (SC), sendo o domínio desta entre as latitudes 20°07'21"S e 30°13'16"S e as longitudes entre 39°09'06"W e 50°20'08"W.

Optou-se pela utilização de uma grade do tipo regular, composta por 562 pontos equiespaçados em 2340 m na direção média paralela às linhas

isobatimétricas da PCSE e 252 pontos equidistantes em 2033 m na direção normal às linhas isobatimétricas da PCSE. Desta forma, a grade tem dimensão horizontal de 562x252, totalizando 141.624 pontos.

A batimetria obtida por Rezende (2003), que combina dados digitalizados das cartas náuticas editadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN-MB) e dados do ETOPO-5 mais profundos que 300 m, livres de dados espúrios na região da plataforma continental, foi interpolada linearmente de acordo com a dimensão horizontal da grade utilizada. Devido ao fato da pesquisa basear-se no estudo hidrodinâmico de plataforma continental, as profundidades da região de integração superiores a 2000 m foram aproximadas a este valor, com isso foi possível diminuir a carga de processamento do modelo numérico. Desta forma, a região mais rasa do domínio tem 2 m e mais profunda, 2000 m.

A resolução da grade numérica objetiva simular a influência de feições morfológicas de menor escala, como pontões e enseadas, na hidrodinâmica local.

Na vertical, foram adotados 15 níveis verticais sigma-S, com maior resolução nas camadas mais próximas à superfície e ao fundo.

Devida à orientação da linha de costa e das isobatimétricas nessa área, a grade foi rotacionada em 45° no sentido horário. Este é um procedimento usualmente adotado em estudos de hidrodinâmica de plataforma continental, que consiste em orientar o eixo x transversalmente à direção média da costa e o eixo y na direção longitudinal.

Sendo assim, a grade do modelo possui 2124360 pontos simulados no campo tridimensional, sendo que aproximadamente 77% deste total, cerca de 1641825 pontos, são pontos “molhados” (i. e. na água) e 23%, cerca de 482353 pontos, são pontos “secos” (i. e. na terra). Nos experimentos realizados, foi utilizada a profundidade mínima de 3 m para fazer essa distinção.

Figura 4.2: Domínio da grade numérica utilizada com a indicação das isóbatas de 20 m, 50 m, 100 m, 200 m, 500 m, 1000 m e 1900 m.

4.2.2 Condições de contorno

As condições de contorno em modelos complexos de regiões costeiras limitadas são altamente dependentes dos processos e da região a ser modelada. Portanto, o estabelecimento de condições de contorno confiáveis é um processo difícil e demorado. O critério adotado neste estudo para seleção das melhores condições de contorno foi o da estabilidade computacional, fazendo com que o modelo atingisse um nível energético estável, conservando a massa total do sistema ao longo das simulações, e a qualidade dos resultados.

No domínio de estudo, foram considerados 3 contornos laterais abertos e um fechado. Dos contornos abertos considerou-se um contorno afastado, em área oceânica, aproximadamente paralelo à direção média da costa, e outros dois transversais a esse plano, que se estendem desde a linha de costa até os limites do domínio oceânico.

Condição de contorno de fundo

A batimetria utilizada no domínio do modelo corresponde àquela descrita no item 4.2.2 deste trabalho.

A determinação da Condição de Contorno de Fundo (CCF) é de extrema importância, já que, à partir dela, é calculado o atrito no fluxo gerado por sua interação com a camada limite de fundo, que é então inserido nas equações do movimento e utilizado como condição de contorno.

Devido às variações significativas dos valores de velocidade, concentração de sedimentos, produção e dissipação de energia cinética turbulenta e do número de Reynolds, principalmente junto ao fundo, na coluna de água, torna-se complexo calcular o atrito de fundo para grades com espaçamentos de níveis verticais utilizados em domínios de escala regional (Warner *et al.*, 2008).

Neste estudo, foi utilizada a formulação de arrasto simples, que resolve a CCF implementando cálculos de atrito de fundo quadrático. O método de arrasto simples quadrático é dependente da velocidade no fundo e dos coeficientes γ_1 e γ_2 , com valores de 3×10^{-4} m/s e 3×10^{-03} (adimensional), respectivamente.

$$\tau_{bx} = (\gamma_1 + \gamma_2 \sqrt{u^2 + v^2}) u \quad (4.1)$$

$$\tau_{by} = (\gamma_1 + \gamma_2 \sqrt{u^2 + v^2}) v \quad (4.2)$$

Onde:

τ_{bx} - tensão de cisalhamento com o fundo no sentido zonal

τ_{by} - tensão de cisalhamento com o fundo no sentido meridional

u - componente zonal da velocidade

v - componente meridional da velocidade

γ_1 - coeficiente de arrasto linear

γ_2 - coeficiente de arrasto quadrático

Nessa formulação, os valores de velocidades utilizados são aqueles correspondentes à camada de célula em contato com o fundo.

Condição de contorno de superfície

Nos experimentos envolvendo a forçante do vento, o modelo utiliza dados de tensão de cisalhamento do vento (τ) como condição de contorno de superfície. Esse valor é obtido através de dados de intensidade e direção do vento, parametrizados para tensão de cisalhamento do vento, descritos no item 4.1.3 deste trabalho.

Condição de contorno lateral

As Condições de Contorno Abertas (CCAs) em modelagem oceânica possuem impacto crucial na solução do interior do domínio. Os problemas de condições de contorno abertas podem ser considerados como os aspectos mais desafiadores da modelagem numérica de oceano (Marsaleix *et al.*, 2006).

As CCAs possuem basicamente dois objetivos. Primeiramente, estabelecer as condições de entrada no domínio para forçar a solução do interior com campos externos, obtidos de observações ou de modelos de maior escala. Ao mesmo tempo, estas devem funcionar como saída, permitindo que as ondas sejam irradiadas para fora ou que as massas d'água saiam do

domínio sem que haja reflexões espúrias nas fronteiras. No entanto, é bastante difícil satisfazer a ambos os objetivos simultaneamente e os modelos tendem a escolher localmente qual deles irá utilizar, de acordo com o caráter de entrada ou saída da dinâmica ali presente.

A maioria das condições de contorno foram amplamente estudadas nos últimos 20 anos (Palma & Matano 1998, 2000). Esses estudos fornecem comparações entre diversas CCAs em casos bem determinados (propagação de ondas livres, jatos costeiros forçados por vento, propagação de tempestades etc.) para os quais existe uma solução de referência (soluções analíticas ou mesmo numéricas validadas com observações). Em resumo, os esquemas mais utilizados podem ser divididos em três classes (Palma & Matano, 1998): i) condições radiativas (Blumberg & Kantha, 1985); ii) Métodos característicos (Hedstrom, 1979); e iii) Métodos de relaxação (Martinsen & Engedahl, 1987).

Na definição das condições de contorno abertas da grade utilizada, o esforço de experimentação foi direcionado para as condições de contorno passivas, em que a resposta do modelo nos contornos abertos é determinada pela dinâmica da circulação no interior do domínio de integração. Essas condições visam manter os contornos abertos transparentes à propagação de ondas geradas no interior do domínio, permitindo ainda livre advecção ao fluido. Assim:

- A condição de contorno utilizada na fronteira foi do tipo *free-slip* para todos os experimentos, ou seja, velocidades tangenciais podem ser diferentes de zero.
- A condição de contorno para a superfície livre nas bordas laterais abertas do modelo foi do tipo Chapman, que considera a propagação de ondas de gravidade (equivalente à condição de Sommerfeld), utilizada em conjunto com informações do nível do mar obtidas a partir do modelo global de marés, nos experimentos envolvendo essa forçante.

- Os traçadores temperatura e salinidade receberam a condição de contorno Não-Gradiente, que repete o valor da penúltima célula anterior ao limite do domínio de forma a estabelecer uma condição onde o gradiente seja 0.
- O momento integrado na vertical recebeu a condição de contorno Flather, uma combinação da condição de contorno de Sommerfeld e condições de continuidade.
- O momento tridimensional recebeu a condição de contorno Não-Gradiente.

Maiores detalhes quanto às condições de contorno utilizadas podem ser obtidos em Mori (1997).

4.2.3 Validação do modelo

Existe muita discussão quanto ao termo validação na verificação de um modelo numérico. Oreskes *et al.* (1994) defendem que tal condição não é possível, pois, ainda que o modelo numérico reproduza os dados observados é inviável tomá-lo como verdade, por se tratar da representação de um sistema aberto.

Neste trabalho, em função do cronograma de atividades, e da falta de tempo hábil, a confirmação do modelo utiliza análises de caráter qualitativo, considerando a comparação dos resultados gerados entre os experimentos e dados da literatura, para confirmar a resposta e a sensibilidade do modelo.

4.3 Experimentos Numéricos

4.3.1 Campos iniciais

Com o objetivo de eliminar instabilidades geradas pelo campo TS no processo de inicialização do modelo numérico, o campo termohalino gerado, e somente ele (sem forçantes), foi processado pelo modelo no modo prognóstico por 21 dias. Ao final desse processo foram obtidos os campos de temperatura e salinidade, que foram processados no modo diagnóstico por 10 dias, a fim de obter o campo de correntes e a elevação do nível do mar, para inicialização dos experimentos.

Blumberg & Mellor (1987) afirmam que simulações diagnósticas, aquelas que mantêm a temperatura e a salinidade estacionárias, não só constituem uma ótima ferramenta para obter a circulação associada a campos médios termohalinos e de vento, mas também fornecem um modo consistente de inicializar simulações no modo prognóstico.

Isto representa um processo de ajuste geostrófico, onde o campo de velocidade se ajusta ao campo de massa. Os movimentos em questão são caracterizados por escalas horizontais maiores que o Raio de Deformação de Rossby, sofrendo então a influência da rotação do planeta.

Entretanto, apenas a estrutura baroclínica da velocidade pode ser diagnosticada, uma vez que os dados hidrográficos não incluem informação sobre a elevação da superfície. Essa impossibilidade de se resolver o modo barotrópico suscita uma importante questão quanto à confiabilidade do resultado do modo baroclínico numa situação inicializada a partir de uma estrutura termohalina média. Essa questão seria sanada se, de alguma forma, pudéssemos obter a topografia do nível do mar antes de processar os dados no modo diagnóstico. Como isso foge da proposta do presente trabalho, o campo de variação do nível do mar utilizado nos experimentos a seguir, bem como a estrutura do campo de massa e de velocidade, são aqueles obtidos ao final do décimo dia de processamento dos dados TS no modo diagnóstico.

4.3.2 Configuração do modelo

Baseado na condição de Courant-Friederichs-Lewy, que relaciona o intervalo de discretização no tempo ao intervalo de discretização no espaço, determinou-se um passo de tempo barotrópico de 2 segundos e um passo de tempo baroclínico de 60 segundos.

O modelo foi configurado para que os experimentos simulassem 31 dias a partir de 0 h do dia 01 de janeiro de 2009.

4.3.3 Experimentos

Foram realizados os seguintes experimentos, no modo prognóstico, com o modelo numérico definido:

- Experimento 1: **campos climatológicos de T e S, sem forçantes**
- Experimento 2: **campos climatológicos de T e S e forçante de maré;**
- Experimento 3: **campos climatológicos de T e S e forçante de vento climatológico; e**
- Experimento 4: **campos climatológicos de T, S e forçante de vento climatológico e maré.**

O modelo foi processado para todo o domínio da PCSE, conforme definido em 4.2.2, porém, devido ao objetivo de estudo, somente os resultados da PCSP são apresentados, mais especificadamente os das regiões da PCISP e da PCMSP, até o limite da isóbata de 100 m.

Os experimentos: Experimento 1, Experimento 2, Experimento 3 e Experimento 4, são referidos como E1, E2, E3 e E4, respectivamente.

Para efeito de comparação, são apresentados os dados de temperatura, salinidade e densidade utilizados na inicialização dos experimentos para as três seções: S1, S2 e S3 (Figura 5.2).

Figura 5.2: Seções verticais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade e densidade convencional (kg/m^3) da estrutura termohalina utilizada na inicialização dos experimentos. Temperatura em Cananéia, Mongaguá e Ubatuba (A, B e C, respectivamente); salinidade em Cananéia, Mongaguá e Ubatuba (D, E e F); e densidade em Cananéia, Mongaguá e Ubatuba (G, H e I, respectivamente).

Os resultados apresentados são aqueles obtidos após a estabilização do modelo numérico, que ocorreu depois de 300 horas (12 dias e meio) do início das simulações (Figura 5.3).

A Figura 5.4 apresenta os dados de elevação da superfície do mar e de correntes induzida pela maré às 12 h do dia 12/01/2009, gerados à partir da simulação da maré em um campo de estrutura termohalina homogênea ($T=25^{\circ}$

C, S=35) com as mesmas configurações do modelo numérico aplicado nos experimentos. A forçante de maré, aplicada nos experimentos E2 e E4, no período simulado (300 h) contempla a metade final de um ciclo de maré de sizígia, um ciclo de quadratura completo e o começo de um novo ciclo de sizígia, sendo que às 12 h do dia 12/01/2009 temos a maré enchendo atingindo a preamar aproximadamente às 15 h do mesmo dia.

Figura 5.3: Energia cinética (m^2/s^2) do domínio do modelo numérico para os quatro experimentos realizados. Experimento 1: TS (curva preta); Experimento 2: TS + MARÉ (curva azul); Experimento 3: TS + VENTO (curva vermelha); e Experimento 4: TS + MARÉ + VENTO (curva verde).

Figura 5.4: Elevação da superfície do mar (m) (A) e correntes de maré (m/s) (B) às 12h do dia 12/01/2009.

5.1 Experimento 1

Na região ao norte da ISS, as correntes na superfície e à 10 m (Figuras 5.5A, B) apresentaram-se as mais intensas, principalmente na PCM, com máximos de intensidade de 0,5 m/s e direção predominante para NE/E. Na PCI, as correntes em 0 m e 10 m apresentaram intensidades entre 0,05-0,4 m/s, e existindo rotação de direção no sentido horário, de SW para N/NE, do norte da ISS para o limite norte do domínio. Na radial S1 - Ubatuba, é possível observar um escoamento barotrópico para NE/E com um núcleo de corrente bem definido que estende-se da superfície à 25 m de profundidade entre 20 e 60 km de distância da costa (Figuras 5.5E, F). Ao largo de Ubatuba, à partir de 23 m as correntes são aproximadamente paralelas às isóbatas, principalmente aquelas mais profundas.

Na região ao sul da ISS, as correntes em 0 m, 10 m e 23 m (Figuras 5.5A, B, C), mais próximas à costa, apresentam escoamento normal às isóbatas em direção à costa; e um fluxo organizado entre as isóbatas de 20 m e 50 m para NE/E, sendo que a componente perpendicular é mais expressiva à medida que avançamos em direção à ISS. Este fluxo, ao que parece, contorna a ISS e contribui para a formação do intenso escoamento na PCM descrito no parágrafo anterior. Porém, nessa região, observa-se grande influência de uma feição anti-ciclônica que avança sobre a PCM e descaracteriza esse contorno.

Através da análise das seções horizontais e verticais de temperatura (Figuras 5.10, 5.11, 5.12B), salinidade (Figuras 5.13, 5.14, 5.15B) e densidade (Figuras 5.16, 5.17, 5.18B) é possível identificar águas com características de temperatura, salinidade e densidade diferentes no limite oceânico do modelo.

A análise das seções verticais das componentes de velocidade em Cananéia e Mongaguá indicam a ocorrência de correntes semelhantes ao primeiro modo baroclínico sobre a PCM (Figuras 5.7A, B, C, D).

Os dados de elevação do nível do mar (Figura 5.9) e os dados de temperatura, salinidade e densidade de todas as seções verticais (Figuras 5.12, 5.15, 5.18, respectivamente), devido ao deslocamento das isolinhas em

direção ao fundo, indicam empilhamento de água na costa, que em balanço geostrófico, induz correntes para NE, conforme foi observado.

Na radial de Ubatuba (S3), as seções verticais de temperatura (Figura 5.12C), salinidade (5.15C) e densidade (5.18C) apontam uma região de ascensão das águas mais profundas.

5.1.1 Velocidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.5: Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

Velocidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.6: Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

Velocidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.7: Seções verticais das componentes de velocidade (m/s) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009. Componente u da velocidade da radial Cananéia (A), componente v da velocidade da radial Cananéia (B), componente u da velocidade da radial Mongaguá (C), componente v da velocidade da radial Mongaguá (D), componente u da velocidade da radial Ubatuba (E), componente v da velocidade da radial Ubatuba (F).

Velocidade

Velocidade verticalmente integrada - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.8: Circulação verticalmente integrada (m/s), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 1. As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

5.1.2 Nível do mar

Variação do nível do mar - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.9: Seção horizontal de elevação do nível médio do mar (m), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 1.

5.1.3 Temperatura

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.10: Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Temperatura

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.11: Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Temperatura

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.12: Seções verticais de temperatura (°C) do Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.1.4 Salinidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.13: Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Salinidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.14: Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Salinidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.15: Seções verticais de salinidade do Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.1.5 Densidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.16: Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Densidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.17: Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Densidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.18: Seções verticais de densidade convencional (kg/m^3) do Experimento 1, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.2 Experimento 2

Na região ao sul da Ponta do Una, na superfície e à 10 m, a porção mais interna da PCI apresenta correntes predominantemente para SW paralelas à linha de costa (Figuras 5.19A, B); entre as isóbatas de 30 m e 50 m, a direção das correntes é aproximadamente perpendicular à costa, para SE; e entre as isóbatas de 50 m e 80 m, a porção mais ao sul apresenta velocidades perpendiculares às isóbatas, enquanto que na região mais ao norte as correntes passam a ser predominantemente na direção SW. O padrão de correntes neste trecho para as profundidades de 23 m, 30 m e 44 m (Figuras 5.19C, D, 5.20A) é bastante similar: as correntes são perpendiculares à costa entre as isóbatas de 30 m e 50 m, e sofrem uma inflexão, mudando de sentido para SW, e entre as isóbatas de 50 m e 80 m apresentam fluxo organizado para SW. Nas profundidades maiores que 75 m as correntes são paralelas à costa, na direção SW (Figura 5.20B).

A região ao norte da ISS apresenta as maiores amplitudes de corrente em superfície e à 10 m (Figuras 5.19A, B), com máximos de 0,35 m/s, sendo que as correntes da PCM apresentam orientação E-NE, enquanto as correntes na PCI, nessas profundidades, apresentam intensidade máxima de 0,3 m/s e uma tendência de mudarem de direção no sentido horário, de SW para N-NE, do norte da ISS para o limite norte do domínio.

Ao sul da ISS as correntes ao largo da isóbata de 80 m tem direção SW e são predominantemente paralelas à isóbata de 80 m, principalmente aquelas mais profundas; ao norte da ISS, as correntes apresentam-se perpendiculares às isóbatas, em direção à costa.

As seções verticais das componentes de velocidade indicam a ocorrência de correntes semelhantes ao primeiro modo baroclínico sobre a PCM em Cananéia e Ubatuba (Figuras 5.21A, B, E, F).

Os resultados de elevação do nível do mar (Figura 5.23) e os dados de temperatura, salinidade e densidade de todas as seções verticais (Figuras 5.26, 5.29, 5.32, respectivamente), devido ao deslocamento das isolinhas em

direção ao fundo, indicam empilhamento de água na costa, que em balanço geostrófico, induz correntes para NE, conforme foi observado. Nos resultados apresentados é notável a contribuição da forçante de maré no campo de correntes.

Através da análise das seções horizontais e verticais de temperatura (Figuras 5.24, 5.25, 5.26B, C), salinidade (Figuras 5.27, 5.28, 5.29B, C) e densidade (Figuras 5.30, 5.31, 5.32B, C) é possível identificar águas com características de temperatura, salinidade e densidade diferentes no limite oceânico do modelo.

5.2.1 Velocidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.19: Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

Velocidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.20: Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

Velocidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.21: Seções verticais das componentes de velocidade (m/s) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009. Componente u da velocidade da radial Cananéia (A), componente v da velocidade da radial Cananéia (B), componente u da velocidade da radial Mongaguá (C), componente v da velocidade da radial Mongaguá (D), componente u da velocidade da radial Ubatuba (E), componente u da velocidade da radial Ubatuba (F).

Velocidade

Velocidade verticalmente integrada - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.22: Circulação verticalmente integrada (m/s), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 2. As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

5.2.2 Nível do mar

Variação do nível do mar - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.23: Seção horizontal de elevação do nível médio do mar (m), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 2.

5.2.3 Temperatura

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.24: Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Temperatura

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.25: Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Temperatura

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.26: Seções verticais de temperatura (°C) do Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.2.4 Salinidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.27: Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Salinidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.28: Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Salinidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.29: Seções verticais de salinidade do Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.2.5 Densidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.30: Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Densidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.31: Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Densidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.32: Seções verticais de densidade convencional (kg/m^3) do Experimento 2, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.3 Experimento 3

As correntes na superfície e à 10 m (Figuras 5.33A, B) em todo o domínio analisado tem direção predominantemente para SW/S, sendo que nas regiões mais rasas as correntes são aproximadamente paralelas à costa e tem magnitude entre 0,1-0,15 m/s. As maiores amplitudes de correntes, com cerca de 0,35 m/s, são observadas na superfície entre as isóbatas de 50 m e 80 m, onde nota-se uma zona de convergência.

Na região ao norte de Santos, à partir de 30 m, observa-se uma mudança na orientação das correntes na direção NW; ao sul de Santos, verifica-se uma tendência das correntes apresentarem-se perpendiculares à isóbatas, com exceção de um trecho na radial da Ponta da Juréia, entre as isóbatas de 50 m e 100 m onde observa-se uma mudança na orientação das correntes para NW. Nas regiões mais profundas que 75 m (Figura 5.34B), observa-se que as correntes, de amplitude entre 0,05-0,1 m/s, são paralelas às isóbatas, com exceção de duas regiões, uma na radial da ISS e outra na radial da Ponta do Una.

Em 0 m e 10 m, as seções de temperatura (Figuras 5.38A, B, 5.40C), de salinidade (Figuras 5.41A, B, 5.43C) e de densidade (Figura 5.44A, B, 5.46C) apontam a área ao norte da ISS como a região dinamicamente mais sensível à ação do vento climatológico de verão. Observa-se ressurgência da ACAS, porém este fenômeno nunca foi observado anteriormente nesta região.

Em 23 m a ACAS predomina no domínio analisado (Figura 5.38C). Porém na região central do domínio oceânico é possível identificar águas com características de temperatura, salinidade e densidade diferentes.

Na seção S1 - Cananéia, as componentes de velocidade (Figuras 5.35A, B) apontam um escoamento aproximadamente barotrópico, com dois núcleos bem definidos, com módulo de velocidade entre 0,15-0,2 m/s: um que estende-se por toda a coluna de água por 35 km à partir da costa e outro mais superficial, entre aproximadamente 90-130 km de distância da costa. Nessa região, observa-se a intrusão da ACAS sobre a PCI pela configuração das

isotermas (Figura 5.40A), das isohalinas (Figura 5.43A) e das isopicnais (Figura 5.46A).

Na seção S2 - Mongaguá, o fluxo é predominantemente barotrópico (Figuras 5.35C, D). Da análise das seções verticais de temperatura (Figura 5.40B), salinidade (Figura 5.43B) e densidade (Figura 5.46B), observa-se a intrusão da ACAS sobre a PCI, chegando a aproximadamente 15 km da costa, e o deslocamento da AC em direção ao largo.

Na seção S3 - Ubatuba, as componentes de velocidade (Figuras 5.35E, F) indicam um escoamento barotrópico.

5.3.1 Velocidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.33: Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

Velocidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.34: Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

Velocidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.35: Seções verticais das componentes de velocidade (m/s) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009. Componente u da velocidade da radial Cananéia (A), componente v da velocidade da radial Cananéia (B), componente u da velocidade da radial Mongaguá (C), componente v da velocidade da radial Mongaguá (D), componente u da velocidade da radial Ubatuba (E), componente v da velocidade da radial Ubatuba (F).

Velocidade

Velocidade verticalmente integrada - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.36: Circulação verticalmente integrada (m/s), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 3. As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

5.3.2 Nível do mar

Variação do nível do mar - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.37: Seção horizontal de elevação do nível médio do mar (m), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 3.

5.3.3 Temperatura

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.38: Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Temperatura

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.39: Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Temperatura

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.40: Seções verticais de temperatura (°C) do Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.3.4 Salinidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.41: Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Salinidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.42: Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Salinidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.43: Seções verticais de salinidade do Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.3.5 Densidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.44: Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Densidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.45: Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A), 75 m (B), 85 m (C) e 94 m (D).

Densidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.46: Seções verticais de densidade convencional(kg/m^3) do Experimento 3, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.4 Experimento 4

As correntes em todo o domínio, da superfície ao fundo tem direção predominantemente para SW/S (Figuras 5.47, 5.48, 5.50). Nas regiões mais rasas as correntes são paralelas à costa e tem magnitude entre 0,1-0,2 m/s. As maiores amplitudes de correntes, com cerca de 0,4 m/s, são observadas na superfície entre as isóbatas de 50 m e 100 m, onde nota-se convergência das mesmas.

Na região ao norte de Santos à partir de 23 m, observa-se uma tendência das correntes apresentarem-se paralelas às isóbatas (Figuras 5.47D, 5.49). Porém, ao sul de Santos é verificada uma maior atuação da componente de velocidade normal à costa.

Nas regiões mais profundas que 75 m (Figura 5.49B), as correntes, de amplitude entre 0,05-0,15 m/s, são paralelas às isóbatas, com exceção daquelas na radial da Ponta do Una.

Em 0 m e 10 m, as seções de temperatura (Figuras 5.52A, B, 5.54C), de salinidade (Figuras 5.55A, B, 5.57C) e de densidade (Figura (5.58A, B, 5.60C) apontam a área ao norte da ISS como a região dinamicamente mais sensível à ação do vento climatológico de verão, evidenciando o processo de ressurgência da ACAS sobre a PCM e a PCI, e o escoamento dessa língua de ACAS em direção ao sul do domínio contornando a ISS.

Em 23 m a ACAS predomina no domínio analisado (Figura 5.52C). Porém na região central do limite oceânico é possível identificar águas com características de temperatura, salinidade e densidade diferentes.

Na seção S1 - Cananéia, as componentes de velocidade (Figuras 5.49A, B) apontam um escoamento quase barotrópico, com dois núcleos bem definidos e módulo de velocidade entre 0,15-0,2 m/s: um que estende-se por toda a coluna de água por 30 km à partir da costa e outro mais superficial, entre 0 m e 10 m, entre aproximadamente 90 km e 130 km da costa. Em S1, observa-se a intrusão da ACAS sobre a PCI pela configuração das isotermas (Figura 5.54A), das isohalinas (Figura 5.57A) e das isopicnais (Figura 5.60A).

Na seção S2 - Mongaguá, o fluxo é aproximadamente barotrópico (Figuras 5.49C, D), com exceção de um núcleo entre 15 m e 30 m na região do limite oceânico da área analisada, que caracteriza o segundo modo baroclínico. Da análise das seções verticais de temperatura (Figura 5.54B), salinidade (Figura 5.57B) e densidade (Figura 5.60B), observa-se a intrusão da ACAS sobre a PCI, chegando a aproximadamente 20 km da costa, e o deslocamento da AC em direção ao largo.

Na seção S3 - Ubatuba, as componentes de velocidade (Figura 5.49E, F) indicam um fluxo marcadamente barotrópico.

5.4.1 Velocidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.47: Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

Velocidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.48: Campos de correntes (m/s) obtidos no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A), 75 m (B), 85 m (C) e 94 m (D). As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

Velocidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.49: Seções verticais das componentes de velocidade (m/s) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009. Componente u da velocidade da radial Cananéia (A), componente v da velocidade da radial Cananéia (B), componente u da velocidade da radial Mongaguá (C), componente v da velocidade da radial Mongaguá (D), componente u da velocidade da radial Ubatuba (E), componente v da velocidade da radial Ubatuba (F).

Velocidade

Velocidade verticalmente integrada - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.50: Circulação verticalmente integrada (m/s), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 4. As isolinhas em vermelho indicam as isóbatas de 30 m, 50 m e 80 m.

5.4.2 Nível do mar

Variação do nível do mar - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.51: Seção horizontal de elevação do nível médio do mar (m), no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, do Experimento 4.

5.4.3 Temperatura

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.52: Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Temperatura

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.53: Seções horizontais de temperatura (°C) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Temperatura

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.54: Seções verticais de temperatura (°C) do Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.4.4 Salinidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.55: Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Salinidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.56: Seções horizontais de salinidade obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Salinidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.57: Seções verticais de salinidade do Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

5.4.5 Densidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 0 m, 10 m, 23 m, 30 m

Figura 5.58: Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 0 m (A), 10 m (B), 23 m (C) e 30 m (D).

Densidade

Seções horizontais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Profundidades: 44 m, 75 m

Figura 5.59: Seções horizontais de densidade convencional (kg/m^3) obtidas no Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, a 44 m (A) e 75 m (B).

Densidade

Seções verticais - modo prognóstico: 12 h de 12/01/2009

Figura 5.60: Seções verticais de densidade convencional (kg/m^3) do Experimento 4, no modo prognóstico às 12 h do dia 12/01/2009, nas radiais de Cananéia (A), Mongaguá (B) e Ubatuba (C).

Experimentos E1 e E2

O objetivo dos experimentos E1 e E2 foi obter a circulação termohalina para a PCMSP e a PCISP e verificar o efeito da forçante de maré na mesma.

Em ambos os experimentos foi registrada a elevação do nível do mar na costa em relação ao largo (Figuras 5.9, 5.23).

A comparação das seções horizontais em todos os níveis analisados e das seções verticais de temperatura, salinidade e densidade obtidas em E1 e E2 não indicam alterações significativas na distribuição de densidade. Porém nota-se uma mudança no comportamento das correntes entre E1 e E2.

Estudos anteriores, demonstram a polarização das elipses de maré no sentido perpendicular às isóbatas e à linha de costa: através de observações na PCI em Ubatuba e na Ilha Montão de Trigo (Moreira, 1998), na PC e talude entre Ubatuba e Cabo Frio (Ruffato, 2007), na quebra da PC e talude ao largo de Santos (Moreira, 1997), também através de modelagem numérica na região costeira centro-sul do estado de São Paulo (Picarelli, 2006), e em toda PCSE (Pereira *et al.*, 2007).

Pela comparação de E1 e E2, pode-se dizer que o campo de correntes da circulação termohalina sofre grande influência da circulação de maré, principalmente da sua componente de velocidade perpendicular à costa.

Entre as isóbatas de 30 m e 50 m, no experimento E1 observa-se que as correntes nos níveis de 0 m, 10 m, 23 m e 44 m (Figura 5.5) à partir de Cananéia têm orientação NE até as proximidades de Santos, onde passam a convergir em direção ao largo e então ramificam-se, parte mantendo curso para NE, parte retrofletindo e sendo incorporada ao escoamento que flui para SW,

na PCM. Esse comportamento foi verificado no trabalho de Rezende (2003). Os resultados obtidos corroboram análises anteriores de Moreira (1998) e Castro *et al.* (2008) que mostram que a região da ISS é uma zona natural de convergência do campo de correntes subinerciais.

Castro (1996) e Valente (1998) apresentam evidências baseadas em dados observacionais de correntes para o padrão de circulação obtido com o modelo numérico na PCI. Valente analisou dados de fundeios realizados nas proximidades da Ilha Montão de Trigo (IMT), localizada nas adjacências da face SW da ISS, e da Ilha Anchieta (IA), localizada na face NE da ISS. No fundeio da IMT o fluxo foi para NE/E na superfície e no fundo. No fundeio da IA, a circulação manteve-se para SW no verão, com inversões para NE no fundo. Correntes com intensidades máximas de 0,5 m/s foram observadas para o fundeio próxima à IA. Castro obteve predominantemente o mesmo padrão de correntes para o fundeio da IA, com velocidades de cerca de 0,10 m/s para NE. Em um dos três fundeios que analisou as correntes médias com maior intensidade foram as do quadrante N-E.

Há que se fazer a consideração de que a circulação termohalina obtida retém outras contribuições, principalmente aquelas referentes ao vento, implícitas na climatologia utilizada.

As correntes obtidas na PCI concordam com aquelas obtidas por Mazzini (2010) que analisou dados correntográfico de fundeios com duração de aproximadamente 10 meses entre 2005 e 2006 do projeto “A influência do complexo estuarino da Baixada Santista sobre o ecossistema da plataforma continental adjacente (ECOSAN)”. Sendo 3 fundeios localizados na PCI, próximos à isóbata de 20 m: em frente à Peruíbe (P20), em frente à Santos (S20) e próximo à IMT (M20). Velocidades típicas observadas na superfície em P20 foram de 0,12 m/s para NE, em S20 entre 0,16-0,21 m/s para E/SE; e no fundo, em P20 de 0,04 m/s para NE, em S20 entre 0,16-0,18 m/s para E/SE, e em M20 entre 0,13-0,20 m/s.

Em E1 e E2, a porção entre as isóbatas de 50 m e 80 m, na região ao sul da ISS foi fortemente influenciada por águas com características de temperatura (Figuras 5.10, 5.11, 5.24, 5.25), salinidade (Figuras 5.13, 5.14, 5.27, 5.28) e densidade (Figuras 5.30, 5.31, 5.44, 5.45) diferentes.

Experimentos E3 e E4

Os experimentos E3 e E4 objetivaram simular a resposta hidrodinâmica da PCI e da PCM sob a ação de um vento climatológico no período de verão, e analisar a eventual diferença no regime dinâmico das correntes quando aplicada a forçante de maré juntamente com a forçante do vento.

Ao final das 300 horas simuladas, em ambos os experimentos observou-se completa alteração do padrão da circulação termohalina obtida em E1, com correntes paralelas à costa para SW na PCI, e correntes para SW/S na PCM.

Em ambos os experimentos, as correntes superficiais foram as mais intensas. Em E3 foram observadas correntes de aproximadamente 0,15 m/s na PCI e correntes com cerca de 0,35 m/s na PCM (Figura 5.33A). Em E4 foram observadas correntes de 0,2 m/s na PCI e de 0,4 m/s na PCM (Figura 5.47A). Tanto em E3 como em E4 é observada uma zona de convergência das correntes na PCM ao sul da ISS entre as isóbatas de 50 m e 80 m.

À 10 m, nota-se uma redução considerável da amplitude das correntes, principalmente em E3. As correntes à partir dessa profundidade variam dentro de um intervalo de amplitude de 0,05-0,1 m/s para E3 (Figura 5.33B), e entre 0,05-0,15 m/s para E4 (Figura 5.47A).

De modo geral, nos resultados apresentados, em E4 observou-se correntes de maior amplitude em toda extensão horizontal e vertical da região analisada, devido à interferência construtiva entre o campo de correntes induzido pelo vento e as correntes geradas pela passagem da maré, principalmente da componente normal à costa.

Em ambos os experimentos as correntes têm estrutura predominantemente barotrópica e apontam na direção SW, com exceção de alguns pontos na PCM, observados nas seções verticais das componentes de velocidade em Cananéia e Mongaguá (Figuras 5.35A, B, C, D).

O padrão de correntes obtido junto à costa já era observado ao final do primeiro dia das simulações em ambos experimentos. A eficiência demonstrada pelo vento de NE de impor um escoamento para SW na PCSE é bem conhecida e já foi objeto de investigação de inúmeros trabalhos. Rezende (2003) resolveu a formulação de Csanady (1974) para estudar a resposta de uma PC à ação de um vento impulsivo aplicado paralelamente à sua linha de costa, para uma PC com configuração similar à da PCSE e obteve um tempo de ajuste por atrito de 7,76 h. Nesse instante de tempo o escoamento encontra-se em condição de transição entre os regimes inercial e friccional, ou seja, o atrito com o fundo já é efetivo em termos de reduzir o crescimento linear da velocidade, ocorrido nos instantes iniciais da atuação do vento, em que vigorava o regime inercial. Com base nos estudos realizados por Castro (1985), em face da profundidade local ser relativamente rasa, esse tempo é suficiente para que o processo de ajuste ao equilíbrio evolua a ponto de gerar uma corrente geostrófica paralela à costa, que contrapõe-se àquela existente no estado inicial. À medida que essa corrente se desenvolve, o campo de pressão vai se ajustando para manter o balanço geostrófico, resultando na inversão do gradiente da elevação da superfície do mar, a partir daquele instante de tempo.

A análise dos dados de salinidade, temperatura e densidade evidenciam o processo de intrusão da ACAS na PCSP, em resposta à exportação de águas mais superficiais em direção ao largo.

Na superfície, verifica-se águas relativamente mais frias na costa que ao largo em toda costa ao sul da ISS até as proximidades de Cananéia; ao norte da ISS a ACAS chegou a ressurgir (Figuras 5.38A, 5.52A). Na profundidade de 10 m, observa-se ACAS nas adjacências da face SW da ISS (Figuras 5.38B, 5.52B), sendo que em 23 m a ACAS está presente em praticamente todo o domínio da PCM (Figuras 5.38C, 5.52C).

O fenômeno da ressurgência observado ao norte da ISS, embora improvável, pode ser efeito da combinação da intrusão local e da intrusão remota da ACAS, visto que o processo de intrusão da ACAS é mais intenso ao norte, de onde essas águas são advectadas para SW.

Na borda oceânica são verificadas águas com características de temperatura, salinidade e densidade diferentes.

6 CONCLUSÕES

- Esse estudo comparativo entre os efeitos das principais forçantes que atuam na PCISP e na PCMSP no período de verão - gradiente de densidade, vento climatológico e maré - na resposta dinâmica da PCISP e da PCMSP, permitiu avaliar o grau de influência dessas forçantes na circulação e na distribuição do campo de massa para a região.
- Qualitativamente os resultados obtidos nos experimentos utilizando modelagem foram coerentes quando comparados com outros trabalhos desenvolvidos com dados observados e modelados.
- A modelagem de alta resolução implementada neste trabalho permitiu observar a influência de feições morfológicas de menor escala (e.g. enseadas, pontões) na hidrodinâmica local.
- Na PCISP e na PCMSP, a componente paralela da velocidade é dominada por forçantes de frequência subinercial, como o vento climatológico e o gradiente de densidade, enquanto que a componente normal é fortemente influenciada pela maré.
- Os efeitos da distribuição de densidade sobre o comportamento geral da circulação na PCISP e PCMSP são secundários quando comparados à circulação induzida pelo vento.
- Os resultados dos experimentos confirmam a capacidade do modelo em reproduzir aspectos hidrodinâmicos relacionados à subsidência e à ressurgência costeira.

- Foi comprovado o caráter efetivo da intrusão da ACAS na PCMSP e na PCISP em resposta ao vento climatológico de verão.
- A região de Ubatuba apresentou-se como a região mais propícia da área analisada ao desenvolvimento de intrusões da ACAS.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, M. A., 1992. Correntes de maré e inerciais na plataforma continental ao largo de Ubatuba (SP). *Dissertação de Mestrado*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 162 p.
- Amante, C. ; Eakins, B. W., 2008. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, National Geophysical Data Center, NESDIS, NOAA. U.S. Department of Commerce, Boulder, CO.
- Amor, C. C., 2004. Intrusões da Água Central do Atlântico Sul sobre a Plataforma Continental situada entre a Ilha de São Sebastião (SP) e o Cabo de São Tomé (RJ). *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo. Instituto Oceanográfico. 254 p.
- Blumberg, A. F. ; Kantha, L. H., 1985. Open Boundary Condition for Circulation Models, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 111, pp. 237-255.
- Blumberg A. F. ; Mellor, G. L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, N. S. Heaps (Ed.), American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 1-16.
- Brink, K. H., 1982. A comparison of long coastal trapped wave theory with observations off Peru. *Journal of Physical Oceanography*, 13, pp. 103-116.

- Campos, E. J. D. ; Gonçalves, J. E. ; Ikeda, Y., 1995. Water mass structure and geostrophic circulation in the South Brazil Bight - Summer of 1991. *J. Geophys. Res.*, 100 (C9), pp. 18.537-18.550.
- Castro, B. M., 1985. Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter. *Tese de Doutorado*. University of Miami, Florida, USA. 211 p.
- Castro, B. M., 1990. Wind driven currents in the Channel of São Sebastião. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, São Paulo, 28, pp. 185-200.
- Castro, B. M., 1996. Correntes e Massas de Água da Plataforma Continental Norte de São Paulo. *Tese de Livre-Docência*, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 248 p.
- Castro, B. M. ; Lee, T., 1995. Wind Forced Sea Level Variability On the Southeast Brazilian Shelf. *J. Geophys. Res.*, 100(8), pp. 16045-16056.
- Castro, B. M. ; Lorenzzetti, J. A. ; Silveira, I. C. A. ; Miranda, L. B., 2006. Estrutura Termohalina e Circulação na Região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: C.L.D.B. Rossi-Wongtschowski & L.S.P. Madureira (org.), *O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil*, Editora da Universidade de São Paulo, pp. 11-120.
- Castro, B. M. ; Miranda L. B., 1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 4°N and 34°S. In: A.R. Robinson & K.H. Brink (ed.), *The Sea*, John Wiley & Sons, New York, vol. 11, pp. 209-251.
- Castro, B. M. ; Miranda, L. B. ; Miyao, S., 1987. Condições Hidrográficas na Plataforma Continental ao largo de Ubatuba: Variações Sazonais e em Média escala. *Bolm. Inst. Oceanográfico*, 35 (2), pp. 135-151.
- Castro, B. M. ; Miranda, L. B. ; Silva, L. S. ; Fontes, R. C. F. ; Pereira A. F. ; Coelho, A. L., 2008: Processos físicos: hidrografia, circulação e

transporte. In: Pires-Vanin, A. M. S. (org), Oceanografia de um Ecossistema Subtropical. EDUSP, São paulo, pp. 59-121.

Cirano, M. ; Campos, E. I. D., 1996. Numerical diagnostic of the circulation in the Santos Bight with COROAS hydrographic data. Rev. Bras. Oceanogr., 44 (2), pp. 105- 121.

Coelho, A. L., 2008. Resposta da Plataforma Continental Sudeste a ventos sazonais e sinóticos de verão: estudos numéricos. *Tese de Doutorado*, Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 188 p.

Csanady, G. T., 1974. Barotropic Currents over The Continental Shelf. J. Phys. Oceanogr., 4, pp. 357-371.

Dottori, M., 2001. Resposta da plataforma continental de São Paulo a forçante do vento transiente. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 105 p.

Dottori, M. ; Castro Filho, B. M., 2009. The response of the São Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds. Ocean Dynamics, v. 59, pp 603-614.

Egbert, G.D. ; Erofeeva, S.Y., 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 19(2), pp. 183-204.

Emilsson, I., 1961. The shelf and coastal waters off southern Brazil. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, São Paulo, 11 (2), pp. 101-112.

Evans, D. L. ; Signorini, S. R., 1985. Vertical structure of the Brazil Current, Nature, 315, pp. 48-50.

Ezer, T. ; Mellor, G. L., 1994. Diagnostic prognostic calculations of the North Atlantic circulation and sea level using a sigma coordinate ocean model. J. Geophys. Res., 99, 14, pp. 159- 171.

- Fairall, C. W. ; Bradley, E. F. ; Rogers, D. P. ; Edson, J. B. ; Young, G.S., 1996. Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment, J. Geophys. Res., 101, pp. 3747-3764.
- Fontes, R. F. C., 1995. As correntes no Canal de São Sebastião. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 159 p.
- Gonçalves, J. E., 1993. Estrutura Termohalina, Campos de Velocidade e Transportes geostróficos da Corrente do Brasil entre Rio de Janeiro (RJ) e Iguape (SP). *Dissertação de Mestrado*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 98 p.
- GTSP – Global Temperature-Salinity Pilot Project. International Oceanographic Commission. Fourth Session, Washington DC, UNESCO 1990.
- Haidvogel, D. B. ; Arango, H. G. ; Budgell, W. P. ; Cornuelle, B.D. ; Curchitser, E. ; Di Lorenzo, E. ; Fennel, K. ; Geyer, W. R. ; Hermann, A. J. ; Lanerolle, L. ; Levin, J. ; McWilliams, J. C. ; Miller, A. J. ; Moore, A. M. ; Powell, T. M. ; Shchepetkin, A. F. ; Sherwood, C. R. ; Signell, R. P. ; Warner, J. C. ; Wilkin, J., 2008: Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System, 2008. Journal of Computational Physics, 227 (7), pp. 3595-3624.
- Harari, J. ; Camargo, R., 1994. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré da plataforma sudeste brasileira através do modelo numérico hidrodinâmico. Bolm Inst. Oceanogr., São Paulo, 42, pp. 35-54.
- Hedstrom, G. W., 1979. Nonreflecting boundary conditions for nonlinear hyperbolic systems, J. Comput. Phys. 30, pp. 222-237.
- Hellerman, S. ; Rosenstein, M., 1983. Normal monthly wind stress over the World Ocean with error estimates. J. Phys. Oceanogr., 13, pp. 1093-1104.

- Kanamitsu, E. M. ; Kistler, R. ; Collins, W. ; Deaven, D. ; Gandin, L. ; Iredell, M. ; Saha, S. ; White, G. ; Woolen, J. ; Zhu, Y. ; Chelliah, M. ; Ebisuzaki, W. ; Higgins, W. ; Janowiak, J. ; Mo, K. ; Ropelewski, C. ; Wang, J. ; Leetmaa, A. ; Reynolds, R. ; Kalnay, R. J. ; Joseph, D., 1996. The NCEP / NCAR 40-year reanalysis project. *Amer. Meteor. Soc.* 77 (3), pp. 437-470.
- Lorenzzetti, J. A., 1994. Southwestern Atlantic Surface Features Observed from AVHRR Images during Project COROAS (1992 to 1994). In: *Southwestern Atlantic Physical Oceanography Workshop. Publicação IOUSP.* 49 p.
- Marsaleix P. ; Auclair F. ; Estournel C., 2006. Considerations on Open Boundary Conditions for Regional and Coastal Ocean Models. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, pp. 1604-1613.
- Martinsen, E. A. ; Engedahl H., 1987. Implementation and testing of a lateral boundary scheme as an open boundary condition in a barotropic ocean model, *Coastal Engineering*, 11, pp. 603-627.
- Mazzini, P. L. F. M., 2010. Correntes subinerciais na Plataforma Continental Interna entre Peruíbe e São Sebastião: Observações. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 112 p.
- Mesquita, A. R. ; Harari, J., 1983. Tides and tide gauges of Cananéia and Ubatuba – Brazil (Lat. 24 S). *Relat. Int. Inst. Oceanogr. Univ. S. Paulo*, 11, pp. 1-14.
- Mesquita, A. R. ; Harari, J., 1987. Harmonic constants of tides and currents of the Southern Brazilian Shelf. In: *Simpósio sobre ecossistemas da costa sul e sudeste brasileira. Publicação ACIESP no. 54-II*, pp. 415-422.
- Miranda, L. B., 1982. Análise de massas de água da plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) à Ilha de São Sebastião (SP). *Tese de Livre-Docência*, Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 194 p.

- Miranda, L. B. ; Castro, B. M., 1982. Geostrophic Flow Conditions of The Brazil Current at 19° South. CIENCIA INTERAMERICANA, Washington, DC, v. 22, n. 1-2, pp. 44-48.
- Miranda, L. B. ; Castro, B. M., 1995. Variabilidade da Circulação e do Transporte de Volume no Canal de São Sebastião (SP): Outono de 1980. *Publicação especial do Instituto Oceanográfico*, 11, pp. 1-9.
- Moreira, J. R. G. B., 1997. Correntes na Plataforma Externa e Talude ao Largo de Santos: Observações no Verão de 1993. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 214 p.
- Moreira, M. H., R., 1998. Circulação na Plataforma Continental Interna do Litoral Norte do Estado de São Paulo. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 153 p.
- Mori, N., 2007. Open Boundary Condition. Roms Memorandum. Osaka City University. 15 p.
- Oliger J. ; Sundström, A., 1978. Theoretical and practical aspects of some initial boundary value problems in fluid mechanics. SIAM J. Appl. Math., 35, pp. 419-446.
- Oreskes, N. ; Shrader-Frechette, K. ; Belitz, K., 1994. Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. Science, 263, pp. 641-646.
- Orlanski I., 1976. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows, J. Comput. Phys., 21, pp. 251-269.
- Palma, E. D. ; Matano, R. P., 1998. On the implementation of passive open boundary conditions to a general circulation model: The barotropic mode, J. Geophys. Res., 103, pp. 1319-1341.
- Palma, E. D. ; Matano, R. P., 2000. On the implementation of passive open boundary conditions for a general circulation model: The three-dimensional case. J. Geophys. Res., 105, pp. 8605-8627.

- Pereira, A. F. ; Castro, B. M., 2007. Internal tides in the Southwestern Atlantic off Brazil: Observations and numerical modeling. *Journal of Physical Oceanography*, 37, pp. 1512-1526.
- Pereira, A. F. ; Castro, B. M. ; Calado, L. ; Silveira, I. C. A., 2006a . Numerical simulations of the M2 internal tides on the South Brazil Bight and their interaction with Brazil Current. *In: 2006 Ocean Sciences Meeting, 2006, Honolulu. Ocean Sciences Meeting Suppl.. Washington: American Geophysical Union, 2006. v. 87. p. OS26H-13.*
- Pereira, A. F. ; Castro, B. M. ; Calado, L. ; Silveira, I. C. A., 2006b. The effect of the Brazil Current on the propagation of internal tides on the South Brazil Bight. *In: III Simpósio Brasileiro de Oceanografia, 2006, São Paulo. Resumos do III Simpósio Brasileiro de Oceanografia. São Paulo: www.mester.com.br, 2006.*
- Pereira, A. F. ; Castro, B. M. ; Calado, L. ; Silveira, I. C. A., 2007. Numerical simulation of M₂ internal tides in the South Brazil Bight ad their interaction with the Brazil Current. *Journal of Geophysical Research*, 112, pp. 1-17.
- Peterson, R. G. ; Stramma, L., 1990. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 26, pp. 1-73.
- Picarelli, S. S., 2006. Análise da hidrodinâmica da região costeira centro sul do Estado de São paulo através de modelagem numérica - efeitos de maré, de ventos e do campo de densidade. *Tese de Doutorado*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. Instituto Oceanográfico. 115 p.
- Rezende, J. H. M., 2003. Intrusões da Água Central do Atlântico Sul na Plataforma Continental Sudeste durante o verão. *Tese de Doutorado*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 120 p.
- Ruffato, D. G., 2007. Marés barotrópica e baroclínica na porção norte da Plataforma Continental Sudeste. *Monografia de Graduação*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 109 pp.

- Samuels, B. ; Cox, M., 1987. Data set atlas for ocean modeling. *Ocean modeling*, 75, pp. 1-3.
- Signorini, S. R., 1978. On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay. *Deep-Sea Research*, v. 25, n. 5, pp. 481-490.
- Song, Y. ; Haidvogel, D. B., 1994: A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *J. Comp. Phys.*, 115 (1), pp. 228-244.
- Stramma, L., 1989. The Brazil Current Transport South of 23°S. *Deep Sea Res.*, 36 (4A), pp. 639-646.
- Stramma, L. ; Ikeda, Y. ; Peterson, R. G., 1990. Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20°S. *Deep-Sea Research*, 37 (12), pp. 1875-1886.
- Valente, M. H. M., 1998. Circulação na Plataforma Interna do Litoral Norte do Estado de São Paulo. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 153 p.
- Warner, J. C. ; Sherwood, C. R. ; Signell, R. P. ; Harris, C. K. ; Arango, H. G., 2008. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*, 34, pp. 1284-1306.
- Zembruscki, S., 1979. Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. In PROJETO REMAC. Geomorfologia da margem continental brasileira e das demais regiões oceânicas adjacentes PETROBRAS. CENPES. DINTOP (Série REMAC no. 7), Rio de Janeiro, pp. 129-177.