

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

***Modelagem matemática da circulação, transporte e
dispersão de nutrientes e plâncton no Arquipélago de São
Pedro e São Paulo***

Marcio Machado Cintra

**Recife-PE
2010**

Marcio Machado Cintra

***Modelagem matemática da circulação, transporte e
dispersão de nutrientes e plâncton no Arquipélago de São
Pedro e São Paulo***

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 Oceanografia, na
área de Oceanografia Física.

Orientador: Moacyr Cunha de Araújo Filho

Recife-PE
2010

C575m Cintra, Marcio Machado

Modelagem matemática da circulação, transporte e dispersão de nutrientes e plâncton no arquipélago de São Pedro e São Paulo. / Marcio Machado Cintra. – Recife: O Autor, 2010.

xvii, 87 folhas; il., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2010.

Orientador: Prof. Moacyr Cunha de Araújo Filho.

Inclui Referência.

1. Oceanografia. 2. Modelagem hidrodinâmica. 3. Modelagem biogeoquímica 4. Montes submarinos. I. Título.

551.46 CDD (22. ed.)

UFPE/BCTG/2010-198

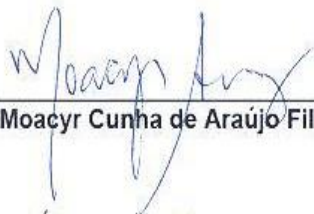
**Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Oceanografia
Programa de Pós Graduação em Oceanografia**

***Modelagem matemática da circulação, transporte e
dispersão de nutrientes e plâncton no Arquipélago de São
Pedro e São Paulo***

por

Marcio Machado Cintra

Dissertação defendida e aprovada pela comissão examinadora abaixo assinada:



Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho



Dra. Dóris Regina Aires Veleda



Dr. Manuel de Jesus Flores Montes

Recife, 30/08/2010

Dedico este trabalho à minha esposa Scheyla, por toda a paciência e carinho que ela teve comigo durante as extensas horas que reservei aos estudos. Por estar sempre ao meu lado, dando amor, força e ânimo, tornando feliz e prazerosa minha vida pessoal e produtiva minha vida profissional.

AGRADECIMENTOS

Todo trabalho desenvolvido conta com uma enorme gama de pessoas envolvidas, umas mais diretamente outras menos. Essas colaborações somam-se resultando no produto final. Na elaboração desse trabalho pude contar com muitas contribuições, seja pessoal ou institucional, as quais gostaria de agradecer:

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por financiar esse projeto e custear minha bolsa de pesquisa.

Ao meu Orientador, Dr. Moacyr Araújo, pela confiança depositada e oportunidade única que me proporcionou, reservando-me um trabalho tão desafiador e importante.

À Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM), por ter criado e proporcionar as pesquisas do PROGRAMA ARQUIPÉLAGO.

Ao Centro de Estudos e Ensaio em Risco e Modelagem Ambiental (CEERMA), em especial aos seus diretores, por disponibilizarem ao meu trabalho tamanha estrutura tecnológica e equipe de apoio, sem a qual eu não teria concluído com tal êxito minhas atribuições nessa pesquisa.

Ao Dr. Marcus Silva, pelo constante aprendizado que me proporcionou, dividindo dúvidas e propondo soluções durante toda minha pesquisa, tendo sempre colaborado para que meus objetivos fossem alcançados.

A todos os colegas do Laboratório de Oceanografia Física, Estuarina e Costeira (LOFEC) por sempre estarem colaborando à solução de problemas e compartilhando conhecimento e amizade nas horas de trabalho.

Aos colaboradores, Dr. Sílvio Macedo e Dr. Manuel Flores, por compartilharem esclarecimentos na componente química de meus trabalhos, e estarem sempre receptivos as minhas dúvidas e opiniões.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Oceanografia (PPGO), por terem contribuído na minha formação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização e estrutura do documento.....	1
1.2. Hidrodinâmica do Atlântico equatorial.....	1
1.3. Processos biogeoquímicos e hidrodinâmicos em regiões de montes submarinos	4
2. OBJETIVOS.....	6
2.1. Objetivos gerais	6
2.2. Objetivos específicos	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	7
3.1. Descrição da área.....	7
3.2. Descrição dos modelos.....	8
3.2.1. O modelo matemático - ROMS	8
3.2.2. O modelo biogeoquímico – NPZD.....	10
3.2.3. O modelo lagrangeano - ICHTHYOP	11
3.3. Base de dados	13
3.3.1. Dados de clorofila-a - Programa JOPSII	13
3.3.2. Dados termodinâmicos e nutrientes – Programa REVIZEE	14
3.4. Características das simulações numéricas.....	15
3.5. Métodos de avaliação dos resultados numéricos	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1. Estrutura termohalina do Arquipélago de São Pedro e São Paulo	22
4.2. Dinâmica de correntes e o Arquipélago de São Pedro e São Paulo.....	39
4.3. Nutrientes e plâncton no Arquipélago de São Pedro e São Paulo.....	48
4.4. Potencial de enriquecimento via mecanismos físicos	57
4.5. Potencial de enriquecimento subsidiado troficamente	71
5. SÍNTESE E CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS.....	79
ANEXO	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de correntes e contracorrentes equatoriais no Oceano Atlântico, evidenciando a posição do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.....	2
Figura 2. Descrição da área de estudo: (a) batimetria tridimensional; (b) Arquipélago de São Pedro e São Paulo; (c) batimetria do domínio simulado.	7
Figura 3. Discretização espacial no modelo ROMS: (a) Esquema de coordenadas verticais sigma; (b) Esquema de uma malha horizontal do tipo Arakawa-C (Arakawa & Lamb, 1977).	9
Figura 4. Modelo conceitual dos principais compartimentos ecológicos do NPZD...	11
Figura 5. Posição das estações JOPS II no domínio simulado.	14
Figura 6 Posição das estações do programa REVIZEE NE II (branco) e NE-III (preto) no domínio simulado. Para as estações NEII e NEIII coincidentes utilizou-se a cor cinza.	15
Figura 7 Esquema demonstrativo dos transectos apresentados (T1, T2, T3, T4, T5, T6 e T7 ROMS). O retângulo V representa a escala ampliada de visualização dos resultados e o retângulo L representa o domínio da simulação Lagrangeana (EXP7).	20
Figura 8. Estrutura vertical térmica no ASPSP (EXP5, junho/2004, T2).....	22
Figura 9. Perfis verticais de temperatura (°C) no ASPSP (média das estações Revizee).	24
Figura 10. Distribuição vertical de temperatura: (a) Estrutura vertical de temperatura no ASPSP (EXP5, junho de 2004, T7); (b) Ampliação delimitada pelo tracejado da Figura 10a.	24
Figura 11. Perfis verticais de temperatura nas posições REVIZEE-NEII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em vermelho contínuo apresentam-se os resultados numéricos de fevereiro (EXP6 ROMS).	25
Figura 12. Perfis verticais de temperatura nas posições REVIZEE-NEIII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em azul contínuo apresentam-se os resultados numéricos de junho (EXP6 ROMS).	26
Figura 13. Estrutura vertical no transecto (T1), comparando a temperatura entre ROMS e REVIZEE: (a) Comparativo para o mês de fevereiro; (b) Comparativo para o mês de junho; (c) Estrutura vertical do erro (ROMS-REVIZEE).	28
Figura 14. Estrutura vertical de Salinidade no ASPSP (EXP5, 2004/6, T2).	29
Figura 15. Distribuição vertical de Salinidade: (a) Estrutura vertical de salinidade no ASPSP (EXP5, junho de 2004, T7); (b) Ampliação delimitada pelo tracejado da Figura 15a.	30
Figura 16. Perfil vertical de Salinidade no ASPSP (média das estações REVIZEE).	30
Figura 17. Perfis verticais de salinidade nas posições REVIZEE-NEII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em vermelho contínuo apresentam-se os resultados numéricos de fevereiro (EXP6 ROMS).	31

Figura 18. Perfis verticais de salinidade nas posições REVIZEE-NEIII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em azul contínuo apresentam-se os resultados numéricos de junho (EXP6 ROMS).	32
Figura 19. Estrutura vertical no transecto (T1), comparando salinidade entre ROMS e REVIZEE. (a) Comparativo para o mês de fevereiro. (b) Comparativo para o mês de junho. (c) Estrutura vertical do erro (ROMS-REVIZEE).	33
Figura 20. Estrutura vertical de densidade no ASPSP (EXP5, 2004/6, T2).	34
Figura 21. Perfil vertical de Densidade no ASPSP (média das estações Revizee). .	35
Figura 22. Distribuição da densidade no ASPSP: (a) Estrutura vertical de densidade no ASPSP (EXP5, junho de 2004, T7); (b) Ampliação delimitada pelo tracejado da Figura 22a.	36
Figura 23. Perfis verticais de densidade nas posições REVIZEE-NEII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em vermelho contínuo apresentam-se os resultados numéricos de fevereiro (EXP6 ROMS).	37
Figura 24. Perfis verticais de densidade nas posições REVIZEE-NEIII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em azul contínuo apresentam-se os resultados numéricos de junho (EXP6 ROMS).	38
Figura 25. Diagrama T-S. Valores observados e numéricos representam médias das estações REVIZEE.	39
Figura 26. Transecto (T4) sobre o ASPSP (2004/1) até os 500m de profundidade, indicando as principais correntes zonais que atuam junto ao banco submarino (EXP5, ROMS).	40
Figura 27. Estrutura vertical medida das correntes zonais equatoriais (perfil em ~ 30°W). Extraído de Stramma & Schott (1999). A linha em vermelho indica a posição do ASPSP.	40
Figura 28. Diagrama de Hovmöller (EXP6) da componente-u da velocidade no transecto 3 (T3) até os 300m de profundidade.	41
Figura 29. Estrutura vertical da componente u da velocidade no transecto zonal (T2) até os 500m de profundidade (EXP5, junho de 2004).	42
Figura 30. Campo zonal de velocidades apresentado na sequência dos transectos T3, T4, T5 e T6 (EXP5, ROMS).	43
Figura 31. Campo de velocidades zonais à 80m de profundidade (EXP5, junho de 2004). As linhas pontilhadas em branco representam as isóbatas (500m, 1000m, 2000m e 3000m).	44
Figura 32. Campo de velocidade zonal à superfície (EXP5, junho de 2004, média mensal). As linhas pontilhadas em branco representam as isóbatas (500m, 1000m, 2000m e 3000m). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal.	45
Figura 33. Campo de velocidade meridional à superfície (EXP5, junho de 2004, média mensal). As linhas pontilhadas em branco representam as isóbatas (500m, 1000m, 2000m e 3000m). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal.	45
Figura 34. Estrutura vertical da componente v da velocidade no transecto zonal (T2) até os 500m de profundidade (EXP5, junho de 2004).	46

Figura 35. Estrutura vertical da componente w da velocidade no transecto transversal (T7) até os 500m de profundidade (EXP5, junho de 2004).....	47
Figura 36. Campo de velocidade zonal à 50m de profundidade (EXP5, junho de 2004, dia 15). Os vetores são representativos da velocidade horizontal.	48
Figura 37. Perfil vertical de nitrato no ASPSP (média das estações Revizee).	49
Figura 38. Perfis verticais de nitrato nas posições REVIZEE-NEII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em vermelho contínuo apresentam-se os resultados numéricos de fevereiro (EXP6 ROMS).	50
Figura 39. Perfis verticais de nitrato nas posições REVIZEE-NEIII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em azul contínuo apresentam-se os resultados numéricos de junho (EXP6 ROMS).	51
Figura 40. Estrutura vertical de concentração do Nitrato no transecto (T1), comparando a concentração entre ROMS e REVIZEE: (a) Comparativo para o mês de fevereiro; (b) Comparativo para o mês de junho; (c) Estrutura vertical do erro (ROMS-REVIZEE).....	52
Figura 41. Estrutura vertical no transecto (T2), para a variável clorofila-a. À esquerda, mês de fevereiro e à direita mês de junho.....	53
Figura 42. Perfis verticais de clorofila-a nas posições JOPS-II. O perfil pontilhado em preto representa os dados observados. Os perfis em verde contínuo representam os resultados numéricos (verde claro – ROMS FEV, verde escuro – ROMS JUN). O tracejado horizontal representa a posição da zona de extinção da Luz (Z_{EU} , 1% Luz)	54
Figura 43. Perfis verticais das variáveis biológicas nas posições REVIZEE-NEII. Resultados numéricos (EXP6, ROMS, azul-Nitrato, verde-Fitoplâncton, vermelho-Zooplâncton e amarelo-Detritos). O eixo do topo representa as concentrações de nitrato enquanto que o eixo abaixo as outras variáveis. O tracejado representa a posição da zona de extinção da Luz (Z_{EU} , 1% Luz).	55
Figura 44. Perfis verticais das variáveis biológicas nas posições REVIZEE-NEIII. Resultados numéricos (EXP6, ROMS, azul-Nitrato, verde-Fitoplâncton, vermelho-Zooplâncton e amarelo-Detritos). O eixo do topo representa as concentrações de nitrato enquanto que o eixo abaixo as outras variáveis. O tracejado representa a posição da zona de extinção da Luz (Z_{EU} , 1% Luz).	56
Figura 45. Acima, seção vertical da componente w da velocidade, abaixo seção vertical de nitrato (T2, média mensal, EXP6). O tracejado representa a posição da zona de extinção da Luz (Z_{EU} , 1% Luz).....	58
Figura 46. Campo horizontal da vorticidade relativa (acima). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal. Abaixo, a Freqüência de Brünt-Väisälä. Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de fevereiro aos 100m de profundidade.	60
Figura 47. Campo de temperatura (acima) e distribuição de nitrato (abaixo). Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de fevereiro aos 100m de profundidade.	61
Figura 48. Campo horizontal da vorticidade relativa (acima). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal. Abaixo, a Freqüência de Brünt-Väisälä.	

Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de junho aos 100m de profundidade.	63
Figura 49. Campo de temperatura (acima) e distribuição de nitrato (abaixo). Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de junho aos 100m de profundidade.	64
Figura 50. Campo horizontal da vorticidade relativa (acima). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal. Abaixo, a Freqüência de Brünt-Väisälä. Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de fevereiro aos 150m de profundidade.	66
Figura 51. Campo de temperatura (acima) e distribuição de nitrato (abaixo). Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de fevereiro aos 150m de profundidade.	67
Figura 52. Campo horizontal da vorticidade relativa (acima). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal. Abaixo, a Freqüência de Brünt-Väisälä. Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de junho aos 150m de profundidade.	69
Figura 53. Campo de temperatura (acima) e distribuição de nitrato (abaixo). Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de junho aos 150m de profundidade.	70
Figura 54. Dispersão de larvas no ASPSP para o mês de fevereiro. A área tracejada ao redor das ilhas representa a região de recrutamento larval. Os tracejados (canto inferior direito) em laranja (vertical) e em vermelho (horizontal) representam as áreas de liberação das larvas. As figuras a, b, c, d são relativas a 20h, 30h, 40h e 70h após o lançamento respectivamente.	72
Figura 55. Dispersão de larvas no ASPSP para o mês de junho. A área tracejada ao redor das ilhas representa a região de recrutamento larval. Os tracejados (canto inferior direito) em laranja (vertical) e em vermelho (horizontal) representam as áreas de liberação das larvas. As figuras a, b, c, d são relativas a 20h, 30h, 40h e 70h após o lançamento respectivamente.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características gerais das simulações.....	15
Tabela 2 Principais características dos experimentos EXP5 e EXP6	17
Tabela 3. Parâmetros utilizados no modelo biológico NPZD (EXP6).....	18
Tabela 4. Estimativas do recrutamento por região de liberação das larvas para os meses de fevereiro e junho no ASPSP.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Massas d'água:

AAIW	Água Intermediária Antártica
CW	Água Central
NADW	Água de Profundidade do Atlântico Norte
SACW	Água Central do Atlântico Sul
TSW	Água Tropical Superficial
uCDW	Água Circumpolar de Profundidade

Correntes Oceânicas:

EUC	Subcorrente Equatorial
GC	Corrente da Guiné
NBC	Corrente Norte do Brasil
NBUC	Subcorrente Norte do Brasil
NEC	Corrente Norte Equatorial
NECC	Contracorrente Norte Equatorial
(s, c, n)SEC	Corrente Sul Equatorial _(sul, central, norte)
SECC	Contracorrente Sul Equatorial
SEUC	Subcorrente Sul Equatorial

Siglas:

ASPSP	Arquipélago de São Pedro e São Paulo
CLIVAR	Climate Variability and Predictability
COADS	Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação

ECCO	Estimating the Circulation and Climate of the Ocean
GFS	Global Forecast System
ICHTHYOP	Modelo Lagrangeano para simulação da dinâmica do Ictioplâncton
ITCZ	Zona de Convergência Intertropical
JOPS II	Joint Oceanographic Projects – II
NPZD	Nitrate – Phytoplankton – Zooplankton - Detritus
OGCM	Ocean Global Circulation Model
PIRATA	Prediction Research Moored Array in the Tropical Atlantic
QUIKSCAT	Satélite de observações “Quik Scatterometer”
REVIZEE	Programa de Avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva
ROMS	Regional Ocean Modeling System
SECIRM	Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar
WOA	World Ocean Atlas

RESUMO

O presente trabalho focou na investigação de processos físicos atuantes no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), localizado em (0°55'06"N and 29°20'48"W), que podem ser responsáveis pela alta produtividade da vida pelágica e bentônica encontrada nessa região. O modelo *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) foi utilizado para simulação hidrodinâmica (interanual, 2003-2005). Para as análises biogeoquímicas, o modelo NPZD foi acoplado ao ROMS para simular a distribuição de nutrientes e plâncton no ASPSP. A fim de avaliar a capacidade de retenção de larvas no arquipélago, também foi utilizado o modelo ICHTHYOP (simulação Lagrangeana), importando o campo hidrodinâmico das simulações com o modelo ROMS. Os resultados numéricos da estrutura termohalina e nitrato foram comparados com os dados do Programa REVIZEE-NE, relativos às campanhas oceanográficas NE-II (verão austral) e NE-III (outono austral). A estrutura termohalina obtida numericamente reproduziu satisfatoriamente a posição da termoclina (60-80m de profundidade) e a posição da haloclina (mais rasa na primavera-verão, mais profunda no outono-inverno). As comparações das concentrações de nitrato reproduziram bem os baixos níveis superficiais com a nitraclina posicionada em ~50m. Os valores abaixo da nitraclina foram discordantes para a maioria das estações avaliadas. As comparações de Clorofila-a foram feitas com os resultados do programa JOPS II e mostraram que os valores numéricos estiveram abaixo dos observados em cerca de 0,2 mg.m⁻³, com a zona de máxima produção posicionada em torno dos 60-80m de profundidade. A avaliação do transporte de larvas no ASPSP indicou que nos meses de verão austral, quando as correntes superficiais se encontram mais fracas, o ASPSP tem maior capacidade de retenção larval do que durante os meses de inverno austral, quando há a intensificação das correntes superficiais. Como resultado da interação da Subcorrente Equatorial-ASPSP foi observado uma zona de intensa enstrofia a leste das ilhas. Nessa região foi verificada a presença de vórtices acompanhados da diminuição das velocidades zonais. Os vórtices gerados apresentaram diâmetros médios de 1 a 2 km. Perturbações na termoclina também foram verificadas nessa região, associadas à intensificação do transporte vertical induzido pelos vórtices ($\bar{w} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$). Os resultados sugerem que a região do ASPSP apresenta um

processo discreto, porém constante, de enriquecimento na base da camada eufótica (~ 100m de profundidade), contribuindo para a existência da grande variedade de vida marinha encontrada em toda essa região.

Palavras chave: Oceanografia; modelagem hidrodinâmica; modelagem biogeoquímica; montes submarinos;

ABSTRACT

The present work focused on investigating the influence of physical processes at St. Peter and St. Paul archipelago (SPSP) located at the Equatorial Atlantic (0°55'06"N and 29°20'48"W) that could be responsible for maintaining high standing stocks of pelagic and benthic organisms found in this area. The Regional Ocean Modeling System (ROMS) was used to hydrodynamic simulation (interannual 2003-2005). To biogeochemical analyses, the NPZD model it was coupled to ROMS model to simulate the distribution of nutrients and plankton in SPSP. With intentions of evaluate the larval retention on SPSP, it was used the ICHTHYOP model (Lagrangian simulation) that imports the hydrodynamic field from the ROMS model simulations. Model results of thermohaline structure and nutrients were compared with observations of the Brazilian program REVIZEE-NE. Two data sets were used to compare results, NEII (austral summer) and NEIII (austral autumn). The thermohaline structure obtained numerically showed good reproduction of thermocline position (around 60-80m of depth) and halocline position (shallower in spring-summer, deepest in autumn-winter). The nitrate comparisons, showed a good agreement with the low levels of nitrate at surface and nitracline position was verified around 50m of depth. The numerical nitrate values under nitracline were in disagreement with measured results in almost all evaluated stations. The chlorophyll-a comparisons it was made with the data from JOPS II program and showed that numerical results were lower than measured results in about 0.2 mg.m^{-3} with the maximum production zone positioned around 60-80m of depth. The larval retention analysis in SPSP, showed that the biggest larval retention occurred in austral summer when the surface currents are weakest, opposing the smallest larval retention in austral winter months, when the surface currents are intensified. The Equatorial Undercurrent-topography interaction induces an enstrophy zone formed eastside of islands. In this region, the presence of eddies was noted along with a significant reduction of zonal velocities field. These eddies present diameter between 1 and 2 km. Disturbance in the thermocline was noted on the east side of SPSP that was associated with intensification of vertical transport induced by vortices ($\overline{w} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$). The main results suggests that the SPSP area has a constant enrichment processes acting on

the base of euphotic zone (~100m depth) that allows the existence of a great variety of marine life in all surrounding region.

Keywords: Oceanography; hydrodynamic modeling; biogeochemical modeling; seamounts

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização e estrutura do documento

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (referenciado a seguir como ASPSP) é constituído por um grupo de pequenas ilhas oceânicas que estão localizadas no oceano Atlântico Equatorial. Atuando como um monte submarino que aflora em uma escala bastante reduzida quando comparada à bacia equatorial, o ASPSP é conhecido por constituir um verdadeiro 'oásis' da vida marinha em meio às águas oceânicas oligotróficas, típicas das regiões equatoriais (Genin, 2004). Tais condições peculiares do Arquipélago chamaram a atenção da comunidade científica, que vem utilizando a região como um grande laboratório científico. Nesse âmbito a Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM) aprovou em junho de 1996 o Programa Arquipélago (PROARQUIPÉLAGO) e posteriormente instituiu uma estação científica permanente na ilha a fim de consolidar a estrutura necessária às pesquisas. O presente trabalho se insere nesse contexto. Trata-se de mais um produto acadêmico do Projeto ARQ_MODEL (CNPq 563871/2005-9), aprovado e financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

1.2. Hidrodinâmica do Atlântico equatorial

A bacia do Atlântico Equatorial compreende um complexo sistema de correntes e contra correntes forçadas pelos giros subtropicais e pela atuação atmosférica dos ventos Alísios de ambos os hemisférios. De acordo com Stramma & Schott (1999) as principais massas de água que atuam nesse sistema são: a Água Tropical Superficial (TSW), Água Central (CW), Água Intermediária Antártica (AAIW), Água Circumpolar de Profundidade (uCDW) pouco acima dos 1200m e a Água de Profundidade do Atlântico Norte (NADW) entre 1200m e 4000m de profundidade. Junto ao fundo também pode ser notado a presença, ainda que restrita, da Água de Fundo Antártica que se desloca em direção ao hemisfério Norte.

Na porção superficial do Atlântico Equatorial as massas d'água mais importantes para compreensão de fenômenos biológicos, como o crescimento

planctônico e suas conseqüências, são a TSW e a Água Central do Atlântico Sul (SACW) posicionada logo abaixo da TSW. À superfície, a TSW possui temperaturas ao redor dos 27°C. Uma termoclina bem definida se faz presente na região equatorial onde as temperaturas caem dos 25°C para 15°C em aproximadamente 50m de profundidade, sendo que a isoterma de 20°C representa o limite inferior da TSW. A SACW chega à região equatorial oriunda de frentes subtropicais sendo carregada através do giro subtropical e trazida ao equador pela Corrente Sul Equatorial (Stramma & Schott, 1999).

As principais correntes zonais (Figura 1) fluindo para oeste na camada superficial dessa região são a Corrente Norte Equatorial (NEC) e a Corrente Sul Equatorial (SEC). Enquanto a NEC se apresenta como um fluxo relativamente largo e contínuo, a SEC é formada por três ramos zonais, separados por contra-correntes de intensidades relativamente fracas (Stramma, 1991).

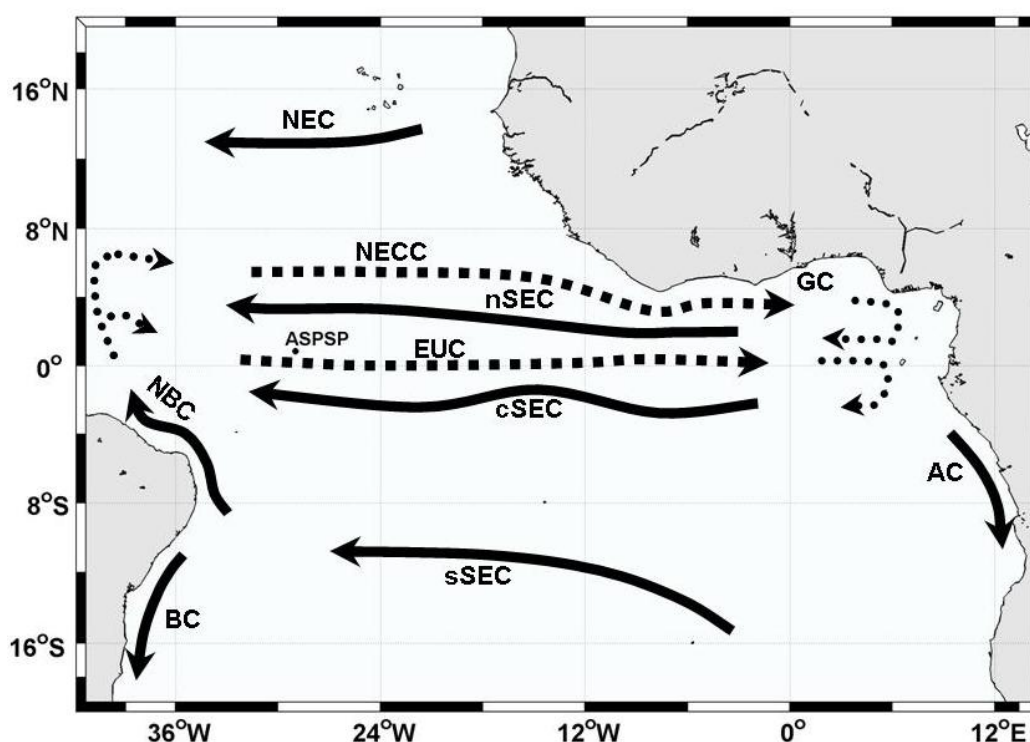


Figura 1. Sistema de correntes e contracorrentes equatoriais no Oceano Atlântico, evidenciando a posição do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Segundo Molinari (1982), as três bandas da SEC no Atlântico Sul são separadas pela Subcorrente Sul Equatorial (SEUC) e pela Contra-Corrente Sul Equatorial (SECC). A parcela de fluxo situada ao norte da SEUC é denominada de

SEC norte (nSEC); a porção situada entre a SEUC e a SECC é denominada SEC central (cSEC), enquanto que o fluxo situado ao sul da SECC é conhecido como SEC sul (sSEC). Outra corrente de importância substancial é a Subcorrente Equatorial (EUC), que perfila o equador fluindo para o leste, pouco abaixo da superfície, com seu núcleo posicionado em aproximadamente 80 m de profundidade.

De acordo com Richardson & McKee, (1984) a SEC flui para oeste, ao sul dos 5°N, possuindo dois núcleos de velocidade zonal média ao redor de 0,35 m.s⁻¹, perfilados em 2°N e 4°S. A respeito da variabilidade sazonal da SEC em 26°W, foi observado que essa corrente apresenta-se mais fraca no início de maio, e que durante junho ocorre uma aceleração em razão da atuação de ventos mais fortes que podem resultar em divergência na superfície (Weisberg, 1985).

O fluxo oeste da SEC próximo ao equador é alimentado pela recirculação das Correntes da Guiné (GC) e Contra Corrente Norte Equatorial (NECC) junto ao Golfo da Guiné na costa africana (Lumpkin & Garzoli, 2005). De maneira análoga, o fluxo leste da EUC é alimentado pela retroflexão da Corrente e Subcorrente Norte do Brasil (NBC/NBUC) que ocorre na borda oeste do Atlântico Equatorial (Schott et al., 2003; Stramma et al., 2005).

Stramma & Schott (1999) relataram que o principal sinal de variabilidade sazonal no Atlântico equatorial é advindo dos processos de interação oceano-atmosfera. As correntes superficiais no equador respondem a variação sazonal dos campos de vento e a migração da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ). Quando a ITCZ se desloca para o norte as correntes NEC e SEC se movem acompanhando o sistema. Tal variabilidade está sob investigação envolvendo grandes projetos internacionais como o CLIVAR (*Climate Variability and Predictability*) e PIRATA (*Prediction Research Moored Array in the Tropical Atlantic*) que focam seus esforços para compreender os fluxos de massa e energia na interface oceano-atmosfera.

Para uma descrição completa sobre o sistema de correntes e contracorrentes equatorial e os processos dinâmicos envolvidos recomendam-se os trabalhos de Stramma & Schott (1999) e Lumpkin & Garzoli (2005).

1.3. Processos biogeoquímicos e hidrodinâmicos em regiões de montes submarinos

O ASPSP não é propriamente um monte submarino, uma vez que suas rochas afloram à superfície na forma de ilhas oceânicas. Kiriakoulakis & Wolff (2005) definiram um monte submarino como sendo uma feição topográfica que se eleva do fundo oceânico com relevo maior que 1000m, possuindo o topo abaixo da superfície. Entretanto, ao considerar a presença de uma elevação rochosa que não aflora a leste das ilhas de São Pedro e São Paulo, percebe-se que o arquipélago também se encaixa na categoria de monte submarino raso (topo em profundidades menores que 400m).

Os montes submarinos são conhecidos como verdadeiros *hot spots* da vida marinha e da biodiversidade nos oceanos. Essas regiões apresentam frequentemente características distintas da região ao seu entorno, sendo o fenômeno comumente referenciado por *seamount effect*. A visão mais comum à respeito desse efeito, envolve o enriquecimento das águas por uma ressurgência local, induzida orograficamente, onde ocorre o aprisionamento de nutrientes pelo mecanismo conhecido como coluna de Taylor. Com a ressurgência, águas ricas em compostos nutrientes podem chegar à camada eufótica, elevando consequentemente a produtividade primária destes locais (Kiriakoulakis & Wolff, 2005).

Ao considerar os principais processos de agregação de organismos em topografias abruptas, Genin (2004) descreveu duas situações: uma em que o incremento na densidade de organismos pode ser provocado por um aumento no crescimento local dos mesmos, e outra situação, em que as altas abundâncias são verificadas sem qualquer ligação com aumento da produtividade local. Os primeiros processos geralmente são sustentados por ressurgências locais enquanto os últimos acontecem quando há um aumento na concentração de presas, sendo chamado de agregação troficamente subsidiada. Esse último processo normalmente ocorre quando há um grande aprisionamento de águas pela interação correntes-topografia, resultando em um aumento da retenção de larvas de organismos junto ao monte, suplementando o recrutamento da fauna bentônica local (Mullineaux & Mills, 1997).

De acordo com Genin, (2004) a ocorrência de agregações de organismos (zooplâncton, ictioplâncton e peixes) em áreas de montes submarinos é observada

com freqüência, e embora sejam vários os mecanismos responsáveis pela formação desses fenômenos, todos são controlados pelas correntes locais.

A dinâmica complexa ao redor de um monte submarino, depende de muitos fatores, em outras palavras das características de cada monte. Ainda que alguns processos sejam típicos da maioria dos montes submarinos (coluna de Taylor, ondas internas aprisionadas, ampliação da maré, vórtices), permitindo que sejam estudados e acompanhados em muitos locais, a classificação é difícil e cada monte submarino deve ser estudado de acordo com suas características peculiares preponderantes (White & Mohn, 2004).

Diante da possibilidade de ocorrência de tantos fenômenos concomitantes ou isolados, o presente trabalho utilizou técnicas de modelagem matemática para estudar a hidrodinâmica do ASPSP, com ênfase na possibilidade de promover o melhor entendimento das interações físicas e biogeoquímicas desse sistema.

2. OBJETIVOS

2.1. *Objetivos gerais*

O objetivo desse trabalho foi utilizar técnicas de modelagem matemática para identificar os principais mecanismos que controlam o enriquecimento biológico das águas adjacentes ao ASPSP.

2.2. *Objetivos específicos*

- Aplicar um modelo hidrodinâmico para a área de estudo que permita a identificação, quantificação e reprodução da variabilidade sazonal dos principais mecanismos físicos atuantes na região (ex: ação de correntes, ressurgência, transporte de Ekman, formação de vórtices);
- Aplicar um modelo biogeoquímico que permita identificar os processos responsáveis pelas variações espaço-temporal de plâncton e nutrientes minerais dissolvidos existentes na área de estudo;
- Fornecer subsídios às pesquisas de oceanografia pesqueira da região do arquipélago, através da compreensão dos mecanismos de enriquecimento mineral, dinâmica/transporte de plâncton e de larvas, e fluxo de energia e de massa nos níveis inferiores da cadeia trófica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área

A área de estudo compreende a região oceânica adjacente ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Figura 2), onde se projetou uma malha computacional com limites entre $29,0^{\circ}\text{W}$ a $28,0^{\circ}\text{W}$ de longitude e entre $0,65^{\circ}\text{N}$ a $1,15^{\circ}\text{N}$ de latitude. Este arquipélago equatorial é constituído por um grupo de pequenas ilhotas sendo as principais Belmonte e São Pedro e São Paulo.

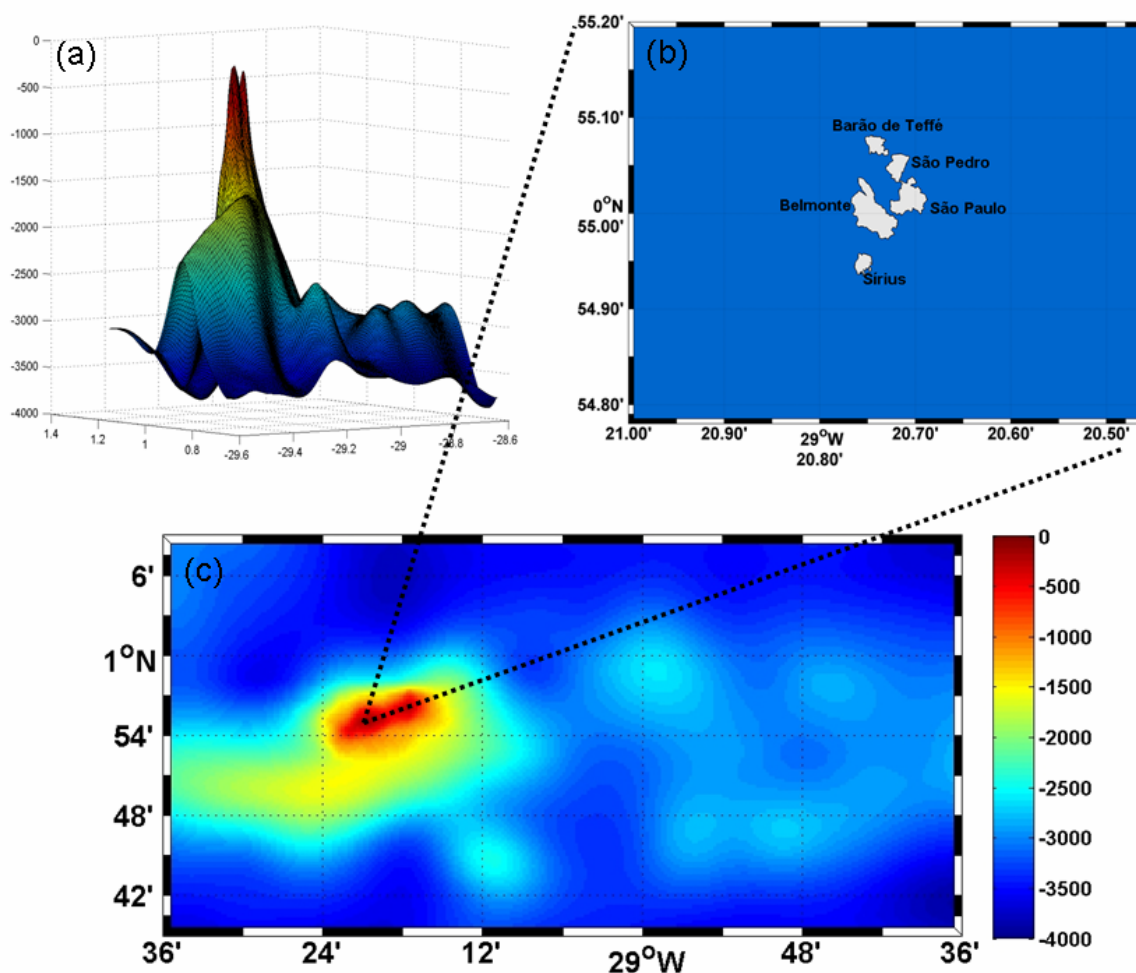


Figura 2. Descrição da área de estudo: (a) batimetria tridimensional; (b) Arquipélago de São Pedro e São Paulo; (c) batimetria do domínio simulado.

O ASPSP, coordenadas $00^{\circ}55'06''\text{N}$ e $29^{\circ}20'48''\text{W}$ (Figura 2), possui um relevo peculiar, apresentando-se como um monte submarino que se eleva de profundidades ao redor de 4000 m, aflorando à superfície na forma de pequenas

ilhas rochosas (Figura 2). A interação das correntes com esta topografia pode ocasionar processos físicos tipicamente observados em montes submarinos, como a produção de vórtices, com zonas de elevada enstrofia, reduções de velocidades, perturbações da estrutura termohalina e possíveis mecanismos de ressurgência locais induzidos orograficamente.

3.2. Descrição dos modelos

3.2.1. O modelo matemático - ROMS

O modelo utilizado foi o *Regional Ocean Modeling System* – ROMS (Shchepetkin & McWilliams, 2005). O ROMS é um conjunto de rotinas matemáticas desenvolvidas por várias Universidades, principalmente pelo *Institut de Recherche pour l'ê Développement* (IRD–França) e pela *Rutgers University* e a *University of Califórnia at Los Angeles* (UCLA–EUA).

Em sua forma básica o ROMS integra as equações primitivas de “Reynolds” que são discretizadas pelo método das diferenças finitas. Essas equações tanto servem para representar campos de velocidade como as distribuições espaciais de temperatura e salinidade. A grande diferença do ROMS para outros modelos está no melhoramento das técnicas de discretização (3ª ordem) dos termos advectivos das equações do movimento, permitindo uma enorme diminuição nos erros associados ao necessário truncamento. Os processos que ocorrem em escala menor que o espaçamento da malha são parametrizados em um modelo de fechamento do tipo KPP (Large et al., 1994).

O ROMS utiliza coordenadas sigma adimensionais para representar a coordenada vertical z (Figura 3a) em uma malha horizontal do tipo Arakawa-C (Figura 3b). Esta versatilidade traz grande facilidade computacional quando utilizado em áreas caracterizadas por fortes gradientes topográficos, como no caso da região oceânica adjacente ao ASPSP.

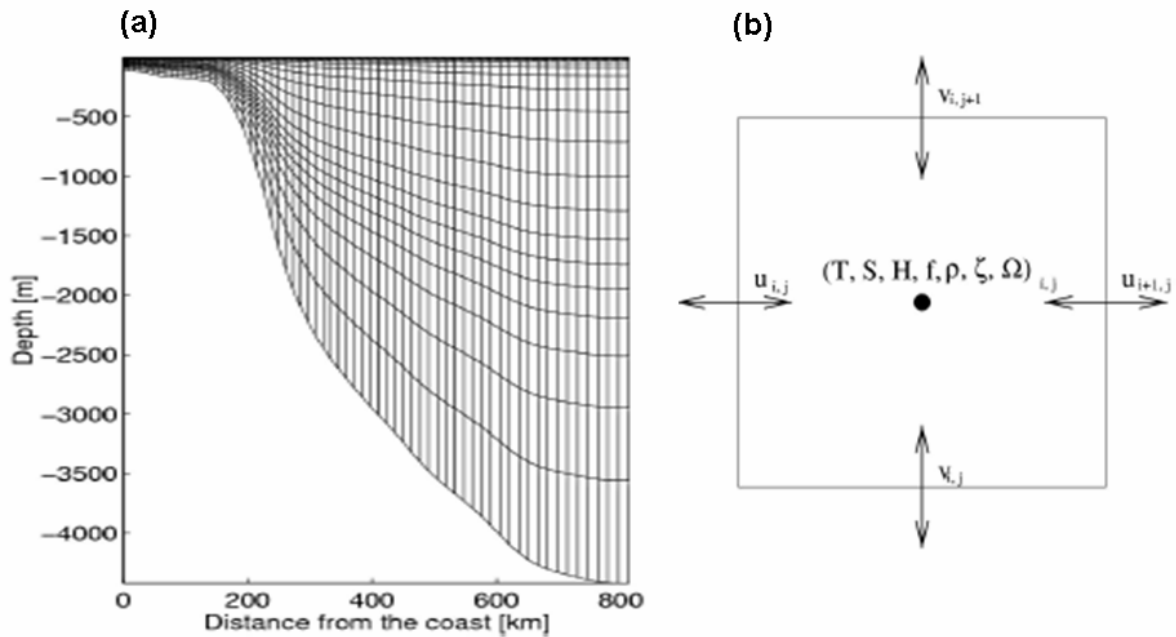


Figura 3. Discretização espacial no modelo ROMS: (a) Esquema de coordenadas verticais sigma; (b) Esquema de uma malha horizontal do tipo Arakawa-C (Arakawa & Lamb, 1977).

As condições de contorno utilizadas nas quatro fronteiras abertas (N, S, E, W) são condições de radiação adaptadas por Orlanski (1976).

Para o pré-processamento dos dados de entrada do modelo foi utilizado o pacote de algoritmos ROMSTOOLS (Penven et al., 2008). Esse pacote é um conjunto de ferramentas computacionais, associadas a vários bancos de dados científicos, que permitem a produção das condições iniciais e de contorno, forçantes superficiais e a topografia para inicialização do modelo ROMS. O ROMSTOOLS também apresenta um pacote para o pós-processamento, transformando os resultados numéricos em produtos finais para interpretação como mapas e gráficos.

O modelo ROMS vem sendo utilizado com êxito na borda oeste do oceano Atlântico sul por Silva et al. (2009). Uma breve descrição das principais equações processadas pelo ROMS é apresentada em Anexo. Uma descrição mais detalhada do modelo pode ser encontrada nos trabalhos de Haidvogel et al. (2000) e Shchepetkin & McWilliams (2005).

3.2.2. O modelo biogeoquímico – NPZD

O modelo biogeoquímico utilizado NPZD (*N*itrate, *P*hytoplankton, *Z*ooplankton and *D*etritus) é uma versão adaptada do código desenvolvido originalmente por Fasham et al. (1990). Esse modelo considera sete variáveis de estado, sendo elas: nitrato, amônio, clorofila-a, fitoplâncton, zooplâncton, micro e macro detritos. O NPZD é baseado no conceito de nutriente limitante. No caso em estudo, sistema oceânico, a disponibilidade de nitrogênio executa um importante papel na regulação dos processos biogeoquímicos. O modelo conceitual com os principais componentes do NPZD é apresentado na Figura 4.

Matematicamente o modelo consiste em um sistema de sete equações diferenciais parciais, relacionadas às variáveis de estado citadas acima. Esse sistema governa a distribuição no tempo e espaço das mesmas variáveis. Uma equação genérica de conservação de um determinado constituinte, considerando (B) como qualquer uma das variáveis descritas acima, é apresentada a seguir:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \cdot K \nabla B - \vec{u} \cdot \nabla_h B - (\vec{w} + w^{\sin k}) \cdot \frac{\partial B}{\partial z} + J(B) \quad (1)$$

onde:

K = coeficiente de difusividade turbulenta ($m^2.s^{-1}$);

∇ e ∇_h = operador gradiente tridimensional e operador gradiente horizontal, respectivamente;

$\vec{u}$ e $\vec{w}$ = velocidades horizontal e vertical, respectivamente ($m.s^{-1}$);

$w^{\sin k}$ = taxa de afundamento da variável considerada ($m.d^{-1}$)

$J(B)$ = termo fonte menos o afundamento para cada variável ($mmol N.m^{-3}$)

Os transportes advectivo e difusivo e o campo termodinâmico são importados para o NPZD a partir dos resultados do modelo físico, sendo esse último de grande

importância para a correta reprodução dos processos ecológicos avaliados. Do acoplamento do ROMS ao modelo biogeoquímico NPZD são calculados novos valores das variáveis de estado, que são balanceadas a cada intervalo de discretização temporal do modelo, de acordo com as transformações físicas e biogeoquímicas que representam os fluxos de massa e energia nesse sistema. Maiores detalhes e uma completa descrição das equações do modelo NPZD são encontrados em Gruber et al. (2006).

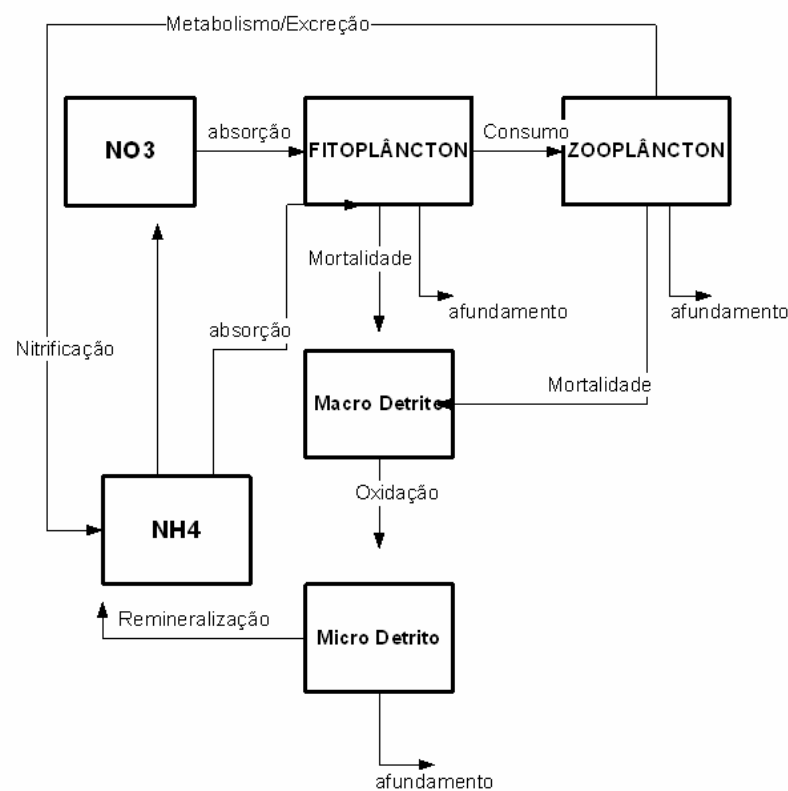


Figura 4. Modelo conceitual dos principais compartimentos ecológicos do NPZD.

3.2.3. O modelo lagrangeano - ICHTHYOP

Muitas vezes, em regiões de montes submarinos, formam-se processos físicos que possibilitam ou favorecem a retenção de larvas de organismos. A retenção larval pode contribuir para enriquecer biologicamente esses ambientes, permitindo que organismos que necessitam de um substrato para se fixar durante alguma fase de suas vidas tenham essa oportunidade para obter sucesso reprodutivo.

Para simulação do transporte de partículas livres junto ao ASPSP, considerando essas partículas como larvas de um organismo genérico, foi escolhido o modelo ICHTHYOP. O modelo ICHTHYOP (Lett et al., 2008) é um conjunto de ferramentas computacionais que permite o estudo de parâmetros físicos e biológicos aplicados à dinâmica do ictioplâncton. Essa ferramenta computacional é um modelo baseado no indivíduo (*Individual based Model - IBM*) que simula larvas de ictioplâncton em um domínio com campos tridimensionais de velocidade, temperatura e salinidade, agregando as propriedades do desenvolvimento biológico a hidrodinâmica.

O modelo biofísico ICHTHYOP compreende seus indivíduos e o ambiente físico em que esses se encontram. Os indivíduos considerados pelo modelo são as suas variáveis de estado, a saber: idade (dias); estágio alimentar da larva; localização da larva (tridimensional) e situação da larva (viva ou morta).

Para a caracterização do ambiente físico o modelo utiliza o campo de correntes, temperatura e salinidade (variáveis Eulerianas), importados do modelo ROMS, para simular os processos de propagação (aproximação Lagrangeana) de larvas de ictioplâncton. Dessa forma as variáveis físicas do ROMS são interpoladas na mesma resolução espacial para o ICHTHYOP, preenchendo as informações para todo domínio desejado. Do mesmo modo, estas variáveis físicas também são interpoladas no tempo, de forma a fornecer as informações ao modelo biofísico (Δt normalmente de 1h).

O modelo é inicializado com a desova (liberação das larvas) que pode ocorrer em qualquer região delimitada pelo usuário. Nessa fase também são determinados o número de indivíduos, sendo o tamanho inicial de cada indivíduo 0,025mm. Após a desova o submodelo de movimento individual processa a advecção horizontal e vertical, como também a dispersão larval, flutuabilidade da larva e a migração vertical diária. Nessa simulação piloto considerando o ASPSP, não foram ativados os módulos de migração vertical e flutuabilidade da larva, uma vez que a situação considerada foi genérica apenas simulando os processos advectivos tridimensional e de dispersão larval. Concomitante ao movimento, os submodelos de crescimento, mortalidade e recrutamento também são processados a cada passo de tempo do modelo biofísico.

Durante o crescimento a larva pode mudar de estágio de saco vitelínico, onde prove seu próprio alimento, para um estágio em que se alimenta de plâncton. No presente estudo tanto a idade como tamanho foram determinados apenas para garantir que as larvas atingissem a zona de recrutamento com a idade e estágios mínimos para recrutar. O submodelo de mortalidade do ICHTHYOP permite que seja determinado pelo usuário uma temperatura letal para a sobrevivência dos indivíduos, esse submodelo avalia a cada passo de tempo se a larva permanece viva ou morta. Esse módulo esteve desativado durante as simulações.

O módulo que calcula o recrutamento pode usar ou o critério de idade ou o critério de tamanho da larva para associar a condição desse indivíduo para recrutar. Nesse estudo foi utilizado o critério de idade, considerando uma idade mínima para o recrutamento (9h).

Os resultados numéricos gerados com essa abordagem permitiram inferir sobre o transporte e assentamento de larvas na região, contribuindo para levantar hipóteses sobre os processos de enriquecimento biológico no ASPSP.

O modelo ICHTHYOP é de distribuição livre, seu código em Java pode ser obtido no endereço eletrônico <http://www.brest.ird.fr/ressources/ichthyop/index.php>.

3.3. Base de dados

3.3.1. Dados de clorofila-a - Programa JOPSII

O conjunto de informações que serviram para verificar o desempenho do modelo biológico, no que se refere a variável de estado Clorofila-a, é oriundo das campanhas de mar realizadas em Janeiro-Fevereiro de 1995 (SMOCKS – *Seamounts Oceanic Islands and Saint Peter and Saint Paul Archipelago-LEG4/1*), no âmbito do Projeto de Cooperação Brasil-Alemanha JOPS-II – *Joint Oceanographic Projects – II*. Os dados de Clorofila-a foram obtidos realizando-se estimativas a partir dos perfis publicados em von Bröckel & Meyerhöfer (1999).

A profundidade de extinção da luz, que delimita o final da camada eufótica (100m), foi retirada dos dados do programa JOPS-II publicados em von Bröckel & Meyerhöfer (1999). O valor utilizado constitui uma média das profundidades

previamente calculadas por esse programa e considerou todas as estações adjacentes ao ASPSP.

A Figura 5 a seguir apresenta a localização das estações JOPS II utilizadas nas comparações.

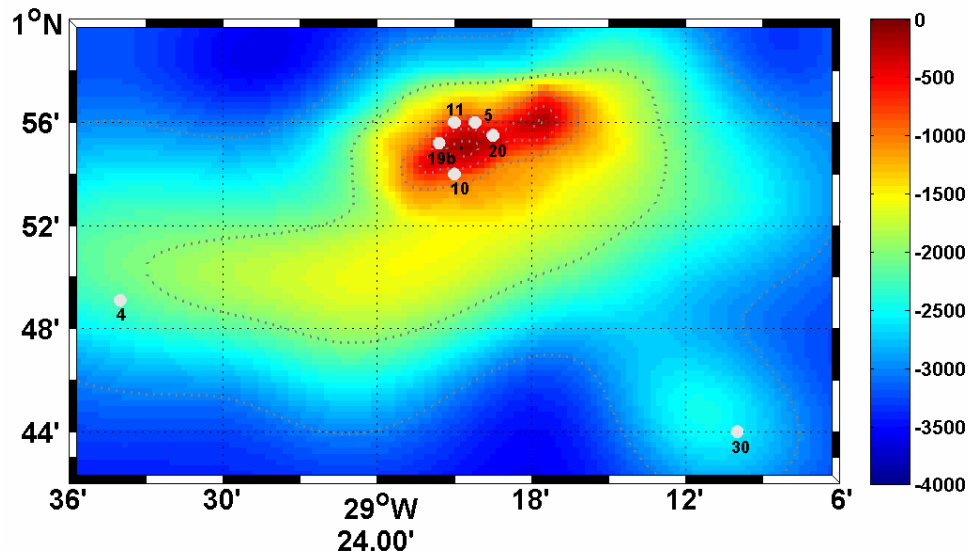


Figura 5. Posição das estações JOPS II no domínio simulado.

3.3.2. Dados termodinâmicos e nutrientes – Programa REVIZEE

A segunda fonte de informações que foi utilizada nas comparações e validação do modelo advém do Programa REVIZEE-SCORE/NE “Programa de Avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva – Subcomitê Região Nordeste” (Becker et al., 2009). As campanhas utilizadas nas comparações com os resultados numéricos foram a NE-II (verão austral) e NE-III (outono austral). A posição das estações REVIZEE utilizadas nas comparações é apresentada na Figura 6.

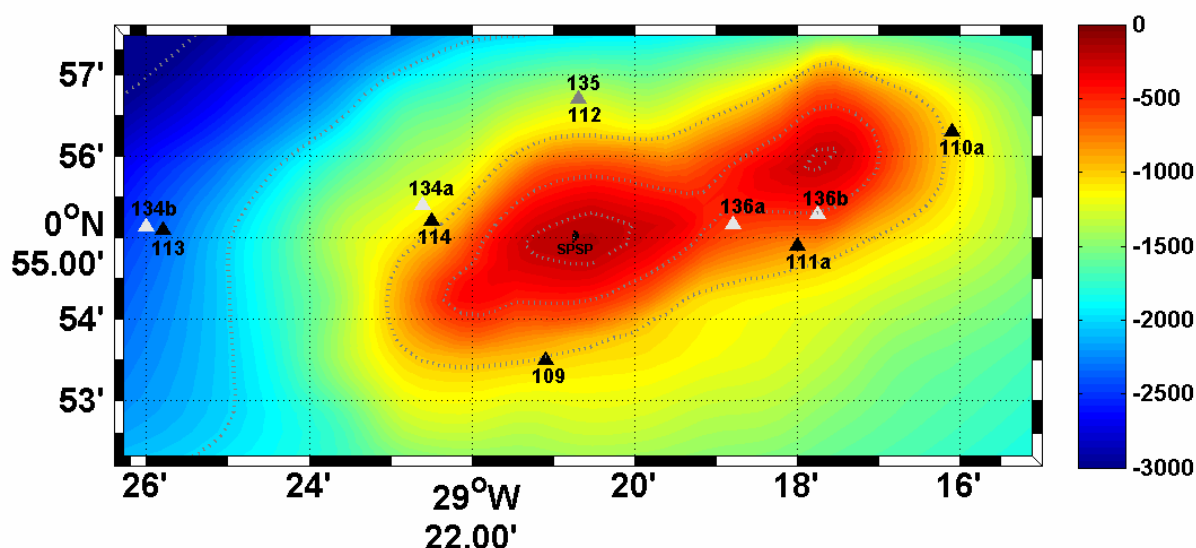


Figura 6 Posição das estações do programa REVIZEE NE II (branco) e NE-III (preto) no domínio simulado. Para as estações NEII e NEIII coincidentes utilizou-se a cor cinza.

3.4. Características das simulações numéricas

Em uma etapa preliminar, os esforços de trabalho visaram determinar os limites computacionais que se poderia chegar, permitindo a melhor resolução espaço-temporal possível para o domínio de integração do ASPSP. Em seguida projetaram-se vários experimentos que focaram progressivamente o arquipélago, visando descrever a interação das correntes com o banco oceânico e identificar os processos resultantes dessa interação. São apresentados a seguir todos os experimentos que foram progressivamente desenvolvidos neste estudo (Tabela 1).

Tabela 1. Características gerais das simulações.

Experimento	Resolução espacial	Tipo de simulação	Modelo utilizado
EXP 1	1/18° horizontal (40 níveis verticais)	Climatológica	ROMS
EXP 2	1/54° horizontal (40 níveis verticais)	Climatológica	ROMS
EXP 3	1/162° horizontal (40 níveis verticais)	Interannual	ROMS
EXP 4	1/162° horizontal (40 níveis verticais)	Climatológica	ROMS + NPZD

EXP 5	1/260° horizontal (40 níveis verticais)	Interanual	ROMS
EXP 6	1/260° horizontal (40 níveis verticais)	Climatológica	ROMS + NPZD
EXP 7	----	Simulação Lagrangiana	ICHTHYOP

Para configurar a batimetria do domínio simulado foram utilizadas duas bases de dados. Para a região oceânica mais externa, utilizou-se a base de dados globais ETOPO2, que constitui um banco de dados topográfico com resolução espacial de 2' (Smith & Sandwell, 1997). Já para as proximidades do ASPSP, considerando a necessidade de uma resolução mais refinada, foram utilizados os dados da carta n° 11 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Para gerar a batimetria utilizada no domínio, os dados com diferentes resoluções espaciais citados acima foram interpolados por uma função de Krigagem resultando em uma malha batimétrica com resolução espacial de 1/80°.

Os experimentos (EXP1, EXP2, EXP3 e EXP4) foram desenvolvidos apenas em caráter preliminar, tendo sido determinantes na definição da malha e domínio computacional definitivos. Os resultados e metodologia apresentados neste documento se referem, portanto, aos EXP5, EXP6 e EXP7, que foram utilizados na análise dos processos hidrodinâmicos e biogeoquímicos no ASPSP.

O domínio simulado nos EXP5 e EXP6 (Figura 2c) tem limites entre 29° 36' W e 28° 36' W de longitude e 0° 39' N e 1°09' N, resultando em uma malha de 259x130 pontos horizontais, com 40 níveis verticais.

Durante o EXP6 os forçantes físicos do campo de velocidades foram importados dos resultados da simulação do EXP5. Para isso foram realizadas médias mensais (EXP5, 2004-2005) para iniciar a simulação com o campo de quantidade de movimento em equilíbrio dinâmico.

O modelo biológico acoplado (NPZD-EXP6) utilizou condições de contorno para temperatura, salinidade e nitrato (NO_3) a partir de dados importados dos resultados observados pelo programa Revizee NE-II e NE-III. A distribuição dessas variáveis nos primeiros 300m de profundidade foi obtida por interpolação linear a

partir dos dados Revizee NE-II para os meses de primavera e verão e NE-III para os de outono e inverno. Os dados utilizados para a distribuição vertical dessas variáveis na malha constituem a distribuição vertical média das estações (134a,134b,136a,136b, NE-II) e (111, 113, 114, NE-III), representando uma distribuição geral na região do domínio. Abaixo dos 300m de profundidade foi utilizada a distribuição vertical da base de dados *Word Ocean Atlas* (WOA 2005). São apresentados na Tabela 2 as principais características desses experimentos, os parâmetros assumidos e as bases de dados utilizadas nos contornos das simulações relativas aos experimentos EXP5 e EXP6.

O EXP7 (modelo Lagrangeano, ICHTHYOP), utilizou os resultados hidrodinâmicos do EXP6 para simular a dispersão de partículas. O domínio simulado no EXP7 tem como limites as coordenadas 29° 27' W e 29° 12' W de longitude e 0° 46,8' N e 1° 3' N de latitude (Figura 7). A idade mínima para recrutamento utilizada foi de 9h, sendo necessário os indivíduos passarem no mínimo 2h dentro da área delimitada para recrutar. No módulo de recrutamento foi habilitada uma opção que considera recrutado o indivíduo que parar de se mover dentro da área delimitada. A área de recrutamento foi demarcada pelas coordenadas 29° 21' W até 29° 19,8' W de longitude e 0° 52,8' N até 0° 55,8' N de latitude. As simulações com o modelo ICHTHYOP tiveram duração de 5 dias com passo de tempo ajustado para 1h.

Tabela 2 Principais características dos experimentos EXP5 e EXP6

Domínio	ASPSP (0° 39'N – 1° 09'N, 29° 36' W – 28° 36' W)
Malha horizontal	1/260° (259 x 130 pontos)
Discretização vertical	40 níveis sigma
Passo de tempo (Δt)	50s
Difusividade horizontal	Zero
Parâmetro de Smagorinsky	0,09
Condições de fronteiras (Campo de velocidades) (Norte, Sul, Leste, Oeste)	OGCM – ECCO (2003-2005) (http://ecco.jpl.nasa.gov/)
Condições de fronteiras (Temperatura e Salinidade) (Norte, Sul, Leste, Oeste)	REVIZEE NE-II; NE-III (Superfície até 300m) WOA 2005 (abaixo dos 300m) (Exclusivo EXP6)

Condições de fronteiras (Nitrato- NO₃) (Norte, Sul, Leste, Oeste)	REVIZEE NE-II; NE-III (Superfície até 300m) WOA 2005 (abaixo 300m) (Exclusivo EXP6)
Condições de fronteiras (Clorofila -a) (Norte, Sul, Leste, Oeste)	WOA 2005 (Exclusivo EXP6) SeaWifs (Exclusivo EXP6, superfície)
Tensão de cisalhamento do vento	QuikScat (2003-2005) (Exclusivo EXP5) (http://www.ifremer.fr/dodsG/CERSAT/quikscat_daily)
Forçantes superficiais	GFS 'Global Forecast System' (Exclusivo EXP5) (http://nomad5.ncep.noaa.gov/)
Forçantes superficiais	COADS (da Silva et al., 1994) (Exclusivo EXP6)
Topografia	ETOPO 2 + Carta N°11 DHN

São apresentados na Tabela 3 os principais parâmetros utilizados no modelo biológico NPZD.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no modelo biológico NPZD (EXP6)

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Coeficiente de atenuação da luz	Kw	0,04	m ⁻¹
Coeficiente de atenuação da luz pela clorofila-a	KChla	0,024	m ² (mgChl-a) ⁻¹
Inclinação da curva P-I	A	1	mgC(mgChl-a.W.m ² .d) ⁻¹
Taxa de C:N para o fitoplâncton	R C:N	6,625	mmol C(mmol.N) ⁻¹
Máximo celular de clorofila para taxa de C	Θm	0,02	mgChl-a(mgC) ⁻¹
Inverso do kNO ₃ para o fitoplâncton (Absorção de NO ₃)	Kno3	1/0,12	1/(mmol. N m ⁻³)
Mortalidade do fitoplâncton para taxa de detrito	tPmort	0,03	d ⁻¹
Taxa de pastagem máxima para o zooplâncton	tZgraze	0,9	d ⁻¹
Eficiência de assimilação do zooplâncton	AE	0,9	-

Constante de meia saturação (ingestão do zooplâncton)	Zp	1	mmol. N m ⁻³
Taxa de excreção do zooplâncton	tZbmet	0,1	d ⁻¹
Mortalidade do zooplâncton para a taxa de Detrito	tZmort	0,1	(mmol. N m ⁻³) ⁻¹ d ⁻¹
Regeneração do microdetrito para taxa de NO ₃	tSDremin	0,05	d ⁻¹
Velocidade de afundamento do fitoplâncton	Wphyto	0,5	m.d ⁻¹

3.5. Métodos de avaliação dos resultados numéricos

Para avaliação dos resultados numéricos foram utilizados mapas horizontais e perfis verticais. Os mapas horizontais permitem visualizar a situação em duas escalas diferentes: escala da malha e uma escala reduzida. Também foi utilizado um esquema de transectos (Figura 7) para analisar o domínio modelado à procura de processos hidrodinâmicos e biológicos de interesse preponderantes. O transecto 1 (T1) foi projetado em função dos dados das estações Revizee (134a,134b,136a,136b - NE-II) e (111, 113, 114 - NE-III), possibilitando posterior comparação com um perfil análogo montado à partir dos dados numéricos (ROMS) extraídos nas mesmas posições das estações REVIZEE. Os transectos 3, 4, 5 e 6 (T3, T4 T5 e T6) foram projetados para a visualização do campo de correntes zonal e sua interação com o ASPSP, enquanto que o transecto 2 (T2) foi utilizado para a visualização geral das outras variáveis (temperatura, salinidade, densidade e velocidade-v). O transecto 7 (T7), também foi projetado para avaliar os processos de interação com o banco, cortando tanto as ilhas do ASPSP quanto o topo mais a leste que não aflora.

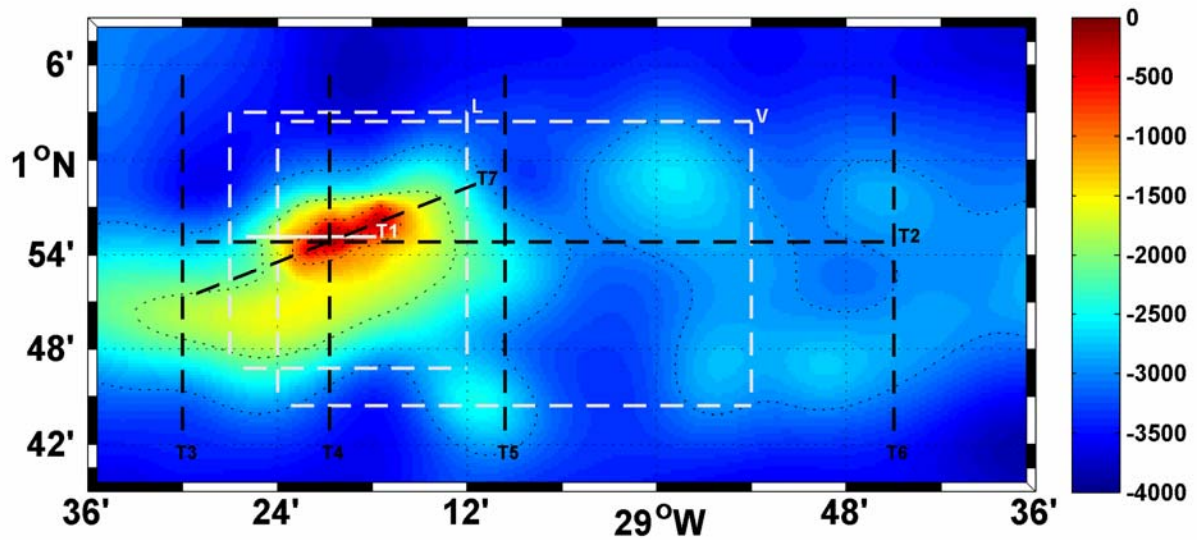


Figura 7 Esquema demonstrativo dos transectos apresentados (T1, T2, T3, T4, T5, T6 e T7 ROMS). O retângulo V representa a escala ampliada de visualização dos resultados e o retângulo L representa o domínio da simulação Lagrangeana (EXP7).

Para a identificação de possíveis vórtices no domínio estudado, foi utilizada a variável vorticidade relativa (ζ), que expressa a tendência de uma porção do fluido para rotacionar (Pond & Pickard, 1983). Essa tendência está diretamente relacionada com o cisalhamento da velocidade. Quando $\zeta > 0$, a rotação é dita anti-ciclônica terá sentido de rotação anti-horário. Caso $\zeta < 0$, a rotação será ciclônica e com sentido de rotação horário.

$$\vec{\zeta} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (2)$$

onde:

v = componente meridional velocidade (m.s^{-1});

u = componente zonal velocidade (m.s^{-1});

$\vec{k}$ = vetor unitário na direção vertical.

Com a intenção de verificar a intensidade da estabilidade em determinadas profundidades, foi utilizada a Freqüência de Brünt Väisälä (N^2).

$$N^2 = g \left[-\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] \quad (3)$$

onde:

g = aceleração da gravidade (m.s^{-2})

ρ = densidade (kg.m^{-3})

$\bar{\rho}$ = densidade média (kg.m^{-3})

Essa variável representa a frequência máxima de propagação de ondas internas em uma água com estabilidade fornecida por $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ (Pond & Pickard, 1983).

Esta frequência também é representativa do grau de estabilidade do oceano, ou seja, da tendência que um determinado volume de água deslocado da sua posição equilíbrio apresenta para voltar a essa posição. Os maiores valores de N^2 são normalmente encontrados nas zonas de pycnoclina, onde se encontram os maiores gradientes de densidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estrutura termohalina do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Os resultados numéricos mostraram um padrão de temperaturas típicas de regiões equatoriais, apresentando altas temperaturas na superfície, uma camada de mistura rasa, com temperaturas relativamente constantes e abaixo uma forte estratificação que constitui a termoclina permanente equatorial (Figura 8). A sazonalidade observada mostra uma variação fraca das temperaturas de verão e inverno. Analisando a Figura 9 nota-se a termoclina superficial posicionada entre os 60 e 140m de profundidade sendo bem reproduzida quando comparada com as observações de Programa REVIZEE. Durante as comparações, houve uma melhor concordância nos meses de outono-inverno em relação aos meses de primavera-verão. Entretanto, deve-se ressaltar que o padrão geral de distribuição térmica vertical foi bem reproduzido numericamente.

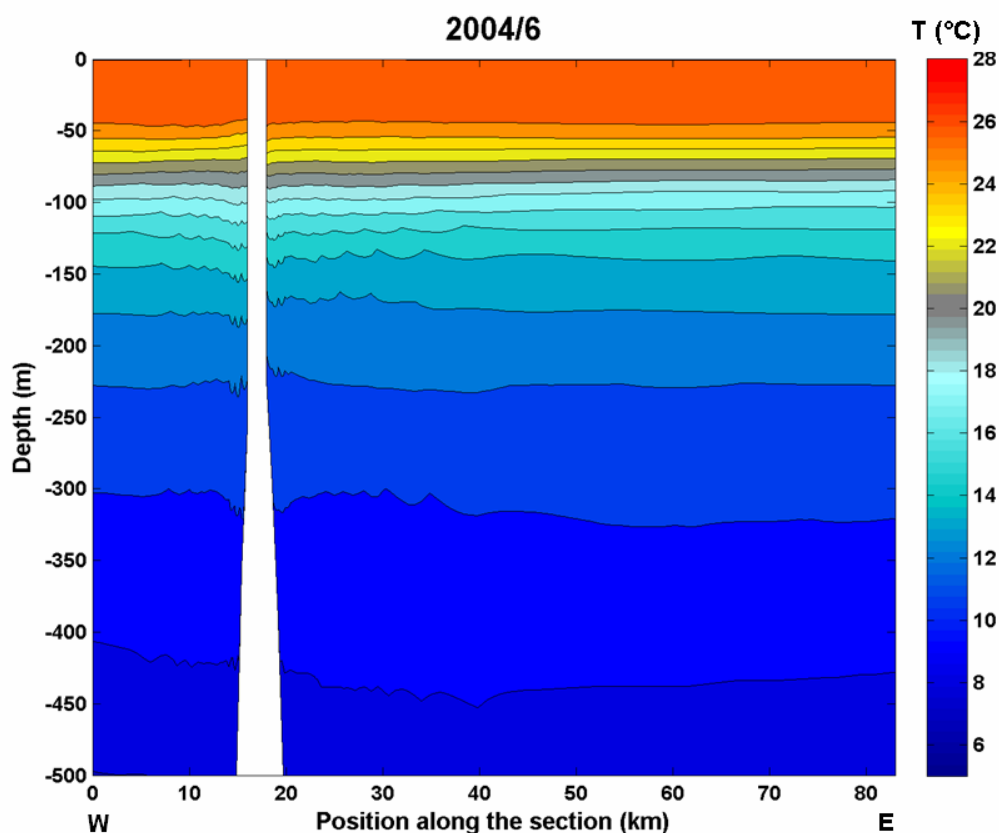


Figura 8. Estrutura vertical térmica no ASPSP (EXP5, junho/2004, T2).

Ao observar a distribuição vertical de temperatura ao longo do ASPSP (Figura 8) notam-se perturbações resultantes da interação topografia-correntes. Essas perturbações são mais intensas e evidentes a leste das ilhas e se propagam nesse sentido por aproximadamente 20 km entre os 120 e 350m de profundidade. Dentro da região da termoclina superficial a propagação dessas perturbações é suprimida em função da forte estratificação térmica e também do fluxo ser predominantemente orientado na direção zonal pela EUC. Já na camada superficial (superfície até ~50m), pouca variação é verificada. Nota-se nessa região, apenas um levantamento de isotermas (~ 5m) na base da camada de mistura (Figura 10 a,b). Esse processo se dá em função da passagem da SEC pelas ilhas, sendo observado a jusante ao ataque dessa corrente sobre o arquipélago.

Observando um perfil médio de todas as estações REVIZEE no ASPSP a fim de avaliar a reprodução dos padrões gerais de distribuição vertical de temperatura, nota-se que à superfície os valores numéricos estiveram um pouco abaixo dos observados (Figura 9). Os valores em 5m de profundidade diferiram em $0,4^{\circ}\text{C}$ tanto para os valores de verão quanto para os de inverno. A melhor concordância dos resultados foi obtida abaixo dos 90m até os 140m de profundidade para as comparações de inverno (ROMS - junho, REVIZEE - NEIII), onde os valores discordantes não passaram de $0,1^{\circ}\text{C}$. O mesmo não se verificou para o mês de fevereiro nessas profundidades, onde as discordâncias mantiveram os mesmos $0,4^{\circ}\text{C}$ observados à superfície. Abaixo dos 150m de profundidade foram observados erros em torno de $0,3^{\circ}\text{C}$ para as comparações de junho enquanto que o erro para o mês de fevereiro esteve em aproximadamente $0,6^{\circ}\text{C}$.

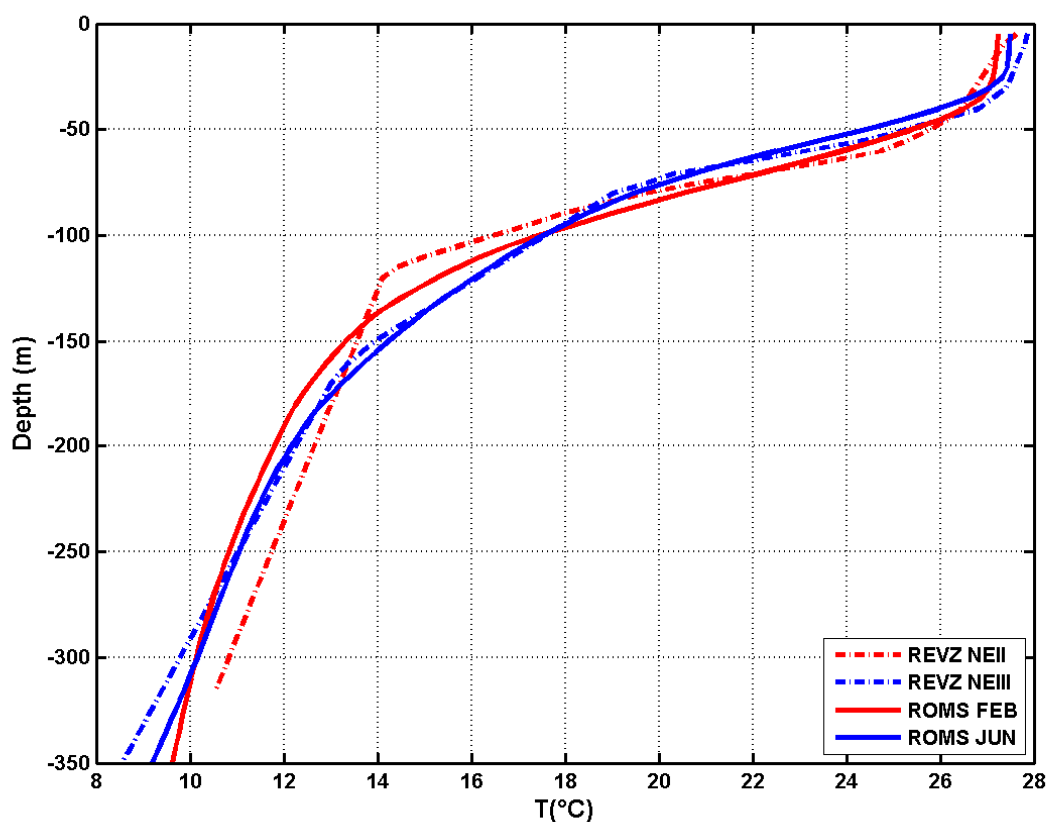


Figura 9. Perfis verticais de temperatura (°C) no ASPSP (média das estações Revizee).

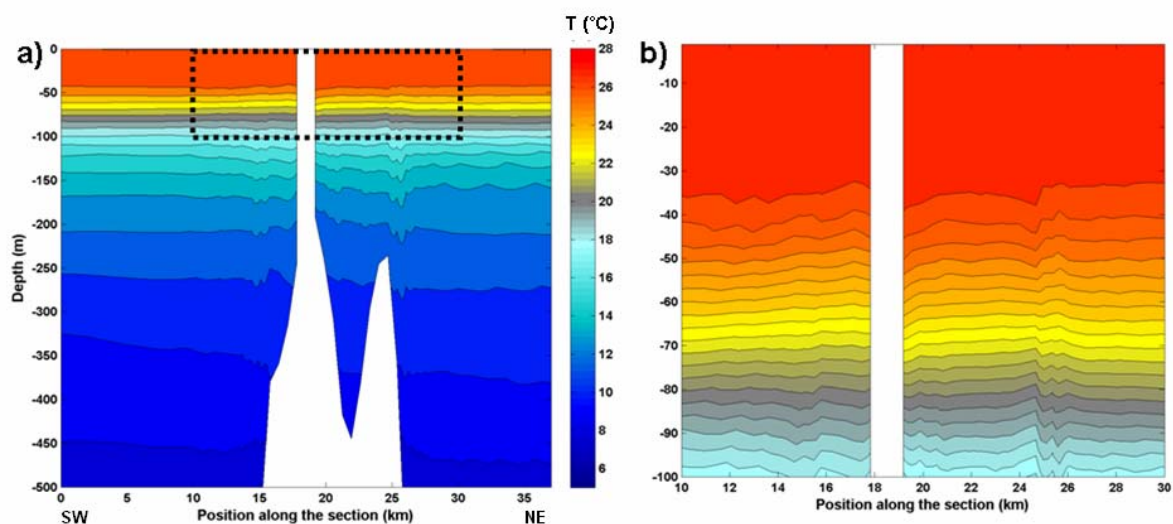


Figura 10. Distribuição vertical de temperatura: (a) Estrutura vertical de temperatura no ASPSP (EXP5, junho de 2004, T7); (b) Ampliação delimitada pelo tracejado da Figura 10a.

Analisando os perfis verticais das estações REVIZEE, nota-se que os resultados das comparações numéricas de junho (Figura 12) com os dados observados (REVIZEE-NEIII) representaram melhor o padrão esperado do que as comparações de fevereiro (Figura 11) com REVIZEE-NEII.

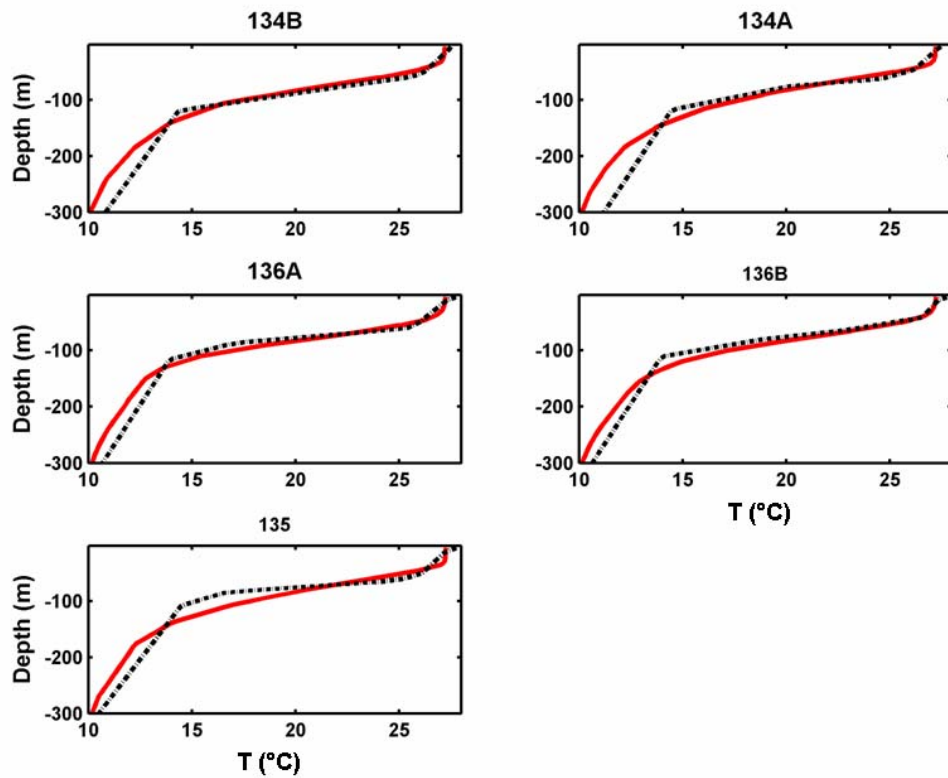


Figura 11. Perfis verticais de temperatura nas posições REVIZEE-NEII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em vermelho contínuo apresentam-se os resultados numéricos de fevereiro (EXP6 ROMS).

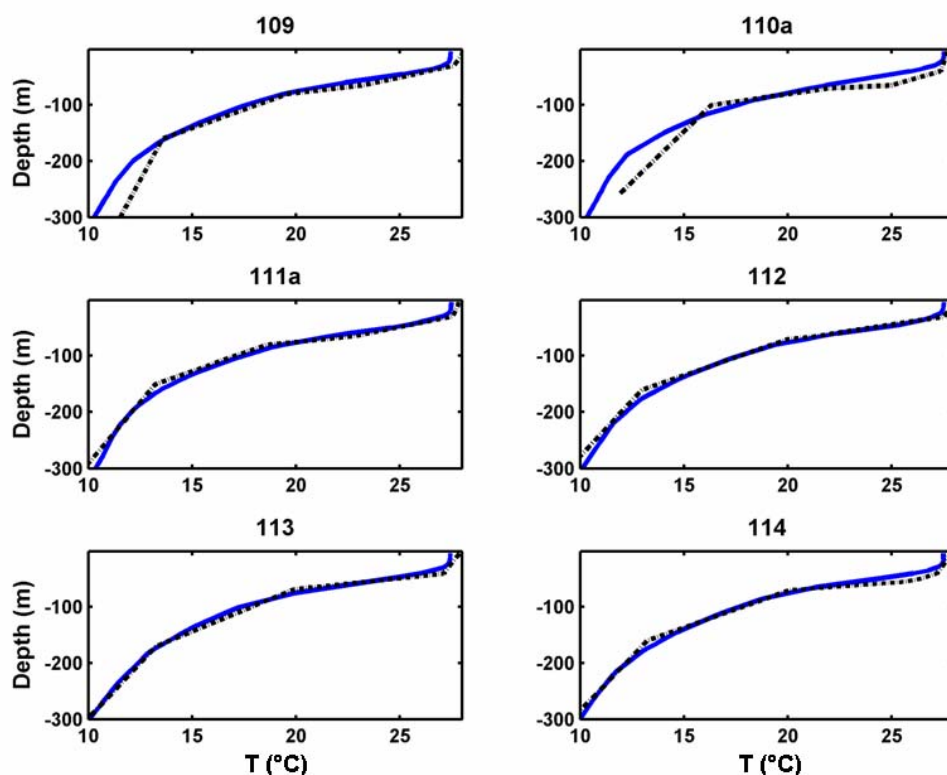


Figura 12. Perfis verticais de temperatura nas posições REVIZEE-NEIII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em azul contínuo apresentam-se os resultados numéricos de junho (EXP6 ROMS).

Nas comparações de fevereiro as estações 136a e 136b, posicionadas a leste do ASPSP, foram as que apresentaram melhores concordâncias entre as medidas e os resultados numéricos, enquanto que as estações a oeste do ASPSP (134a e 134b) apresentaram as maiores discordâncias, sobretudo abaixo dos 100m de profundidade. Analisando-se somente as comparações de julho, as estações mais próximas do arquipélago (111a, 112, 113 e 114) foram as que melhor reproduziram o padrão vertical observado pelo programa REVIZEE - NEIII. A estação 109, posicionada ao sul das ilhas, e a estação 110 situada próximo à zona de influência do banco submerso obtiveram as maiores discordâncias.

Considerando o transecto T1, que compara as estações 134a, 134b, 136a, 136b, nota-se que o modelo reproduz satisfatoriamente a estratificação térmica superficial, apresentando, entretanto, uma termoclina um pouco mais suave do que a observada pelos dados medidos (Figura 13a). Analisando-se o mesmo transecto

para o mês de junho, agora em função do alinhamento das estações 113, 114 e 111a (Figura 13b), fica evidente a melhor reprodução da estratificação térmica vertical obtida nesse mês. O grau de acerto dos resultados numéricos pode ser visualizado observando a Figura 13c onde o erro dos perfis foi exibido. Observa-se que em ambos os meses comparados, da superfície até uns 40m de profundidade o erro é pequeno, mas logo abaixo aparece uma zona, dos 40 aos 60m, onde o erro é mais significativo e negativo, ou seja, as temperaturas simuladas estiveram menores que os valores medidos.

Nas proximidades do ASPSP, dos 70m aos 140m de profundidade para as comparações (ROMS-fev – REVIZEE-NEII), foram observados erros positivos no campo de temperatura, significando que os resultados numéricos se verificaram mais quentes que as observações. Abaixo dos 170m de profundidade essa tendência foi invertida tendo os resultados numéricos se verificados mais frios que as observações. Durante as comparações de junho (ROMS-jun – REVIZEE III), abaixo dos 60m de profundidade, os erros no campo térmico apontaram valores numéricos mais quentes que as observações, com a magnitude desses erros não ultrapassando 1°C.

Analisando a distribuição espacial da salinidade no ASPSP (Figura 14), nota-se que as mesmas perturbações observadas para a variável temperatura também foram verificadas para a salinidade. A salinidade máxima em subsuperfície, comportamento típico de regiões equatoriais, foi bem reproduzida em todo domínio.

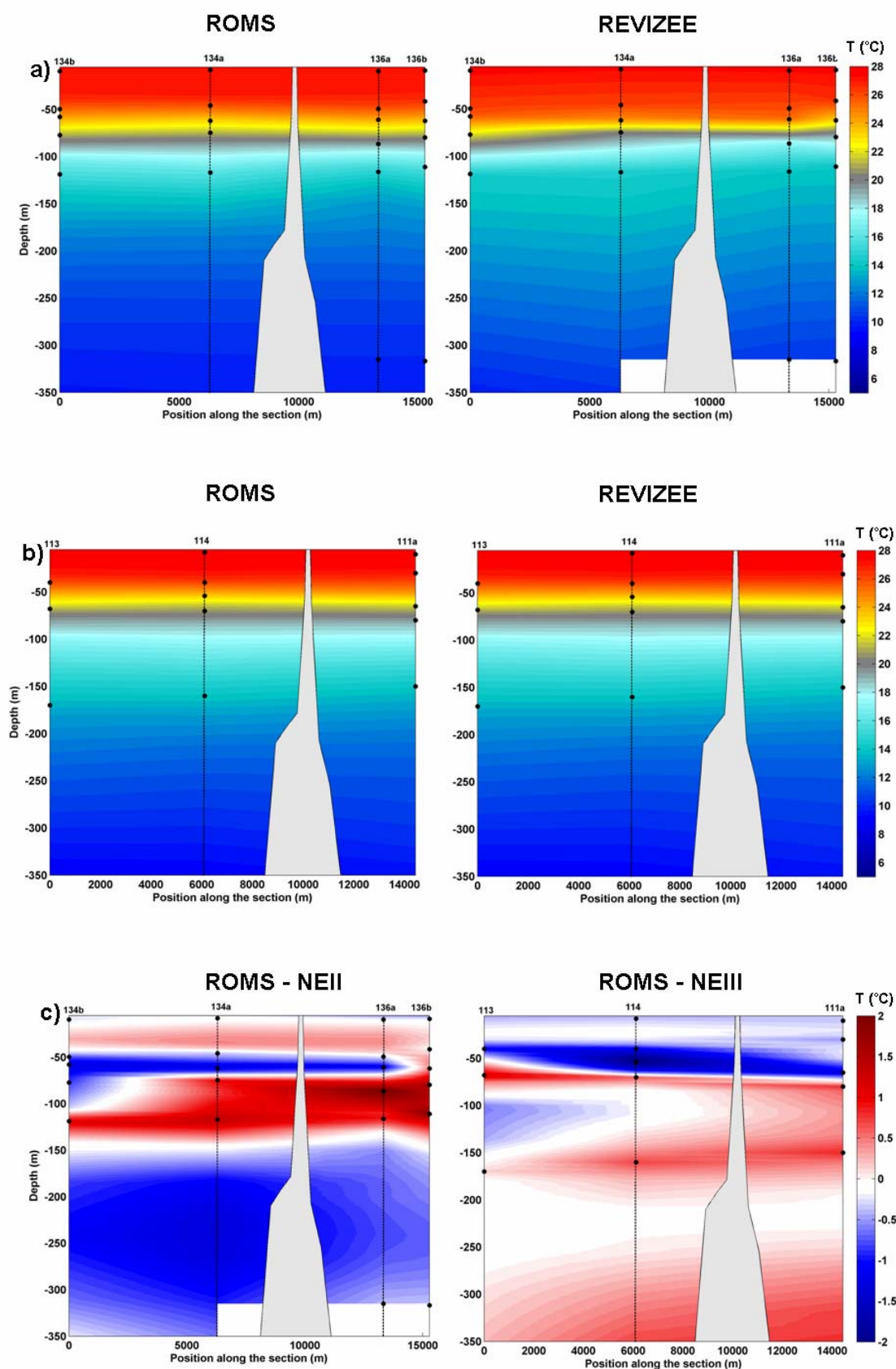


Figura 13. Estrutura vertical no transecto (T1), comparando a temperatura entre ROMS e REVIZEE: (a) Comparativo para o mês de fevereiro; (b) Comparativo para o mês de junho; (c) Estrutura vertical do erro (ROMS-REVIZEE).

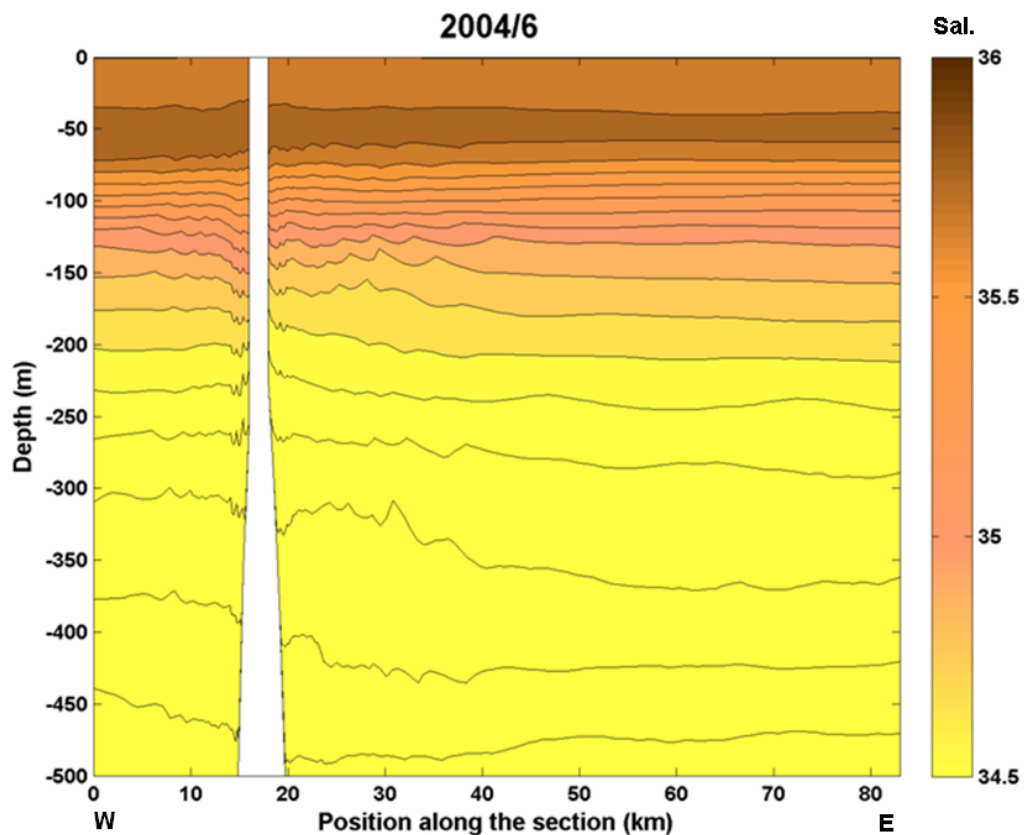


Figura 14. Estrutura vertical de Salinidade no ASPSP (EXP5, 2004/6, T2).

Observando em maior detalhe (Figura 15a,b), nota-se que uma região posicionada entre 35m e 65m constitui a zona de máxima salinidade no perfil vertical. Perturbações resultantes da interação correntes-topografia atuam nas proximidades do arquipélago, sobretudo acima do banco submarino posicionado a nordeste das ilhas, entretanto, sem ultrapassar a haloclina superficial, não tendo portanto efeitos visíveis em superfície.

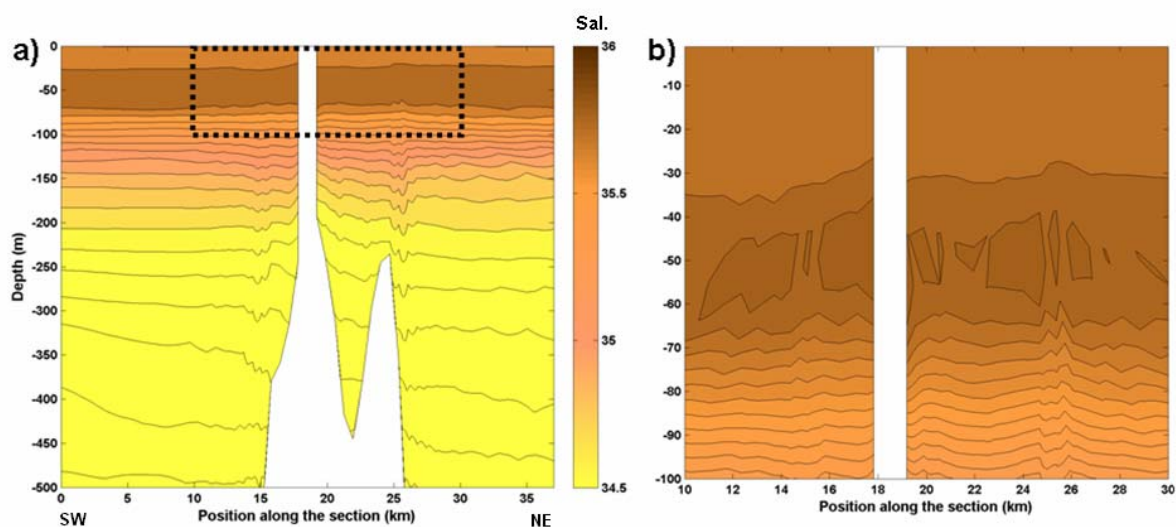


Figura 15. Distribuição vertical de Salinidade: (a) Estrutura vertical de salinidade no ASPSP (EXP5, junho de 2004, T7); (b) Ampliação delimitada pelo tracejado da Figura 15a.

Analisando o padrão de distribuição da salinidade em torno das estações REVIZEE junto às ilhas (Figura 16), nota-se que os valores numéricos estiveram um pouco acima dos observados em superfície. Entretanto, as discordâncias dos valores em superfície estiveram entre 0,12 para a simulação de fevereiro e 0,08 para as comparações de junho. Em geral o perfil vertical médio de salinidade foi bem reproduzido, assim como suas variações sazonais.

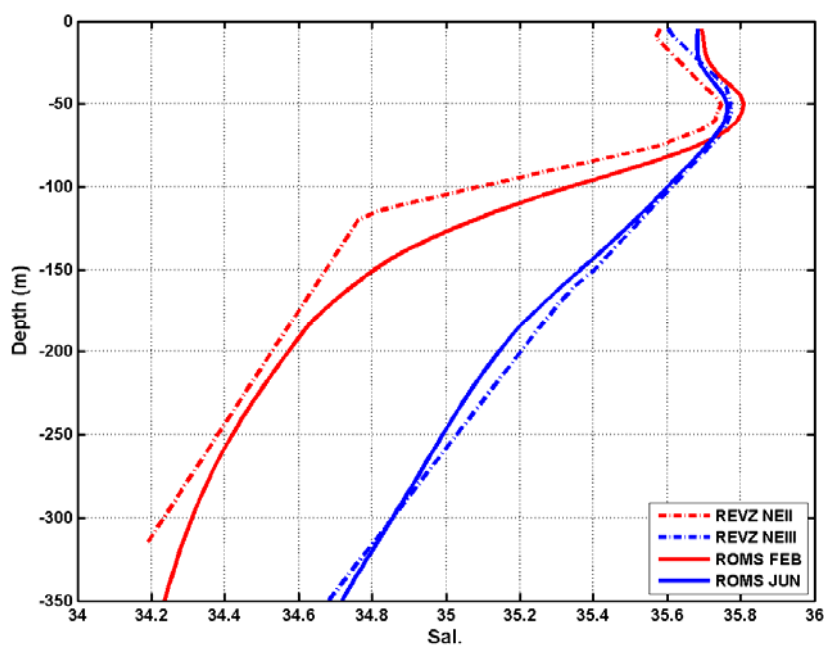


Figura 16. Perfil vertical de Salinidade no ASPSP (média das estações REVIZEE).

Ao observar as comparações nas posições das estações REVIZEE no mês de fevereiro (Figura 17), nota-se que as estações 136a e 136b (posicionadas a leste do ASPSP) foram responsáveis pelas melhores concordâncias. Esse comportamento também foi observado em relação a variável temperatura. Em relação às comparações do mês de junho (Figura 18), as estações que melhor reproduziram os dados observados foram as de 113 e 114 (posicionadas a oeste do ASPSP), não corroborando com o padrão observado até então, onde o lado leste melhor representava os parâmetros analisados. A boa reprodução do padrão vertical de salinidade ao redor do ASPSP fica mais evidente ao observar a Figura 19 a,b,c podendo notar que os erros nos perfis verticais foram mais perceptíveis nas comparações de fevereiro, mais precisamente na estação 134b onde o valor da discordância mostrou resultados numéricos mais salinos que os observados.

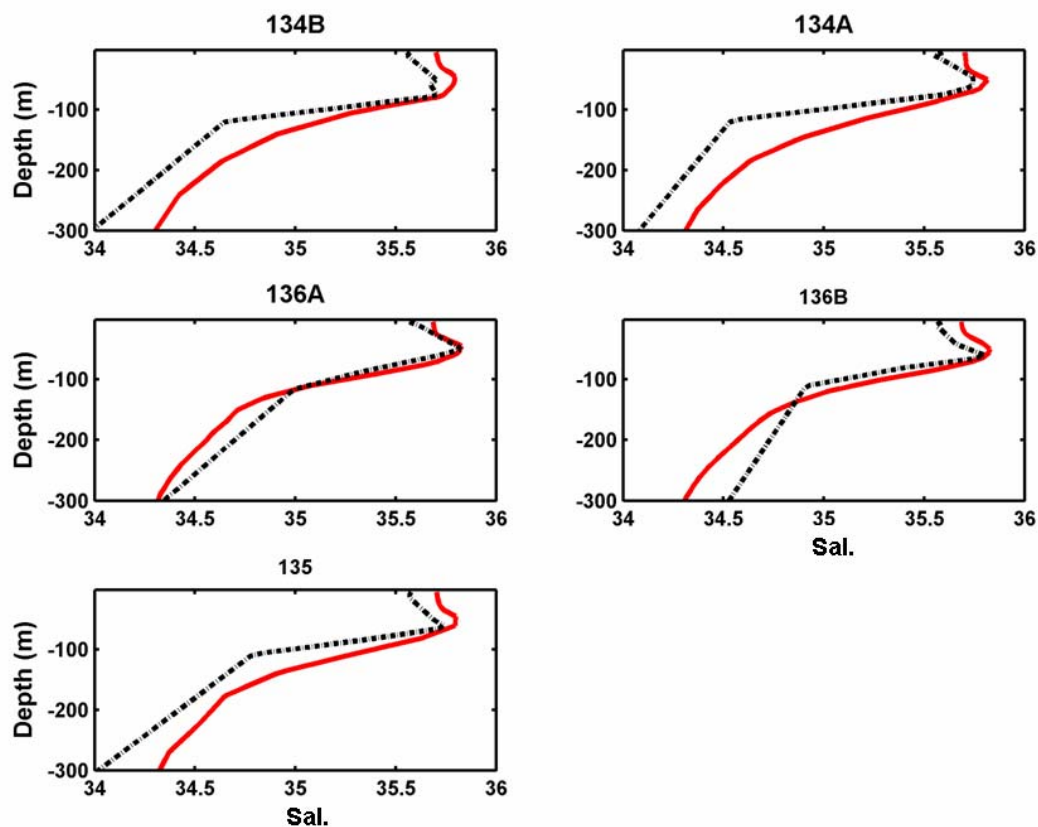


Figura 17. Perfis verticais de salinidade nas posições REVIZEE-NEII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em vermelho contínuo apresentam-se os resultados numéricos de fevereiro (EXP6 ROMS).

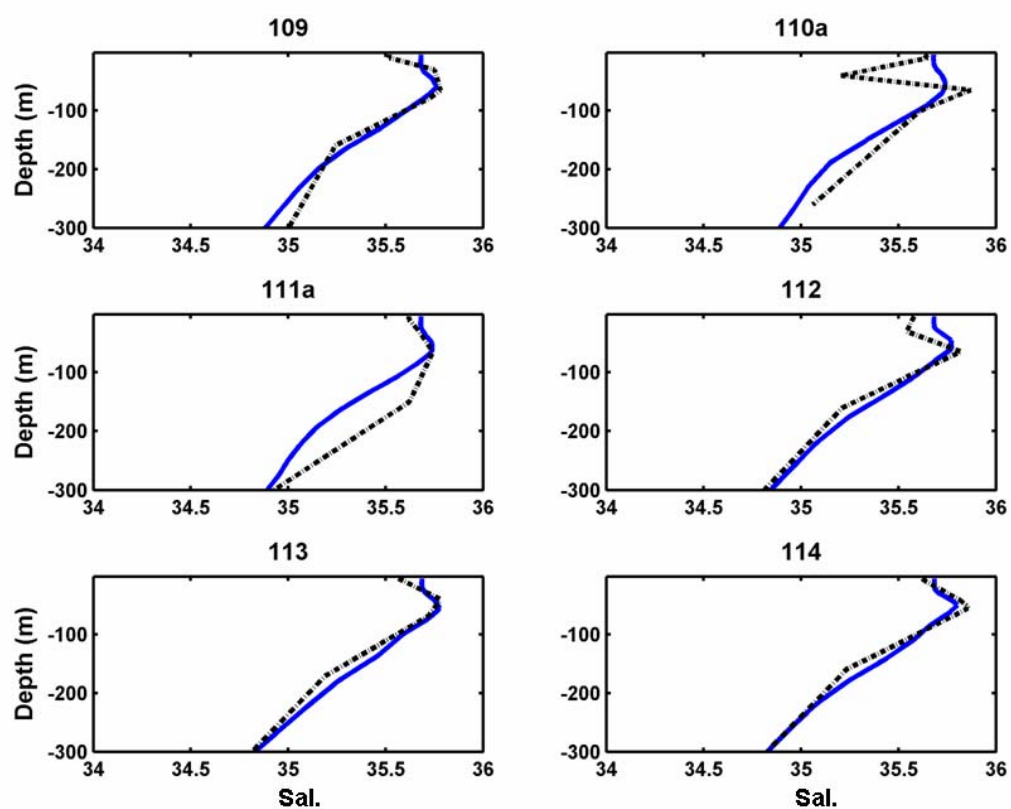


Figura 18. Perfis verticais de salinidade nas posições REVIZEE-NEIII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em azul contínuo apresentam-se os resultados numéricos de junho (EXP6 ROMS).

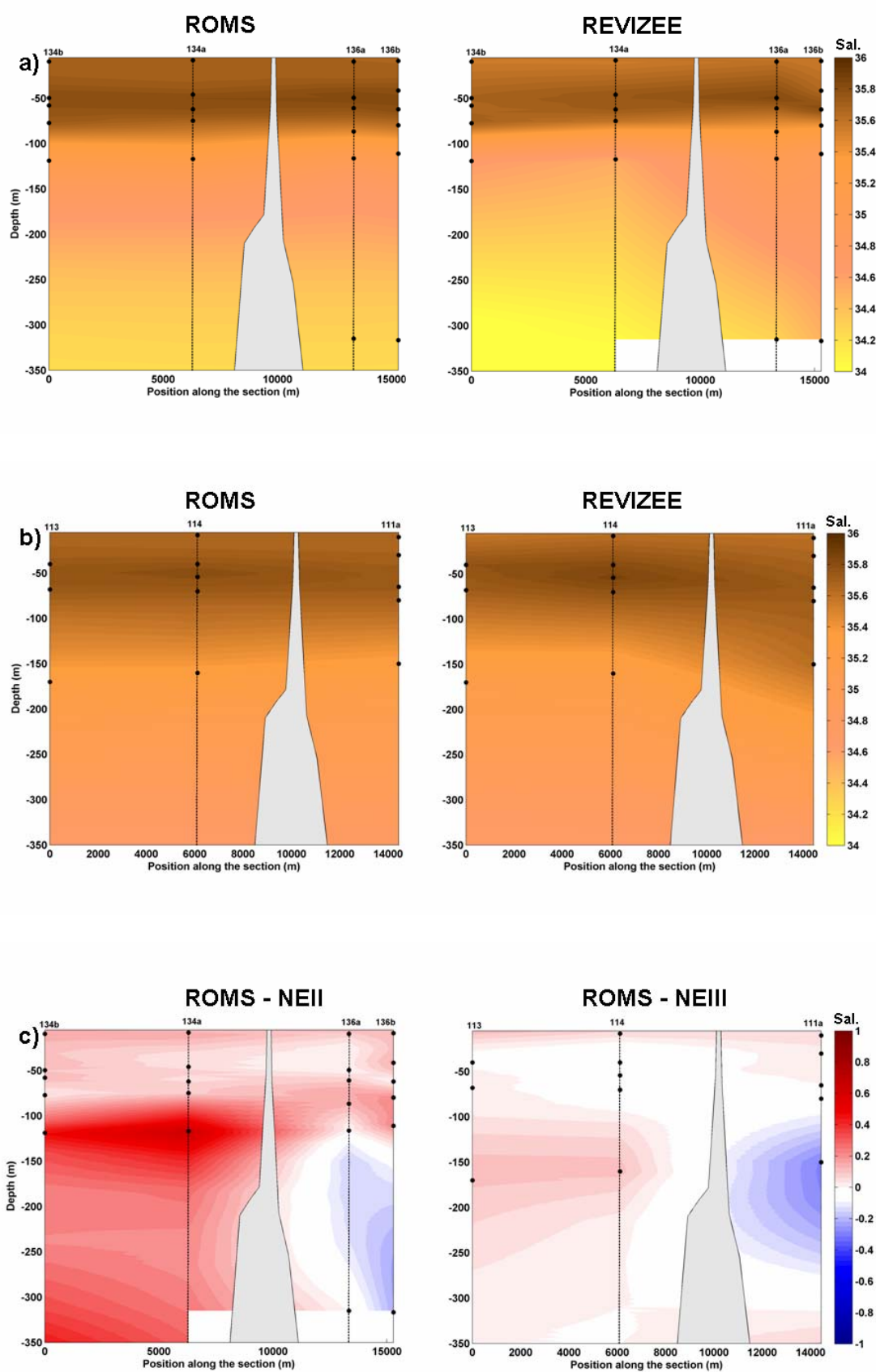


Figura 19. Estrutura vertical no transecto (T1), comparando salinidade entre ROMS e REVIZEE. (a) Comparativo para o mês de fevereiro. (b) Comparativo para o mês de junho. (c) Estrutura vertical do erro (ROMS-REVIZEE).

A região oceânica adjacente ao ASPSP apresentou-se fortemente estratificada próxima à superfície (Figura 20). Entretanto, as perturbações já observadas para os campos de temperatura e de salinidade obrigatoriamente se refletiram na variável densidade. Foi verificado um levantamento de isopícnas próximas aos 40m de profundidade, assim como perturbações junto às ilhas, essas observadas com maior facilidade dos 70m aos 190m de profundidade.

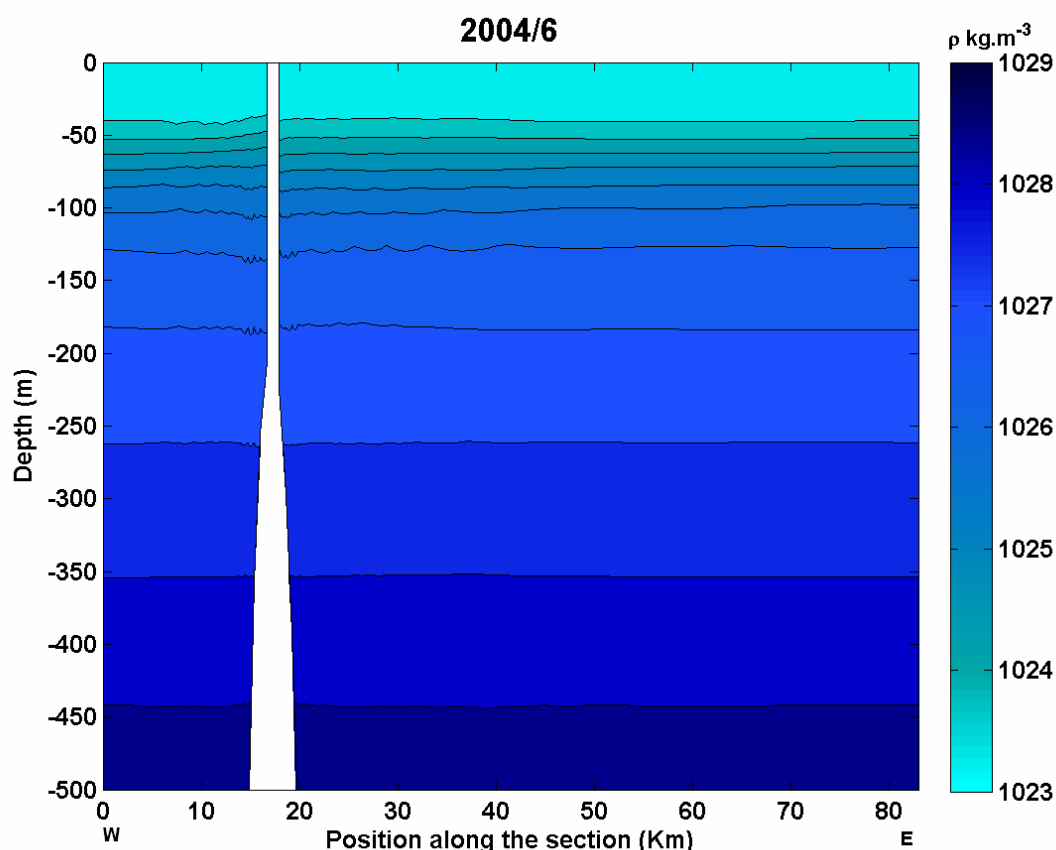


Figura 20. Estrutura vertical de densidade no ASPSP (EXP5, 2004/6, T2).

Observando as comparações nas posições REVIZEE para densidade (Figura 21), verifica-se que tanto o padrão geral de distribuição vertical como também a variação sazonal, foram bem reproduzidos. Durante o mês de fevereiro, à superfície, foram observadas densidades maiores do que durante o mês de junho. Este mesmo foi reproduzido numericamente, apresentando uma inversão dessas características entre 30m e 45m de profundidade. Essa estrutura é resultante da presença de maiores temperaturas superficiais no período de junho, embora deva ser lembrado que as variações sazonais desta variável de estado são de ordem bastante

reduzida. A densidade apresentou discordâncias médias entre os valores numéricos e observados de $0,2 \text{ kg.m}^{-3}$ em fevereiro (REVIZEE NEII) e $0,17 \text{ kg.m}^{-3}$ em junho (REVIZEE NEIII). Abaixo dos 50m de profundidade o erro médio esteve em torno de $0,1 \text{ kg.m}^{-3}$ para ambos meses, com exceção a fevereiro abaixo dos 130m de profundidade, onde o erro esteve ao redor de $0,2 \text{ kg.m}^{-3}$.

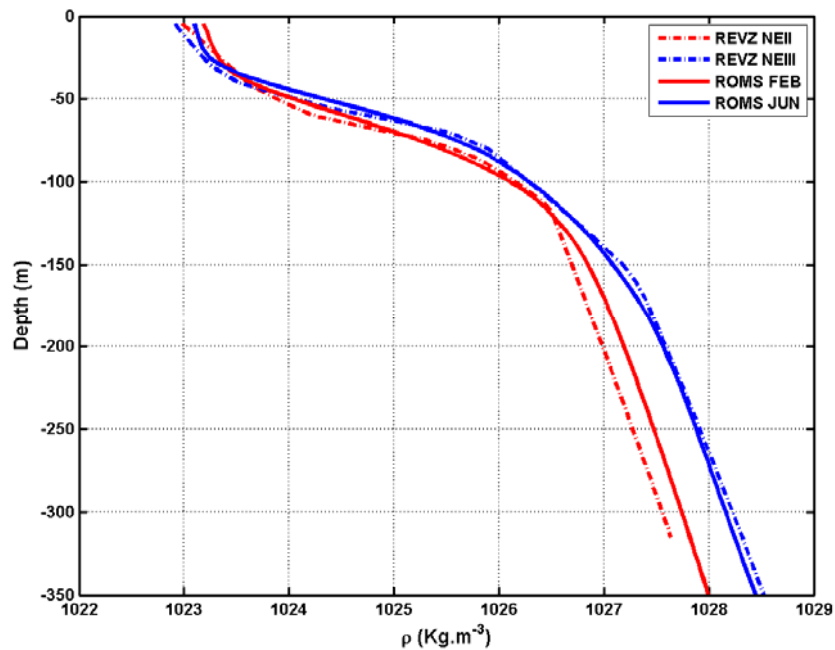


Figura 21. Perfil vertical de Densidade no ASPSP (média das estações Revizee).

Ao observar a estrutura vertical da densidade sobre as ilhas e o banco submerso (Figura 22 a,b), são verificados os efeitos das interações correntes-topografia. Da atuação da SEC à superfície, resulta um levantamento de $\sim 6\text{m}$ das isopícnas no lado à jusante dessa corrente, ocorrendo entre os 30m e 45m de profundidade. Abaixo dos 70m de profundidade pode ser notada a influência do ataque de oeste da EUC, produzindo em ambos os lados do arquipélago perturbações de estratificação vertical. Essas oscilações são mais evidentes próximos aos 150m de profundidade, chegando a atingir 30m de altura na região sobre o monte submerso.

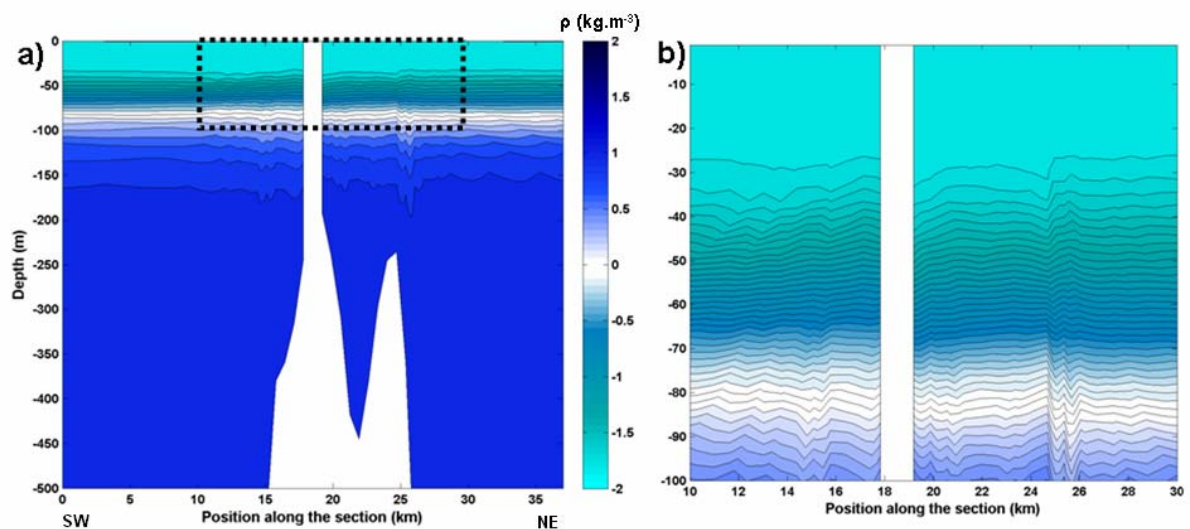


Figura 22. Distribuição da densidade no ASPSP: (a) Estrutura vertical de densidade no ASPSP (EXP5, junho de 2004, T7); (b) Ampliação delimitada pelo tracejado da Figura 22a.

Analisando as comparações em relação às medições do Programa REVIZEE, em fevereiro (Figura 23), as estações 136a e 136b foram as que apresentaram melhores concordâncias. As estações mais discordantes foram as 134a e 134b (lado oeste). Em julho (REVIZEE NEIII), de maneira geral, o padrão vertical de densidade foi bem representado, com o maior erro ocorrendo no lado leste (estação 111a) abaixo dos 100m de profundidade (Figura 24).

As massas de água observadas a partir dos dados das estações REVIZEE e dos resultados com o modelo ROMS são apresentadas na Figura 25. Neste caso, nota-se a presença de duas massas d'água que ocorrem na região, a Água Tropical Superficial (TSW) e a Água Central do Atlântico Sul (SACW). Os limites de dessas massas d'água, determinados pela isopícnica σ_t 24,5 para a TSW e σ_t 27,1 para a SACW, foram utilizados para posicionar os limites apresentados na Figura 35, de acordo com o proposto por Stramma & Schott (1999).

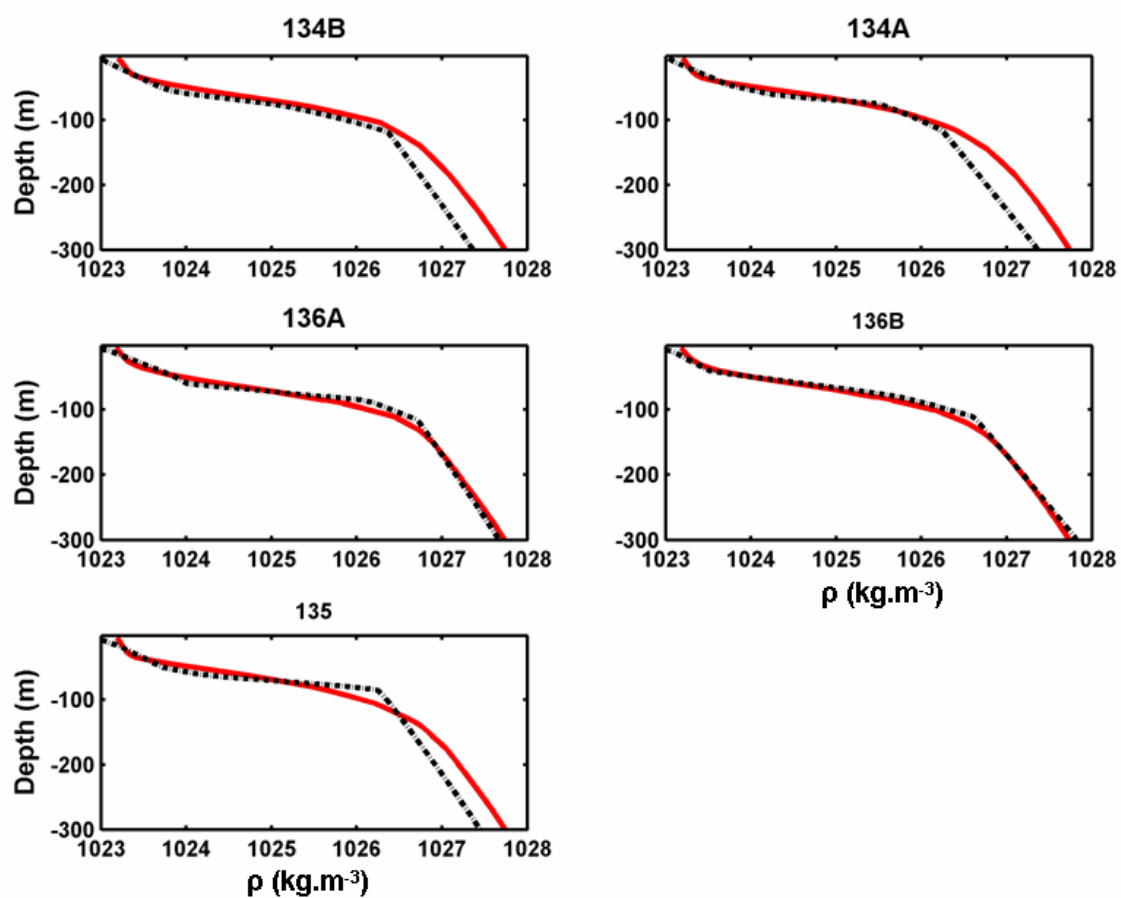


Figura 23. Perfis verticais de densidade nas posições REVIZEE-NEII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em vermelho contínuo apresentam-se os resultados numéricos de fevereiro (EXP6 ROMS).

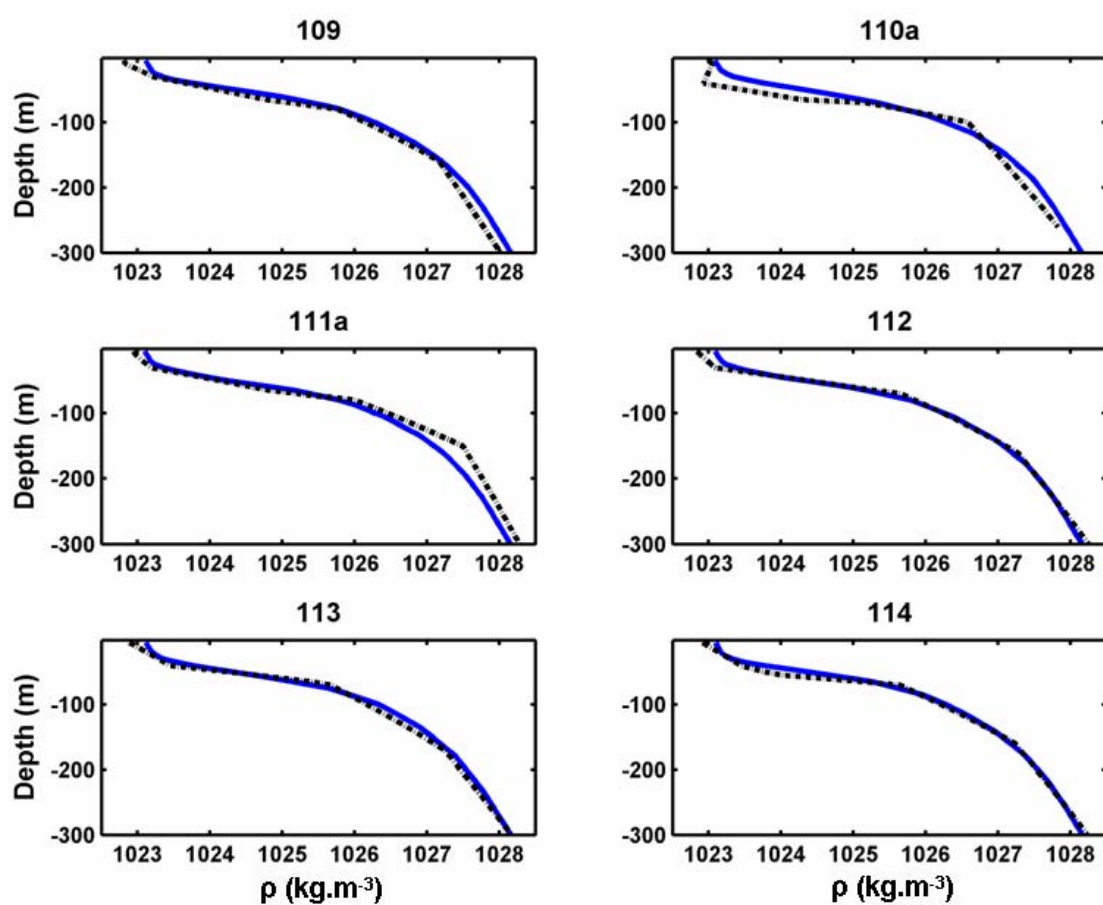


Figura 24. Perfis verticais de densidade nas posições REVIZEE-NEIII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em azul contínuo apresentam-se os resultados numéricos de junho (EXP6 ROMS).

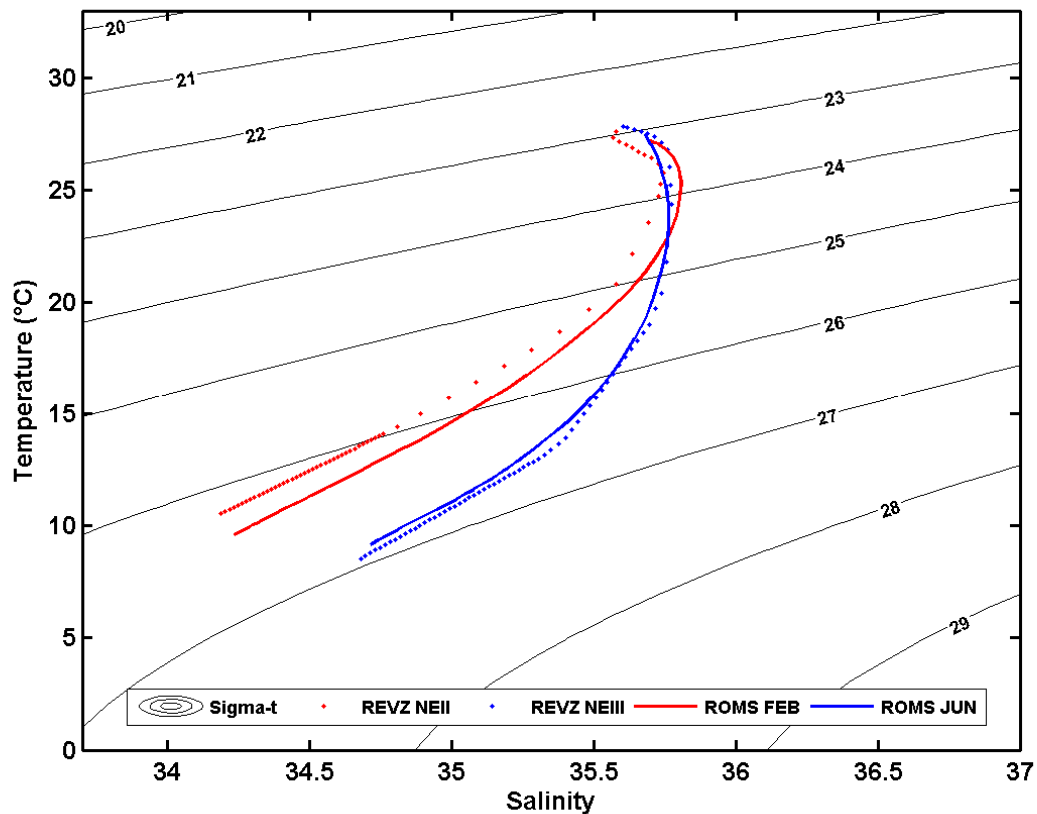


Figura 25. Diagrama T-S. Valores observados e numéricos representam médias das estações REVIZEE.

4.2. Dinâmica de correntes e o Arquipélago de São Pedro e São Paulo

As principais correntes atuando no ASPSP são o ramo norte da SEC (nSEC), à superfície, e a EUC em subsuperfície. Essas correntes possuem fluxos de mesma direção (zonal) e sentidos contrários, sendo o fluxo da nSEC para oeste e a EUC de sentido leste (Figura 26).

A estrutura vertical de correntes superficiais apresentada na Figura 26, quando comparada com a estrutura resultante das medições de Stramma & Schott (1999) (Figura 27) indica que o padrão simulado reproduz bem as correntes geostóficas equatoriais, tanto em posição quanto em intensidade. Portanto o padrão apresentado numericamente condiz com a estrutura observada em aproximadamente 30°W por esses autores no equador.

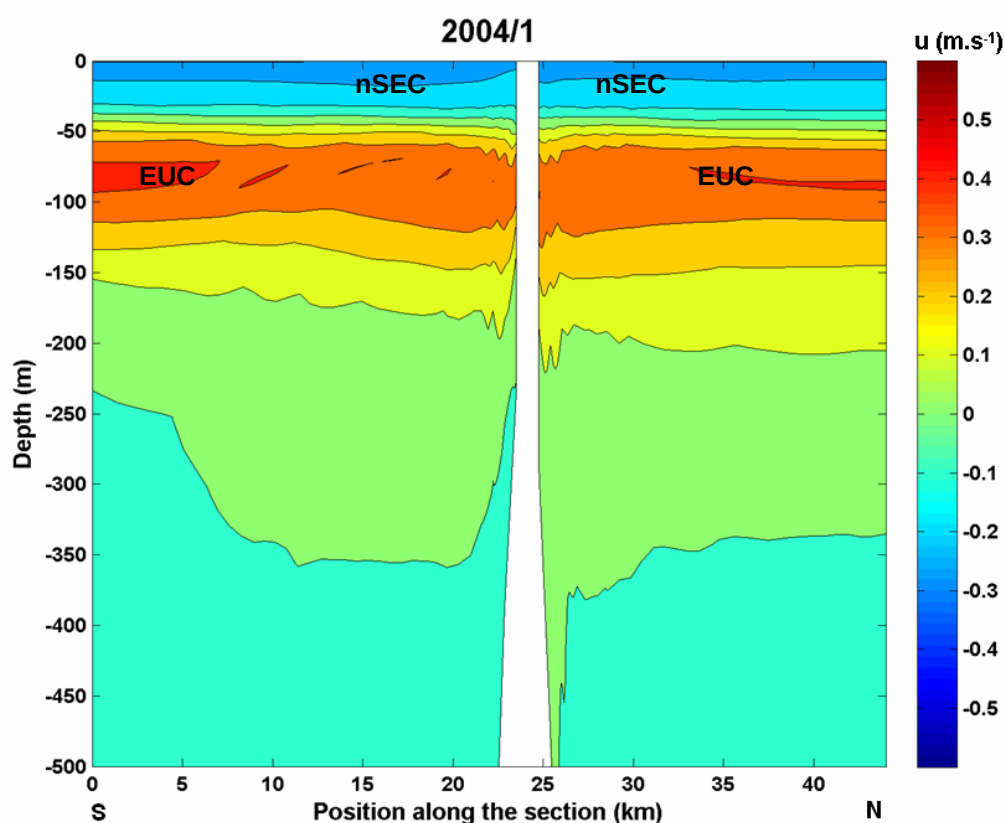


Figura 26. Transecto (T4) sobre o ASPSP (2004/1) até os 500m de profundidade, indicando as principais correntes zonais que atuam junto ao banco submarino (EXP5, ROMS).

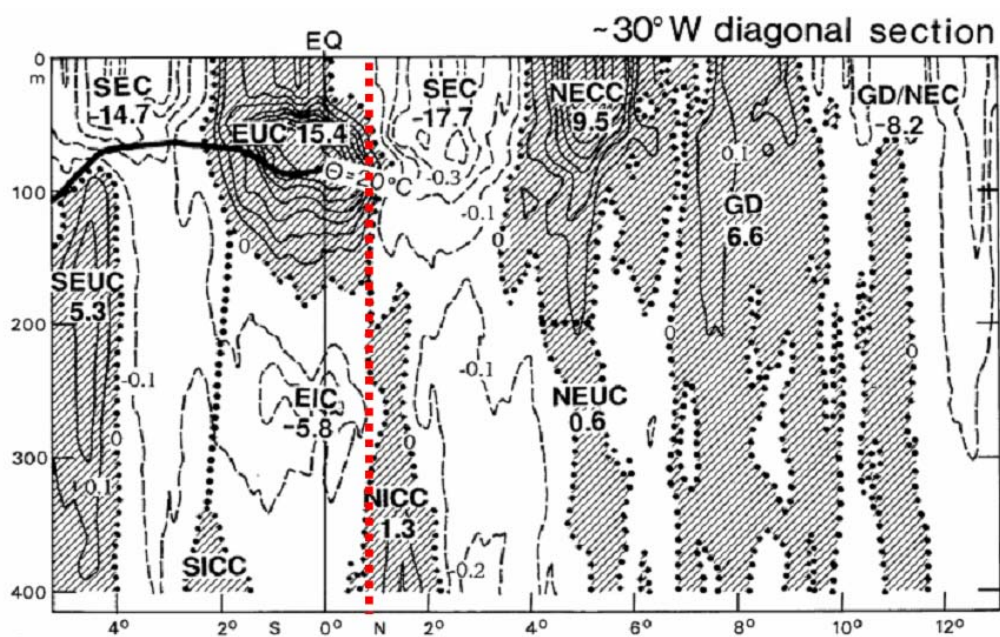


Figura 27. Estrutura vertical medida das correntes zonais equatoriais (perfil em $\sim 30^\circ\text{W}$). Extraído de Stramma & Schott (1999). A linha em vermelho indica a posição do ASPSP.

De modo geral os meses simulados de verão austral apresentaram uma nSEC com menores intensidades e a EUC mais intensa, contrapondo-se ao padrão de inverno austral, onde se verificou a nSEC mais intensa e uma EUC mais fraca.

Analisando a sazonalidade desses fluxos (Figura 28) nota-se que a intensificação da EUC coincide com o relaxamento da SEC à superfície. A velocidade máxima observada para a SEC à superfície foi de $-0,59 \text{ m.s}^{-1}$ em junho. Já a EUC atingiu a velocidade máxima de $0,71 \text{ m.s}^{-1}$ em março na profundidade de 80m. De acordo com Weisberg (1985) as águas equatoriais superficiais respondem principalmente ao comportamento dos ventos alísios, e sua variação sazonal fica condicionada a posição da ITCZ. Nos meses próximos de março, quando a ITCZ se encontra em sua posição mais ao sul os ventos equatoriais são mais fracos, enquanto que durante os meses próximos a agosto o posicionamento mais ao norte da ITCZ favorece a intensificação dos ventos superficiais.

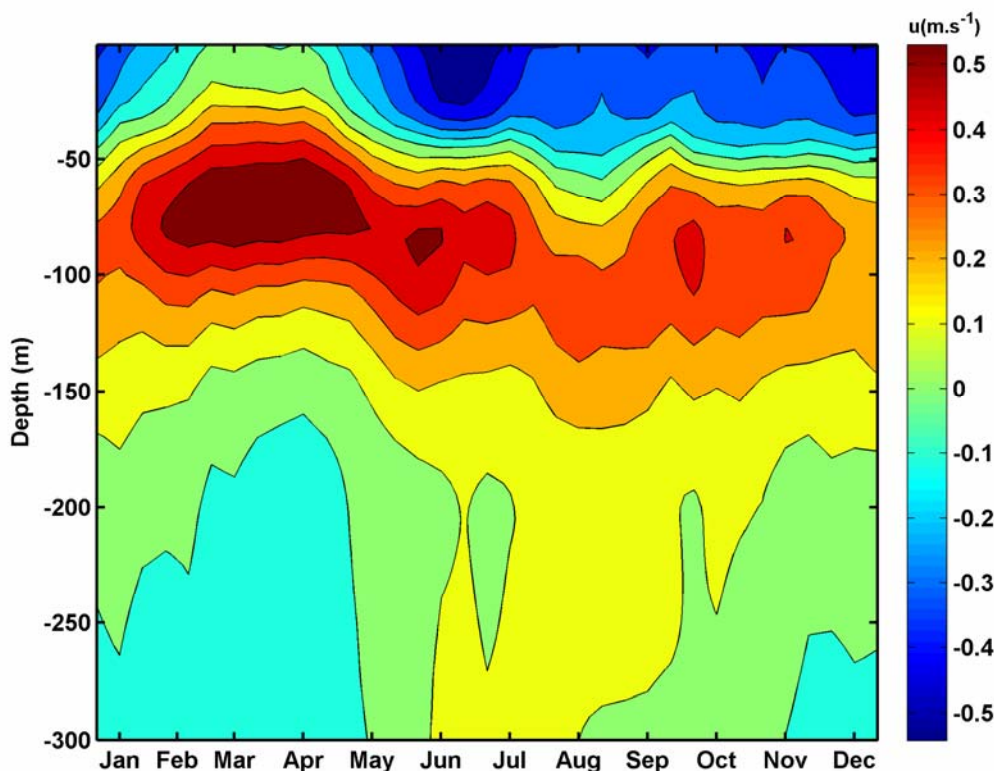


Figura 28. Diagrama de Hovmöller (EXP6) da componente-u da velocidade no transecto 3 (T3) até os 300m de profundidade.

Analisando a estrutura vertical média do campo zonal de velocidades (Figura 29) pode-se verificar a existência de uma zona de baixa velocidade resultante da interação da corrente superficial com o ASPSP ocorrendo a oeste do mesmo. Nessa

faixa, junto ao arquipélago, as velocidades zonais são reduzidas de intensidades, passando de cerca de $0,35 \text{ m.s}^{-1}$ para valores entre $0,03$ e $0,08 \text{ m.s}^{-1}$. As velocidades da EUC em 80m de profundidade estiveram próximas a $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ e uma zona de baixa velocidade foi verificada a leste do ASPSP decorrente do atrito com o monte submarino, apontando velocidades da ordem de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ nas proximidades do arquipélago e aumentando na direção leste, de maneira a recompor a estrutura anterior à influência do monte. A seqüência completa descritiva da atuação da EUC frente ao banco pode ser visualizada na Figura 30, onde a estrutura vertical das correntes zonais nos transectos meridionais T3, T4, T5 e T6 é apresentada para uma condição de inverno austral de 2004.

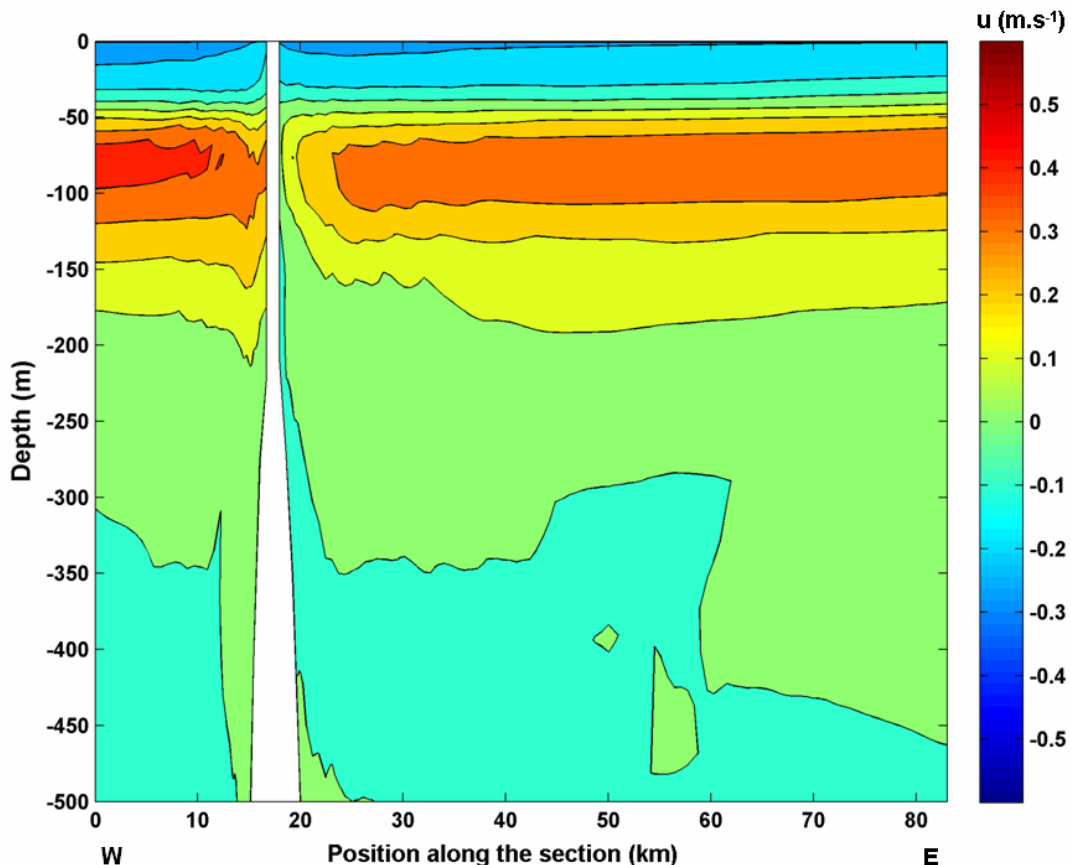


Figura 29. Estrutura vertical da componente u da velocidade no transecto zonal (T2) até os 500m de profundidade (EXP5, junho de 2004).

A partir da Figura 30 verifica-se que a EUC é forçada a se dividir quando encontra o ASPSP, criando dois braços, um ao norte e outro ao sul do arquipélago, gerando alguma instabilidade, sobretudo aos 80m de profundidade (Figura 31), onde

se espera que ocorram as velocidades mais intensas. Brandt et al. (2006) apresentaram resultados que mostram o núcleo da EUC posicionado à 85m de profundidade atingindo velocidades de $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ em um perfil posicionado a 26°W . As velocidades obtidas numericamente estiveram de acordo com os valores apontados por esses autores. Entretanto, deve-se ressaltar que quando foram utilizadas médias mensais para visualização dos resultados as intensidades de correntes obtidas numericamente ficam um pouco abaixo desses referenciais. Outro fator que deve ser lembrado para justificar os valores encontrados da EUC em torno de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ deve-se ao fato de que a posição do domínio simulado não abranger uma área meridional suficientemente grande para atingir o núcleo da corrente que perfila a região equatorial (Figura 27).

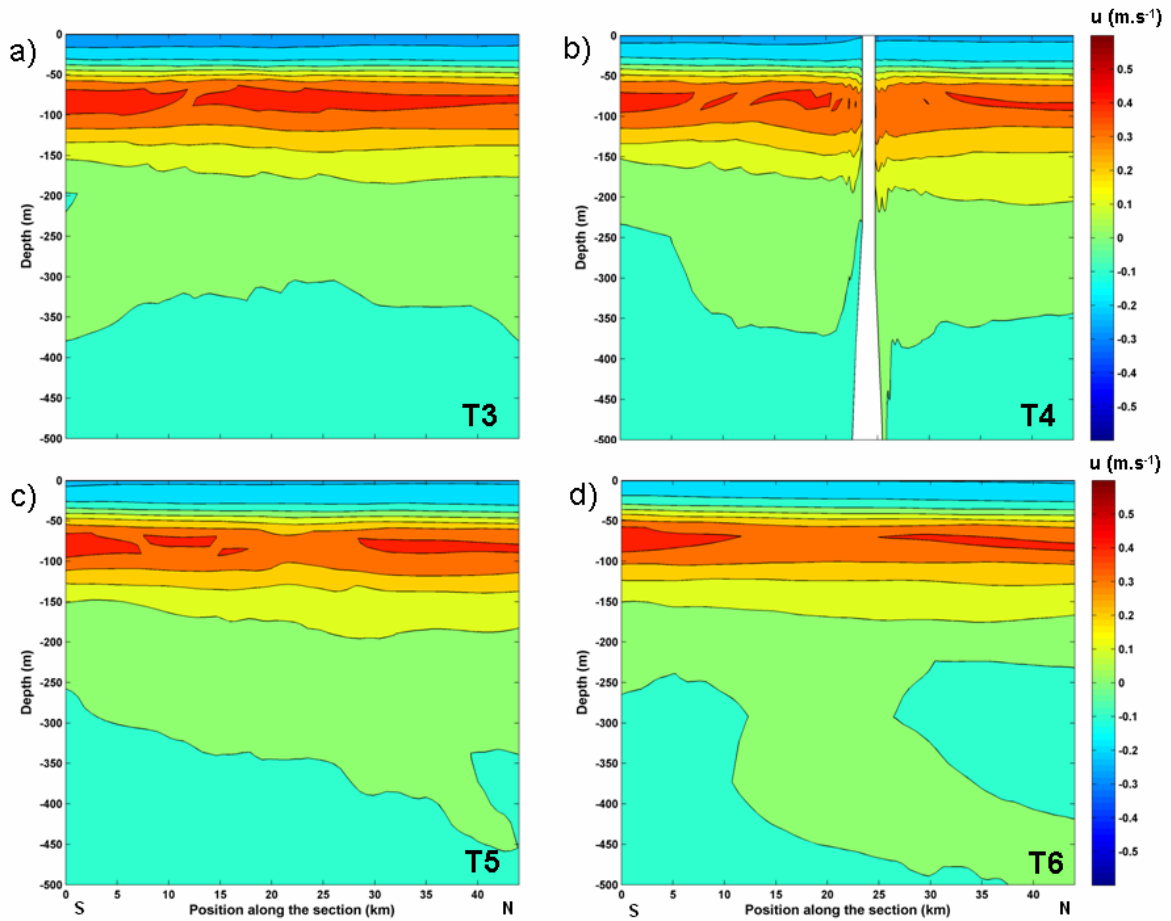


Figura 30. Campo zonal de velocidades apresentado na sequência dos transectos T3, T4, T5 e T6 (EXP5, ROMS).

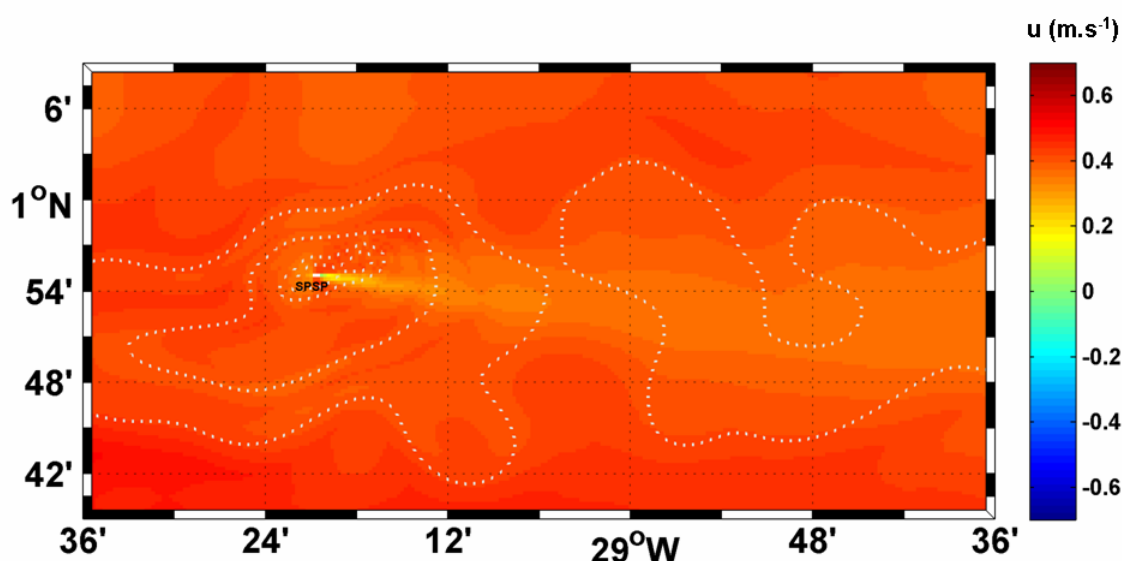


Figura 31. Campo de velocidades zonais à 80m de profundidade (EXP5, junho de 2004). As linhas pontilhadas em branco representam as isóbatas (500m, 1000m, 2000m e 3000m).

O campo de correntes superficial reproduzido numericamente tem sentido noroeste, resultante da ação dos ventos Alísios de sudeste que atuam na região. Analisando o campo zonal à superfície (Figura 32), foram verificadas velocidades em torno de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ e a existência de uma pequena zona na porção oeste ao ASPSP (jusante à corrente superficial) onde ocorre redução das velocidades. Essa região de velocidades baixas é resultante da interação corrente-topografia, portanto do atrito promovido pelas ilhas. Analisando o campo de velocidades meridional à superfície, a componente v da SEC apresentou valores máximos de $0,22 \text{ m.s}^{-1}$ (Figuras 33 e 34). Também foi verificado uma zona de baixa velocidade a noroeste do ASPSP, nessa região as velocidades partiram de $0,07 \text{ m.s}^{-1}$ junto ao arquipélago até a recuperação dos valores de $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ a jusante.

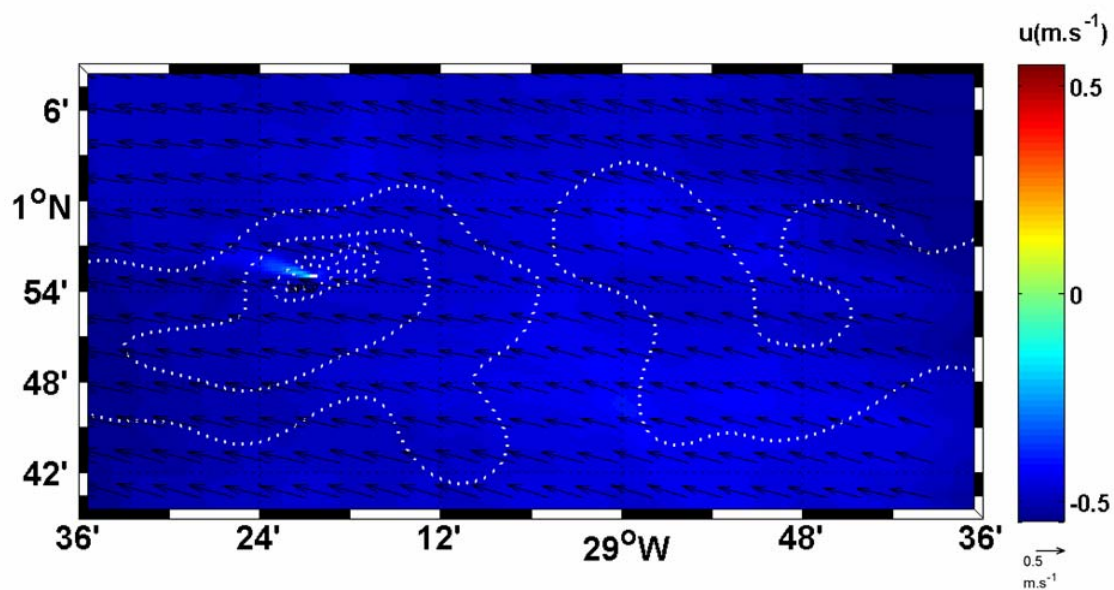


Figura 32. Campo de velocidade zonal à superfície (EXP5, junho de 2004, média mensal). As linhas pontilhadas em branco representam as isóbatas (500m, 1000m, 2000m e 3000m). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal.

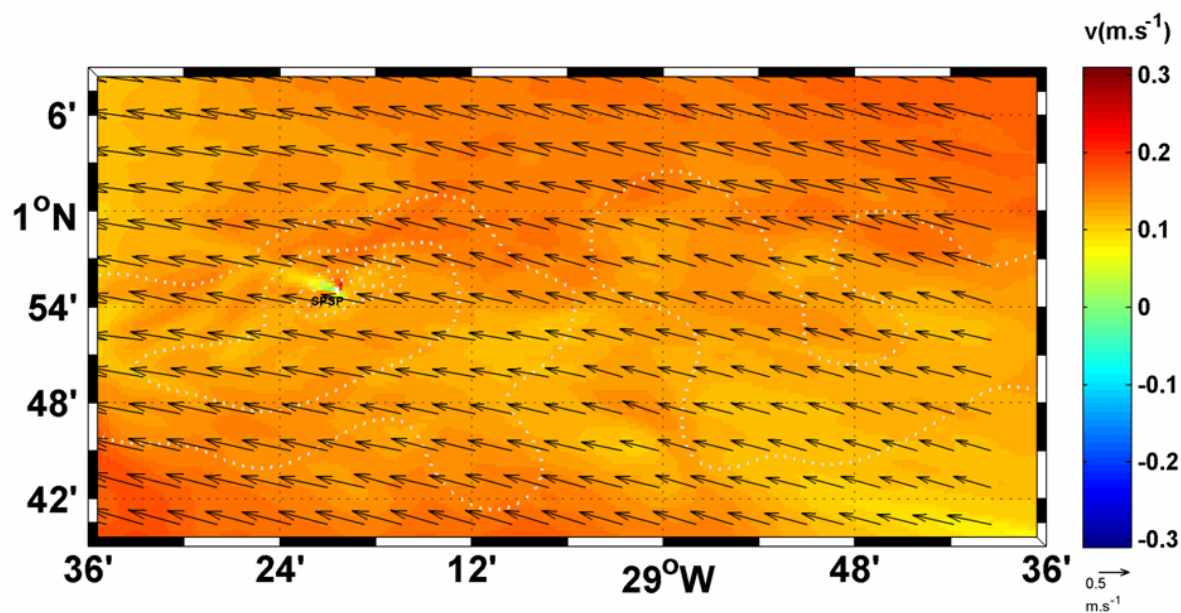


Figura 33. Campo de velocidade meridional à superfície (EXP5, junho de 2004, média mensal). As linhas pontilhadas em branco representam as isóbatas (500m, 1000m, 2000m e 3000m). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal.

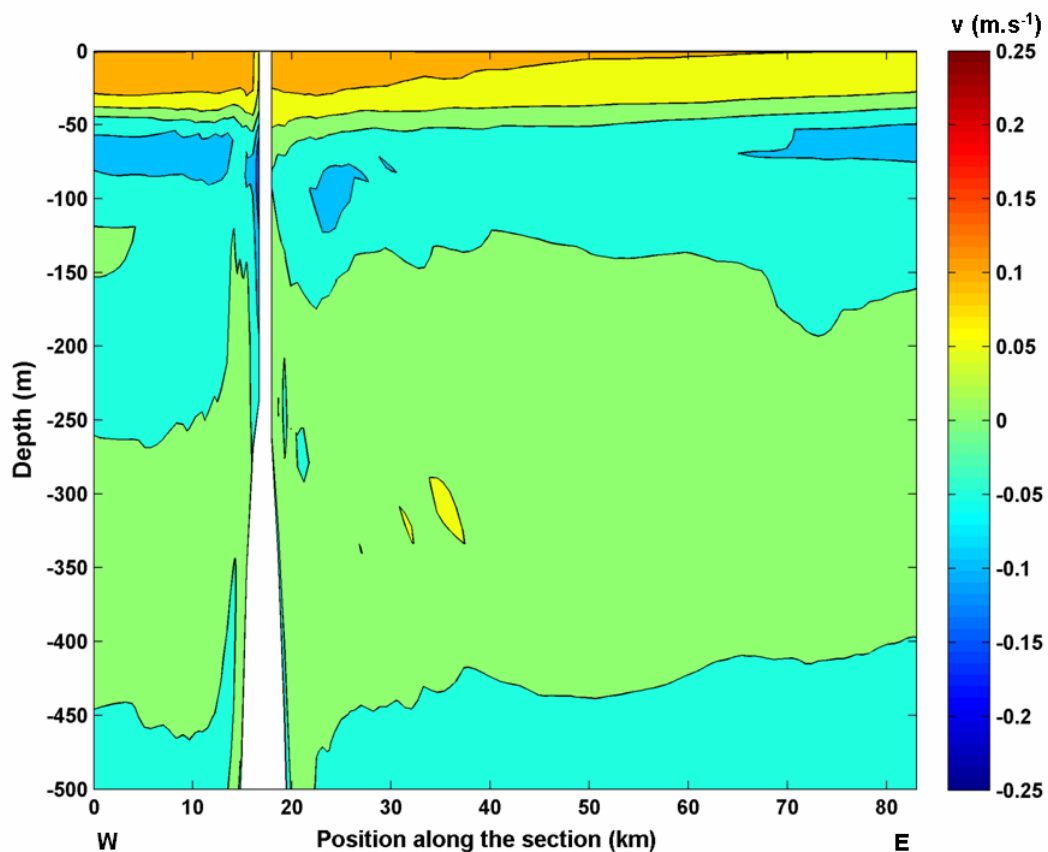


Figura 34. Estrutura vertical da componente v da velocidade no transecto zonal (T2) até os 500m de profundidade (EXP5, junho de 2004).

A componente meridional da velocidade, de maneira geral, tem seu campo de atuação da superfície até ~ 40 m de profundidade desviando o fluxo oeste da SEC para o norte, provavelmente em resposta as tensões superficiais dos ventos alísios de sudeste que ultrapassam o equador e atuam dos níveis superficiais até a profundidade de Ekman. A partir de ~ 50 m de profundidade a componente v da velocidade apresenta um fluxo inverso ao das camadas superiores, tendo sentido sul com intensidades menos expressivas (Figura 34).

Tanto em superfície quanto à 80m de profundidade ocorrem os fluxos da nSEC e EUC respectivamente. Nesses níveis, portanto, predominam os fluxos zonais (direção L - W) que contribuem para manter a estabilidade vertical no ASPSP. Analisando o transecto 7, em relação a componente vertical da velocidade (Figura 35), verifica-se que em toda extensão do perfil junto ao monte submarino ocorrem movimentos verticais tanto ascendentes quando de subsidência. Esses movimentos verticais estão associados a formação de vórtices resultante da interação correntes-topografia no ASPSP.

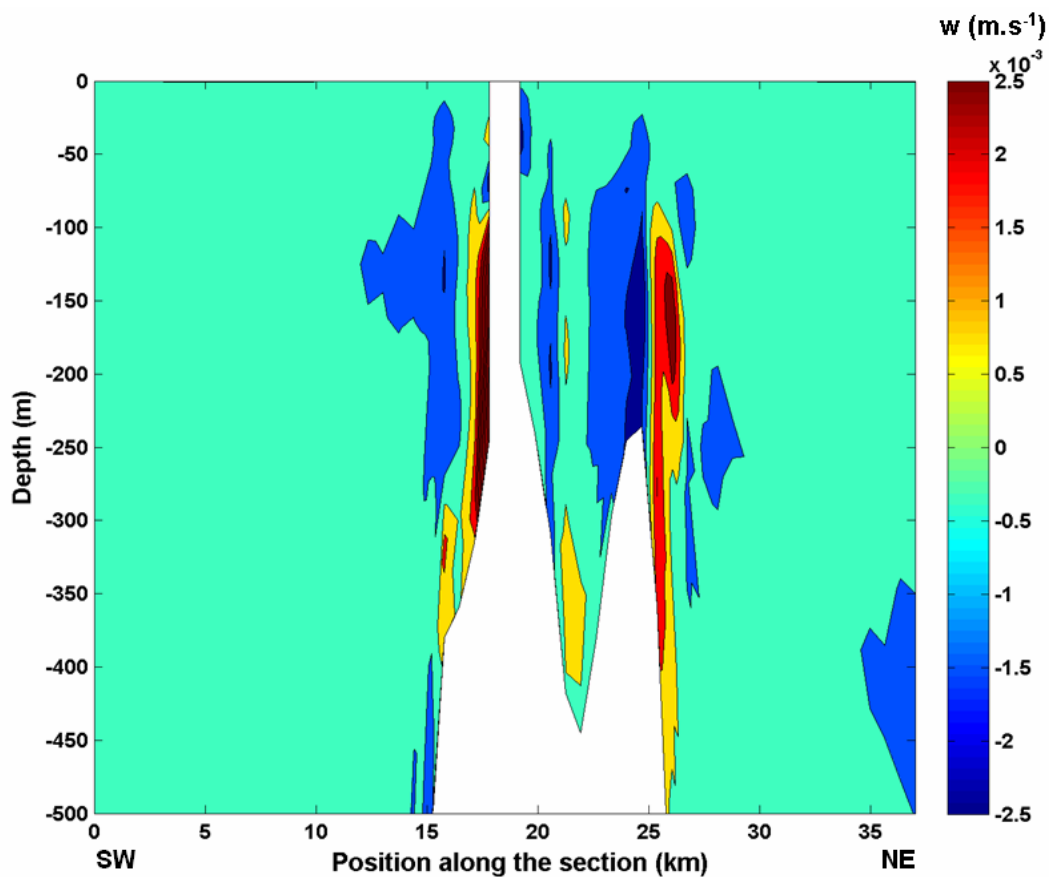


Figura 35. Estrutura vertical da componente w da velocidade no transecto transversal (T7) até os 500m de profundidade (EXP5, junho de 2004).

Na profundidade de 50m, uma região de transição entre os fluxos da SEC à superfície e da EUC em subsuperfície, nota-se a intensa formação de vórtices nas proximidades do arquipélago, resultantes da interação de fluxos contrários (Figura 36). Entretanto, esses pequenos vórtices não têm intensidade nem permanecem atuando tempo suficiente para ter capacidade para romper a estabilidade vertical do ASPSP.

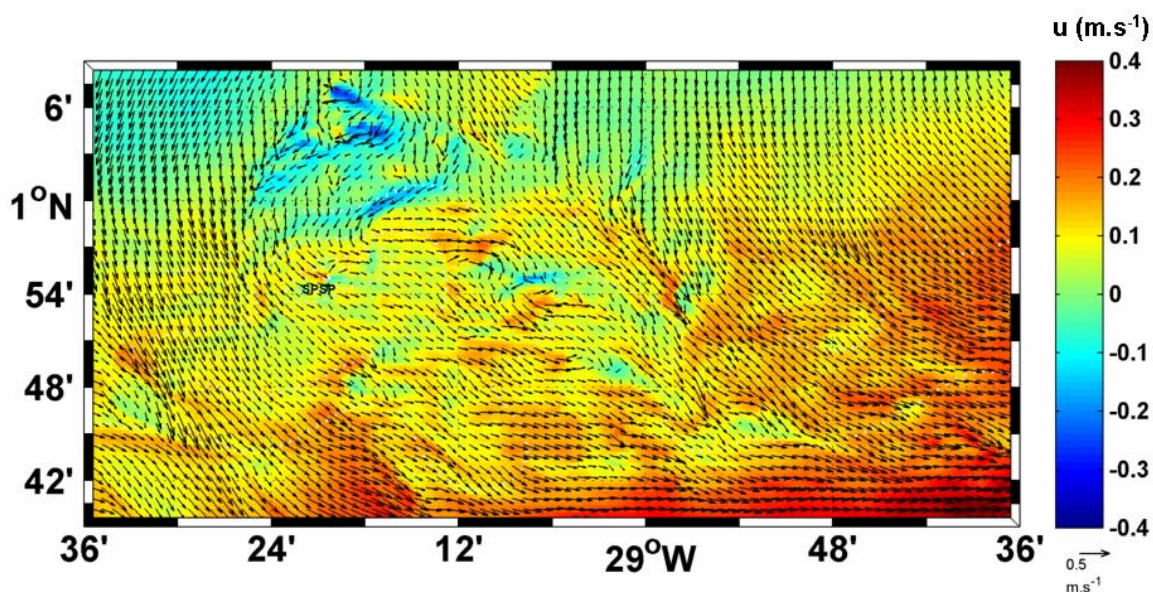


Figura 36. Campo de velocidade zonal à 50m de profundidade (EXP5, junho de 2004, dia 15). Os vetores são representativos da velocidade horizontal.

4.3. Nutrientes e plâncton no Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Os resultados do modelo ecológico NPZD acoplado ao modelo físico ROMS, permitiram observar a distribuição da concentração de Nitrato, com variação espaço-temporal, dentro de todo domínio estudado. Este nutriente considerado como principal fator limitante à produção primária marinha, influi no ciclo das demais variáveis biológicas do modelo NPZD (fitoplâncton, zooplâncton e detritos).

Analisando o perfil médio das posições REVIZEE em relação ao Nitrato, pode-se observar que a distribuição vertical média foi bem representativa (Figura 37).

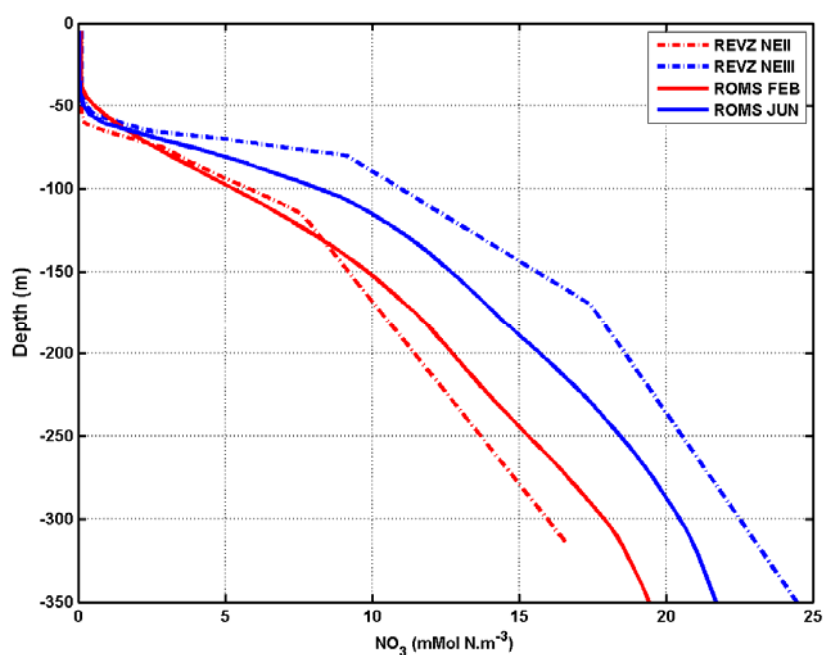


Figura 37. Perfil vertical de nitrato no ASPSP (média das estações Revizee).

Ao comparar os resultados obtidos numericamente e as medições do Programa REVIZEE, verifica-se que uma maior aderência foi obtida na estação 136b durante o mês de fevereiro (Figura 38). Em junho as concentrações numéricas na coluna d'água abaixo da nitracлина não foram tão discordantes como em fevereiro. Nas estações 109 e 110a, por exemplo, os erros estiveram em aproximadamente 2 mmol N.m^{-3} . As maiores discrepâncias foram verificadas na estação 111a, que apresentou valores discordantes de cerca de 10 mmol N.m^{-3} . Entretanto, deve-se ressaltar que, de forma geral a posição da nitracлина superficial foi bem reproduzida para a maioria das estações (~ 50m), com exceção da estação 135, onde a nitracлина medida esteve mais profunda (~100m).

Analisando as concentrações de Nitrato em julho (Figura 39), verifica-se que os resultados numéricos representaram melhor o padrão vertical de distribuição dessa variável do que em relação a fevereiro (Figura 38).

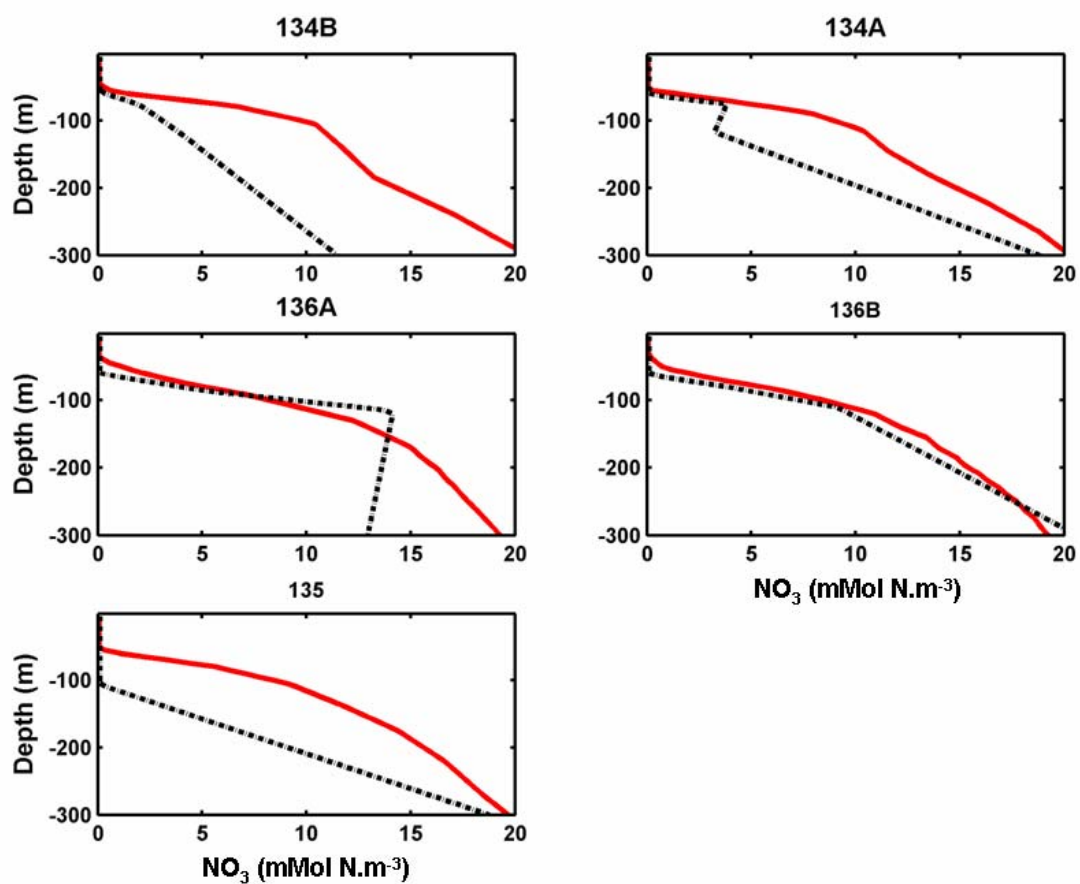


Figura 38. Perfis verticais de nitrato nas posições REVIZEE-NEII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em vermelho contínuo apresentam-se os resultados numéricos de fevereiro (EXP6 ROMS).

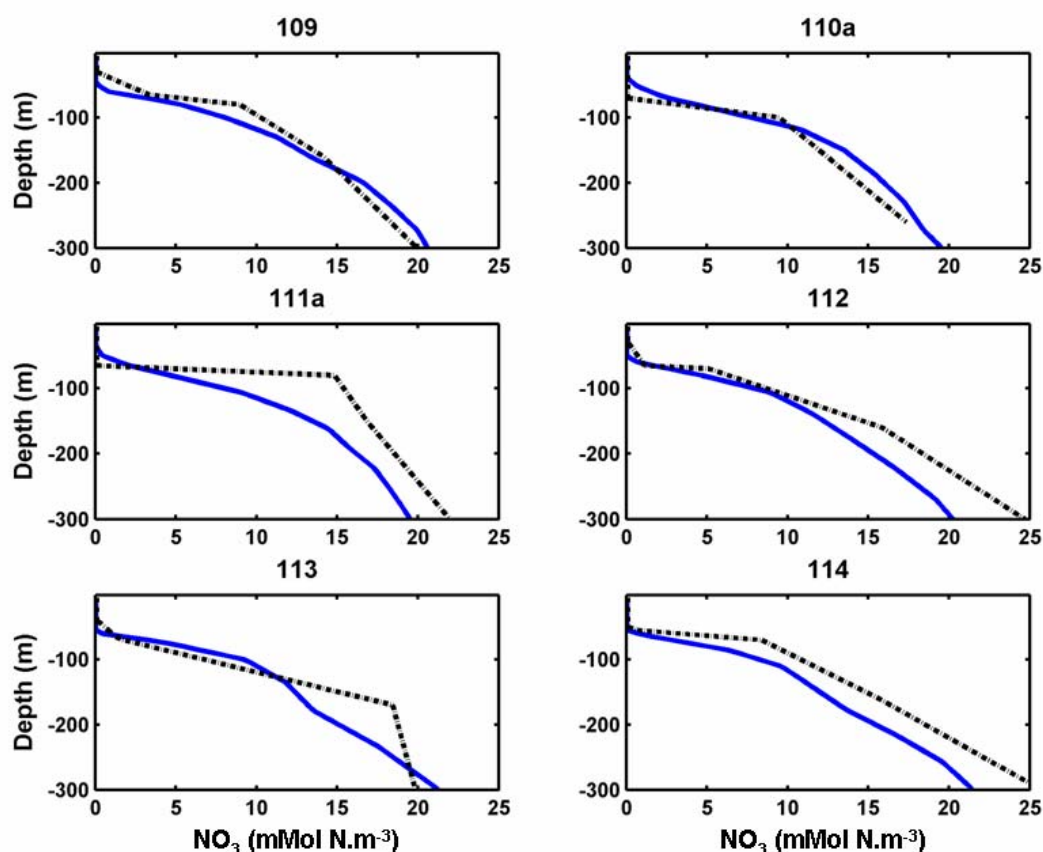


Figura 39. Perfis verticais de nitrato nas posições REVIZEE-NEIII. O perfil pontilhado representa os dados observados e em azul contínuo apresentam-se os resultados numéricos de junho (EXP6 ROMS).

Ao observar o transecto 1 (T1), verifica-se que as medições do Programa REVIZEE-NEII indicam um levantamento da nitracina nas proximidades do ASPSP, mantendo-se com mais intensidade no lado leste das ilhas. Este processo não foi verificado a partir dos resultados numéricos (Figura 40a). Em relação aos dados da campanha REVIZEE - NEIII, a posição da nitracina se mostra mais estável, junto ao arquipélago, com um aprofundamento a oeste na estação 113 (Figura 40b). Com uma menor variabilidade nesta época do ano, os resultados numéricos foram mais eficientes em reproduzir o padrão de distribuição vertical do Nitrato medido nos meses de outono-inverno. Analisando-se o erro médio da distribuição de Nitrato nas posições REVIZEE (Figura 40c), nota-se que durante a simulação do mês de fevereiro, abaixo dos 130m de profundidade, os resultados numéricos estiveram mais ricos em Nitrato do que as observações. Já em relação à simulação de junho, os resultados numéricos se mostraram mais pobres em nitrato em todo perfil abaixo da nitracina.

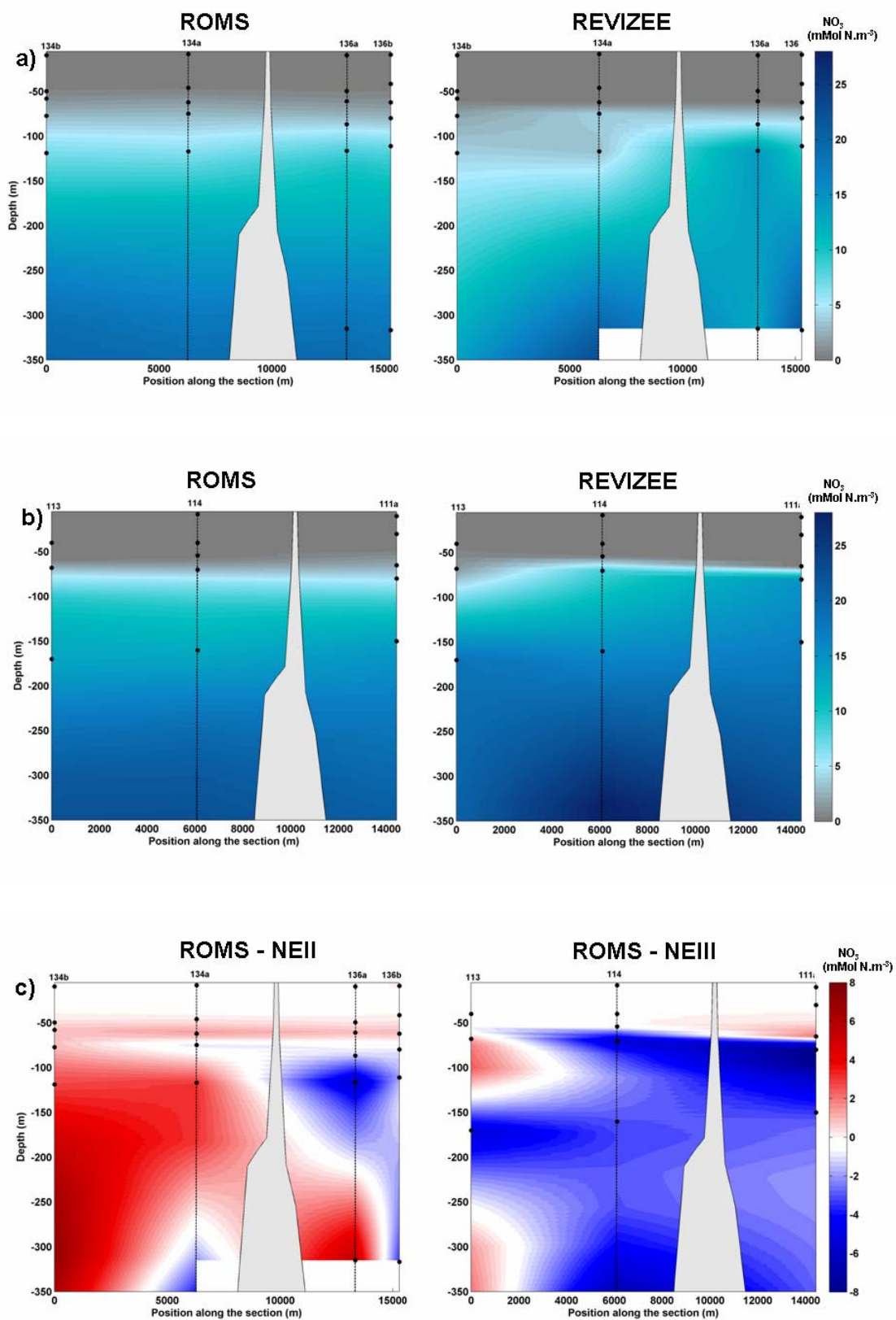


Figura 40. Estrutura vertical de concentração do Nitrato no transecto (T1), comparando a concentração entre ROMS e REVIZEE: (a) Comparativo para o mês de fevereiro; (b) Comparativo para o mês de junho; (c) Estrutura vertical do erro (ROMS-REVIZEE).

Dos resultados numéricos do modelo NPZD, os níveis de Clorofila-a são o primeiro indicativo de produção biológica para a região. Analisando a estrutura vertical de Clorofila-a junto ao ASPSP (Figura 41), verifica-se a reprodução do padrão esperado para regiões equatoriais, onde a produtividade máxima ocorre em subsuperfície, com rápido declínio abaixo dos 100m de profundidade, resultante da extinção da luz. As maiores produções, representadas aqui pela clorofila-a, estiveram nas proximidades do ASPSP, fenômeno que ganha mais importância relativa nos meses de verão e primavera equatorial, quando as águas estão mais oligotróficas, desfavorecendo a produtividade biológica.

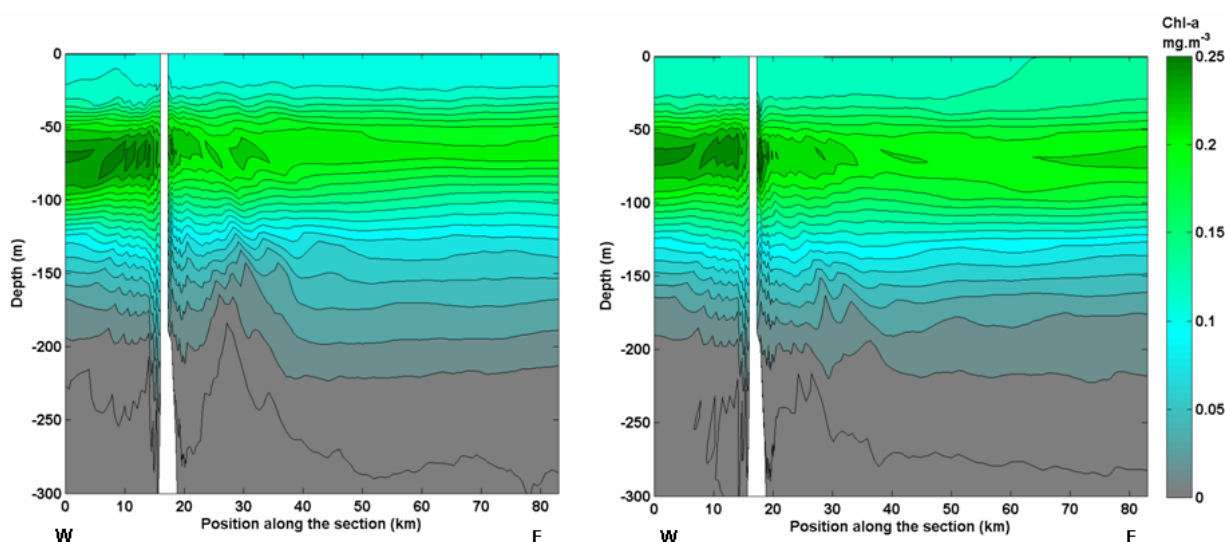


Figura 41. Estrutura vertical no transecto (T2), para a variável clorofila-a. À esquerda, mês de fevereiro e à direita mês de junho.

Analisando inicialmente as observações nas estações do programa JOPS-II, e comparando-as com os resultados numéricos (Figura 42), entende-se que, de maneira geral, a clorofila-a foi subestimada no ASPSP, tendo os resultados numéricos dentro da zona de máxima produtividade ficado em $\sim 0,2 \text{ mg Chl-a.m}^{-3}$ abaixo dos observados. Entretanto, deve ser ressaltado que as baixas produções fitoplânctônicas superficiais (da superfície até $\sim 45\text{m}$) foram bem reproduzidas em algumas estações (04, 11 e 19b). A estação 05 (posicionada próxima e a nordeste do ASPSP) sugere com seus valores altos logo à superfície a possibilidade de algum processo de mistura vertical nesse local, entretanto os valores não se equivalem de nenhum “bloom” de desenvolvimento biológico nem tampouco indicam ressurgência.

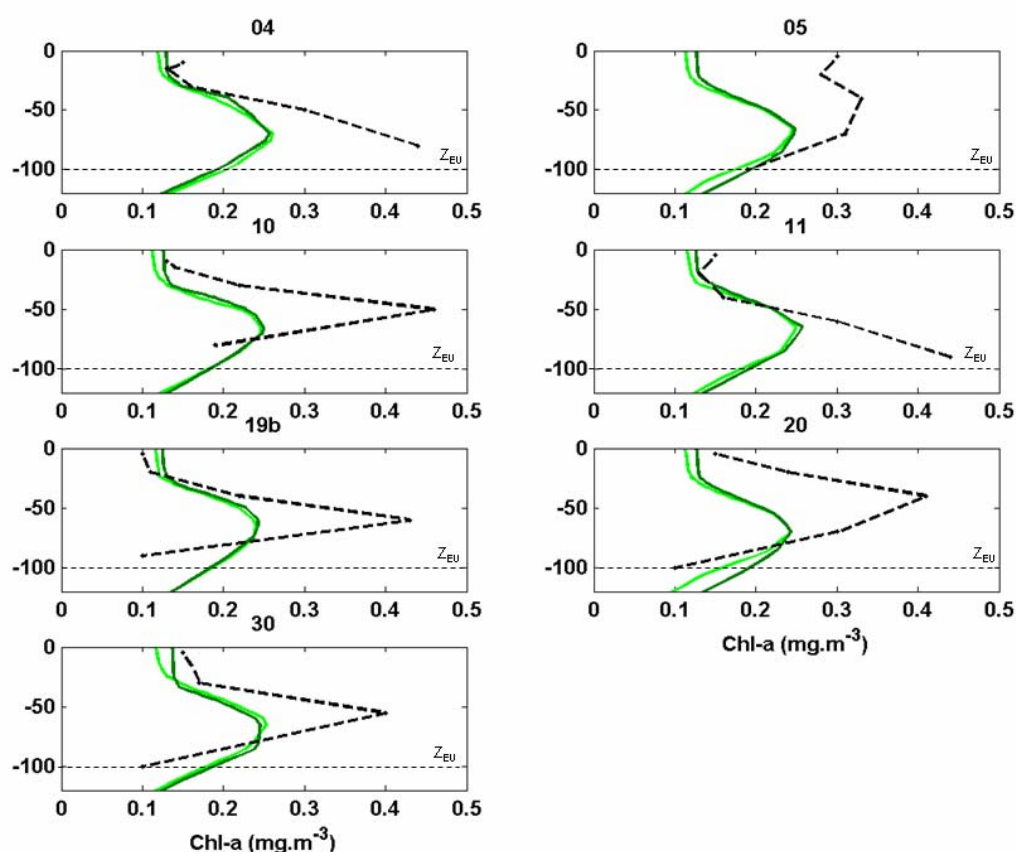


Figura 42. Perfis verticais de clorofila-a nas posições JOPS-II. O perfil pontilhado em preto representa os dados observados. Os perfis em verde contínuo representam os resultados numéricos (verde claro – ROMS FEV, verde escuro – ROMS JUN). O tracejado horizontal representa a posição da zona de extinção da Luz (Z_{EU} , 1% Luz)

A partir dos resultados de clorofila-a pode-se projetar o mesmo padrão observado para os resultados de fitoplâncton, considerando que a primeira variável é indicativa dessa última. Portanto ao observar os resultados ecológicos da simulação (Figuras 43 e 44) nota-se a camada de maior produção em subsuperfície dos 60m aos 80m de profundidade.

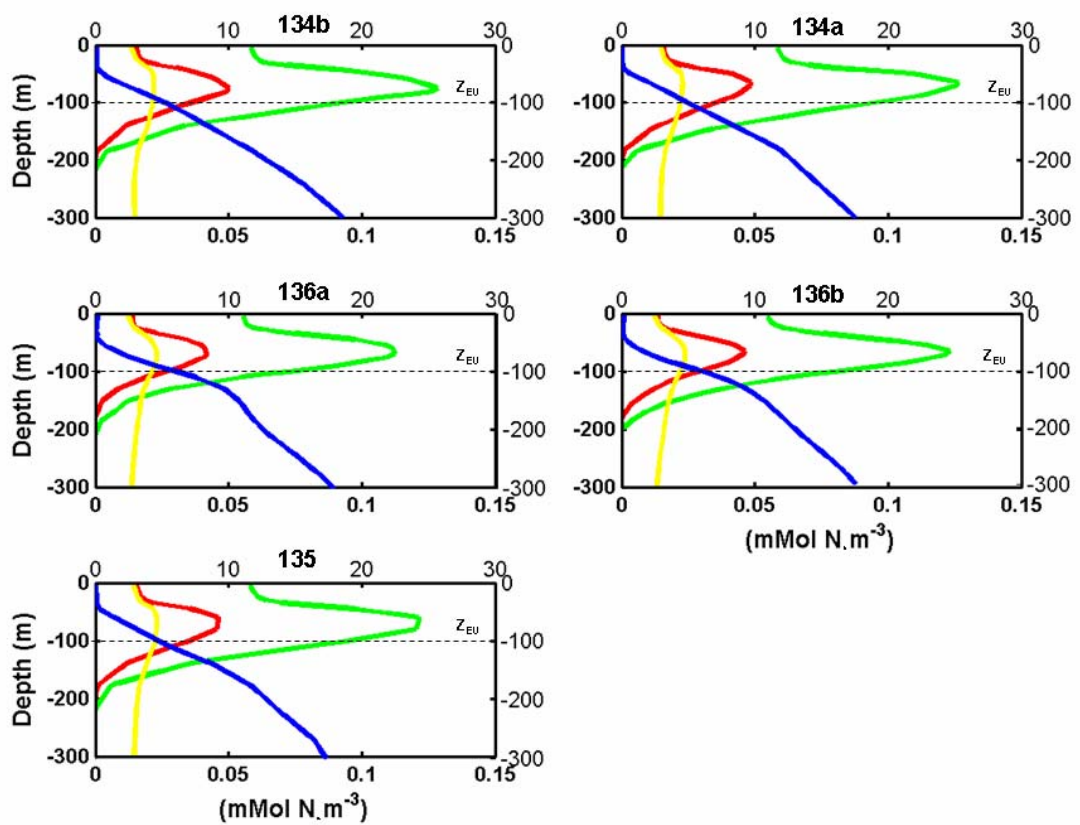


Figura 43. Perfis verticais das variáveis biológicas nas posições REVIZEE-NEII. Resultados numéricos (EXP6, ROMS, azul-Nitrato, verde-Fitoplâncton, vermelho-Zooplâncton e amarelo-Detrítos). O eixo do topo representa as concentrações de nitrato enquanto que o eixo abaixo as outras variáveis. O tracejado representa a posição da zona de extinção da Luz (Z_{EU} , 1% Luz).

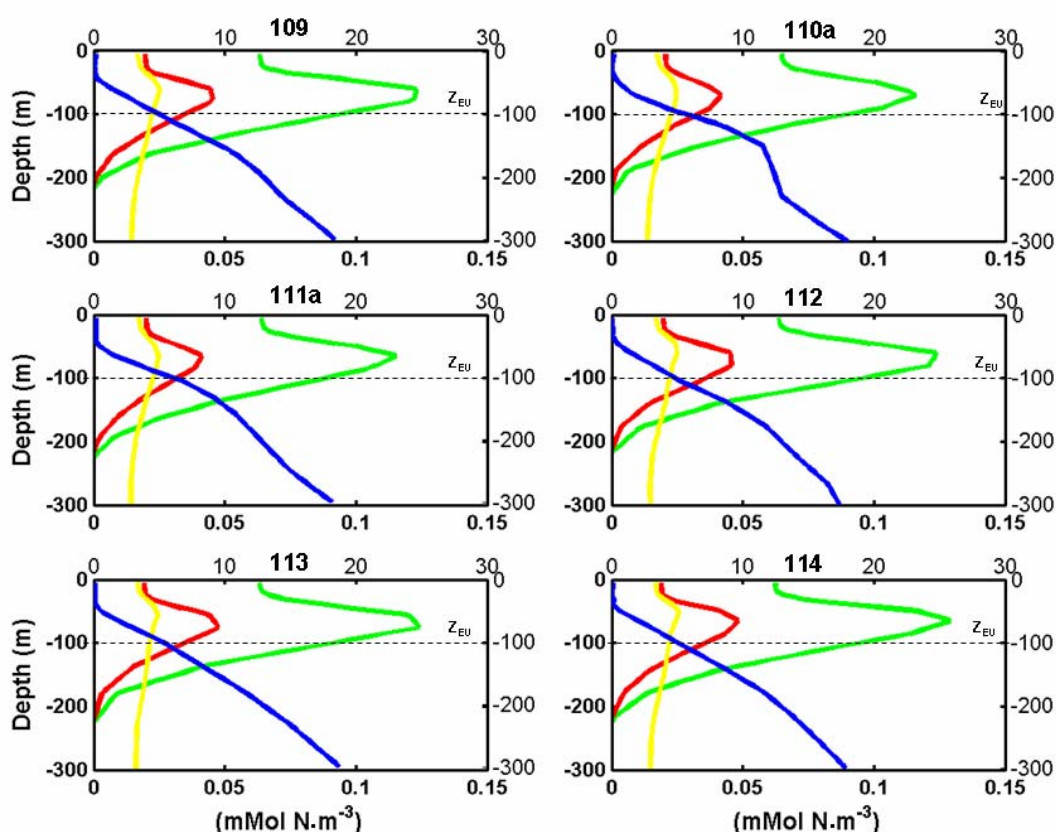


Figura 44. Perfis verticais das variáveis biológicas nas posições REVIZEE-NEIII. Resultados numéricos (EXP6, ROMS, azul-Nitrato, verde-Fitoplâncton, vermelho-Zooplâncton e amarelo-Detritos). O eixo do topo representa as concentrações de nitrato enquanto que o eixo abaixo as outras variáveis. O tracejado representa a posição da zona de extinção da Luz (Z_{EU} , 1% Luz).

Uma vez que as posições REVIZEE foram utilizadas para observar diversas variáveis no entorno do ASPSP, as mesmas também foram utilizadas para mostrar os resultados ecológicos ainda que não existam dados para comparações. Ao observar as estações não foi verificada nenhuma variação significativa que denote algum processo oceanográfico de importância biológica. De maneira geral o fitoplâncton apresentou o seu máximo de produtividade em subsuperfície ($0,123 \text{ mmol N.m}^{-3}$) acompanhado pelo zooplâncton com sua concentração máxima de ($0,045 \text{ mmol N.m}^{-3}$), apresentando o fenômeno de sucessão ecológica.

Comparando as produções de verão e inverno, tanto fitoplâncton quanto zooplâncton se mostraram maiores no inverno, contudo os valores são insignificamente maiores, sendo da ordem de $\sim 0,003 \text{ mmol N.m}^{-3}$. Os resultados do fitoplâncton indicam que abaixo dos 80m de profundidade ocorre a insuficiência de luz para a fotossíntese, resultando na constante depleção de fitoplâncton e

consequentemente zooplâncton abaixo desse nível. A produção de detritos pelo modelo obteve seu máximo valor ao redor dos 60m de profundidade, camada onde ocorreu o máximo de produção planctônica, seguida de ligeira queda para se manter praticamente constante em $0,015 \text{ mmol N.m}^{-3}$ nos níveis mais profundos.

4.4. Potencial de enriquecimento via mecanismos físicos

Conforme já apresentado, Genin (2004) descreve como principais processos de agregação de organismos em topografias abruptas oceânicas, duas situações. Na primeira, o incremento na densidade de organismos pode ser provocado por um aumento no crescimento local dos mesmos. Na segunda, as altas abundâncias são verificadas sem qualquer ligação com aumento da produtividade local. Os primeiros processos geralmente são sustentados por ressurgências locais, enquanto os últimos acontecem quando há um aumento na concentração de presas, sendo chamado de agregação troficamente subsidiada. Mullineaux & Mills (1997) investigaram processos físicos que afetam o assentamento larval em montes submarinos, obtendo indicações de que quando há um grande aprisionamento de águas pela interação correntes-topografia, ocorre um aumento da retenção de larvas de organismos junto ao monte, suplementando o recrutamento da fauna bentônica local.

Esta seção tem o objetivo de investigar processos de meso escala nas proximidades do ASPSP, tais como vórtices e deslocamentos verticais de água. A Figura 45 exemplifica o resultado da atuação de um vórtice que promove o levantamento de isolinhas de nitrato. Esse fenômeno foi verificado tanto em fevereiro quanto em julho, dos 100m a cerca de 300m de profundidade sempre à jusante da atuação da EUC sobre o arquipélago.

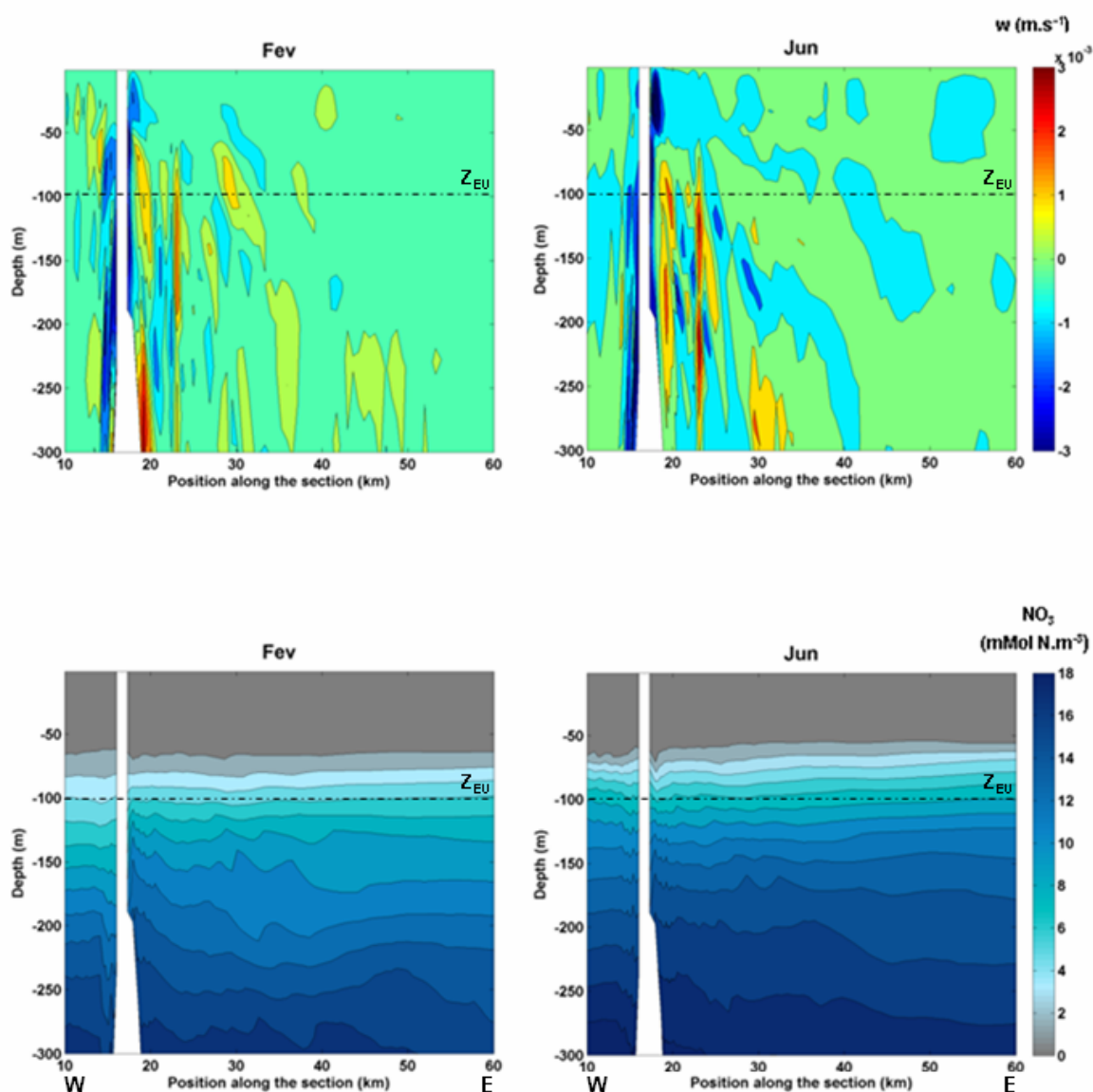


Figura 45. Acima, seção vertical da componente w da velocidade, abaixo seção vertical de nitrato (T2, média mensal, EXP6). O tracejado representa a posição da zona de extinção da Luz (Z_{EU} , 1% Luz).

De acordo com os resultados da Figura 45, nos primeiros metros desde a superfície até ~50m, o fluido tem estabilidade suficiente para praticamente não apresentar movimentação vertical, com exceção feita ao lado leste junto ao ASPSP onde são constantemente verificados movimentos subsidêntes ($w = -1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ fevereiro e $w = -2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ junho).

Em aproximadamente 50m de profundidade, região de transição entre os fluxos contrários da SEC e EUC, foram verificados giros provocados por esses contra-fluxos. Esses giros são inferiores aos verificados abaixo dos 100m de

profundidade em uma ordem de grandeza. Tais instabilidades não foram capazes de promover o levantamento ou subsidência de isotermas.

Ao analisar a vorticidade relativa e a frequência de Brünt-Väisälä aos 100m de profundidade em fevereiro (Figura 46) verifica-se a existência de uma área de instabilidades à jusante do ataque da EUC ao ASPSP. Essa região instável a leste das ilhas existe pela ocorrência de vórtices que atuam em sentido horário e anti-horário deslocando parcelas de fluido ora pra baixo ora acima. Uma situação análoga ao que ocorre no ASPSP nessa profundidade parece ser as esteiras de vórtices de von Karman, onde se verifica o surgimento de vórtices resultantes da imersão de um obstáculo em um fluido em movimento.

Os reflexos das instabilidades provocadas pelos vórtices no lado leste do ASPSP atingem tanto a distribuição da temperatura quanto a distribuição de nitrato (Figura 47). Ao analisar essa situação, verifica-se a jusante do ataque da EUC ($u = 0,5 \text{ m.s}^{-1}$) ao ASPSP, a ocorrência de uma zona com levantamento da termoclina e nitraclina. Nessa região nota-se um decréscimo médio na temperatura de 1°C , podendo atingir $1,5^\circ\text{C}$ nas áreas mais a leste. Já os acréscimos de nitrato nessa região foram em média de $1,5 \text{ mmol N.m}^{-3}$ chegando a atingir 2 mmol N.m^{-3} na porção mais a leste. As maiores variações de temperatura e nitrato foram visualizadas nas porções mais ao leste da região afetada pela dinâmica local. Esse fato é mais facilmente compreendido, traçando uma análise comparativa com a frequência de Brünt-Väisälä (Figura 46), onde se verifica áreas de um gradiente de densidades mais intenso junto das ilhas, portanto, conferindo maior estabilidade ao fluido nessas regiões.

Os vórtices anti-ciclônicos verificados a leste do ASPSP (Figura 45) em fevereiro têm de 1 a 2,5 km de diâmetro, sendo esses os responsáveis pelas elevações de parcelas de fluido ($w = 1,5.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$) e conseqüentemente resultam no levantamento de isotermas e isolinhas de nitrato. Os vórtices ciclônicos se verificaram mais esparsos, de menores intensidades, e com $\sim 0,5 \text{ km}$ de diâmetro.

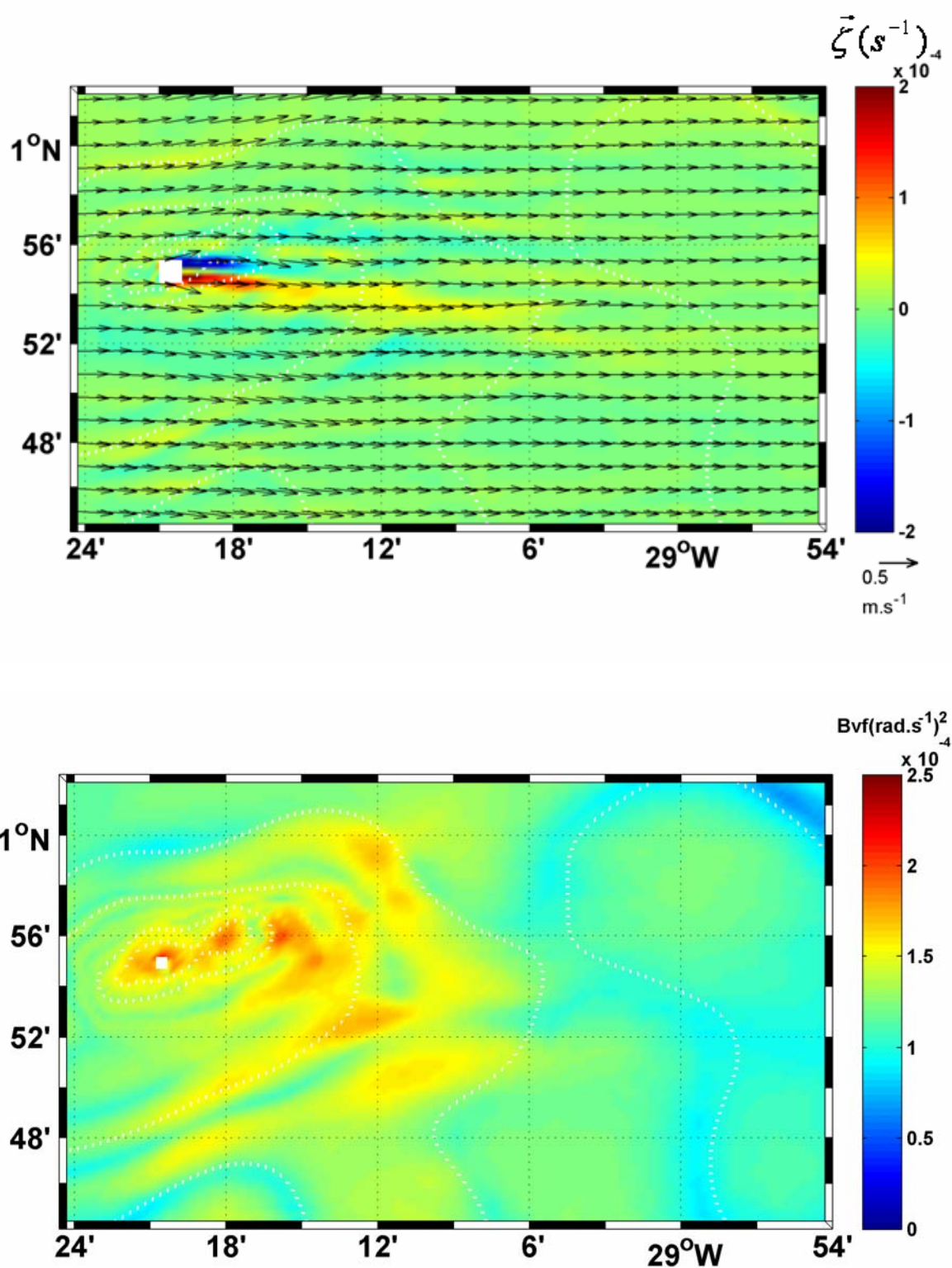


Figura 46. Campo horizontal da vorticidade relativa (acima). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal. Abaixo, a Frequência de Brünt-Väisälä. Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de fevereiro aos 100m de profundidade.

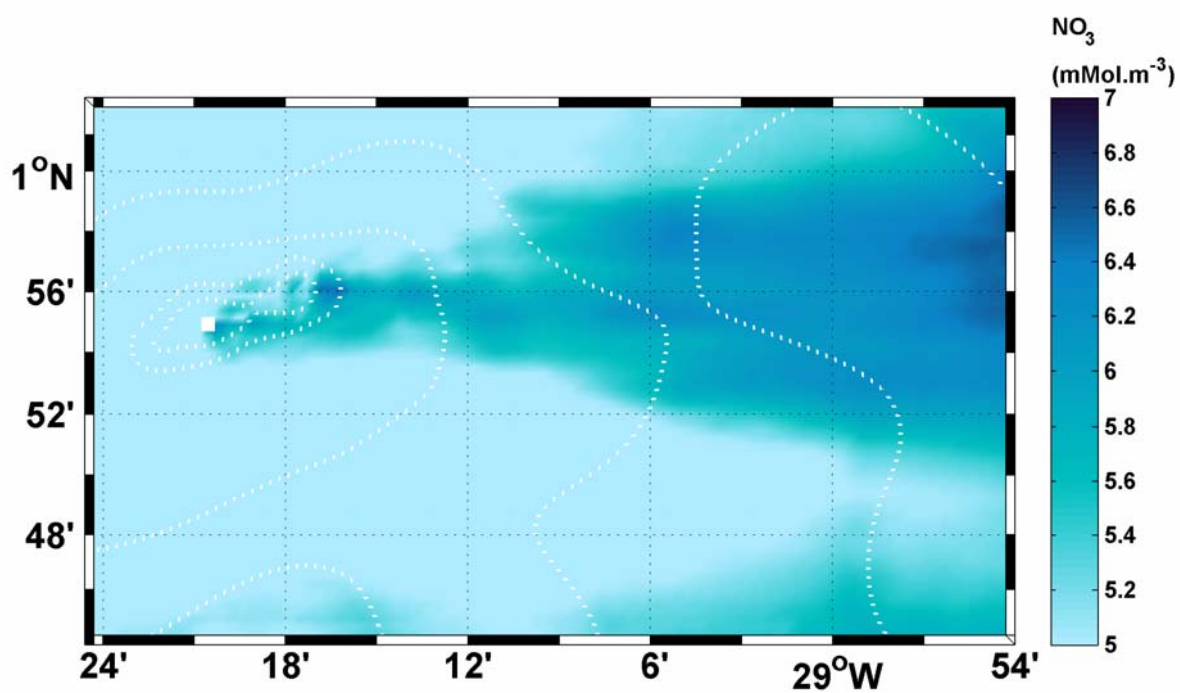
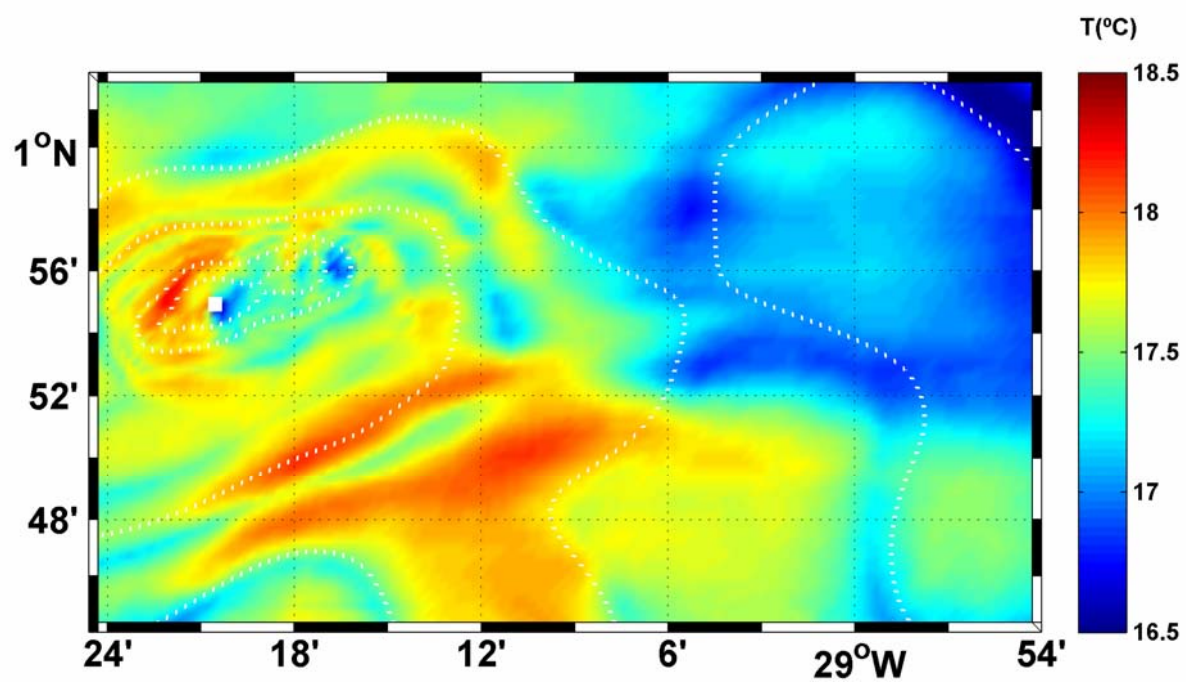


Figura 47. Campo de temperatura (acima) e distribuição de nitrato (abaixo). Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de fevereiro aos 100m de profundidade.

Na figura 48 é apresentada a vorticidade relativa e a frequência de Brünt-Väisälä aos 100m de profundidade para o mês de junho. Durante esse mês a posição da nitracina é verificada um pouco acima em relação a fevereiro (Figura 45). Ao analisar essa situação foi verificado um padrão semelhante ao discutido para o mês de fevereiro, com a presença de uma zona instável a leste das ilhas. A formação dessas perturbações é resultante do encontro do fluxo predominantemente leste da EUC ($u = 0,5 \text{ m.s}^{-1}$) com uma barreira física nessa profundidade, o ASPSP. A frequência de Brünt-Väisälä apontou um incremento do gradiente de densidades na porção sudeste do ASPSP. Entretanto, também foram verificadas regiões de gradiente de densidade menos intensos, portanto de menor estabilidade estática, nas porções norte e nordeste das ilhas. Essas regiões menos estáveis apresentam uma boa correlação quando comparadas às regiões onde foram verificadas diminuição da temperatura pelo levantamento de isothermas (Figura 49). As quedas de temperatura verificadas foram de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$ ao redor do ASPSP, especialmente nas regiões norte e nordeste. Nessas áreas também se verificou o incremento das concentrações de nitrato, com valores aumentados de 1 mmol N.m^{-3} a 2 mmol N.m^{-3} . Os vórtices responsáveis por esses processos apresentaram de 1 a $1,5 \text{ km}$ de diâmetro (Figura 45) causando deslocamentos verticais ascendentes ($w = 2,5.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$).

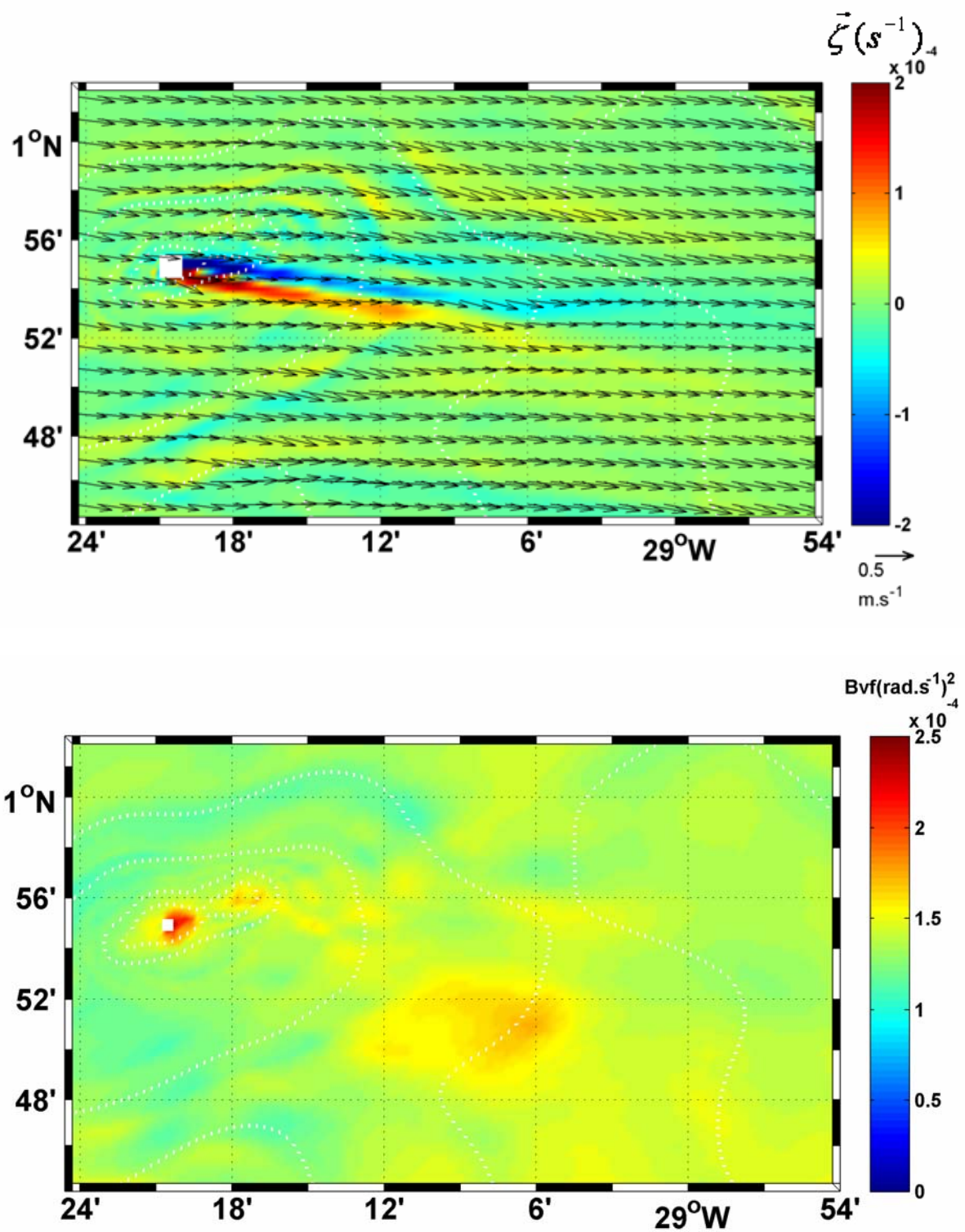


Figura 48. Campo horizontal da vorticidade relativa (acima). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal. Abaixo, a Frequência de Brünt-Väisälä. Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de junho aos 100m de profundidade.

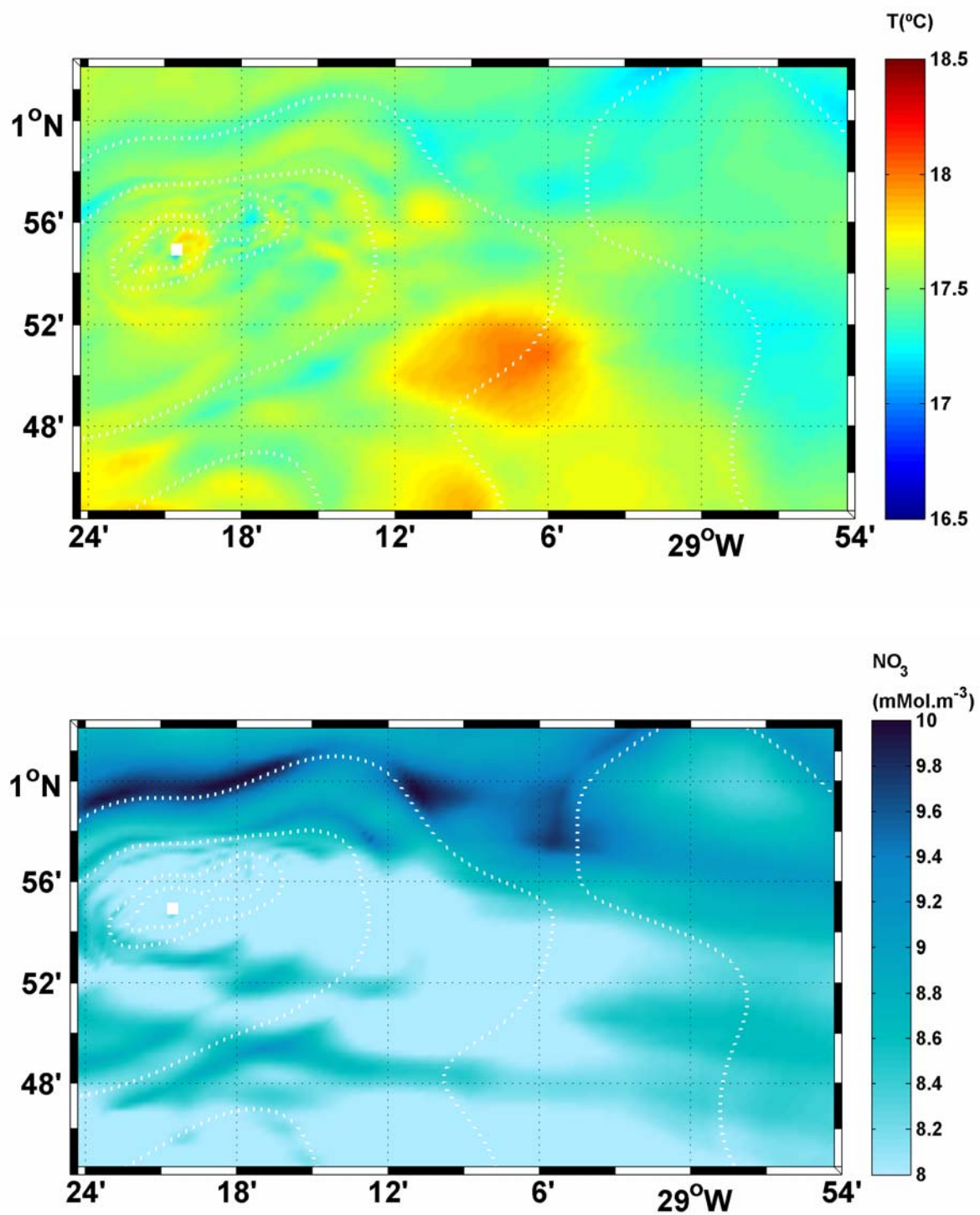


Figura 49. Campo de temperatura (acima) e distribuição de nitrato (abaixo). Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de junho aos 100m de profundidade.

Na figura 50 é apresentada a vorticidade relativa e a frequência de Brünt-Väisälä aos 150m de profundidade durante o mês de fevereiro. Nesse mês o campo horizontal de correntes que atinge o ASPSP é predominantemente de sentido leste ($u = 0,3 \text{ m.s}^{-1}$), portanto, com intensidades menores do que as verificadas em 100m de profundidade. Nessa profundidade, as instabilidades resultantes do encontro das correntes zonais com o ASPSP geram perturbações verificadas em toda porção leste, tanto ao norte como ao sul das ilhas.

Foram registradas temperaturas com decréscimo médio de 1°C em toda essa região leste do ASPSP, processo resultante do levantamento das isotermas em todo lado leste das ilhas (Figura 51). As concentrações de nitrato, registraram um incremento de até 2 mmol N.m^{-3} em relação as áreas adjacentes no lado leste do ASPSP. Esse incremento chega a ser de 3 mmol N.m^{-3} quando resulta da comparação entre o lado leste com a região à oeste do arquipélago. Os vórtices causadores dessas perturbações nas isotermas e isolinhas de nitrato possuem de 1 a 1,5 km de diâmetro (Figura 45) e resultam em deslocamentos ascendentes com velocidade vertical máxima de $w = 1,5.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$.

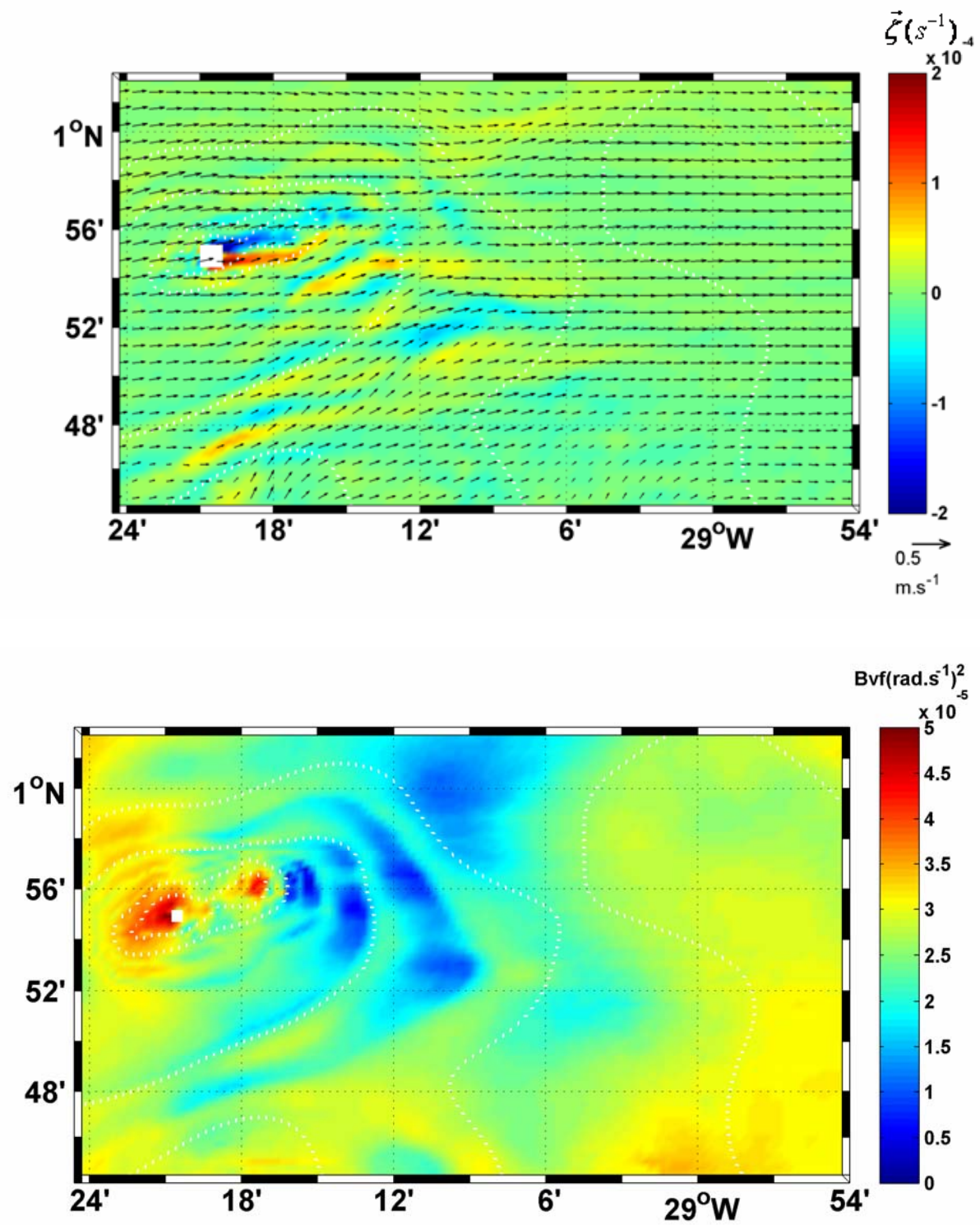


Figura 50. Campo horizontal da vorticidade relativa (acima). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal. Abaixo, a Frequência de Brünt-Väisälä. Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de fevereiro aos 150m de profundidade.

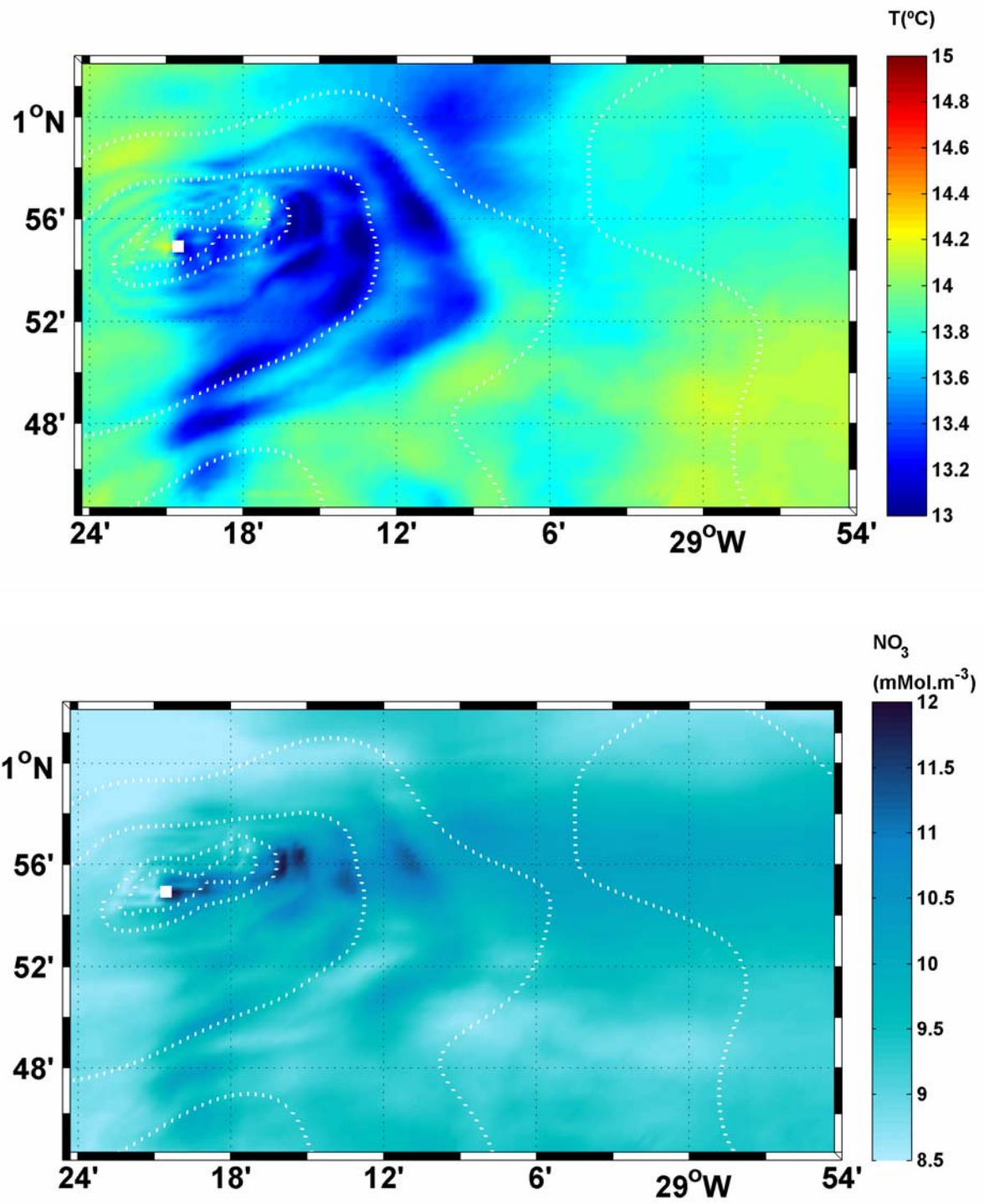


Figura 51. Campo de temperatura (acima) e distribuição de nitrato (abaixo). Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de fevereiro aos 150m de profundidade.

São apresentadas na Figura 52 a vorticidade relativa e a frequência de Brünt-Väisälä para a profundidade de 150m durante o mês de junho. O campo de correntes horizontal se mostrou predominantemente de sentido leste ($u = 0,27\text{m.s}^{-1}$), gerando instabilidades a jusante do encontro com o ASPSP. Como já verificado em fevereiro, uma zona de perturbações a leste do arquipélago causa o levantamento de isotermas e isolinhas de nitrato (Figura 53). Dentro dessa região a temperatura sofreu um decréscimo de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$ e as concentrações de nitrato foram enriquecidas em até 2 mmol N.m^{-3} . Os vórtices que atuaram nessa zona perturbada a leste das ilhas (Figura 45) possuem de 1 a 1,5 km de diâmetro e proporcionaram deslocamentos ascendentes com velocidade vertical de até $1,5.10^{-3}\text{ m.s}^{-1}$.

De maneira geral, foram observadas perturbações a leste do ASPSP que causam o levantamento de isotermas e isolinhas de nitrato. Essas perturbações não ocorrem nos primeiros metros superficiais, porém tem forte intensidade dos 100m aos 250m de profundidade. Com o posicionamento médio do final da camada eufótica em 100m de profundidade, acredita-se que os processos pontuais, porém constantes verificados a leste do ASPSP possam contribuir para o enriquecimento de nutrientes na base da camada fótica. Ainda que esse fenômeno de enriquecimento de nutrientes tenha intensidade fraca, sua constância pode atuar significativamente em benefício de comunidades bentônicas primárias, auxiliando na manutenção dos altos índices de riqueza biológica presentes na região.

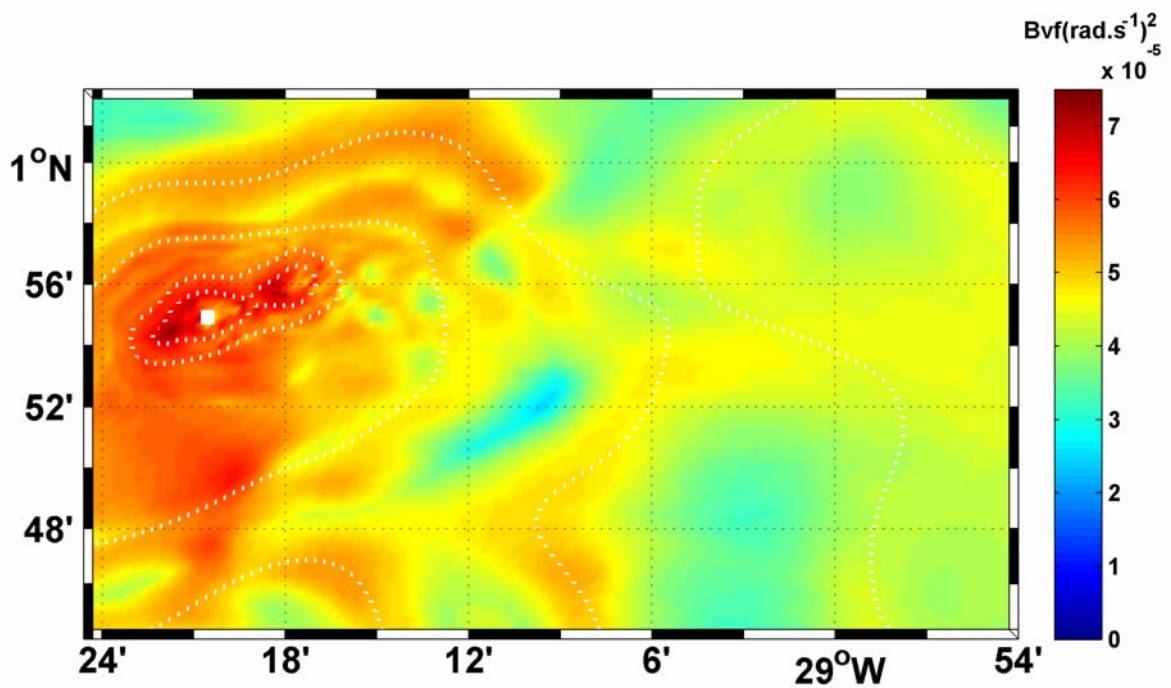
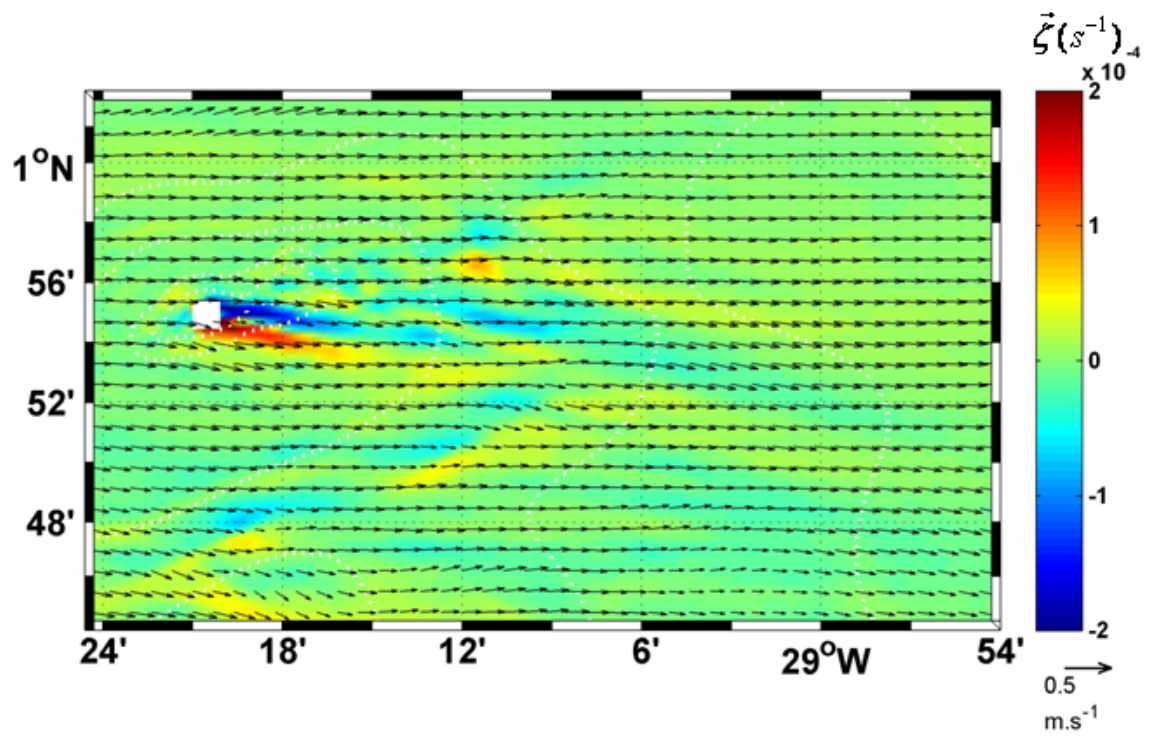


Figura 52. Campo horizontal da vorticidade relativa (acima). Os vetores representam o campo de velocidade horizontal. Abaixo, a Frequência de Brünt-Väisälä. Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de junho aos 150m de profundidade.

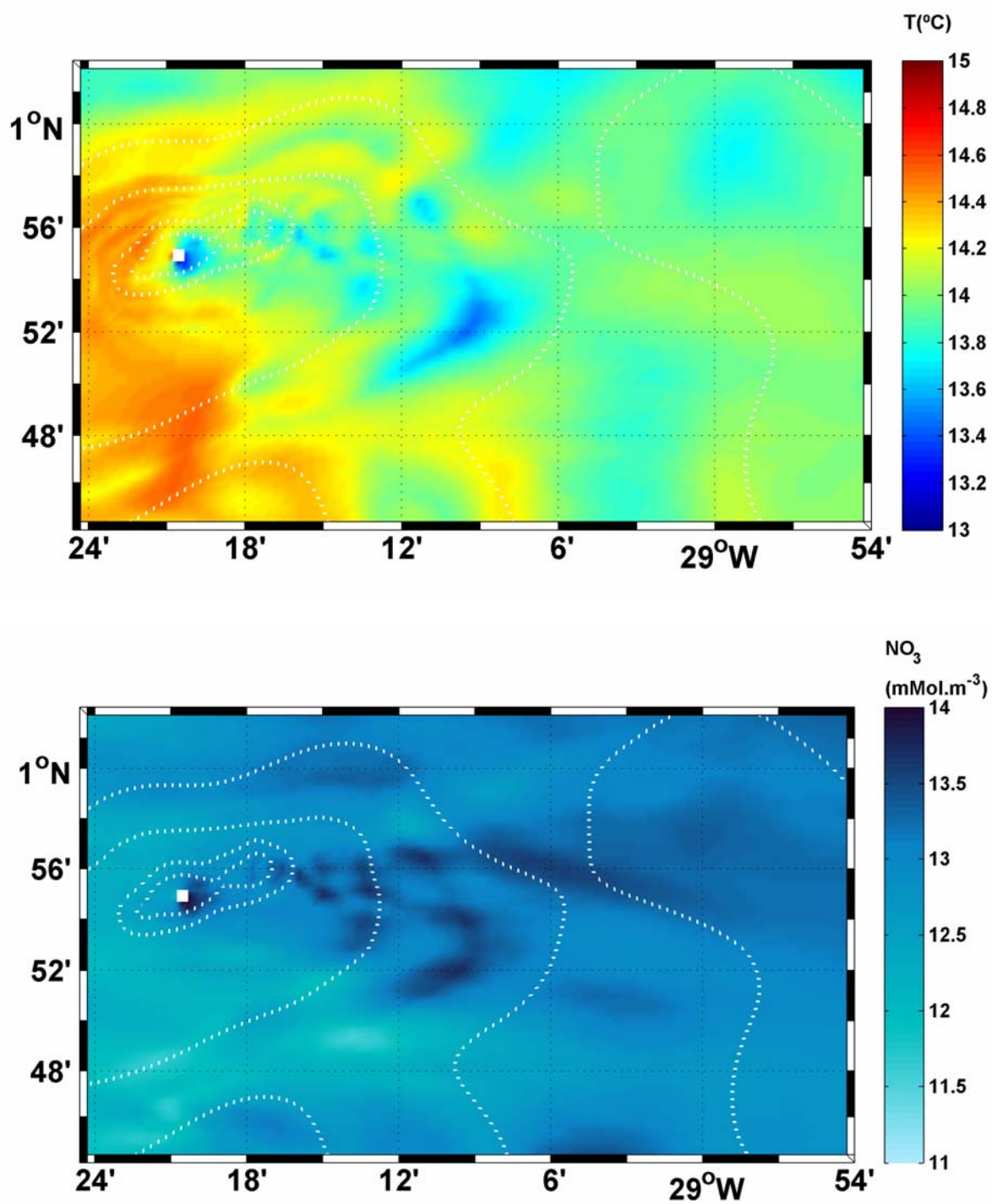


Figura 53. Campo de temperatura (acima) e distribuição de nitrato (abaixo). Resultados numéricos (ROMS EXP6) para o mês de junho aos 150m de profundidade.

4.5. Potencial de enriquecimento subsidiado troficamente

Como última etapa desse trabalho, foi utilizado um modelo lagrangeano de dispersão de partículas livres na região oceânica do ASPSP. Durante a simulação foram desconsideradas uma série de variáveis pertinentes a alguma larva em particular, produzindo-se assim resultados mais generalistas. As partículas livres que foram liberadas no domínio, serão chamadas de “larvas”, uma vez que algumas exigências e delimitações de recrutamento foram utilizadas para pesquisar a capacidade de retenção de larvas no ASPSP, ainda que hipotéticas. A Figura 54 apresenta a evolução da dispersão larval para o mês de fevereiro. As larvas foram inicialmente liberadas a sudeste das ilhas (canto inferior direito) em duas regiões distintas para posterior comparação. Uma área no entorno do ASPSP (tracejado central) foi delimitada como sendo a área de potencial recrutamento, considerando então a fixação das larvas ao substrato ou sua permanência na região.

Em superfície a componente horizontal da velocidade é predominantemente noroeste em resposta a influência dos ventos alísios de sudeste.

Verifica-se a partir da Figura 54a, que 20h após a liberação das larvas, nenhuma ainda tinha atingido a região de recrutamento junto ao ASPSP. Em 30h e 40h após a liberação, muitas larvas atingiram o arquipélago e tiveram a chance de recrutar. Após 70h da liberação, as larvas estão bastante dispersas e permanecem junto às ilhas apenas os recrutas.

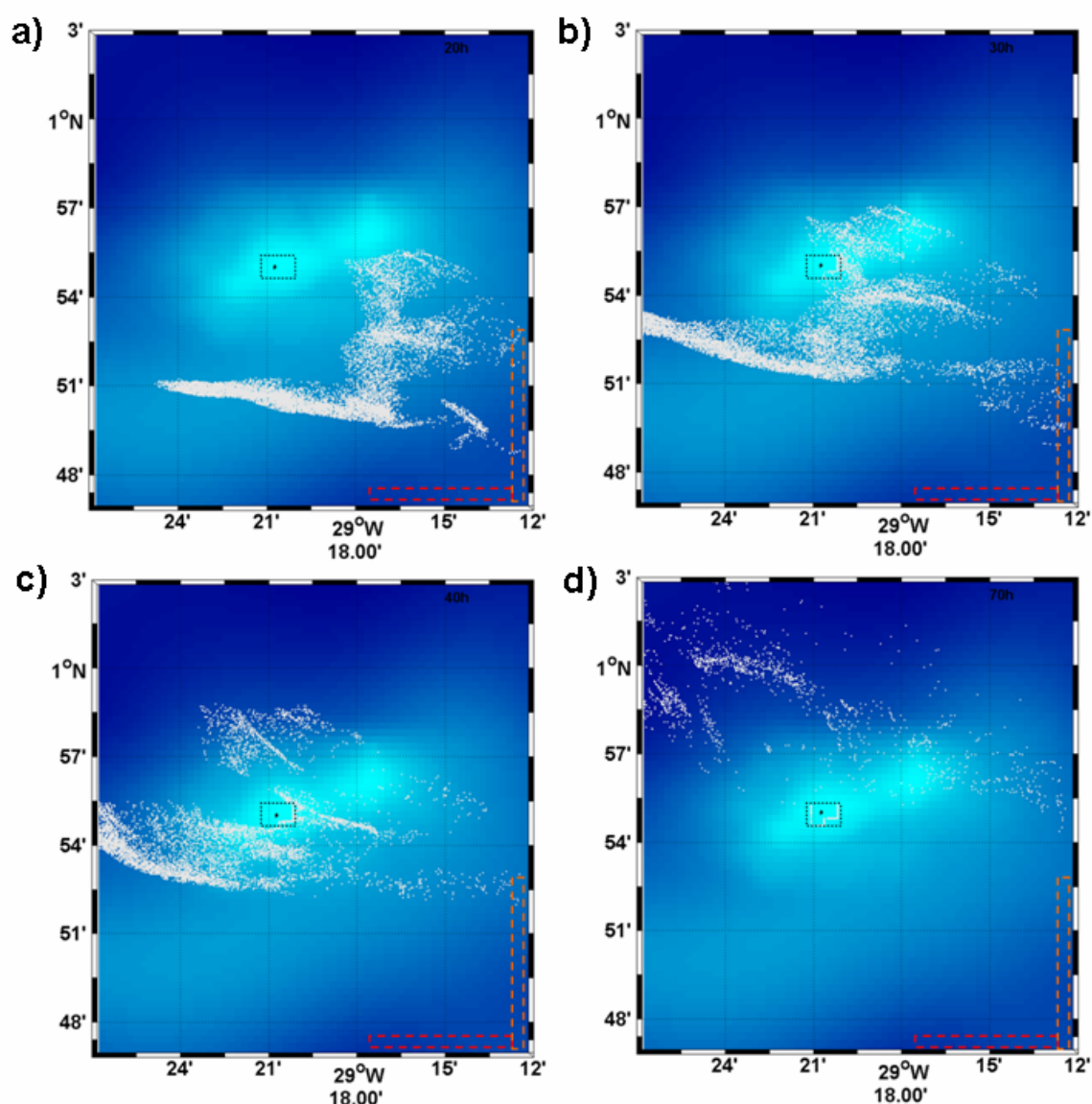


Figura 54. Dispersão de larvas no ASPSP para o mês de fevereiro. A área tracejada ao redor das ilhas representa a região de recrutamento larval. Os tracejados (canto inferior direito) em laranja (vertical) e em vermelho (horizontal) representam as áreas de liberação das larvas. As figuras a, b, c, d são relativas a 20h, 30h, 40h e 70h após o lançamento respectivamente.

Analisando os resultados de dispersão larval para o mês de junho (Figura 55), verifica-se que o campo de velocidades superficial está mais acelerado do que em fevereiro, em função da intensificação dos ventos alísios nessa época, resultando assim em um processo mais rápido de propagação das larvas, o que reduz drasticamente o potencial de retenção das mesmas junto ao ASPSP. Passadas 15h e 20h após a sua liberação, as larvas já haviam atingido o arquipélago e tiveram a chance de recrutar, se dividindo em dois ramos pela ação das ilhas. Após 25h da

liberação, os ramos continuam se distanciando e o recrutamento junto ao ASPSP já ocorreu, entretanto com eficiência bem menor para a retenção dos recrutas.

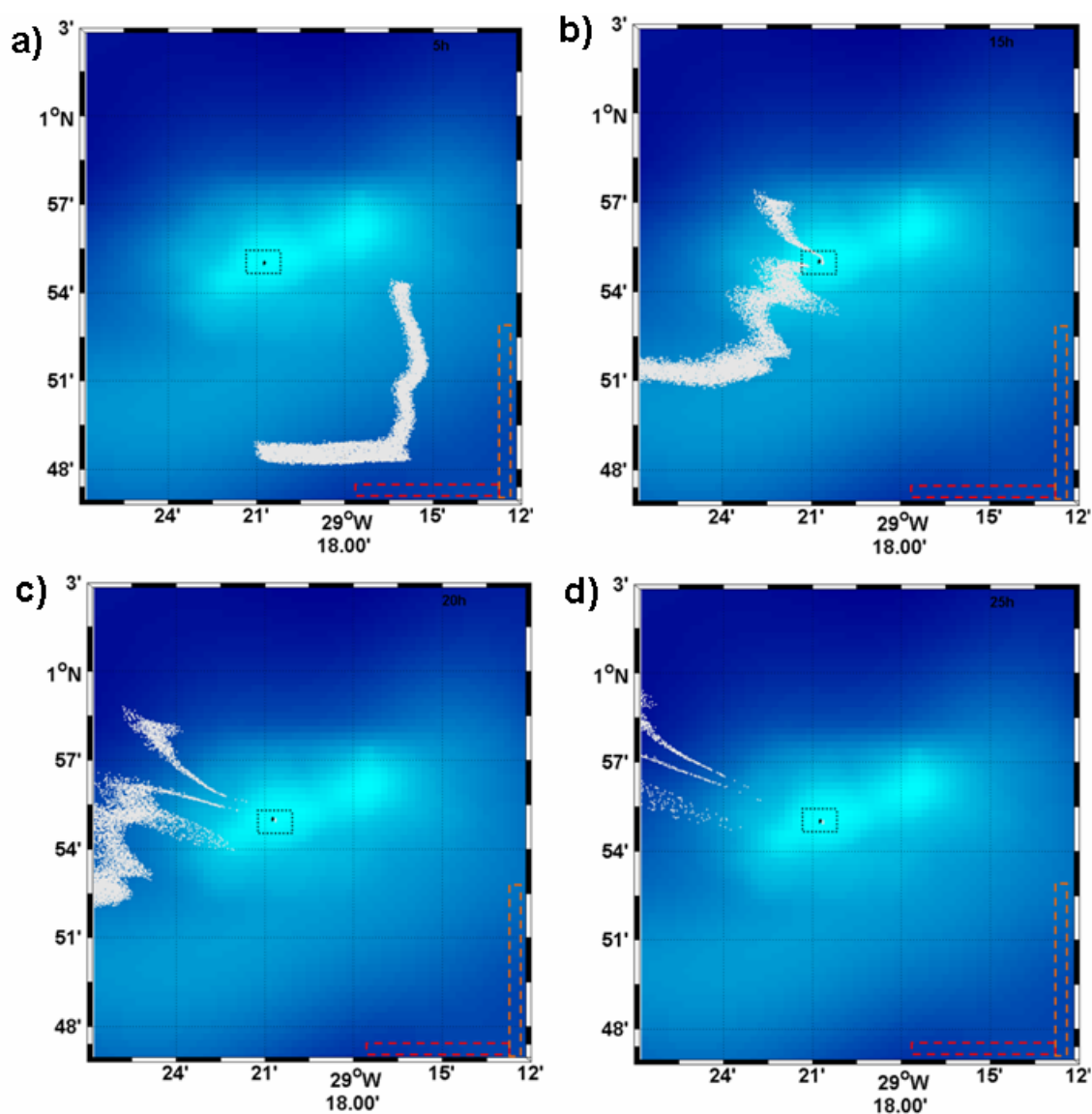


Figura 55. Dispersão de larvas no ASPSP para o mês de junho. A área tracejada ao redor das ilhas representa a região de recrutamento larval. Os tracejados (canto inferior direito) em laranja (vertical) e em vermelho (horizontal) representam as áreas de liberação das larvas. As figuras a, b, c, d são relativas a 5h, 15h, 20h e 25h após o lançamento respectivamente.

Comparando o sucesso das áreas de liberação das larvas para o recrutamento (Tabela 4), a área laranja (vertical) mostrou-se muito mais efetiva, apresentando 14,8% de capacidade de retenção, contra menos de 1,5% em relação à área vermelha (horizontal).

Tabela 4. Estimativas do recrutamento por região de liberação das larvas para os meses de fevereiro e junho no ASPSP.

Mês\ Recrutamento por zona de liberação	Recrutamento (ZL)	%(ZL)	Recrutamento (ZV)	%(ZV)
Fevereiro (10.000 ini)	740	14,8	70	1,4
Junho (10.000 ini)	67	1,34	0	0

Ao comparar a época de liberação das larvas, percebe-se que o mês de fevereiro foi mais efetivo para o recrutamento do que o mês de julho. Essa diferença é melhor compreendida se levarmos em consideração que as velocidades horizontais à superfície se apresentam menos intensas em fevereiro ($\sim 0,28 \text{ m.s}^{-1}$), enquanto que em junho essas velocidades são intensificadas ($\sim 0,53 \text{ m.s}^{-1}$). A situação com as correntes superficiais mais intensas, não favoreceu a formação de uma zona de retenção de larvas com dimensões espaciais suficientes para proporcionar um recrutamento mais significativo.

5. SÍNTESE E CONCLUSÕES

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) vem sendo alvo de extensas pesquisas nos últimos 20 anos, envolvendo as mais deferentes áreas das Geociências. Sua localização estratégica desperta grande interesse econômico e científico. Entretanto, verifica-se que, até o presente momento, muito pouco se conhece acerca da circulação oceânica e da interação de processos físicos e biogeoquímicos. Dos poucos trabalhos de avaliação abiótica, cabe citar inicialmente Travassos et al. (1999), que fizeram referência ao complexo regime de correntes atuante no ASPSP, evidenciando a presença em superfície da SEC e em subsuperfície da EUC, ambas em direta interação com as ilhas. Outros autores também verificaram estruturas semelhantes para o campo zonal de correntes equatoriais, mas todos eles, entretanto, focados na escala espacial da bacia Atlântica (Weisberg, 1985; Stramma & Schott, 1999; Lumpkin & Garzoli, 2005).

O presente estudo focou a investigação de processos físicos atuantes no ASPSP, que podem ser responsáveis pela alta produtividade da vida pelágica e bentônica encontrada nessa região. Num primeiro momento, o modelo *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) foi utilizado para simulação hidrodinâmica (interanual, 2003-2005). Para as análises biogeoquímicas, o modelo *Nitrogen-Phyto-Zoo-Detritus* (NPZD) foi em seguida acoplado ao ROMS, visando analisar a ação da circulação sobre a distribuição espaço-temporal de nutrientes e de plâncton na região do ASPSP.

Retomando algumas informações pretéritas, Travassos et al. (1999) reportaram o levantamento de isotermas e isohalinas ocorrendo abaixo da termoclina, mas sem qualquer evidência de ressurgência atingindo a camada eufótica. As perturbações verificadas por esses autores em 150-200m de profundidade também foram reproduzidas numericamente nesse trabalho. Os resultados numéricos nessa camada apontaram o levantamento de isotermas e isohalinas da ordem de 20-50m, sendo que a intensidade e frequência desses eventos diminuem com a aproximação da termoclina. Outros trabalhos também investigaram a hidrografia da região do arquipélago, sem encontrar indicativos de ressurgência (i.e., Zagaglia, 1998; Flores Montes, 2003; Macedo et al., 2009). Aos

50m de profundidade, os resultados numéricos aqui obtidos indicaram a presença de vórtices em consequência do encontro de fluxos contrários da SEC e EUC, porém com intensidade fraca, em razão do forte gradiente térmico funcionar como uma barreira a esses fluxos verticais, conferindo estabilidade estática ao fluido.

Um dos principais resultados obtidos com a utilização do modelo numérico regional foi a indicação da existência de correntes verticais significativas (da ordem de 10^{-3} m.s^{-1}), localizadas de 100-150m de profundidade. Este fenômeno ainda não havia sido reportado por nenhum pesquisador na região. As perturbações verificadas ocorreram a leste dos rochedos, nas proximidades do ASPSP, em resposta a atuação de vórtices (~1,5km de diâmetro), que promovem deslocamentos verticais, tanto ascendentes quanto de subsidência na região. Os deslocamentos verticais ascendentes podem ser responsáveis por promover um enriquecimento mineral na base da camada eufótica. Este mecanismo, relativamente restrito em termos de área de abrangência, se mostra temporalmente permanente, e agindo de modo similar ao sugerido por von Bröckel & Meyerhöfer (1999). De fato, von Bröckel & Meyerhöfer (1999) também não encontraram evidências de ressurgência no ASPSP e atribuíram a isso, o fato de terem praticado coletas pontuais em apenas um mês, sem cobertura de variabilidade sazonal. Estes autores fundamentaram, entretanto, uma hipótese para explicar a vasta riqueza ecológica e alta produtividade pelágica e bentônica do ASPSP, qual seja: as correntes locais poderiam estar subsidiando o enriquecimento de nutrientes para organismos adaptados a viver em locais de pouca luz (algas bentônicas), localizados preponderantemente na base da zona eufótica.

O ASPSP é considerado um importante local para pesca de Atuns, Cavalas, Tubarões e peixes-voadores (Vaske Jr, et al., 2005). De acordo com Rudorff et al. (2009), que estudaram a dispersão larval em grande escala no oceano Atlântico equatorial, há uma conexão entre as Ilhas Ascensão no meio do Atlântico Sul e o ASPSP. Esses autores relataram que as larvas virtuais estudadas, quando liberadas nas Ilhas Ascensão, chegam a região do ASPSP, utilizando a cSEC como via de transporte preferencial.

Embora o ASPSP não tenha a configuração tradicional de um monte submarino, com formação clássica de coluna de Taylor, especulamos se outros processos, relacionados ao aumento da retenção de larvas de organismos junto ao monte, suplementando assim o recrutamento da fauna bentônica local, não

poderiam estar influenciando o incremento de biodiversidade e de riqueza protéica na região. Dessa forma, na última etapa deste estudo foi aplicado o modelo ICHTHYOP (simulação Lagrangeana) à área oceânica do ASPSP. Os resultados deste estudo indicaram que, em condições de fluxo mais fraco da cSEC ($u < 0,3 \text{ m.s}^{-1}$), verificadas no verão austral, as ilhas apresentaram boa capacidade de retenção larval para recrutamento, enquanto que durante os meses em que ocorre a intensificação das correntes superficiais (inverno austral) essa capacidade foi quase que totalmente extinguida.

Diante das evidências, podemos sugerir a ação conjunta de dois principais mecanismos agindo de forma independente e contribuindo para sustentar a vasta diversidade biológica verificada no ASPSP, quais sejam:

(a) Mecanismo físico, de ação subsuperficial, que ocorre constantemente abaixo dos 90m de profundidade, promovendo o incremento de nutrientes na base da camada eufótica (100m de profundidade). Esse mecanismo é resultante do contato EUC-ASPSP. Dessa interação surgem vórtices a leste do arquipélago que resultam em deslocamentos verticais de fluido. De acordo com Brandt et al., (2006) a EUC é mais intensa no período de maio a outubro. Condicionada a essa variação temporal, associam-se mudanças na posição de seu núcleo, que se encontra ora mais raso, ora mais profundo, quando se registram as maiores velocidades zonais.

(b) Mecanismo de enriquecimento subsidiado tróficamente. Esse mecanismo, de ação superficial, é resultante do transporte de larvas de organismos promovido pela SEC e sua interação com o ASPSP. Dessa interação, são criadas as condições necessárias para que as ilhas exerçam um importante papel, constituir uma área para recrutamento larval em águas oceânicas. Esse mecanismo é controlado pela intensificação/relaxamento das correntes superficiais. No período em que a hidrodinâmica superficial está menos acelerada (verão austral), as ilhas apresentam boas condições para recrutamento larval, enquanto que, durante os meses de inverno austral (intensificação das correntes superficiais), essa capacidade de retenção, é prejudicada pela redução da camada limite na região de contato corrente-topografia.

Araújo & Cintra (2009) já haviam reportado a existência desses dois aspectos importantes de interação das correntes com o ASPSP, a atuação do cisalhamento

eólico (alísios de SE) sobre a circulação superficial e a atuação subsuperficial do contato EUC-ASPSP.

Portanto, da avaliação efetuada no ASPSP, conclui-se que essa região não apresenta apenas um processo de enriquecimento, apresentando contribuições tanto bióticas (agregações de organismos) quanto abióticas (enriquecimento de nutrientes na base da camada eufótica) para manutenção dos altos níveis de diversidade ecológica verificados em uma área equatorial oceânica.

Esses estudos se mostram promissores e devem ser aprofundados. Por exemplo, novas simulações com o modelo de dinâmica larval devem ser realizadas, considerando parâmetros e características específicas dos organismos presentes no ASPSP. Isso permitirá uma avaliação mais precisa dos mecanismos de recrutamento e desova locais, ampliando as informações que contribuam para justificar cientificamente os altos índices de riqueza ecológica e de biodiversidade verificados no ASPSP.

REFERÊNCIAS

- Arakawa, A., Lamb, V., 1977. Computational design of the basic processes of the UCLA general circulation model. **Methods in Computational Physics** 17, 174-265.
- Araújo, M., Cintra, M., 2009. **Modelagem matemática da circulação oceânica na região equatorial**. In: O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica. Orgs. Viana, D., [et al]. Brasília, DF, SECIRM, 348p.
- Becker, H., Macedo, S., Mozzeto, J., 2009. **Hidrologia da região de bancos e ilhas oceânicas do nordeste brasileiro**. In: Meteorologia e sensoriamento remoto, oceanografia física, oceanografia química e oceanografia geológica. Org. Hazin, F., Fortaleza. Editora Martins & Cordeiro. (Programa Revizee – Score Nordeste), 248p.
- Brandt, P., Schott, F., Provost, C., Kartavtseff, A., Hormann, V., Boulès, B., Fischer, J., 2006. Circulation in the central equatorial Atlantic: Mean and intraseasonal to seasonal variability. **Geophysical Research Letters** 33.
- Fasham, M., Ducklow, H., McKelvie, S., 1990. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. **Journal of Marine Research** 48, 591–639.
- Flores Montes, M., 2003. Fatores que Influenciam na Produtividade dos Oceanos: A Importância do Fluxo de Difusão dos Nutrientes para a Biomassa do Fitoplâncton na Região Oceânica do Nordeste Brasileiro. 179 f. **Tese (Doutorado)**. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências. Departamento de Oceanografia, Recife.
- Genin, A., 2004. Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies. **Journal of Marine Systems** 50 (1-2), 3- 20.
- Gruber, N., Frenzel, H., Doney, S., Marchesiello, P., McWilliams, J., Moisan, J., Oram, J., Plattner, G-K., Stolzenbach, K., 2006. Eddy-resolving simulation of plankton ecosystem dynamics in the California Current System. **Deep Sea Research I** 53, 1483-1516.

- Haidvogel, D., Arango, H., Hedström, K., Beckmann, A., Malanotte-Rizzoli, P., Shchepetkin, A., 2000. Model evaluation experiments in the North Atlantic basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. **Dynamics Atmosphere and Oceans** 32, 239-281.
- Kiriakoulakis, K., Wolff, G., 2005. Organic Biogeochemistry of Seamounts: a Review. **OASIS report**, University Hamburg, 10p.
- Large, W., McWilliams, J., Doney, S., 1994. Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parametrization. **Reviews in Geophysics** 32, 363-403.
- Lett, C., Verley, P., Mullan, C., Parada, C., Brochier, T., Penven, P., Blanke, B., 2008. A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. **Environmental Modelling & Software** 23, 1210-1214.
- Lumpkin, R., Garzoli, S., 2005. Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean. **Deep Sea Research I** 52, 495-518.
- Macedo, S., Flores Montes, M., Costa, K., 2009. **Hidrologia**. In: O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica. Orgs. Viana, D., [et al]. Brasília, DF, SECIRM, 348p.
- Molinari, R., 1982. Observations of eastward currents in the tropical South Atlantic Ocean: 1978-1980. **Journal of Geophysical Research** 87, 9707-9714.
- Mullineaux, L., Mills, S., 1997: A test of the larval retention hypothesis in seamount-generated flows. **Deep Sea Research** 44, 745-770.
- Orlanski, I., 1976. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. **Journal of Computational Physics** 21, 251-269.
- Penven, P., Marchesiello P., Debreu L., Lefevre J., 2008. Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. **Environmental Modelling and Software** 23 (5), 660-662.
- Pond, S., Pickard, G., 1983. **Introductory Dynamical Oceanography**. Oxford. Pergamon Press. pp. 329.

- Richardson, P., McKee, T., 1984: Average Seasonal Variation of the Atlantic Equatorial Currents from Historical Ship Drifts. **Journal of Physical Oceanography** 14, 1226-1238.
- Rudorff, C., Lorenzzetti, J., Gherardi, D., Lins-Oliveira, J., 2009. Modeling spiny lobster larval dispersion in the Tropical Atlantic. **Fisheries Research** 96, 206-215.
- Schott, F., Dengler, M., Brandt, P., Affler, K., Fischer, J., Bourles, B., Gouriou, Y., Molinari, R., Rhein, M., 2003. The zonal currents and transports at 35°W in the tropical Atlantic. **Geophysical Research Letters** 30 (7), 1349.
- Shchepetkin, A., McWilliams, J., 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. **Ocean Modelling** 9, 347-404.
- Silva, M., Araújo, M., Servain, J., Penven, P., Lentini, C. 2009. High-resolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern tropical Atlantic. **Ocean Modelling (Oxford)**, 1-14.
- Smith, W.; Sandwell, D., 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. **Science** 277, 1957-1962.
- Stramma, L., 1991. Geostrophic transport of the south equatorial current in the Atlantic. **Jornal of Marine Research** 49, 281-294.
- Stramma, L., Rhein, M., Brandt, P., Dengler, M., Böning, C., Walter, M., 2005. Upper ocean circulation in the western tropical Atlantic in boreal fall 2000. **Deep Sea Research** 52, 221–240.
- Stramma, L., Schott, F., 1999. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. **Deep Sea Research** 46, 279–303.
- Travassos, P., Hazin, F., Zagaglia, J., Rocha, R., Schober, J., 1999. Thermohaline structure around seamounts and islands off North-Eastern Brazil. **Archive of Fishery Marine Research** 47, 211-222.
- Vaske Jr, T., Lessa, R., de Nóbrega, M., Montealegre-Quijano, S., Marcante Santana, F., Bezerra Jr, J., 2005. A checklist of fishes from Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil. **Journal of Applied Ichthyology** 21, 75-79.

- Von Bröckel, K., Meyerhöfer, M., 1999. Impact of the Rocks of São Pedro and São Paulo upon the quantity and quality of suspended particulate organic matter. **Archive of Fishery Marine Research** 47 (2/3), 223-238.
- Weisberg, R., 1985. Equatorial Atlantic velocity and temperature observations: February-November 1981. **Journal of Physical Oceanography** 15, 533-543.
- White, M., Mohn, C., 2004. Seamount: a review of physical processes and their influence on the seamount ecosystem. **OASIS report**, University Hamburg, 40p.
- Zagaglia, J., 1998. Caracterização da Estrutura Termoalina da Zona Econômica Exclusiva do Nordeste Brasileiro. 127 f. **Monografia de Graduação**. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Pesca, Recife.

ANEXO

Principais formulações matemáticas do modelo ROMS

A seguir são apresentadas as principais formulações do modelo ROMS na forma contínua:

O sistema de coordenadas sigma (σ) é dado por

$$x^* = x;$$

$$y^* = y;$$

$$t^* = t$$

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H}; \quad (1)$$

onde:

x, y, z – coordenadas cartesianas;

t – tempo (s);

H – profundidade local (m);

η – elevação da superfície (m).

➤ Equação da continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x^*} + \frac{\partial v}{\partial y^*} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

➤ Conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial u}{\partial t^*} + \vec{v} \cdot \nabla u - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_{x^*} \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t^*} + \vec{v} \cdot \nabla v + f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y^*} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_{y^*} \quad (4)$$

sendo a aceleração advectiva:

$$\vec{v} \cdot \nabla \phi = u \frac{\partial \phi}{\partial x^*} + v \frac{\partial \phi}{\partial y^*} + w \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

➤ Equação hidrostática

$$\rho g = - \frac{\partial P}{\partial z} \quad (5)$$

➤ Equação de estado da água do mar

$$\rho = \rho(S, \theta, P) \quad (6)$$

➤ Conservação da temperatura potencial

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + \vec{v} \cdot \nabla \theta = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + F_{\theta^*} \quad (7)$$

➤ Conservação da salinidade

$$\frac{\partial S}{\partial t^*} + \vec{v} \cdot \nabla S = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_{S^*} \quad (8)$$

onde:

$\vec{v}$ - velocidade (m.s^{-1})

u, v, w – componentes (x,y,z) da velocidade (m.s^{-1});

$f(x,y)$ - parâmetro de Coriolis (s^{-1});

ρ_0 - densidade de referência (kg.m^{-3});

ρ - densidade *in situ* (kg.m^{-3});

P - pressão (N.m^{-2});

K_M – coeficiente de viscosidade turbulenta vertical ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

K_H - coeficiente de difusividade turbulenta vertical para calor e sal ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

g - aceleração da gravidade ($\text{m}.\text{s}^{-2}$);

θ - temperatura potencial ($^{\circ}\text{C}$);

S - salinidade (ups).

∇ - operador gradiente

Os movimentos que ocorrem em escalas menores que o espaçamento da malha são determinados pelos termos:

$$F_{x^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y^*} + \frac{\partial v}{\partial x^*} \right) \right] \quad (9)$$

$$F_{y^*} = \frac{\partial u}{\partial x^*} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y^*} + \frac{\partial v}{\partial x^*} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y^*} \right) \quad (10)$$

$$F_{\theta^*, S^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left[A_H \frac{\partial}{\partial x^*} (\theta, S) \right] + \frac{\partial}{\partial y^*} \left[A_H \frac{\partial}{\partial y^*} (\theta, S) \right] \quad (11)$$

onde:

A_M - coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

A_H - coeficiente de difusão turbulenta horizontal para θ e S ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).

Definidos pela formulação de *Smagorinsky*:

$$A_M = C_{SMA} \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$A_M = \frac{A_H}{\sigma_M} \quad (13)$$

onde:

$C_{SMA} \cong 0,09$ - constante de difusividade de *Smagorinsky*;

Δx e Δy - espaçamentos horizontais da célula de integração numérica;

σ_M - número de *Prandtl* turbulento.

A posição da Camada de Mistura (MLD), importante tanto para a estratificação térmica quanto para ecologia local, é parametrizada considerando a profundidade onde o Número de Richardson se iguala a um valor crítico conforme a formulação a seguir:

$$Ri(h) = \frac{[B_r - B(h)]h}{|V_r - V(h)|^2 + V_t^2(h)} = Ri_{cr} = 0.3 \quad (14)$$

onde:

Ri - Número de Richardson

B_r – Empuxo de referência (superfície) (N)

B – Empuxo médio (N)

V_r – Velocidade de referência (superfície) ($m.s^{-1}$);

V – Velocidade média ($m.s^{-1}$);

H - profundidade (m).

O Ri expressa uma relação entre a estratificação e o cisalhamento da velocidade turbulenta.