

**Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Oceanografia  
Programa de Pós-graduação em Oceanografia**

*Dinâmica de sistemas de bancos oceânicos da Cadeia Norte do Brasil:  
caracterização experimental e simulação numérica*

**Fábio de Oliveira Geber**

**Recife – PE  
2003**

**Fábio de Oliveira Geber**

*Dinâmica de sistemas de bancos oceânicos da Cadeia Norte do Brasil:  
caracterização experimental e simulação numérica*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências, na área de Oceanografia Física.

**Orientador: Moacyr Cunha de Araújo Filho**

**Recife – PE  
2003**

**Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Oceanografia  
Programa de Pós-graduação em Oceanografia**

*Dinâmica de sistemas de bancos oceânicos da Cadeia Norte do Brasil:  
caracterização experimental e simulação numérica*

por

**Fábio de Oliveira Geber**

Dissertação defendida e aprovada pela comissão examinadora abaixo assinada:

**Titular:**

---

**Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho**

---

**Dr. Fábio Hissa Vieira Hazin**

---

**Dr. José Oribe Rocha de Aragão**

**Suplente:**

---

**Dr. Paulo Eurico Pires Ferreira Travassos**

---

**Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura**

**Recife, 03 de junho de 2003.**

Dedico este trabalho aos meus pais, Douglas e Fátima Geber, que como tais só tenho que agradecer pelos denges, carinhos, atenção e por terem abdicado de tantas coisa em suas vidas por causa de seus filhos.

O único homem que jamais erra é aquele que nunca faz nada  
(Eleanor Roosevelt)

## AGRADECIMENTOS

Quando comecei a cursar o 2º grau decidi escolher minha profissão para poder centralizar meus esforços e poder concretizar meu desejo. Pensei no que poderia ser e subitamente veio em minha mente, o mar. Os motivos foram muitos que me levaram a tomar esta decisão, como exemplo sua energia, vida e imponência. Desde então, venho trilhando e buscando vivenciar sua existência e assim tenho aprendido muitas lições, tais como: a paciência, a tranquilidade e a maleabilidade. Por isso, aqui estou concluindo uma Pós-graduação que só existe graças ao maravilhoso mar e seus mistérios. O que segue neste trabalho é apenas uma pequena contribuição que desaparece no imenso universo do conhecimento, mas que tem seu peso para o mesmo.

Gostaria de deixar registrado os meus sinceros agradecimentos:

- Ao orientador, Dr. Moacyr “Moa” Araújo, por ter me dado a oportunidade de subir mais um degrau em minha vida acadêmica.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq por conceder subsídios para minha formação de pesquisador.
- Um obrigado especial a Marcus André, conhecedor dos segredos de programação, sem o qual não seria possível a utilização do modelo POM neste trabalho.
- Á Dra. Carmen Medeiros, que começou como professora e terminou como amiga.
- A minha querida esposa, Clara Emilie, que sem ela eu não teria alcançado metade do que alcancei até hoje. Sou eternamente grato por ela estar em minha vida e participar dos presentes preciosos que essa nos concede.
- Aos irmãos Ábdon e Sidarta, e ao querido Arthurzinho, que para mim são sinônimos de sucesso; e também aos demais membros da minha família, cuja existência alegra meu coração.
- Ao querido Oscar Agra, que a vida me presenteou com sua pessoa. Você é parte fundamental na minha vida pessoal e profissional.
- Um obrigado muito especial ao casal Felipe e Ana Koury, eu os amo muito.
- Aos amigos Isaac Freitas, Josafat Falcão e Thierry Tofredou, que me cativaram pelas pessoas maravilhosas que são.
- Aos amigos “LOFEQUIANOS”: Vidal Freitas, Marcelo Rollnic, Pedro Lins, Alex Costa, estendendo ainda o meu muito obrigado aos demais colegas do DOCEAN.

- Um obrigado carinhoso a Mirna que sem sua eficiência poucas coisas seriam possíveis de serem agilizadas.
- Aos meus amigos do Aikido e Iaido, Profº. Cavalvanti, Profº José Antônio, Ricardo, Karla Galvão, Luiz Caldas, Márcio Nakai, André Corredoura, Guilherme Scheidt e Anderson Lopes pelas amizades que construímos juntos.
- E, finalmente, àqueles que minha memória não deixou lembrar, mas que a gratidão não é menor das que foram mencionadas, muito obrigado a todos.

Recife, 03-03-2003

Fábio Geber

# SUMÁRIO

---

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 - OBJETIVO</b> .....	<b>5</b>
<b>3 - DESCRIÇÃO DA ÁREA</b> .....	<b>6</b>
3.1 - <i>Localização geográfica</i> .....	<b>6</b>
3.2 - <i>Sistema de ventos e correntes</i> .....	<b>8</b>
3.3 - <i>Massas d'água</i> .....	<b>12</b>
<b>4 - MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>12</b>
4.1 - <i>Caracterização experimental</i> .....	<b>12</b>
4.1.1 - <i>Obtenção dos dados termodinâmicos e meteorológicos</i> .....	<b>13</b>
4.1.2 - <i>Determinação das massas d'água</i> .....	<b>15</b>
4.1.3 - <i>Distribuição espacial da clorofila-a na área do banco Aracati</i> .....	<b>15</b>
4.1.4 - <i>Determinação da Camada de Barreira (CB)</i> .....	<b>16</b>
4.1.5 - <i>Forçantes interfaciais e Energia Cinética Turbulenta (ECT)</i> .....	<b>18</b>
4.2 - <i>O modelo matemático Princeton Ocean Model - POM</i> .....	<b>21</b>
4.2.1 - <i>Equações básicas do modelo</i> .....	<b>22</b>
4.2.2 - <i>Malhas horizontal e vertical</i> .....	<b>26</b>
4.2.3 - <i>Cenários de simulação</i> .....	<b>30</b>
4.2.4 - <i>Condições iniciais</i> .....	<b>31</b>
4.2.5 - <i>Condições de contorno</i> .....	<b>32</b>
4.2.6 - <i>Configuração computacional</i> .....	<b>33</b>



<b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1 – Caracterização Experimental .....</b>	<b>34</b>
5.1.1 - <i>Massas d'água</i> .....	34
5.1.2 – <i>Camada de Barreira</i> .....	38
5.1.3 – <i>Forçantes interfaciais e Energia Cinética Turbulenta</i> .....	39
5.1.4 – <i>Distribuição espacial da clorofila-a na área do banco Aracati</i> .....	41
5.1.5 – <i>Análise dos transectos em torno do banco Aracati</i> .....	44
5.1.5.1 – Perfil vertical da temperatura .....	44
5.1.5.2 – Perfil vertical da salinidade .....	48
<b>5.2 – Simulações numéricas .....</b>	<b>51</b>
5.2.1 – <i>Estabelecimento das condições semipermanentes</i> .....	51
5.2.2 – <i>Comparação com os dados experimentais</i> .....	52
5.2.3 – <i>Estrutura cinemática horizontal</i> .....	58
5.2.4 – <i>Estrutura cinemática vertical</i> .....	63
<b>6 – SUMÁRIO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
<b>7 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES .....</b>	<b>71</b>
<b>8 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE 1.....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICE 2.....</b>	<b>96</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Correntes e áreas de ressurgência importantes para a pesca (Adaptado de: Espensade, 1950).....	2
<b>Figura 2.</b> Localização da área de bancos do Brasil (Fonte: Sloss, 2001).....	7
<b>Figura 3.</b> Representação gráfica simplificada das correntes oceânicas no Atlântico Equatorial Oeste.....	11
<b>Figura 4.</b> Navio Oceanográfico Antares da Marinha do Brasil.....	13
<b>Figuras 5a – d.</b> Estações de coleta do programa REVIZEE – NE I a IV na sub-região do banco Aracati.....	14
<b>Figura 6.</b> Coordenadas sigma.....	21
<b>Figura 7.</b> Malha Arakawa C.....	26
<b>Figura 8.</b> Vista horizontal da malha numérica utilizada nas simulações (41 nós em x e 61 nós em y), com indicação do sentido da CNB.....	28
<b>Figura 9.</b> Vista tridimensional da malha numérica utilizada nas simulações, com indicação do sentido da CNB.....	29
<b>Figura 10.</b> Distribuição vertical das camadas em coordenadas sigma sobre o banco Aracati..	30
<b>Figura 11.</b> Campanhas do REVIZEE – NE agrupadas de acordo com o período do ano para as simulações numéricas.....	31
<b>Figuras 12a – d.</b> Distribuição sazonal das massas d’água na região do banco Aracati.....	36
<b>Figuras 13a – d.</b> Diagrama T/S em cada estação do ano na região do banco Aracati.....	37
<b>Figura 14.</b> Distribuição sazonal anual para $Z_{mix}$ , $Z_{isot}$ e CB na região do banco Aracati.....	38
<b>Figura 15.</b> Curva de regressão obtida a partir das normalizações $\frac{E_{total}}{E_v}$ e $kZ_{mix}$ .....	40
<b>Figura 16a – c.</b> Concentração de clorofila-a na superfície na área do banco Aracati (Becker, 2001).....	41
<b>Figura 17a – c.</b> Concentração de clorofila-a a 50% de luz na área do banco Aracati (Becker, 2001).....	42
<b>Figura 18a – c.</b> Concentração de clorofila-a a 1% de luz na área do banco Aracati (Becker, 2001).....	43
<b>Figuras 19a – d.</b> Distribuição sazonal da temperatura em sentido longitudinal ao banco Aracati.....	46

<b>Figuras 20a – d.</b> Distribuição sazonal da temperatura no sentido transversal ao banco Aracati.....	47
<b>Figuras 21a – d.</b> Distribuição sazonal da salinidade em um corte longitudinal ao banco Aracati.....	49
<b>Figuras 22a – d.</b> Distribuição sazonal da salinidade em um corte transversal ao banco Aracati.....	50
<b>Figura 23.</b> Energia Cinética Total para o período de inverno.....	51
<b>Figura 24.</b> Energia Cinética Total para o período de verão.....	52
<b>Figura 25.</b> Exemplos de perfis verticais de temperatura e salinidade na região do banco Aracati – Inverno. Dados experimentais (●) e resultados numéricos (—).....	53
<b>Figura 26.</b> Exemplos de perfis verticais de temperatura e salinidade na região do banco Aracati – Verão. Dados experimentais (●) e resultados numéricos (—). ....	54
<b>Figura 27.</b> Transecto longitudinal dos resultados numérico na região do banco Aracati. ....	55
<b>Figura 28a – b.</b> Perfis verticais de temperatura e salinidade na região do banco Aracati para o período de inverno. ....	56
<b>Figura 29a – b.</b> Perfis verticais de temperatura e salinidade na região do banco Aracati para o período de verão. ....	57
<b>Figura 29a – c.</b> Campos de velocidade horizontal na área do banco Aracati - Inverno.....	59
<b>Figura 31a – c.</b> Campos de velocidade horizontal na área do banco Aracati - Verão. ....	60
<b>Figura 32.</b> Simulação da vorticidade vertical e do campo cinemático horizontal sem a presença do banco Aracati na área de estudo. ....	61
<b>Figura 33.</b> Vorticidade vertical na região do banco Aracati - Inverno. ....	62
<b>Figura 34.</b> Componente rotacional de verão na região do banco Aracati. ....	63
<b>Figura 35.</b> Perfis de velocidade vertical numérica na região do banco Aracati - Inverno. ...	64
<b>Figura 36.</b> Perfis de velocidade vertical numérica na região do banco Aracati - Verão.....	65
<b>Figura 37.</b> Velocidade vertical numérica de inverno e verão no banco Aracati, com a representação das profundidades médias das camadas: misturada ( $Z_{mix}$ ), isotérmica ( $Z_{isot}$ ); e eufótica ( $Z_{eu}$ ).....	67
<b>Figura 38:</b> Fluxograma simplificado do modelo POM (fonte: POM Users Guide 1998).....	84

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1. Campanhas REVIZEE/SCORE NE.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2. Medidas de densidade para as principais massas d'água na região do banco Aracati.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 3. Parâmetros físicos da água do mar de acordo com Blank (1999).....</i>	<i>17</i>
<i>Tabela 4. Parâmetros das condições de contorno.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 5. Descrições das condições de contornos horizontais Norte e Sul para as simulações na região do banco Aracati.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 6. Massas d'água identificadas na região do banco Aracati. ....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 7. Estimativa da Energia Cinética Turbulenta na região do banco Aracati.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 8. Intensidade da corrente horizontal no transecto longitudinal na região do banco Aracati - Inverno.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 9. Intensidade da velocidade horizontal no transecto longitudinal na região do banco Aracati - Verão. ....</i>	<i>60</i>

## RESUMO

Neste trabalho utilizou-se os dados físicos oceanográficos e meteorológicos, obtidos durante o Programa REVIZEE - Nordeste, para analisar a dinâmica de sistemas bancos oceânicos da cadeia Norte do Brasil. Num primeiro momento, foram identificadas as massas d'água, a espessura da camada de barreira, a energia cinética turbulenta, os perfis de temperatura e de salinidade na área do banco Aracati. Numa segunda etapa, estas informações foram utilizadas em um modelo matemático tri-dimensional, visando identificar situações potenciais de ressurgência orográfica nesta sub-região. Foram identificadas duas massas d'água na região do banco Aracati, sendo essas: a Água Tropical, cujo limite inferior está à cerca de 150 m, aproximadamente, e a Água Central do Atlântico Sul, situada entre a Água Tropical e a profundidade de cerca de 670 m. A camada de barreira variou sazonalmente de uma situação menos espessa na primavera a mais espessa no outono, com mínimo de 2 m (outubro a dezembro) e máximo de 20 m (abril a junho). Já as camadas de mistura e isotérmica alcançaram maiores profundidades médias (84 m e 96m, respectivamente) no inverno correspondendo ao trimestre de julho a setembro. Na primavera, estas camadas ficaram restringidas nas primeiras profundidades médias de 6 e 8 m, correspondentemente. A energia média produzida pelo cisalhamento eólico foi de  $9,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ , e a produzida por quebra de ondas superficiais foi de cerca de  $10,8 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ . Os perfis verticais de temperatura indicaram a presença de uma termoclina ao longo de todo o ano, com seu início variando entre as profundidades de 70 e 150 m, aproximadamente. No tocante à salinidade, as isoalinas mostraram uma variação similar à das isotermas com destaque a formação de células de baixa salinidade na parte rasa do banco. O modelo matemático reproduziu satisfatoriamente os perfis de temperatura e salinidade observados. A estrutura cinemática gerada nas simulações indicou o desenvolvimento de velocidades verticais da ordem de  $10^{-3} \text{ m/s}$  na região situada à montante do banco, tanto no inverno quanto no verão. Nesta última estação, entretanto, as velocidades verticais mais importantes ficaram localizadas abaixo do limite inferior da zona eufótica enquanto que, no inverno, foram constatadas velocidades significativas dentro desta zona de penetração de luz.

## ABSTRACT

It has been used oceanographic and meteorological physical data observed during REVIZEE-NE Program to analyze the dynamics of the ocean bank systems of the North of Brazil Chain. At a first moment, it has been identified the water masses, the thickness barrier layer, the turbulent kinetic energy, the temperature and salinity profiles in Aracati bank area. At a second moment these information have been used in a three-dimensional model to identify potential situations of upwelling in this sub-region. It was identify two water masses in the region of the Aracati bank, as follow: Tropical Water, limited in the depth of 150 m, approximately and the South Atlantic Central Water, limited from Tropical Water down to 670 m depth. It has been identified the barrier layer that varies seasonally and shows to be less thicker in the Spring than in the Autumn with a minimum of 2 m (October to December) and maximum of 20 m (July to September). The superficial mixed and isothermal layers in the Winter (April to September) were found in 84 m and 96 m depth, respectively. During the Spring these layers had been restricted between the average depths of 6 m and 8 m, respectively. The wind shear energy had an average of  $9.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  and the break superficial gravity wave energy of  $10.8 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ . The temperature profiles indicated the presence of a thermocline throughout the year, remaining between 70 m to 150 m depth. Concerning the salinity profiles, the isohalinas showed a similar variation to isotherms detaching the formation of low salinity eddies on the bank slope. The three-dimensional model reproduced satisfactorily the temperature and salinity profiles. The kinematics structure observed in the simulations indicated vertical velocities of  $10^{-3} \text{ m/s}$  in the upstream region of the bank, for Winter and Summer situations. However, in this last season the most important vertical velocities were localized below the inferior limit of the euphotic zone, while in the winter, these velocities were inside of this zone.