

# ESTUDO NUMÉRICO DA SIMULAÇÃO DA ESTRUTURA TÉRMICA DO CANAL DE SÃO SEBASTIÃO À PASSAGEM DE UMA FRENTE FRIA

SILVA, L. dos S. <sup>(1)</sup>; MIRANDA, L. B. <sup>(2)</sup>; CASTRO FILHO, B. M. de <sup>(3)</sup>

Centro Universitário Lusíada (UNILUS) <sup>(1)</sup>

Rua Armando Salles de Oliveira, 150 – 11050-071 – Santos – SP – Brasil

Fone (13) 3235-1311; Fax (13) 3221-4488

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo <sup>(2, 3)</sup>

Praça do Oceanográfico, 191 – 05508-900 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – Brasil

Fone (11) 3091-6598

lourval@uol.com.br <sup>(1)</sup>; miranda@io.usp.br <sup>(2)</sup>; bmcastro@usp.br <sup>(3)</sup>

## Resumo

O Princeton Ocean Model foi adaptado ao Canal de São Sebastião (CSS) através do aninhamento de três grades numéricas para estudar a resposta da estrutura termohalina e da circulação do canal à passagem de uma frente fria. A grade de menor resolução compreende a Plataforma Continental Sudeste (PCSE) sendo que a de maior resolução está no CSS, com uma grade de resolução intermediária, de Parati-RJ a Santos-SP. O modelo é integrado durante vinte dias com vento climatológico de fevereiro e climatologia de verão e a partir de então o vento é trocado diariamente através de uma interpolação linear a cada passo de tempo. Os resultados do modelo sugerem a rápida resposta das águas do canal com o recuo para o largo da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e pronto retorno assim que a frente deixa a plataforma. Ventos de nordeste na grade da PCSE são imprescindíveis para que a ACAS penetre o Canal de São Sebastião.

**Palavras-chave:** Modelagem Numérica. Estrutura Termohalina. Corrente. Frente Fria.

## 1 INTRODUÇÃO

A região sul-sudeste da costa brasileira situa-se entre as latitudes de 19° e 34° S. A orientação predominante de sua costa é NE-SW, com exceção das regiões localizadas ao sul de Cabo Frio (23° S), cuja orientação é E-W, e ao norte do Cabo de Santa Marta (28° 40' S), cuja orientação é N-S. Estes dois cabos, Cabo Frio e Cabo de Santa Marta, delimitam a chamada Plataforma Continental Sudeste (PCSE) (Fig. 1), cuja parte mais larga, cerca de 230 km, está localizada em frente a Santos e as mais estreitas nas proximidades de Cabo Frio, com 50 km e Cabo de Santa Marta, com 70 km.

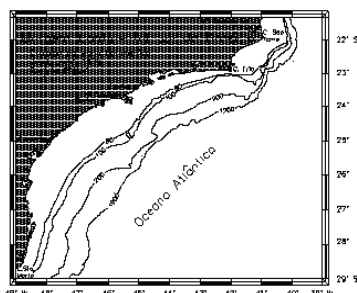


Figura 1 - A Plataforma Continental Sudeste.

O comprimento da Plataforma Continental Sudeste é aproximadamente de 1000 km. A profundidade da quebra da plataforma varia entre 120 m e 180 m e a área total da PCSE está ao redor de 150.000 km<sup>2</sup> [1].

O Canal de São Sebastião e região costeira adjacente (Fig. 2 e 3) estão localizados na parte central da plataforma continental sudeste brasileira, região esta denominada Embaiamento de São Paulo [1]. Ela se caracteriza pela proximidade da Corrente do Brasil, que flui ao longo do talude continental, transportando massas de água de origens distintas: a Massa de Água Tropical (AT) e a Massa de Água Central do Atlântico Sul (ACAS). A influência da AT é predominante na camada de superfície e, nas camadas mais profundas, a ACAS contribui com um volume superior a 50 % do volume total da água da plataforma continental para a formação das massas de água a leste da Ilha de São Sebastião [2].

O Canal de São Sebastião (CSS) está localizado na parte nordeste do Estado de São Paulo (SP) entre a planície costeira e a Ilha de São Sebastião.

Esse canal tem aproximadamente 22 km de comprimento, estendendo-se entre as latitudes 23° 41' e 23° 54' S. Ele tem uma forma curva cuja orientação com o norte verdadeiro varia entre NE e N nas suas entradas sul e norte, respectivamente.

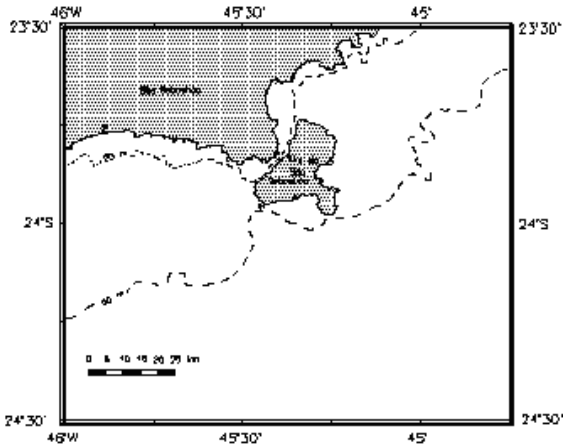


Figura 2 - A Região Costeira adjacente ao Canal de São Sebastião.

Essas entradas, com a configuração afunilada, têm larguras aproximadas de 7,2 e 5,6 km, e a parte mais estreita, com aproximadamente 1,9 km, está localizada na Ponta Araçá (Fig. 3). A região mais profunda do canal está localizada no lado insular, onde a profundidade varia aproximadamente entre 20 m nas entradas norte e sul, até uma profundidade máxima de aproximadamente 50 m na parte central do CSS.

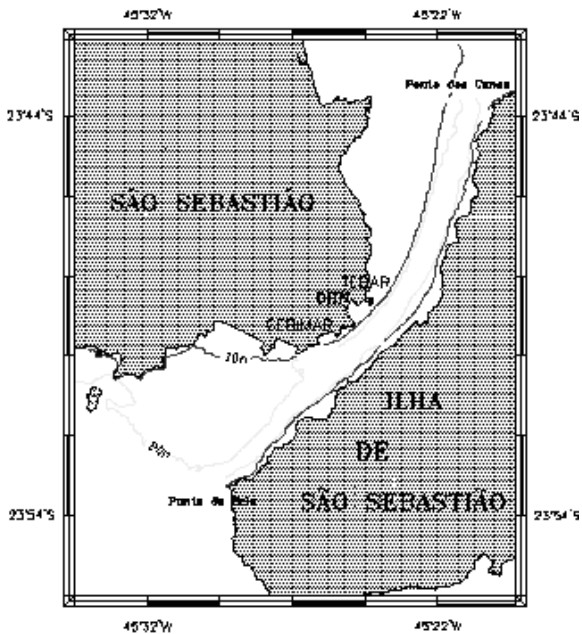


Figura 3 - O Canal de São Sebastião.

O lado insular, onde ocorrem as maiores profundidades, designado como canal principal, caracteriza-se por uma topografia do fundo submarino com acentuadas inclinações laterais. Deve-se ressaltar a singularidade do CSS em costas brasileiras, não somente em relação às suas dimensões físicas, como também em relação ao fato de que se trata de um canal não estuarino, o que torna sua oceanografia física bem particular.

Modelos numéricos da circulação gerada pelo vento no Embaiamento de São Paulo foram desenvolvidos por Harari [3] e Castro Filho [4]. Esse

último desenvolveu um modelo numérico hidrodinâmico barotrópico e hierarquizado na forma de ninhos e com três grades, a de maior resolução foi localizada no CSS.

Ficou demonstrado que a circulação no Canal de São Sebastião resultante desse modelo no inverno, quando a coluna de água apresenta-se pouco estratificada, é uma manifestação local de movimento de escala espacial muito maior, predominantemente gerada pelo vento.

A região entre Ubatuba e a Ilha de São Sebastião foi pesquisada com amostragens quase-sinóticas em períodos de verão e de inverno, entre os anos de 1985 e 1988. Os resultados da análise dos dados para o verão de 1985 e o inverno de 1986 [5] mostraram padrões distintos de distribuição de massas de água em dois domínios (interior e costeiro, e exterior), separados por uma zona frontal térmica bem definida no inverno.

Durante o verão o domínio interior tem uma estratificação de massa em duas camadas, gerada pelo desenvolvimento da termoclina sazonal, que se intensifica devido ao efeito advectivo da ACAS nesta época do ano. No inverno a sua estrutura térmica tende a uma quase homogeneidade vertical. Com métodos de análise das curvas T-S, esses pesquisadores [5] calcularam os percentuais de contribuição da AT e ACAS, para a formação da Massa de Água Costeira (AC).

Castro [6], analisando dados de sete cruzeiros hidrográficos e de fundeios de correntógrafos, identifica na Plataforma Continental Norte de São Paulo, três regiões com características diferentes: plataforma continental interna (PCI), plataforma continental média (PCM) e plataforma continental externa (PCE). O autor destaca que essas três regiões são separadas por duas frentes: a frente halina superficial entre a PCM e a PCE e a frente térmica profunda que separa a PCI e a PCM. Segundo o autor, a intrusão da ACAS na PCM é sazonal e está presente durante todo o ano na PCE.

Um modelo de dispersão desenvolvido por Soares [7] calculou, com base nos resultados do modelo hidrodinâmico de Castro Filho [4], o espalhamento de uma mancha formada a partir do derrame de 250000 toneladas de uma substância no ponto central do Canal de São Sebastião. Os resultados mostraram que, para uma situação hipotética de vento constante, quatro dias são suficientes para praticamente limpar o Canal de São Sebastião.

Um longo conjunto de dados correntográficos, coletados no CSS durante os anos de 1992 e 1993, foi analisado por Fontes [8]. Neste trabalho constatou-se um padrão sazonal para a circulação, com velocidades médias em torno de 0,40 a 0,60 m.s<sup>-1</sup>, circulação no interior do CSS essencialmente barotrópica, fluxo unidirecional predominantemente para NE em uma camada durante o outono, inverno e primavera.

No verão, entretanto, podem ocorrer fluxos baroclínicos bidirecionais em duas camadas, predominantemente para SW e para NE nas camadas superficial e profunda, respectivamente. Ainda, segundo o autor, aqueles fluxos baroclínicos estariam associados à tensão de cisalhamento do vento e à penetração da ACAS pela extremidade sul do canal.

Os dados analisados por Silva [9] e Silva [10], seis cruzeiros hidrográficos coletados no período entre fevereiro de 1994 e março de 1995, confirmam a homogeneidade das águas do Canal de São Sebastião durante os meses de inverno e sugerem a influência da ACAS na entrada sul do canal em meses de verão (ventos preponderantes de nordeste) que podem, em circunstâncias ideais, levar à formação de duas camadas.

Coelho [11] analisou dados coletados de 16 cruzeiros oceanográficos no CSS e 4 cruzeiros na Plataforma Continental adjacente à ISS entre 1992 e 1993. O autor destaca o domínio da Água Costeira no CSS no outono, inverno e início de primavera e a intrusão da ACAS no fundo do CSS no verão e fim de primavera. Essa massa de água flui para NE no fundo, enquanto a Água Costeira flui para SW, na superfície.

Leandro [12] elaborou a climatologia da região, através de dados hidrográficos e correntométricos, coletados de 37 cruzeiros hidrográficos realizados entre janeiro de 1992 e março de 1997, em treze estações no Canal de São Sebastião. Neste trabalho o autor observa baixos valores das médias de temperatura no lado insular da entrada sul do canal durante a primavera e o verão, e a homogeneidade das águas no inverno.

A circulação do Canal de São Sebastião e sua estrutura termohalina têm sido estudadas em diversos trabalhos, entre artigos, dissertações de mestrado e teses de doutoramento. Estes trabalhos tiveram como ferramenta a análise de dados hidrográficos e correntográficos. Somente dois apresentaram modelos numéricos de sua circulação. Como estes modelos apresentaram a circulação do CSS em meses de inverno, quando a coluna de água é bastante homogênea, são, portanto, modelos barotrópicos. A seqüência natural agora é apresentar um modelo que represente a circulação e a estrutura termohalina do CSS durante todo o ciclo anual, o que será possível através de um modelo baroclínico.

Uma questão de interesse científico, levantada freqüentemente na região de estudo, diz respeito à penetração de águas frias pela entrada sul do canal, o que já foi confirmado em muitos trabalhos. Diante do acima exposto este trabalho tem como objetivo aplicar um modelo baroclínico ao Canal de São Sebastião para estudar sua circulação e estrutura termohalina como resposta à passagem de uma frente fria pela região.

## 2 METODOLOGIA

O modelo utilizado neste trabalho foi desenvolvido por George L. Mellor em 1975 e vem sendo constantemente refinado e atualizado de modo

a incluir melhores representações físicas e maior robustez numérica. Uma descrição prévia desse modelo de circulação costeira e estuarina, tridimensional e dependente do tempo pode ser encontrada em Blumberg e Mellor [13].

Esse modelo tem sido usado em numerosos estudos, em várias regiões costeiras, tais como: o Golfo do México [14]; em Delaware Bay, incluindo a região estuarina e a plataforma continental adjacente [15], [16]; em Chesapeake Bay [17] e mais recentemente em Massachusetts Bay [18]. Em todos esses estudos, os resultados do modelo foram amplamente comparados com os dados disponíveis, sendo bem representada a realidade física de cada reprodução.

A escolha do modelo, como justificado, permite resolver a topografia e a linha de costa de maneira bastante realística. Desse modo se procederá à escolha de uma grade e de subgrades que permitam resolução adequada aos fenômenos em estudo, em cada escala de interesse.

Para modelar o Canal de São Sebastião, a exemplo do trabalho de Castro [4], a plataforma continental sudeste é forçada para se obter as condições de contorno no canal. A grade tem três níveis: a grade maior com malhas quadradas de 13200 m estendendo-se de Cabo Frio ao Cabo de Santa Marta, uma grade intermediária com malhas quadradas de 2640 m envolvendo a região do Canal de São Sebastião, desde Parati, ao norte, até Santos, ao sul, e finalmente uma grade de maior resolução com malhas de 528 m contendo o Canal de São Sebastião.

O total de pontos da grade maior é de 2520, da grade intermediária, 2640, e da grade menor, 2064. Estas grades possuem uma inclinação de 51°, sentido horário, em relação ao norte geográfico (Fig. 4). Esta rotação, além de diminuir o tempo computacional (pois possui menor número de pontos de grade do que uma grade de orientação norte – sul, que envolva a mesma região), tem sua componente  $v$  de velocidade das correntes aproximadamente ao longo da costa e automaticamente a componente  $u$ , perpendicular à costa.

Na plataforma, os dados termohalinos vêm do Programa de Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva (REVIZEE) que conta com uma densa massa de dados coletada sistematicamente desde o Ano Geofísico Internacional (1957) ao longo da costa brasileira. Esses dados, após tratamento adequado, geraram a climatologia das águas da plataforma continental sudeste com resolução espacial de pelo menos 1° de latitude e 1° de longitude.

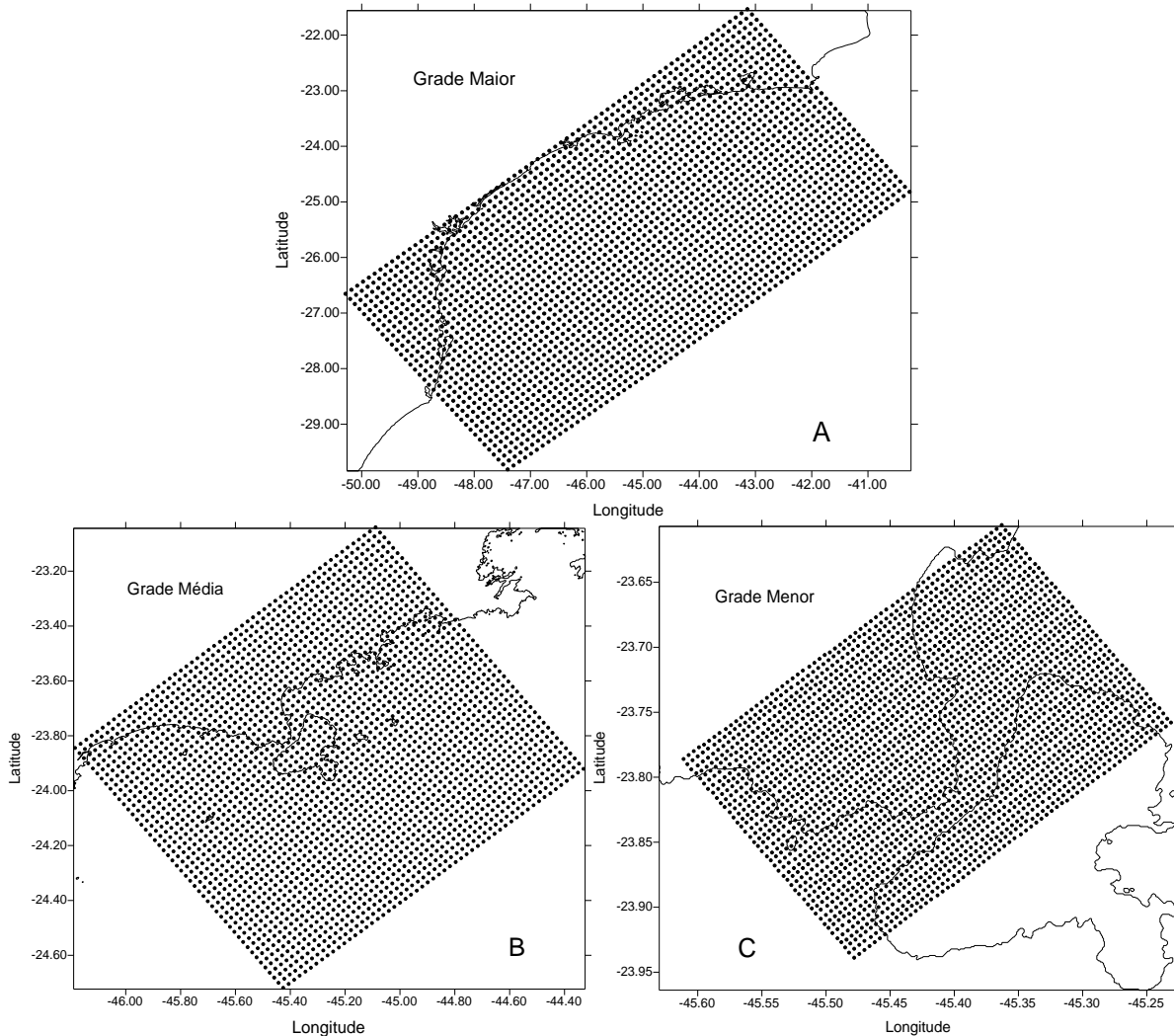


Figura 4 - As Grades Maior (A), Média (B) e Menor (C).

O tratamento desses dados 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 faixas de 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); (c) obtenção das médias e dos desvios padrão dos dados para cada um desses subconjuntos.

Seqüencialmente e já neste trabalho, os dados foram interpolados horizontalmente em profundidades padronizadas através do método 'kriging' para os pontos de grade na PCSE e na PCI. Em seguida, esses dados foram interpolados verticalmente através do método 'cubic spline' e descritos em um sistema de coordenadas sigma com 11 níveis. Estes níveis têm uma distribuição logarítmica na superfície e no fundo, permitindo maior resolução, e uma distribuição linear no restante da coluna d'água.

Os dados termohalinos utilizados para a inicialização do modelo junto à grade menor (no CSS) têm origem na Climatologia do Canal de São Sebastião [12] a partir dos dados dos projetos HIDROCASS e OPISS sistematicamente amostrados

desde 1992 em intervalos aproximados de 40 dias e em 13 estações ao longo do CSS.

Além dos dados termohalinos, o modelo também é forçado com dados que representam médias mensais de fluxos de calor e de sal, radiação de ondas curtas e tensão de cisalhamento do vento (TCV). Esses dados são obtidos de COADS (Comprehensive Ocean-Atmospheric Data Set).

A condição de contorno escolhida para a grade maior foi a forma implícita da condição radiativa de Orlanski [19], que é um esquema centrado no tempo e avançado no espaço, em conjunto com uma técnica de relaxação na região estendida da grade. Esta técnica de relaxação foi implementada originalmente por Martinsen e Engedhal [20] como uma condição de contorno aberta, utilizando um modelo linear de águas rasas. A avaliação da performance destas condições de contorno pode ser encontrada em Chapman [21] e Palma e Matano [22]. Estas condições de contorno foram usadas para as propriedades nível do mar e as componentes de velocidade paralelas aos contornos; para as componentes de velocidade perpendiculares ao contorno foi utilizada uma condição não gradiente. Os dados gerados pela grade maior são armazenados nos contornos da grade média, interpolados no tempo e no espaço e após o experimento, esta por sua vez

armazena os dados nos contornos da grade menor, caracterizando desse modo condição de contorno ativa nas grades interiores. Neste modelo, os dados armazenados nos contornos das grades interiores foram: o nível do mar, as componentes de velocidade da corrente (tanto aquelas tomadas como média vertical, assim como aquelas dentro de cada camada sigma), a temperatura e a salinidade.

Os índices termohalinos da AT e da ACAS não apresentam variações sazonais significativas [23] na borda da plataforma continental. Em decorrência deste fato, os índices termohalinos das massas de Água Central do Atlântico Sul e Água Tropical adotados neste trabalho para o cálculo de percentuais foram os adotados por Coelho [11], através da análise do diagrama T-S espalhado de 16 cruzeiros oceanográficos na PCI e no CSS; estes índices são (13,2°C; 35,27) para a ACAS e (24,11°C; 37,18) para a AT. Estes índices são muito próximos aos obtidos por Silva [23] e Castro [6]. O índice termohalino da Água Costeira foi obtido através do diagrama T-S espalhado após cada experimento, identificando na curva os pontos com maior temperatura, associados às menores salinidades.

Para a melhor visualização dos dados, foram efetuados cortes transversais e longitudinais no CSS. Os cortes transversais no CSS são quatro: um ao sul (seção A), um ao norte (seção D) e dois intermediários (seções B e C). Estas seções foram colocadas tão próximas quanto possível das seções de coleta de dados realizadas no local com a intenção de melhor poder comparar os resultados do modelo com trabalhos experimentais anteriores.

Com o objetivo de avaliar a performance das condições de contorno, as seguintes integrais foram calculadas, como em Palma e Matano [22]:

Energia mecânica =

$$\left(\frac{1}{A_T}\right) \cdot \left[ \int_A \rho \cdot q \cdot \eta^2 dA + \int_A 0,5 \cdot \rho \cdot (U^2 + V^2) dA \right]$$

Nível médio =

$$\left(\frac{1}{A_T}\right) \cdot \int_A n dA$$

Fluxo de energia =

$$\left(\frac{1}{W}\right) \cdot \int_0^W D \cdot U \cdot \left( g \cdot \eta + \frac{1}{2} \cdot U^2 + \frac{1}{2} \cdot V^2 \right) dy$$

A área do domínio é, W é o comprimento do contorno aberto e D é a profundidade local. A energia mecânica e o nível do mar são valores médios sobre a área do domínio. A energia mecânica é usada para avaliar os níveis de energia das simulações ao passo que o nível do mar médio é utilizado para avaliar a condição de contorno com relação ao fluxo de massa através dos contornos abertos. O fluxo de energia é calculado tomando-se a média sobre o comprimento da bacia nos contornos abertos e é usada para detectar reflexões de ondas.

A simulação dos efeitos sobre a estrutura termohalina e sobre a circulação à passagem de uma frente fria pela PCSE é então implementada em modo prognóstico e descrita a seguir.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um conjunto de dados de velocidade do vento para o período de 21/02/1992 a 05/03/1992 de Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) foi utilizado para simular uma frente fria na Plataforma Continental Sudeste, com particular interesse no Canal de São Sebastião.

Os dados da FNMOC têm resolução de 2,5° x 2,5° e período de 6 horas. Nossa latitude de referência é 24° e a longitude 45° (proximidades do CSS). O CSS está sob regime de ventos de sudoeste no dia 21/02/92 e uma frente fria se aproxima do sul. O local é atingido pela frente fria no dia 25/02/92, e ela dirige-se deste local para o leste. Uma nova frente chega no dia 28/02/92 e passa totalmente pelo CSS no dia 04/03/92. Maiores detalhes desta frente fria podem ser vistos em Silva [24]. O modelo é integrado durante vinte dias com vento climatológico de fevereiro e climatologia de verão, isto é, do dia 01/02/92 ao dia 20/02/92. A partir deste dia, o vento é trocado diariamente, tendo sido efetuada uma interpolação linear a cada passo de tempo.

As figuras de 5 e 6 mostram a distribuição vertical da temperatura junto à seção A do Canal de São Sebastião do dia 20/02/92 ao dia 05/03/92. No dia 20/02 as temperaturas superficiais variam entre 23°C no oeste, e 27°C no leste. Em destaque no centro do canal está a isoterma de 16°C e no fundo, temperaturas maiores do que 11°C.

O quadro apresentado no dia 21/02 não é muito diferente do dia anterior, a não ser por um leve aquecimento das águas superficiais e ligeiro esfriamento das águas de fundo. No dia 22/02 há um aquecimento geral na seção e a isoterma de 16°C se aprofunda aproximadamente 5 m.

A isoterma de 12°C desaparece no fundo e a de 26°C na superfície, antes só no lado leste, ocupa agora o lado oeste. No dia 23/02 as águas na seção continuam aquecendo; a isoterma de 16°C no fundo se aprofunda mais 5 m desaparecendo agora a de 13°C. Dia 24/02, há um leve aquecimento em todas as profundidades e no dia 25/02, o estado térmico se mantém.

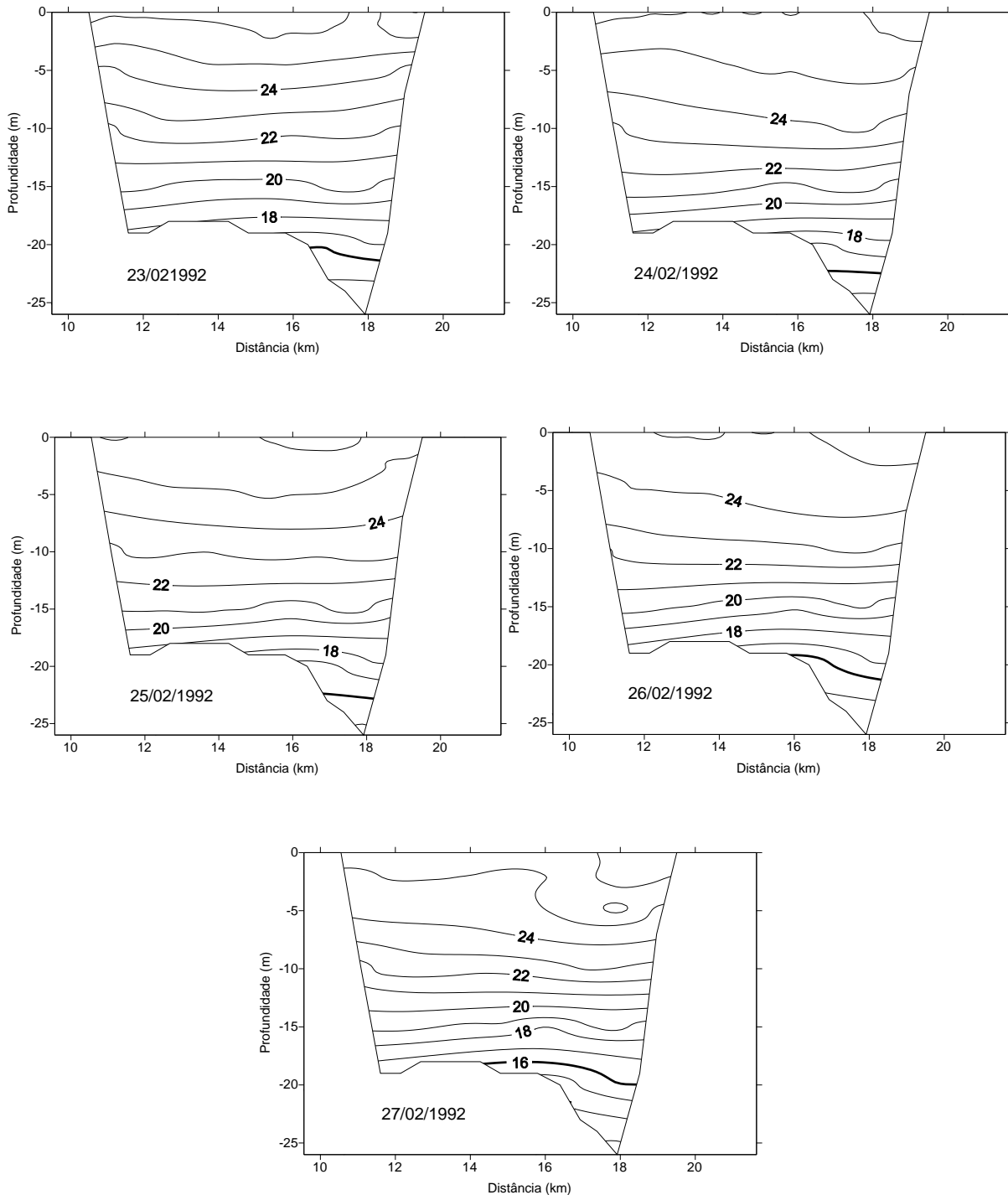
Em decorrência do afastamento da frente fria para leste, ocorre uma diminuição das temperaturas na seção nos dias 26 e 27/02, a isoterma de 16°C se eleva e a de 13°C ressurgiu no fundo. No dia 27/02, enquanto uma frente fria se afasta para o oceano, outra surge no sul da PCSE e alcança o CSS no dia 28/02. As isotermas na seção, neste dia, sofrem uma rotação anti-horária com aumento das temperaturas principalmente no lado oeste e no fundo da seção; neste local, a temperatura se elevou de 13°C para 17°C. As isotermas sofrem rotação horária, alinhando-se com a horizontal no dia seguinte (29/02), e a temperatura no fundo aumenta 1°C aproximadamente.

Este estado permanece praticamente inalterado no dia 01/03. No dia 02/03 há aumento de temperatura no fundo e a isoterma de 19°C desaparece; é bem nítida neste dia a isoterma de 27°C na superfície. Embora não surjam novas

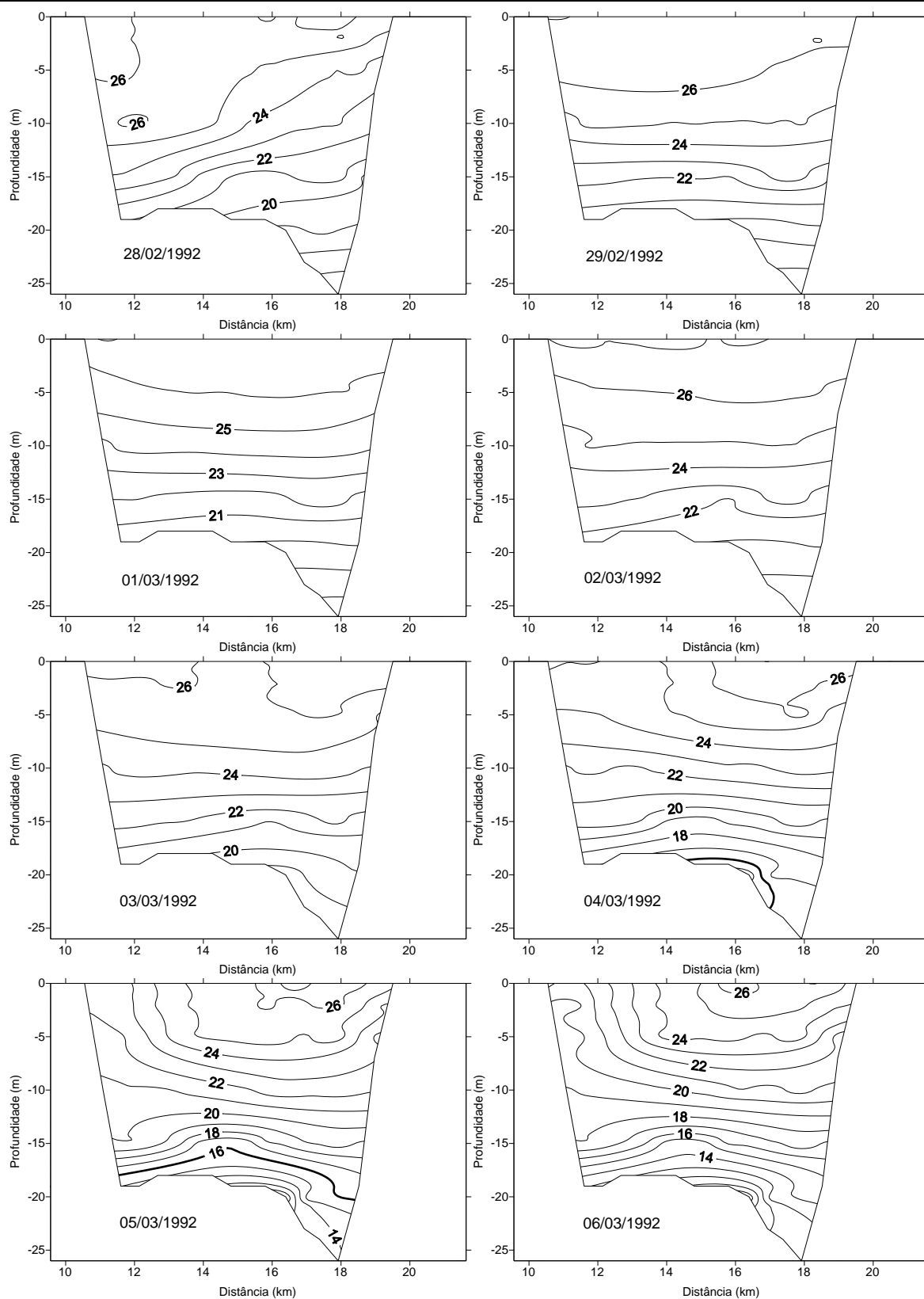
isotermas no fundo no dia 03/03, todas se elevam, desaparecendo na superfície a de 27°C.

No dia 04/03 há uma diminuição das temperaturas no fundo com o ressurgimento da isoterma de 16°C e no dia 05/03 a distribuição vertical de temperatura da seção é praticamente a mesma que a do dia 20/02.

No norte do CSS, durante a passagem da frente fria, ocorre aumento de temperatura no fundo, porém essa diferença tem amplitude bem menor que aquela encontrada no sul do canal.



**Figura 5 - Distribuição vertical de temperatura junto à seção A, no sul do Canal de São Sebastião, nos dias 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27 de fevereiro de 1992, durante a simulação numérica de uma frente fria através da Plataforma Continental Sudeste.**



**Figura 6 - Distribuição vertical de temperatura junto à seção A, no sul do Canal de São Sebastião, nos dias 28 e 29, de fevereiro de 1992 nos dias 01, 02, 03, 04, 05 e 06 de março de 1992, durante a simulação numérica de uma frente fria através da Plataforma Continental Sudeste.**

Foram desenvolvidas séries temporais das componentes de velocidade das correntes, de temperatura e de nível do mar em três pontos,

localizados no sul, no centro e no norte do CSS, na superfície e no fundo.

As Fig. 7 e 8 mostram séries temporais das componentes de velocidade  $v$  e  $u$ , no sul e no norte do CSS, respectivamente.

Observa-se que o regime de correntes na superfície é para sul, com exceção do período em que o canal está sob a influência da frente fria, quando as correntes superficiais fluem para norte.

As Fig. 7 A e 8 A apresentam, cada uma delas, dois máximos da componente  $v$ , o da esquerda, relativo à passagem da primeira frente fria, de intensidade menor, e o da direita, relativo à passagem da segunda frente fria, de maior intensidade que a

primeira. De maneira geral, a componente  $u$  inverte seu sinal durante a passagem da frente. No fundo, observa-se que a circulação é preponderantemente para norte e, durante a passagem da frente fria, inverte-se para sul. É interessante observar que, no fundo da entrada sul do canal, na ausência de frentes frias, a componente  $v$  aponta para norte enquanto a componente  $u$  aponta para oeste, indicando a penetração de água no canal por esse setor. Quando se instala a frente fria, a componente  $v$ , no fundo, tem orientação para sul ao passo que a componente  $u$  também inverte, apontando para leste.

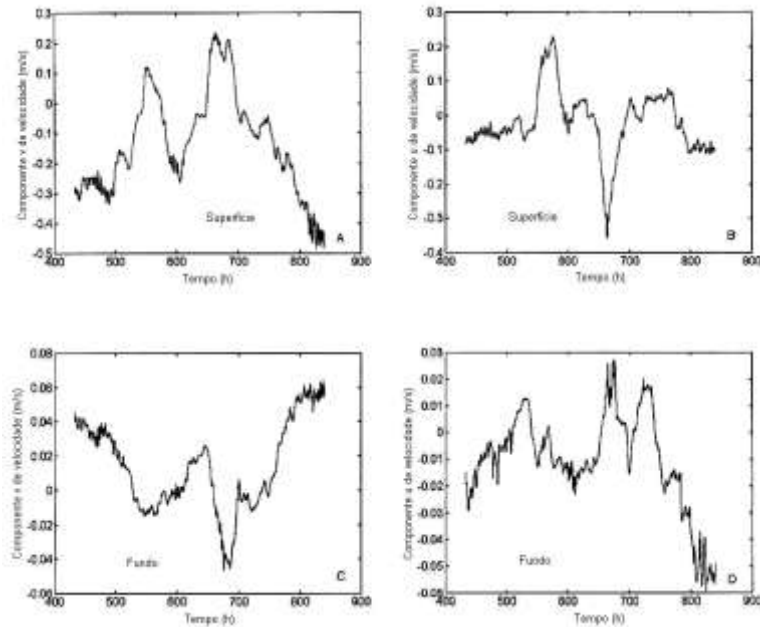


Figura 7 - Séries temporais das componentes  $v$  e  $u$  de velocidade para um ponto localizado ao sul do Canal de São Sebastião.

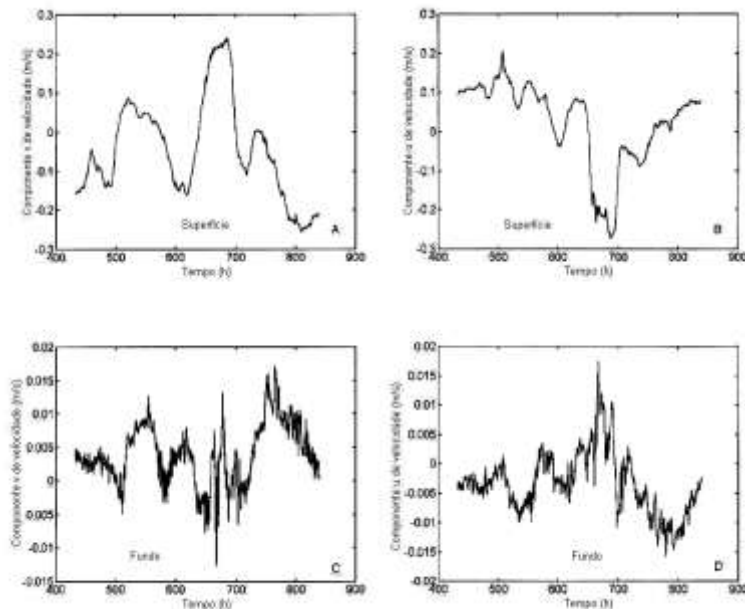


Figura 8 - Séries temporais das componentes  $v$  e  $u$  de velocidade para um ponto localizado ao norte do Canal de São Sebastião.



As Fig. 9 e 10 apresentam séries temporais de temperatura e nível do mar no sul e no norte do canal, respectivamente, e nos mesmos dois pontos citados acima. A Fig. 9 C apresenta a série temporal da componente v da tensão de cisalhamento do vento para um ponto no sul do CSS. Observa-se nestas figuras que o nível do mar no CSS responde instantaneamente à tensão de cisalhamento do vento,

apresentando dois máximos. Estes máximos estão associados às passagens das duas frentes frias. O nível do mar se eleva em todo o canal, cerca de 0,15 m a partir da saída da primeira até a chegada da segunda frente. É bem clara a resposta da temperatura de fundo nos três pontos amostrados no CSS, elevando-se quando as frentes se aproximam.

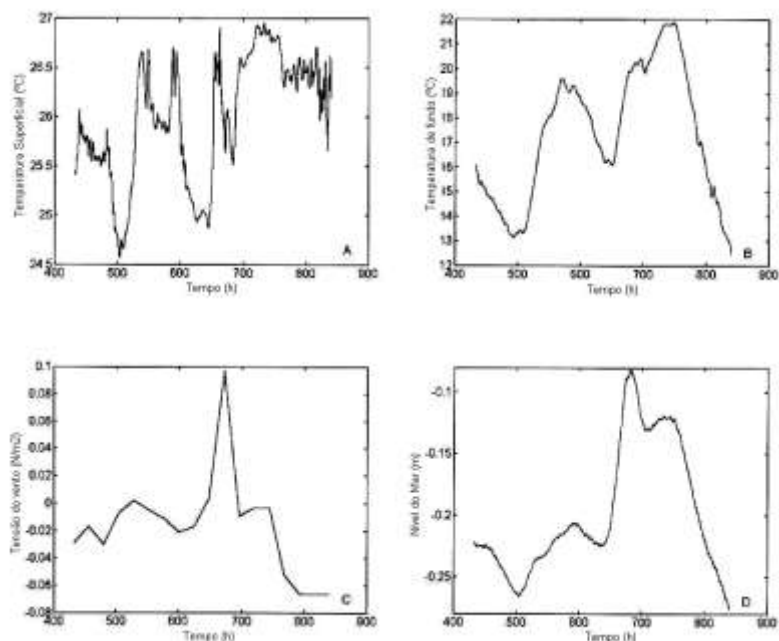


Figura 9 - Séries temporais de temperatura (A, B), da componente v de tensão de cisalhamento do vento (C) e de nível do mar (D) para um ponto localizado ao sul do Canal de São Sebastião.

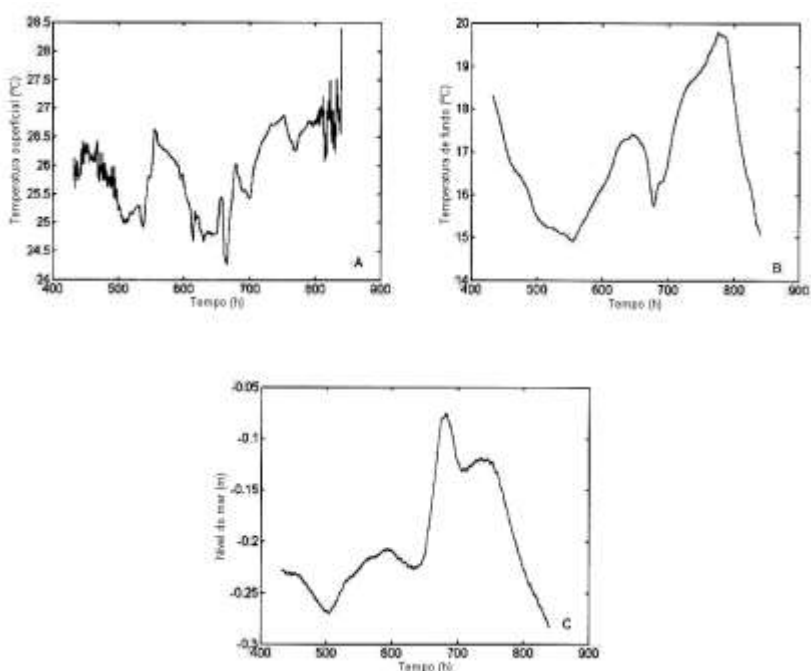


Figura 10 - Séries temporais de temperatura (A, B) e de nível do mar (C) para um ponto localizado ao norte do Canal de São Sebastião.

#### 4 CONCLUSÕES

Cinco experimentos foram conduzidos na Plataforma Continental Sudeste: quatro visam simular as condições médias sazonais de primavera, verão, outono e inverno, com base em dados médios históricos de fontes como COADS, HIDROCASS e REVIZEE. O experimento apresentado neste trabalho simula a estrutura térmica do CSS à passagem de uma frente fria, utilizando como forçantes médias diárias de tensão de cisalhamento do vento de FNMOC.

A simulação da estrutura térmica do CSS à passagem de uma frente fria mostra a associação existente entre as componentes de velocidade e a temperatura no fundo do CSS, em sua entrada sul ao lado da ISS. Fora dos efeitos da frente fria, as correntes no local fluem para noroeste, indicando que as correntes penetram o canal após contornarem a ISS; as temperaturas locais são baixas, em torno de 14°C. Com a aproximação da frente fria, a ACAS se afasta para o largo e as temperaturas se elevam por influência da AC logo acima. As correntes passam a fluir para sudeste, contornando a ISS em sentido oposto àquele inicialmente descrito. O efeito baroclínico sobre a circulação no CSS então fica claro. A divergência do transporte de Ekman na costa, em decorrência de ventos de nordeste na plataforma, aproxima a ACAS da entrada sul do CSS, penetrando o canal após contornar a ISS. A circulação superficial é para sudoeste, enquanto a circulação de fundo é para nordeste. Este quadro é freqüente no final da primavera e no verão. Há uma relaxação desta circulação em duas camadas no inverno, quando os ventos de nordeste são menos intensos e os gradientes de temperatura, menores. Esta relaxação é ainda maior no outono, quando os ventos na plataforma, além de fracos, são contra a costa; a circulação em duas camadas desaparece quando os ventos são de sudoeste, o que normalmente ocorre em regime de frentes frias.

#### 5 REFERÊNCIAS

- [1]. ZEMBRUSCKI, S. G. Geomorfologia da Margem Continental Sul Brasileira e das Bacias Oceânicas adjacentes (Relatório Final). In: Reconhecimento Global da Margem Continental Brasileira, Chaves, H. A. F. PETROBRÁS, 1979, p. 129-177.
- [2]. MIRANDA, L. B. Análise de massas de água da plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) e Ilha de São Sebastião (SP). Tese de Livre-Docência. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1982, 123p. + Fig.
- [3]. HARARI, J. Desenvolvimento de um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional linear, para a simulação e a previsão de circulação na plataforma brasileira, entre 23° e 26° S. Bolm Inst. Oceanogr., S Paulo, 1985, n. 33(2), p. 159-191.
- [4]. CASTRO FILHO, B. M. de. Sub tidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during the winter. PH.D. Dissertation. RSMAS, University of Miami, 1985, 211 p.
- [5]. CASTRO FILHO, B. M. de; MIRANDA L. B. de.; MIYAO, S. Y. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em média escala. Bolm Inst. Oceanogr., S Paulo, 1987, n. 35(2), p. 135-151.
- [6]. CASTRO FILHO, B. M. de. Correntes e Massas de Água da Plataforma Continental Norte de São Paulo. Tese de Livre-Docência, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 1996, 248 p.
- [7]. SOARES, I. D. Um Modelo Numérico de Dispersão Oceânica: Aplicações ao Canal de São Sebastião e Adjacências. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1995, 126 p.
- [8]. FONTES, R. F. C. As correntes no Canal de São Sebastião. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da USP, 1995, 159 p.
- [9]. SILVA, L. dos S. Condições Oceanográficas no Canal de São Sebastião: fevereiro de 1994 a março de 1995. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1995, 130 p.
- [10]. SILVA, L. dos S. Relatório do Projeto "Oceanografia da Plataforma Interna de São Sebastião" (OPISS). Relatórios Técnicos do Instituto Oceanográfico, 2001, n. 47, p. 1-31.
- [11]. COELHO, A. L. Massas de água e circulação no Canal de São Sebastião (SP). Dissertação de mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1997, 244p.
- [12]. LEANDRO, R. P. Climatologia das Águas do Canal de São Sebastião (SP). Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da USP, 1999, 162 p.
- [13]. BLUMBERG, A. F.; MELLOR, G. L. A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, In: Three-Dimensional Coastal Ocean Models, N. Heaps, p. 1-16, American Geophys. Union, EUA, 1987.
- [14]. BLUMBERG, A. F.; MELLOR, G. L. A Simulation of the Circulation in the Gulf of Mexico, Israel J. of Earth Sciences, Tel-Aviv, No. 34, p. 122-44, 1985.
- [15]. GALPERIN, B.; MELLOR, G. L. A Time - Dependent, Three-Dimensional Model of the Delaware Bay and River System, Estuarine Coastal Shelf Sci., EUA, No. 31, p. 231-81, 1990 a.
- [16]. GALPERIN, B.; MELLOR, G. L. Salinity Intrusion and Residual Circulation in Delaware Bay During the Drought of 1984, In: Residual Current and long term transport, R.T.Cheng, Ed., Spring-Verlag, Nova Iorque, No. 38, p. 469-80, 1990 b.
- [17]. BLUMBERG, A. F.; GOODRICH, D. M. Modeling of Wind-Induced Destratification in Chesapeake Bay, Estuaries, EUA, No. 13, p. 1236-49, 1990.
- [18]. BLUMBERG, A. F.; SIGNELL, R. P.; JENTER, H. L. Modeling Transport Processes in the Coastal Ocean, J. Marine Env. Engg., EUA, No. 1, p. 3-52, 1993.
- [19]. ORLANSKI, I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows, J. Comput. Phys., 21, 251-269, 1976.
- [20]. MARTINSEN, E. A.; ENGEDAHL, H. Implementation and testing of a Lateral Boundary Scheme as an Open Boundary Condition in a

---

Barotropic Ocean Model, Coastal Eng., 11, 603-627, 1987.

[21]. CHAPMAN, D. C., Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. J. Phys. Oceanogr. , 15: 1060-1075, 1985.

[22]. PALMA, E. D.; MATANO, R. P. On the implementation of open boundary conditions to a general circulation model: The barotropic mode, J. Geophys. Res., 103, 1319 – 1341, 1998.

[23]. SILVA, M. P. Caracterização Físico-Química das Massas de Água da Baía de Santos durante o Projeto COROAS. Verão e inverno de 1993. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1995, 135 p.

[24]. SILVA, L. dos S. Estudo Numérico da Circulação e da Estrutura Termohalina no Canal de São Sebastião. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 2001, 256 p.

---

## **NUMERICAL STUDY OF THE SIMULATION OF THE THERMAL STRUCTURE OF SÃO SEBASTIÃO CANAL DURING COLD FRONT PASSAGE**

### **Abstract**

The Princeton Ocean Model was adapted to São Sebastião Channel (SSC) by nesting three numerical grids so as to study the effects of a cold front on its thermohaline structure and circulation. The grid of low resolution covers the Southeast Continental Shelf and the grid of high resolution is over the São Sebastião Channel, with an intermediate grid stretching from Parati-RJ to Santos-SP. The model is integrated during twenty days with February climatologic wind and summer climatology and then the wind is changed everyday and a linear interpolation was done in each time step. The numerical simulation results suggests the quick answer of the water channel with the falling back offshore of the South Atlantic Central Water and immediate return when the cold front is gone. Northeasterly winds on the SCS grid are essential so that the SACW enters the SSC.

**Keywords:** Numerical Modeling. Thermohaline Structure. Currents. Cold Front.

