



Relatório Técnico [rev.00]

## Modelagem Numérica

Campo de Xerelete

---

**/PRO\_AEC\_1216**

Preparado para: AECOM / TOTAL

Preparado por: Felipe Soares

Gabriel Carvalho

Maurício Fragoso

Henery Ferreira Garção

Francisco dos Santos

Bruna Cerrone

Leilane Passos

31 de outubro de 2012

### **Prooceano**

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.0040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax + 55 21 2532.5666

[www.prooceano.com.br](http://www.prooceano.com.br)

## Controle de revisão

---

### Revisão nº 00

---

Data:

---

Descrição:

---

Responsável:

---

Empresa:

---

### Revisão nº 01

---

Data:

---

Descrição:

---

Responsável:

---

Empresa:

---

### Revisão nº 02

---

Data:

---

Descrição:

---

Responsável:

---

Empresa:

---

### Revisão nº 03

---

Data:

---

Descrição:

---

Responsável:

---

Empresa:

---

## Sumário

---

<b>1. Introdução .....</b>	<b>20</b>
<b>2. Caracterização Meteo-oceanográfica .....</b>	<b>21</b>
2.1. Introdução .....	21
2.2. Meteorologia .....	22
2.3. Oceanografia .....	60
2.4. Bibliografia .....	133
<b>3. Modelagem Hidrodinâmica .....</b>	<b>137</b>
3.1. Introdução .....	137
3.2. Base de Dados Utilizada .....	138
3.3. Bibliografia .....	159
<b>4. Modelagem de Dispersão de Óleo .....</b>	<b>161</b>
4.1. Introdução .....	161
4.2. Metodologia .....	163
4.3. Resultados .....	189
4.4. Conclusão .....	250
4.5. Bibliografia .....	251

---

## Índice das imagens

Figura 1: Localização do Campo de Xerelete. A área destacada representa a Bacia de Campos. .....	21
Figura 2: Localização das estações meteorológicas do INMET do Rio de Janeiro/RJ e Arraial do Cabo, da estação meteorológica do CPTEC de Cabo Frio, dos pontos de grade do NCEP utilizados para análises pontuais (ponto amarelo) e espaciais do regime de ventos e demais parâmetros meteorológicos analisados (pontos vermelhos).....	24
Figura 3 : Temperatura média na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET. ....	26
Figura 4: Temperatura média do ar (°C) na região do Campo de Xerelete, no período de verão	27
Figura 5: Temperatura média do ar (°C) na região do Campo de Xerelete no período de inverno (junho a agosto). ....	28
Figura 6: Temperatura média do ar sobre o Campo de Xerelete. Elaborado com dados de 1979 a 2011 da Reanálise II do NCEP. ....	28
Figura 7: Série temporal de temperatura do ar na estação de Arraial do Cabo – RJ, para o período entre janeiro de 2008 e dezembro de 2010. A linha central (preta) representa a média de temperatura, e as linhas vermelhas correspondem ao percentil 99% superior e inferior. ....	30
Figura 8: Precipitação na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET. ....	31
Figura 9: Precipitação (Kg/m <sup>2</sup> ) na região do Campo de Xerelete no período de verão (janeiro a março). ....	32
Figura 10: : Precipitação (Kg/m <sup>2</sup> ) na região do Campo de Xerelete no período de inverno (junho a agosto). ....	33
Figura 11: Precipitação média mensal sobre o Campo de Xerelete. Elaborado com dados de 1979 a 2011 da Reanálise II do NCEP. ....	33
Figura 12: Série temporal de precipitação na estação de Arraial do Cabo – RJ, para o período entre janeiro de 2008 e dezembro de 2010. A linha vermelha indica o percentil 99%. ....	34
Figura 13: Evaporação na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET. ....	35
Figura 14: Umidade relativa na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET. ....	36

Figura 15: Umidade relativa do ar (%) na região do Campo de Xerelete, no período de verão (janeiro a março).....	37
Figura 16: Umidade relativa do ar (%) na região do Campo de Xerelete, no período de inverno (junho a agosto).....	38
Figura 17: Umidade relativa do ar média sobre o Campo de Xerelete. Elaborado com dados de 1979 a 2011 da Reanálise II do NCEP.....	38
Figura 18: : Série temporal de umidade relativa do ar na estação de Arraial do Cabo - RJ, para o período entre janeiro de 2008 e março de 2010. A linha central (preta) representa a média e as linhas vermelhas correspondem ao percentil 99% superior e inferior. ....	39
Figura 19: Pressão atmosférica na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET.....	40
Figura 20: Pressão atmosférica (hPa) na região do Campo de Xerelete, no período de verão (janeiro a março).....	41
Figura 21: Pressão atmosférica (hPa) na região do Campo de Xerelete, no período de inverno (junho a agosto).....	42
Figura 22: Pressão atmosférica média mensal sobre o Campo de Xerelete. Elaborado com dados de 1979 a 2011 da Reanálise II do NCEP.....	42
Figura 23: Série temporal de pressão atmosférica na estação de Arraial do Cabo – RJ, para o período entre janeiro de 2008 e janeiro de 2010. A linha central (preta) representa a média e as linhas vermelhas indicam o percentil 99% superior e inferior.....	43
Figura 24: Insolação na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET.....	44
Figura 25: Histograma direcional dos ventos na região do entorno do Campo de Xerelete. Dados de 1979 a 2011. Fonte: NCEP.....	45
Figura 26: Rosa dos Ventos (m/s) para os meses de janeiro a junho. Figura gerada com dados do NCEP.....	46
Figura 27: Rosa dos Ventos (m/s) para os meses de julho a dezembro. Figura gerada com dados do NCEP.....	47
Figura 28: Número total de ocorrência de frentes por ano.....	54
Figura 29: Média mensal de sistemas frontais entre os anos de 1996 e 2010.....	55

Figura 30: Intensidade máxima por direção associada, para cada mês do ano. Elaborado com dados de 1960 a 2011, da Reanálise I do NCEP. ....	57
Figura 31: Mapa batimétrico local. A linha preta indica o contorno da Bacia de Campos. As linhas pontilhadas representam as isóbatas de 200, 1000, 2000 e 3000 metros.....	62
Figura 32: Localização do ponto de grade (verde) e da seção vertical (linha vermelha) de onde foram retirados os dados de temperatura e salinidade do WOA09. ....	63
Figura 33: Perfis de temperatura e salinidade climatológicas para as quatro estações do ano na região do Campo de Xerelete. Acima, perfil completo, abaixo, zoom nos primeiros 500 metros da coluna d'água. A linha azul nas figuras de cima indicam a área ampliada.....	64
Figura 34: Perfis das densidades climatológicas para as quatro estações do ano na região do Campo de Xerelete. A direita, ampliação dos primeiros 500 metros da coluna d'água. A linha pontilhada em azul indica a área ampliada. ....	65
Figura 35: Temperatura climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de verão. ....	66
Figura 36: Temperatura climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de inverno. ....	67
Figura 37: Salinidade climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de verão. ....	69
Figura 38: Salinidade climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de inverno. ....	70
Figura 39: Densidade climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de verão. ....	72
Figura 40: Densidade climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de inverno. ....	73
Figura 41: Seção vertical de temperatura climatológica em um perfil normal à costa, para o período de verão. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.....	75
Figura 42: Seção vertical de temperatura climatológica em um perfil normal à costa, para o período de inverno. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.....	76

Figura 43: Seção vertical de salinidade climatológica em um perfil normal à costa, para o período de verão. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete. ....	77
Figura 44: Seção vertical de salinidade climatológica em um perfil normal à costa, para o período de inverno. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete. ...	78
Figura 45: Localização das estações de coleta dos dados de temperatura e salinidade obtidos do NODC (pontos verdes). .....	80
Figura 46: Diagrama TS espalhado para a região do Campo de Xerelete, elaborado com os dados do NODC. A linha em azul representa o gabarito proposto por Silva <i>et al</i> (1982)...	81
Figura 47: Seção vertical de densidade em um perfil normal à costa para o período de verão. As linhas isopicnais representam os limites entre as massas d'água. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete. ....	82
Figura 48: Seção vertical de densidade em um perfil normal à costa para o período de inverno. As linhas isopicnais representam os limites entre as massas d'água. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete. ....	83
Figura 49: Representação esquemática do giro subtropical do Atlântico Sul. Fonte: Silveira (2000).....	84
Figura 50: Representação esquemática do Sistema Corrente do Brasil. Fonte: Adaptado de Godoi (2005). .....	85
Figura 51: Carta-imagem da temperatura da superfície do mar processada pelo INPE do dia 24 de março de 2001 mostrando feições vorticais próximas ao Cabo de São Tomé e Cabo Frio. Fonte: Fragoso, 2004. ....	87
Figura 52: Campo de vorticidade relativa ( $s^{-1}$ ) e velocidade em superfície para 1º de janeiro de 1999 resultante do modelo numérico de Fragoso, 2004. ....	88
Figura 53: Campo de vorticidade relativa ( $s^{-1}$ ) e velocidade em superfície para 15 de janeiro de 1999 resultante do modelo numérico de Fragoso, 2004. ....	89
Figura 54: Campo de vorticidade relativa ( $s^{-1}$ ) e velocidade em superfície para 30 de janeiro de 1999 resultante do modelo numérico de Fragoso, 2004. ....	90
Figura 55: Campo de vorticidade relativa ( $s^{-1}$ ) e velocidade em superfície para 15 de fevereiro de 1999 resultante do modelo numérico de Fragoso, 2004. ....	91
Figura 56: Campo médio anual das velocidades de corrente na região da Bacia de Campos. ...	94

Figura 57: Campo médio sazonal de verão das velocidades de corrente na região da Bacia de Campos.....	95
Figura 58: Campo médio sazonal de inverno das velocidades de corrente na região da Bacia de Campos.....	96
Figura 59: Ilustração esquemática da estrutura do fundeio. Fonte: adaptado de Santos (2009).	97
Figura 60: Localização do fundeio do DEPROAS utilizado em relação ao Campo de Xerelete.	98
Figura 61: Rosa de corrente para as profundidades de 23, 85, 155 e 195 metros. ....	99
Figura 62: Seção utilizada na análise da distribuição espacial vertical de correntes indicada pela linha vermelha.....	100
Figura 63: Seção vertical das correntes na seção 1, para todo o período analisado. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.....	101
Figura 64: Seção vertical das correntes na seção 1, para o período de verão. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.....	102
Figura 65: Seção vertical das correntes na seção 1, para o período de inverno. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.....	103
Figura 66: Representação esquemática do derivador do tipo SVP – WOCE.....	104
Figura 67: Trajetória dos derivadores. As linhas em cinza representam as isobatimétricas de 200m, 1000m, 2000m e 3000m. A área destacada representa a Bacia de Campos. A linha pontilhada representa a área de análise delimitada. ....	105
Figura 68: Stickplot de corrente dos 3 derivadores contidos na área de análise. ....	106
Figura 69: Localização do ponto para o qual foram utilizados os resultados do modelo WaveWatch III neste relatório.....	108
Figura 70: Exemplo de passagem de uma frente fria pela Bacia de Santos. Nesse evento, os ventos se SW associados foram fracos, como pode ser visto na previsão de para 36 horas (a). Porém, com a evolução do sistema, ventos fortes de SE geraram ondas com altura significativa entre 3 e 3,5 m (b). Fonte: ATLASUL.....	109
Figura 71: Exemplo de atuação do vento de NE, associado ao ASAS (a), levando ao desenvolvimento de um mar local de até 2 m (b). Fonte: ATLASUL.....	110



Figura 72: Rosas de dispersão para altura e direção para Hs (esquerda), <i>Wind sea</i> (centro) e <i>swell</i> (direita).....	111
Figura 73: Diagrama de dispersão para altura e período de pico para <i>swell</i> (a) e <i>wind sea</i> (b).113	
Figura 74: Espectro Direcional de Ondas para um ponto na Bacia de Campos, ilustrando a presença de um forte <i>swell</i> de SW. Fonte: Projeto ATLASUL ( <a href="http://www.atlasul.com.br">www.atlasul.com.br</a> ). .....	115
Figura 75: Diagrama de dispersão para direção e período de pico para <i>swell</i> (a) e <i>wind sea</i> (b). .....	116
Figura 76: Distribuição de alturas para altura significativa (a), <i>swell</i> (b) e <i>wind sea</i> (c), em classes de 0,5 m. ....	118
Figura 77: Série temporal de altura significativa (a), altura do <i>swell</i> (b) e altura do <i>wind sea</i> (c). .....	119
Figura 78: Valores médios (a) e máximos (b) mensais da altura significativa. ....	120
Figura 79: Valores médios (a) e máximos (b) mensais do <i>swell</i> . ....	121
Figura 80: Valores médios (a) e máximos (b) mensais do <i>wind sea</i> . ....	122
Figura 81: Posicionamento do ponto de grade do FES-2004 utilizado.....	125
Figura 82: Amplitude da componente M2 para região da Bacia de Campos. ....	126
Figura 83: Fase da componente M2 para região da Bacia de Campos. ....	127
Figura 84: Elevação da superfície do mar (cm) para todo o ano de 2011.....	128
Figura 85: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <a href="http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html">http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html</a> .....	138
Figura 86: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25°W, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <a href="http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html">http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html</a> .....	139
Figura 87: Trajetórias dos derivadores i12 e i13, lançados no Projeto MondoCorcovado ( <a href="http://mondocorcovado.prooceano.com.br">mondocorcovado.prooceano.com.br</a> ). ....	140

Figura 88: Espectro da velocidade de corrente. Destaque para os picos correspondentes aos períodos aproximados de 6 dias, 24 h e 12 h.....	141
Figura 89: Local de medição das correntes.....	142
Figura 90: Série temporal da componente zonal e meridional das correntes.....	143
Figura 91: Espectro de Energia das Componentes Zonal e Meridional de Corrente. ....	144
Figura 92: Exemplo da grade hidrodinâmica do HYCOM utilizada para forçar o modelo de óleo. .....	148
Figura 93: Campo médio das simulações do HYCOM para o período de verão.....	149
Figura 94: Campo médio das simulações do HYCOM para o período de inverno.....	150
Figura 95: Trajetórias dos derivadores do Projeto MONDO e trajetórias das partículas simuladas a partir dos resultados do HYCOM (painel superior). Mapas de probabilidade de presença das partículas simuladas (painel inferior à esquerda) e obtidos pelos derivadores do Projeto MONDO (painel inferior à direita).....	153
Figura 96: Trajetórias dos derivadores do Projeto mondoCORCOVADO e trajetórias das partículas simuladas a partir dos resultados do HYCOM (painel superior). Mapas de probabilidade de presença das partículas simuladas (painel inferior à esquerda) e obtidos pelos derivadores do Projeto mondoCORCOVADO (painel inferior à direita).....	154
Figura 97: Trajetórias dos derivadores do Projeto mondoOGX Campos e trajetórias das partículas simuladas a partir dos resultados do HYCOM (painel superior). Mapas de probabilidade de presença das partículas simuladas (painel inferior à esquerda) e obtidos pelos derivadores do Projeto mondoOGX Campos (painel inferior à direita).....	155
Figura 98: Trajetórias dos derivadores do Projeto mondoOGX Santos e trajetórias das partículas simuladas a partir dos resultados do HYCOM (painel superior). Mapas de probabilidade de presença das partículas simuladas (painel inferior à esquerda) e obtidos pelos derivadores do Projeto mondoOGX Santos (painel inferior à direita).....	156
Figura 99: Limite norte da isoterma de 20° C a partir de dados do produto OSTIA, do HYCOM e dos resultados de Souza e Robinson (2004). Fonte: Santos <i>et al.</i> (2011). ....	158
Figura 100: Localização do ponto de vazamento, em relação ao Campo de Xerelete (área em verde).....	161

Figura 101: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001). .....	164
Figura 102: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001). .....	172
Figura 103: A grade de habitats utilizada na simulação. ....	178
Figura 104: A grade de batimetria utilizada na simulação. ....	179
Figura 105: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo do ponto de vazamento no Campo de Xerelete. ....	182
Figura 106: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho no ponto mais próximo do Campo de Xerelete. ....	183
Figura 107: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro no ponto mais próximo do Campo de Xerelete. ....	184
Figura 108: Localização dos pontos de grade do NCEP para região de estudo. ....	186
Figura 109: Séries temporais das componentes “u” e “v”, do vento, para a região do Campo de Xerelete, Bacia de Santos, com o número de zeros ascendentes presentes nas séries. ....	188
Figura 110: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilístico. ....	190
Figura 111: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos. ....	191
Figura 112: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	192
Figura 113: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	193
Figura 114: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	194
Figura 115: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	195
Figura 116: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	196
Figura 117: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	197

Figura 118: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias).....	198
Figura 119: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> , no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias).....	199
Figura 120: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> ( <i>blowout</i> ) no período de verão. Simulação de 1.440 horas (60 dias).....	200
Figura 121: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> ( <i>blowout</i> ) no período de verão. Simulação de 1.440 horas (60 dias).....	201
Figura 122: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> ( <i>blowout</i> ) no período de verão. Simulação de 1.440 horas (60 dias).....	202
Figura 123: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para um vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> ( <i>blowout</i> ) no período de verão. Simulação de 1.440 horas (60 dias).....	203
Figura 124: Massa máxima de óleo na costa após as simulações de 60 dias no cenário de verão.....	204
Figura 125: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> ( <i>blowout</i> ) no período de inverno. Simulação de 1.440 horas (60 dias). ....	205
Figura 126: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> ( <i>blowout</i> ) no período de inverno. Simulação de 1.440 horas (60 dias). ....	206
Figura 127: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> ( <i>blowout</i> ) no período de inverno. Simulação de 1.440 horas (60 dias). ....	207
Figura 128: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa, para um vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> ( <i>blowout</i> ) no período de inverno. Simulação de 1.440 horas (60 dias). ....	208
Figura 129: Massa máxima de óleo na costa após as simulações de 60 dias no cenário de inverno. ....	209
Figura 130: Vento utilizado nas simulações de condições meteo-oceanográficas.....	214
Figura 131: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	215
Figura 132: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	216

---

Figura 133: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	217
Figura 134: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> . ....	218
Figura 135: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 206 horas (tempo mínimo de toque) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> . .....	219
Figura 136: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	220
Figura 137: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	221
Figura 138: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	222
Figura 139: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	223
Figura 140: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	224
Figura 141: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	225
Figura 142: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica no período de inverno. Volume de 270.000 m <sup>3</sup> .....	226
Figura 143: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	227
Figura 144: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	228
Figura 145: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	229

Figura 146: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	230
Figura 147: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	231
Figura 148: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	232
Figura 149: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	233
Figura 150: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	234
Figura 151: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	235
Figura 152: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	236
Figura 153: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de verão. Volume de 270.000 m <sup>3</sup> .....	237
Figura 154: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	238
Figura 155: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	239
Figura 156: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	240

---

Figura 157: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	241
Figura 158: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	242
Figura 159: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	243
Figura 160: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	244
Figura 161: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	245
Figura 162: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	246
Figura 163: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m <sup>3</sup> .....	247
Figura 164: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de inverno. Volume de 270.000 m <sup>3</sup> . ....	248

---

## Índice das tabelas

---

Tabela 1: Resumo dos parâmetros analisados, fontes com abrangência temporal e frequência dos dados utilizados. ....	25
Tabela 2: Localização das fontes de dados utilizadas.....	25
Tabela 3: Ocorrência conjunta de intensidade e direção dos ventos no Campo de Xerelete para o período de 1979 a 2011. Fonte: NCEP.....	48
Tabela 4: Estatística mensal dos ventos no Campo de Xerelete para o período de 1979 a 2011. Fonte: NCEP.....	49
Tabela 5: Ocorrência de passagem de sistemas frontais em Cabo Frio entre os anos de 1996 e 2010. Fonte: CPTEC/INPE. ....	51
Tabela 6: Intervalo médio de passagem de dois sistemas frontais consecutivos na Baía de Campos (dias). Fonte de dados: CPTEC/INPE.....	53
Tabela 7: Ocorrência conjunta de direção (°) e intensidade (m/s) dos ventos na Baía de Campos para o período de 1960 a 2011. ....	56
Tabela 8: Estatística mensal dos ventos na Baía de Campos, para o período de 1960 a 2011.....	56
Tabela 9: Sumário dos resultados. ....	58
Tabela 10: Localização das fontes de dados utilizadas.....	61
Tabela 11: Variação da temperatura climatológica superficial. ....	68
Tabela 12: Variação da salinidade climatológica superficial.....	71
Tabela 13: Variação da densidade (kg/m <sup>3</sup> ) climatológica superficial.....	74
Tabela 14: Valores de velocidade e transporte da corrente do Brasil na região da Baía de Campos obtidos da bibliografia. Fonte: Silveira (2007). ....	93
Tabela 15: Estatística básica de correntes para os quatro níveis analisados. ....	99
Tabela 16: Estatística básica de correntes superficiais obtidas dos derivadores.....	107
Tabela 17: Correlação entre altura significativa e direção média.....	111
Tabela 18: Correlação entre altura e direção do <i>swell</i> . ....	112



---

Tabela 19: Correlação entre altura e direção do <i>wind sea</i> . .....	112
Tabela 20: Correlação entre altura e período (T) do <i>swell</i> . .....	114
Tabela 21: Correlação entre altura e período (T) do <i>wind sea</i> . .....	114
Tabela 22: Correlação de direção e período para o <i>swell</i> . .....	117
Tabela 23: Correlação de direção e período para o <i>wind sea</i> . .....	117
Tabela 24: Valores médios e máximos mensais e máximos para altura significativa, <i>swell</i> e <i>wind sea</i> . .....	123
Tabela 25: Constantes harmônicas obtidas pelo modelo global de maré FES-2004 no ponto de latitude 23.5° S e longitude 41.5° W. ....	125
Tabela 26: Valores médios e máximos mensais e máximos para altura significativa. ....	129
Tabela 27: Ocorrência de altura significativa superior a 3 metros por direção. ....	129
Tabela 28: Velocidades máximas (m/s) em superfície obtidas pelos dados do DEPROAS e pelos derivadores do Projeto mondoOGX. ....	130
Tabela 29: Sumário dos resultados. ....	131
Tabela 30: Informações sobre os projetos de monitoramento por derivadores utilizados. ....	152
Tabela 31: Resumo dos cenários de vazamento simulados. ....	162
Tabela 32: Equações de regressão para estimativa dos parâmetros Koc e Kow para diferentes componentes químicos. Fonte: Reed, 2001. ....	174
Tabela 33: Características do óleo informado pela contratante. ....	177
Tabela 34: Características do óleo escolhido no banco de dado do OSCAR. ....	177
Tabela 35: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento derrame de grande volume (270.000 m <sup>3</sup> ), nos cenários de verão e inverno. ....	210
Tabela 36: Resumo dos principais resultados obtidos na modelagem da dispersão de óleo no mar. Campo de Xerelete. ....	249

---

## Equipe técnica

---

**Nome: Bruna Cerrone**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 768292

---

Responsável pela(s) Seção(ões): TODAS

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Felipe Lobo Mendes Soares**

---

Registro no Conselho de Classe:

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 3811578

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Caracterização Meteo-oceanográfica e Modelagem Hidrodinâmica

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Gabriel Vieira de Carvalho**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 5416625

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Caracterização Meteo-oceanográfica e Modelagem Hidrodinâmica

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Henery Ferreira Garção**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 3790998

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem de Dispersão de Óleo

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

---

**Nome: Francisco dos Santos**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 459094

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem de Dispersão de Óleo

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Leilane Passos**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 5546915

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem de Dispersão de Óleo

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Mauricio Fragoso**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental:

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem Hidrodinâmica

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

## 1. Introdução

Esse relatório é parte integrante do Estudo Ambiental de Perfuração – EAP, para a atividade de perfuração marítima no Campo de Xerelete (Blocos BC-2 e BM-C-14), Bacia de Campos, e compõe o “Capítulo II.6 – Modelagem Numérica” do Termo de Referência CGPEG/DILIC/IBAMA nº10/12.

O relatório está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada a Caracterização Meteo-oceanográfica da Bacia de Campos, mais precisamente nas proximidades do Campo de Xerelete; no Capítulo 3 a Modelagem Hidrodinâmica; e no Capítulo 4 a Modelagem de Dispersão de Óleo.

## 2. Caracterização Meteo-oceanográfica

### 2.1. Introdução

A caracterização ambiental de uma determinada região representa uma importante ferramenta de planejamento do uso dos recursos naturais e de otimização de investimentos.

Assim sendo, o presente estudo aborda os aspectos meteorológicos e oceanográficos mais relevantes da Bacia de Campos, mais precisamente, nas proximidades do Campo de Xerelete, de forma a contemplar as solicitações da Coordenação Geral de Petróleo e Gás do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis (CGPEG/IBAMA).

Para tanto, foram pesquisadas informações secundárias de bases regionais e globais, assim como dados coletados *in situ*, analisados através de procedimentos estatísticos.

A Bacia de campos se situa no litoral sudeste do Brasil, limitada ao sul pela cidade de Cabo Frio (RJ) e ao norte pela cidade de Vitória (ES). O Campo de Xerelete encontra-se a aproximadamente 150 Km da cidade de Cabo Frio (Figura 1).

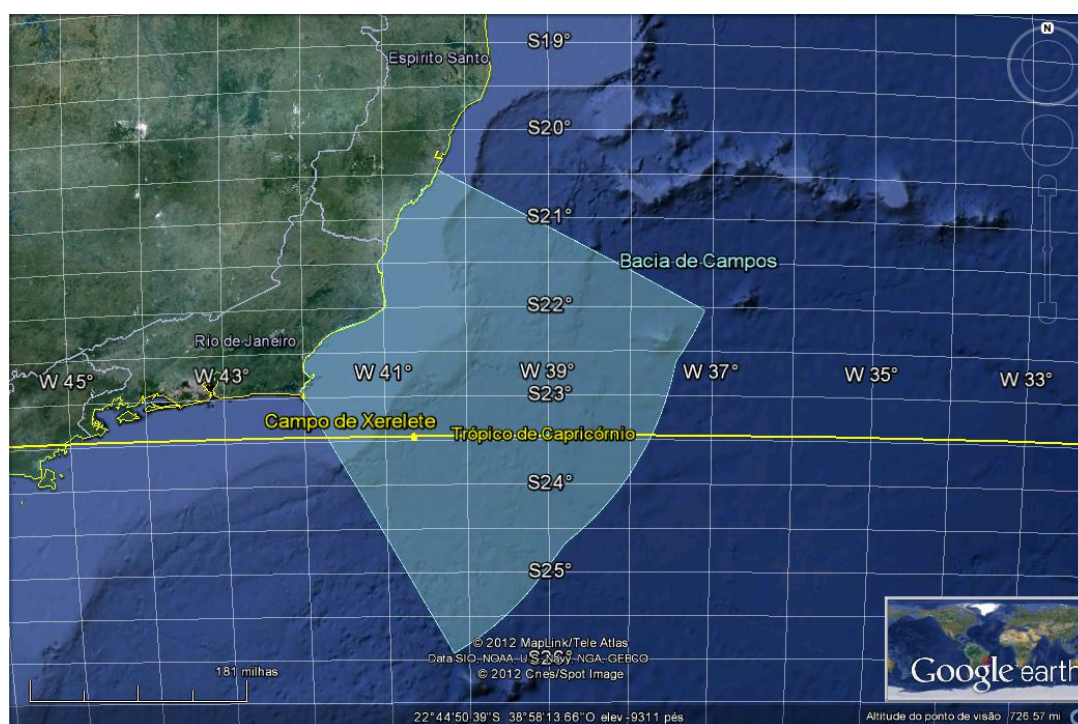


Figura 1: Localização do Campo de Xerelete. A área destacada representa a Bacia de Campos.

## 2.2. Meteorologia

A caracterização meteorológica da região da Bacia de Campos, mais especificamente, da localização do Campo de Xerelete, baseou-se na análise e interpretação dos dados das seguintes fontes:

- » Normais climatológicas de temperatura, precipitação, evaporação, umidade, pressão atmosférica e insolação, obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da estação do Rio de Janeiro-RJ;
- » Dados de temperatura do ar, precipitação, pressão atmosférica e umidade relativa na estação do INMET de Arraial do Cabo (RJ);
- » Dados de ventos, temperatura do ar, precipitação, pressão atmosférica e umidade relativa das Reanálises II do NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research);
- » Dados de frequência de passagem de sistemas frontais do Boletim Climanálise do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional Pesquisas Espaciais (INPE);
- » Dados bibliográficos existentes para a região.

As Normais Climatológicas do INMET fornecem médias mensais de parâmetros meteorológicos de um determinado local por períodos de 30 anos, caracterizando a distribuição dos dados dentro de uma faixa de incidência habitual. Serão apresentadas as normais climatológicas de temperatura, precipitação, evaporação, umidade relativa, pressão atmosférica e insolação, obtidas na estação do Rio de Janeiro situada nas coordenadas 22,88° S e 43,18° W, para os períodos de 1931 a 1960 e 1961 a 1990, perfazendo um total de 60 anos. Esta estação foi escolhida por ser a mais próxima ao Campo de Xerelete.

Para avaliação da variabilidade dos parâmetros meteorológicos em maior frequência amostral, também foram utilizados os dados de temperatura, precipitação, umidade relativa e pressão atmosférica da estação meteorológica do INMET de Arraial do Cabo – RJ, localizada em 22,98° S e 42,02° W. Estes dados foram coletados em intervalos de uma hora, entre janeiro de 2008 e março de 2010. Não estão disponíveis dados de evaporação e insolação para a estação do INMET de Arraial do Cabo, sendo suas caracterizações feitas apenas em função das normais climatológicas descritas anteriormente. Os dados desta estação também foram utilizados na identificação de eventos extremos. Limiares foram definidos para cada variável analisada e valores fora desse limiar foram identificados como extremos. Os limiares escolhidos foram os valores sobre os quais e abaixo dos quais (quando pertinente), se encontram apenas 0,1% das ocorrências (percentil 99%).

Os dados da Reanálise II do NCEP utilizados para as análises pontuais do vento foram obtidos do ponto de grade mais próximo ao Campo de Xerelete, localizado em 23,81° S e 41,25° W com resultados a cada 6 horas, de janeiro de 1979 a dezembro de 2011, totalizando 32 anos e englobando 46.752 dados.

Com relação ao projeto R-2 (NCEP - DOE AMIP-II Reanalysis), trata-se de uma série global atualizada, de 1979 até o presente, que corrige os erros de processamento da Reanálise, utilizando um modelo de previsão e um sistema de assimilação de dados mais robustos. Assim, é gerada uma reanálise mais consistente e recomendada para usuários que eram afetados por alguns erros presentes anteriormente. Dentre estes erros, podemos citar as análises de transientes no Hemisfério Sul; o uso de temperaturas próximas à superfície e cobertura de neve sobre os continentes no Hemisfério Norte durante o inverno; análise da umidade dos solos; análises do balanço de neve; e sensibilidade das análises à mudanças no modelo de assimilação (KALNAY *et al.*, 1996).

Para análise de condições extremas de vento, foram utilizados os dados da Reanálise I do NCEP de 1960 a 2011, novamente com observações de 6 em 6 horas. Os dados da Reanálise I do NCEP foram escolhidos para essa análise devido à maior extensão temporal de dados, fator positivo para análise de eventos extremos.

A variação espacial dos parâmetros meteorológicos (temperatura, precipitação, umidade e pressão atmosférica) na região oceânica da bacia de Campos foi realizada através de médias sazonais elaboradas com dados da Reanálise II do NCEP, para o período compreendido entre janeiro de 1979 e dezembro de 2011, com resolução temporal de 6 horas. Esses dados também foram utilizados na elaboração de séries de normais climatológicas mensais, de cada parâmetro, para o Campo de Xerelete.

Ressalta-se que as duas séries de normais climatológicas apresentadas na caracterização meteorológica (INMET e NCEP) são elaboradas com duas diferentes classes de dados, dados medidos e dados de modelo. Devido aos diferentes erros associados a cada tipo de medição, comparações entre os valores exatos devem ser feitas com ressalvas.

É observada boa correlação na representação dos padrões de variação sazonal entre as duas séries, porém, valores devido a algumas razões.

Para avaliação da frequência de passagem de frentes frias na região, optou-se por apresentar as estatísticas mensais de passagens de sistemas frontais na cidade de Cabo Frio-RJ, para o período compreendido entre janeiro de 1996 e dezembro de 2010, publicadas pelo Boletim Climanalise, do CPTEC/INPE. Esta publicação consiste em boletins de monitoramento e análise climática, disponibilizados no site do CPTEC, que fazem uma análise mensal das ocorrências de

sistemas frontais em estações de superfície no Brasil, separando-as em uma linha de estações costeiras.

As localizações das estações meteorológicas do INMET (Rio de Janeiro, Arraial do Cabo), do CPTEC (Cabo Frio) e da posição dos pontos de grade do NCEP utilizados para as análises pontuais e espaciais são apresentadas na Figura 2. Como as localizações das estações meteorológicas do INMET de Arraial do Cabo e do CPTEC de Cabo Frio são muito próximas, estas foram referenciadas a um mesmo ponto, para facilitar a visualização.

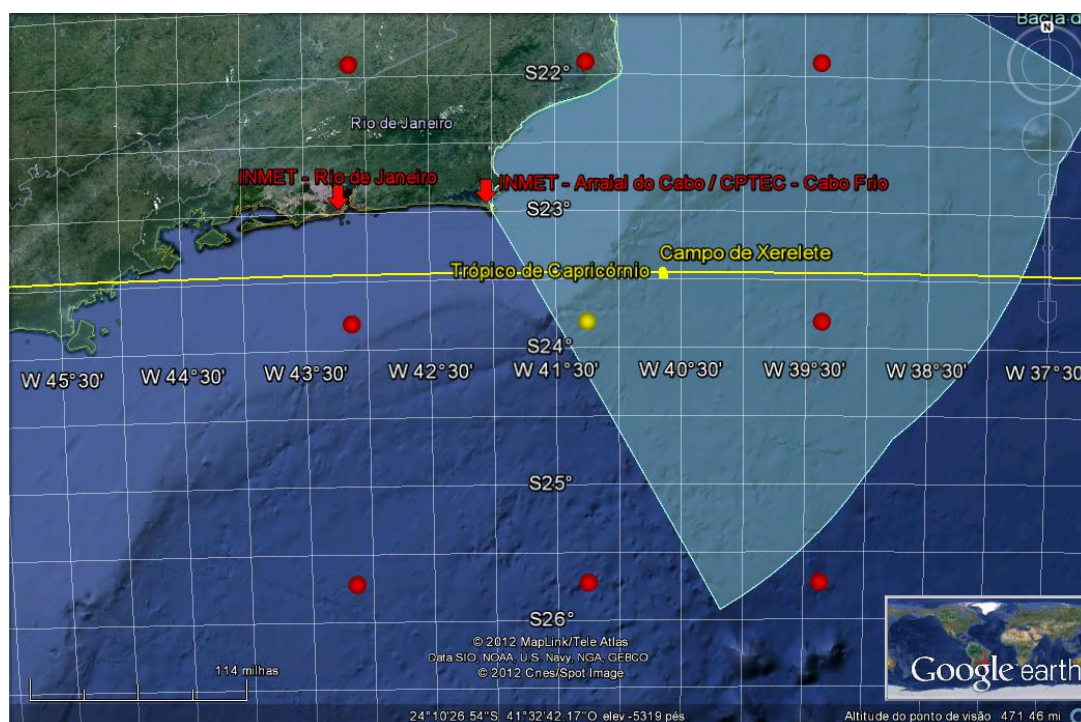


Figura 2: Localização das estações meteorológicas do INMET do Rio de Janeiro/RJ e Arraial do Cabo, da estação meteorológica do CPTEC de Cabo Frio, dos pontos de grade do NCEP utilizados para análises pontuais (ponto amarelo) e espaciais do regime de ventos e demais parâmetros meteorológicos analisados (pontos vermelhos).



A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados utilizados para os diferentes parâmetros. Na Tabela 2, apresenta-se as fontes de dados utilizados no estudo e suas respectivas localizações.

Tabela 1: Resumo dos parâmetros analisados, fontes com abrangência temporal e frequência dos dados utilizados.

	TA	P	PA	U	E	I	V	SF	
INMET - Rio de Janeiro	Normais climatológicas (médias mensais) nos períodos de 1931 a 1960, e 1961 a 1990;								
INMET – Arraial do Cabo	Dados horários de janeiro de 2008 a março de 2010;								
NCEP/NCAR	Dados a cada 6 horas de janeiro de 1979 a dezembro de 2011;						Dados a cada 6 horas, dados de Jan/79 a Dez/11; Análise de extremos: dados a cada 6 horas no período de Jan/60 a Dez/11		
CPTEC/INPE								Boletim Climanálise - Passagem de frentes frias em Cabo Frio, entre Jan/96 e Dez/10	

Legenda: TA = Temperatura do Ar; P = Precipitação; E = Evaporação; UR = Umidade Relativa; UE = Umidade Específica; PA = Pressão Atmosférica; V = Ventos; I = Insolação; SF = Sistemas Frontais.

Tabela 2: Localização das fontes de dados utilizadas.

Fontes	Coordenadas		Parâmetros
	Latitude	Longitude	
INMET - Rio de Janeiro	22,88° S	43,18° W	TA, P, E, UR, PA e I
INMET – Arraial do Cabo	22,98° S	42,02° W	TA, P, UR e PA
NCEP-NCAR (área)	20,5°S – 25,5°S	37°W - 45°W	TA, P, UR e PA
NCEP-NCAR (pontual)	23,81° S	41,25° W	TA, P, UR, PA, V
Climanálise/CPTEC/INPE	22,92° S	42,07° W	SF

Legenda: TA = Temperatura do Ar; P = Precipitação; E = Evaporação; UR = Umidade Relativa; UE = Umidade Específica; PA = Pressão Atmosférica; V = Ventos; I = Insolação; SF = Sistemas Frontais.

### 2.2.1. Temperatura

A temperatura média para a estação do Rio de Janeiro (Figura 3), para os períodos de 1931 a 1960 e 1961 a 1990, apresentou um padrão sazonal bem definido. Como é esperado, os meses mais quentes são os de verão, e os mais frios, os de inverno, com amplitude térmica de aproximadamente 5°C. Nos dois períodos o mês de fevereiro é, em média, o mais quente, aproximadamente 26,5°C e 26,0°C, e julho o mais frio ~21,3°C e ~20,8°C. Os valores médios máximos ocorrem no mês de fevereiro, enquanto os valores médios mínimos são encontrados no mês de julho. Pode-se observar que o período compreendido entre 1961 e 1990 apresenta temperaturas ligeiramente mais elevadas.

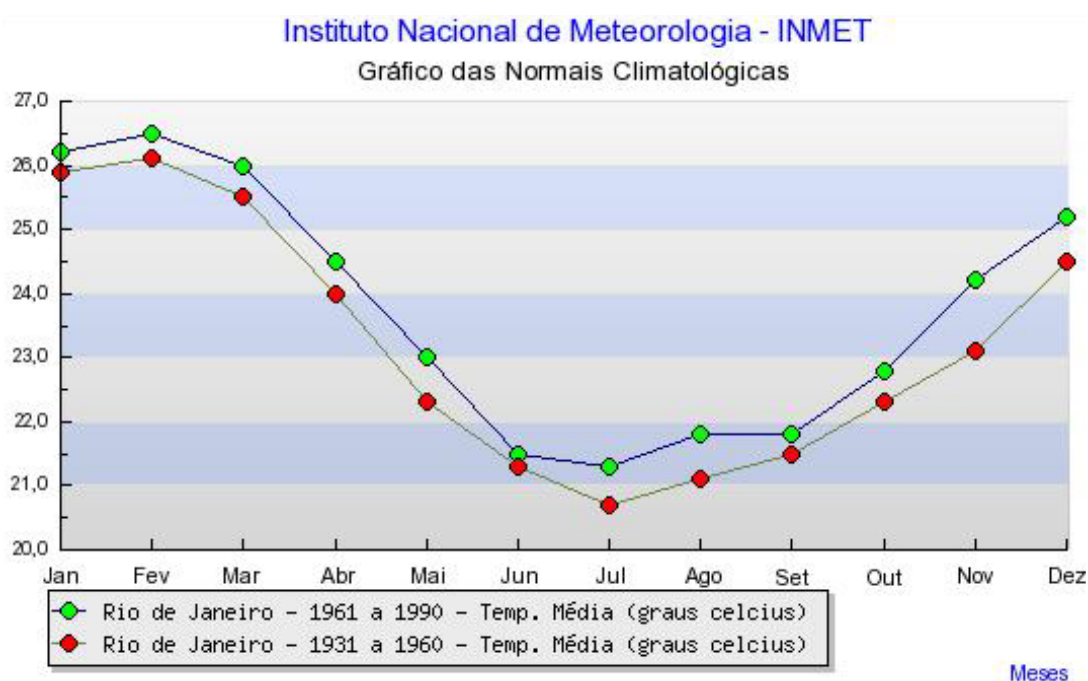


Figura 3 : Temperatura média na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET.

Para avaliação das variações espaciais e sazonais da temperatura do ar na região do Campo de Xerelete, são apresentadas, na Figura 4 e na Figura 5, médias sazonais dos dados de temperatura do ar a 2 metros de altitude, obtidos a partir das Reanálises II do NCEP.

Como poderá ser verificado nas figuras a seguir, tanto para o período de verão – janeiro a março – (Figura 4) quanto para o período de inverno – junho a agosto – (Figura 5), há um aumento da temperatura em direção ao leste da região analisada. Durante o verão, a região do Campo de Xerelete se encontra com temperaturas médias próximas a 26°C, já no inverno, com aproximadamente 22° C.

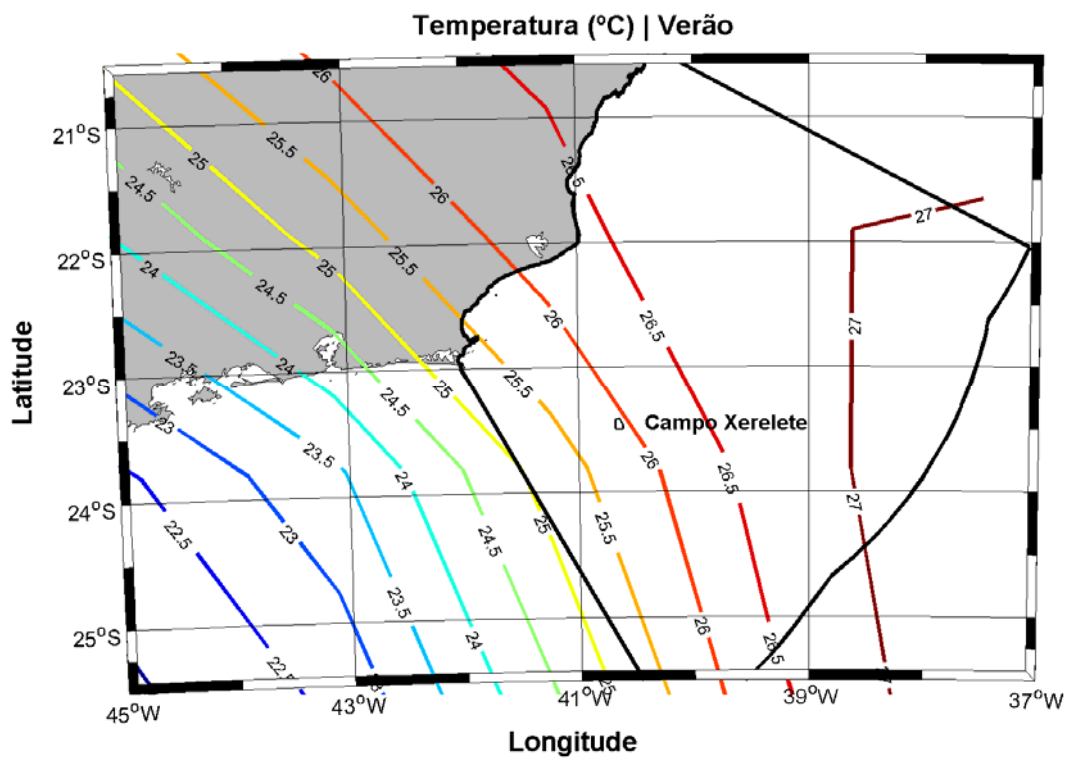


Figura 4: Temperatura média do ar (°C) na região do Campo de Xerelete, no período de verão (janeiro a março).

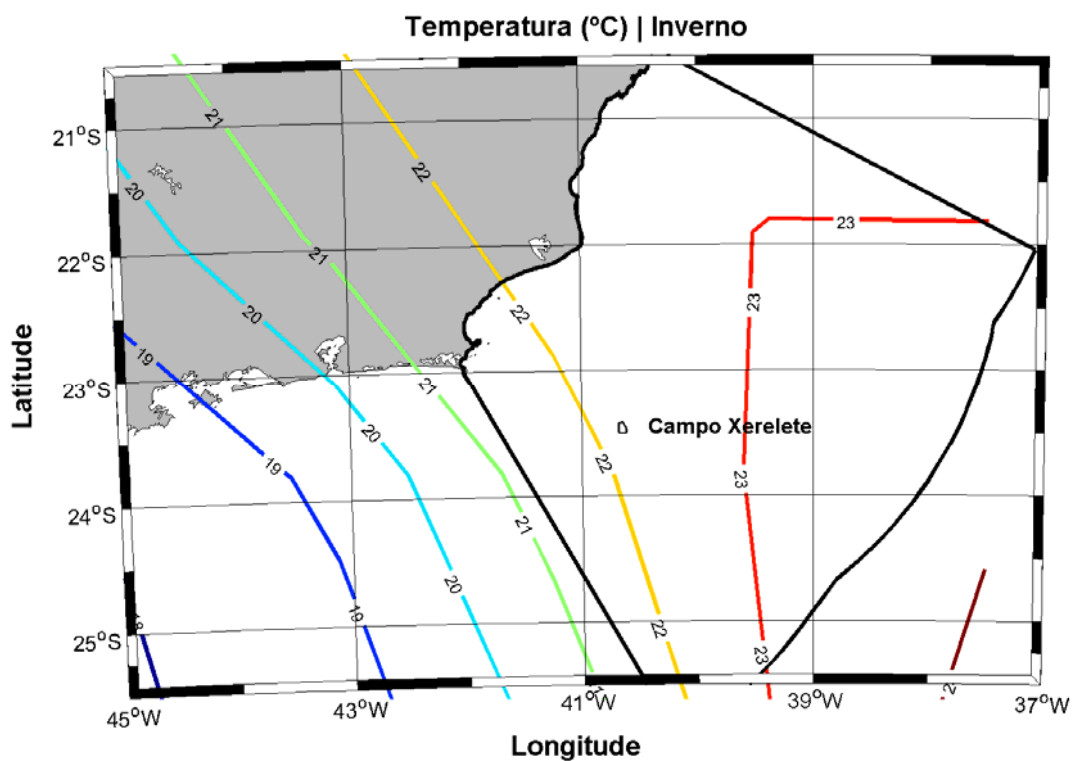


Figura 5: Temperatura média do ar (°C) na região do Campo de Xerelete no período de inverno (junho a agosto).

A seguir, na Figura 6, as temperaturas médias mensais sobre o Campo de Xerelete, elaboradas com os dados do NCEP, são apresentadas.

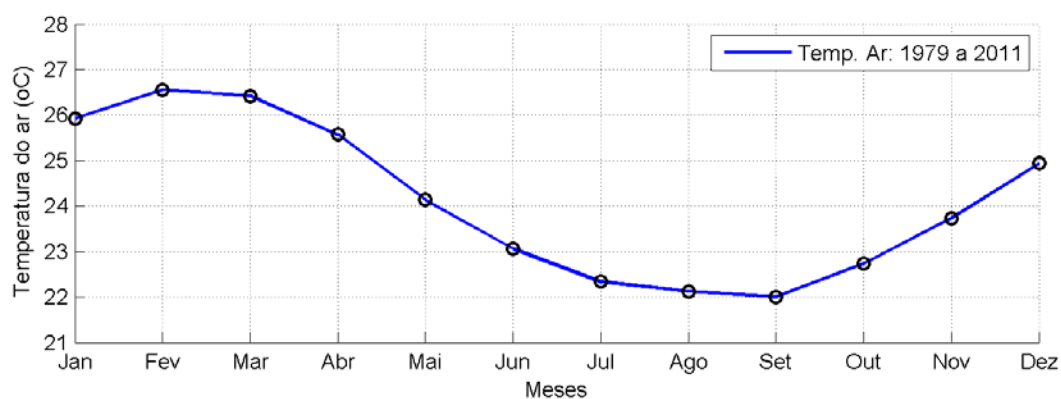


Figura 6: Temperatura média do ar sobre o Campo de Xerelete. Elaborado com dados de 1979 a 2011 da Reanálise II do NCEP.

Observa-se novamente a sazonalidade deste parâmetro. A temperatura média máxima ocorre no mês de fevereiro e a mínima no mês de setembro e a amplitude anual de temperatura do ar é de aproximadamente  $4,5^{\circ}\text{C}$ . Lima (2012), em estudo comparativo entre os dados observados de temperatura do ar do INMET e os dados da reanálise do NCEP, constatou que este apresenta subestimação de  $2^{\circ}\text{C}$  em média para o território brasileiro, diminuindo o erro em regiões próximas a costa. Porém, o padrão sazonal apresentado pelas normais climatológicas do INMET está de acordo com as normais elaboradas com os dados do NCEP, para este parâmetro.

Para análise da variabilidade da temperatura na região próxima ao Campo de Xerelete em maior frequência amostral, na Figura 7 é apresentada toda a série temporal dos dados da estação do INMET de Arraial do Cabo, no período de janeiro de 2008 a março de 2010.

Para verificação de eventos extremos, foram adotados dois limites em torno da média ( $23,31^{\circ}\text{C}$ ), um inferior ( $16,40^{\circ}\text{C}$ ) e outro superior ( $30,10^{\circ}\text{C}$ ) que correspondem a 0,2% do número total de observações, metade ultrapassando o limite superior e a outra metade a inferior.

Como esperado, os dados apresentam tanto variações de alta frequência, da ordem de 1 dia, provocadas pelo aquecimento solar diário, como as variações de mais baixa frequência (período de 1 ano), associada aos ciclos sazonais (verão e inverno).

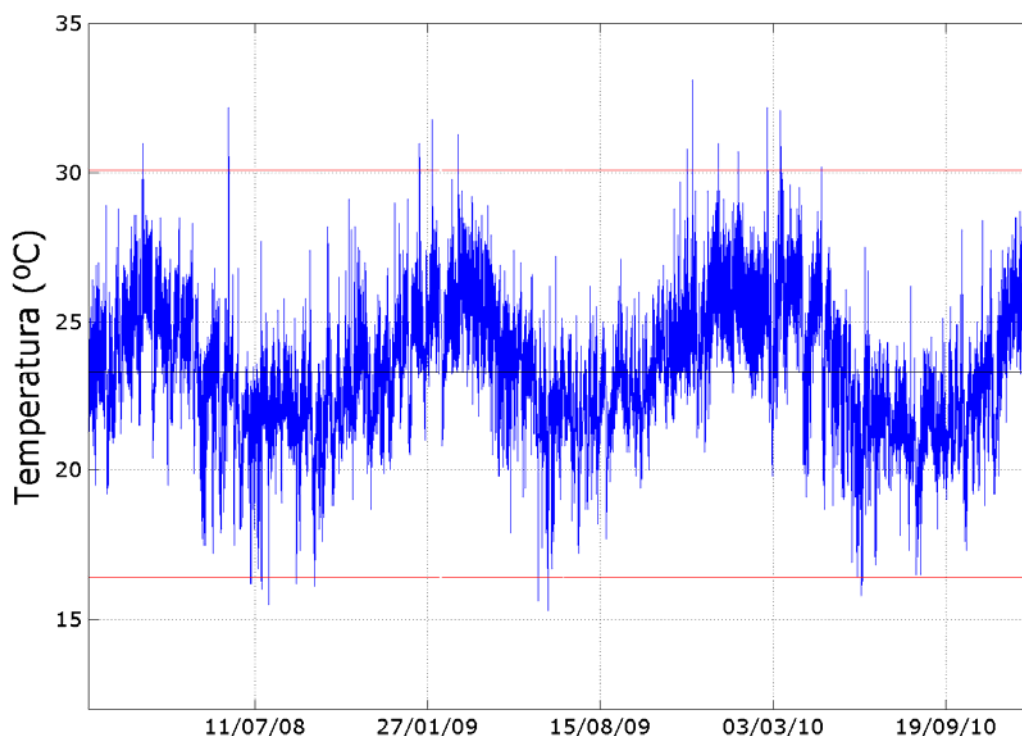


Figura 7: Série temporal de temperatura do ar na estação de Arraial do Cabo – RJ, para o período entre janeiro de 2008 e dezembro de 2010. A linha central (preta) representa a média de temperatura, e as linhas vermelhas correspondem ao percentil 99% superior e inferior.

Do total de 25.270 observações de temperatura, 25 excederam o limite superior, com o mês de fevereiro apresentando o maior número de eventos extremos (5 ocorrências). Das temperaturas que ultrapassaram o limite inferior, o mês de junho foi o que apresentou a maior quantidade de eventos extremos (15 ocorrências).

A série temporal exibe um caráter sazonal bem definido (Figura 7). É sempre bom atentar aos pontos extremos e variações fora da média, já que a região de estudo sofre Influência de fenômenos climáticos de longa escala.

Graficamente pela Figura 7 podemos observar que no final do inverno e início da primavera de 2008 as temperaturas foram mais altas que a média habitual para essas datas (21,39°C). Isso se justifica por um enfraquecimento do fenômeno La Niña simultaneamente com o início da evolução da fase quente do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Nessa mesma época podemos observar uma predominância de anomalias positivas de pressão ao nível do mar (Figura 23), consistente com a menor atividade baroclínica sobre a América do Sul (INFOCLIMA - CPTEC/INPE).

## 2.2.2. Precipitação

Em regiões tropicais, a precipitação reflete as características e comportamentos de outros parâmetros, tais como temperatura, umidade relativa e regime de vento. Para a estação do Rio de Janeiro (Figura 8), os valores médios de precipitação apresentam uma sazonalidade bem marcada, onde são observadas maiores precipitações no verão, e menores no período de inverno. Para a série mais recente (1961 a 1990), o mês com maior taxa de precipitação é o mês de dezembro, com precipitação de aproximadamente 170mm na estação do Rio de Janeiro. Agosto aparece como o mês com menor precipitação, aproximadamente 50mm).

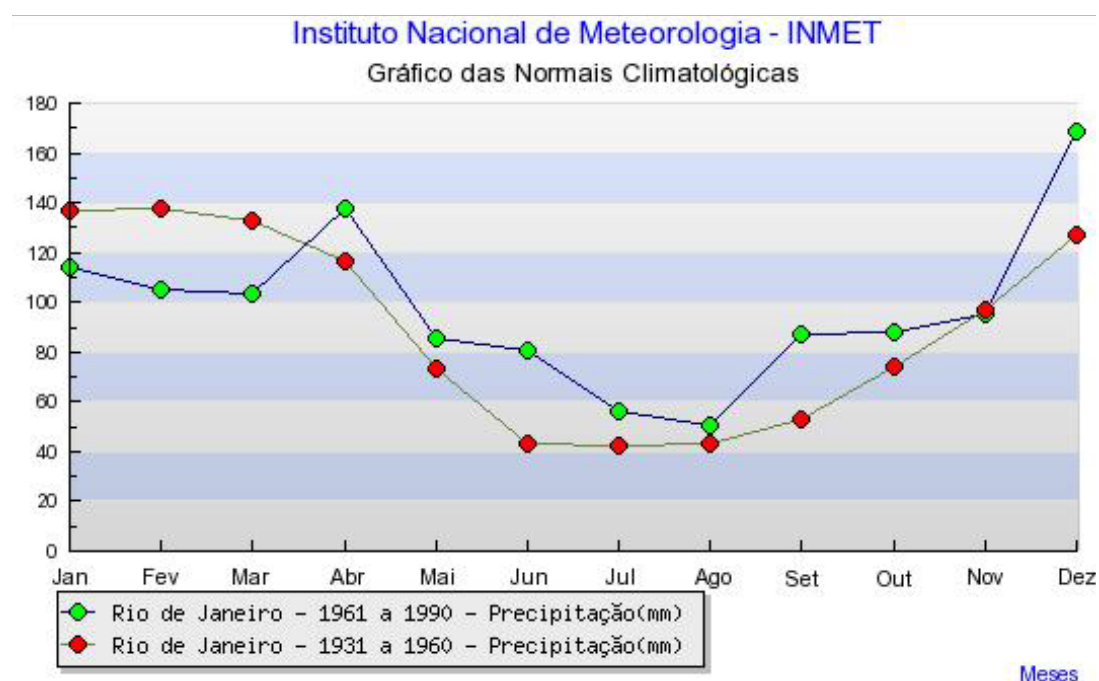


Figura 8: Precipitação na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET.

Para avaliação das variações espaciais e sazonais da precipitação na região do Campo de Xerelete, são apresentadas na Figura 9 e na Figura 10, médias sazonais dos dados de precipitação obtidos a partir das Reanálises II do NCEP. Nas duas situações médias, há um aumento da precipitação em direção a oeste da região analisada. Durante o verão a taxa de precipitação é mais elevada. Ressalta-se que 1mm corresponde a 1 Kg/m<sup>2</sup>.

A precipitação na região do Campo de Xerelete é próxima de 170 kg/m<sup>2</sup> no período de verão – janeiro a março – e cerca de 60 kg/m<sup>2</sup> no período de inverno – junho a agosto.

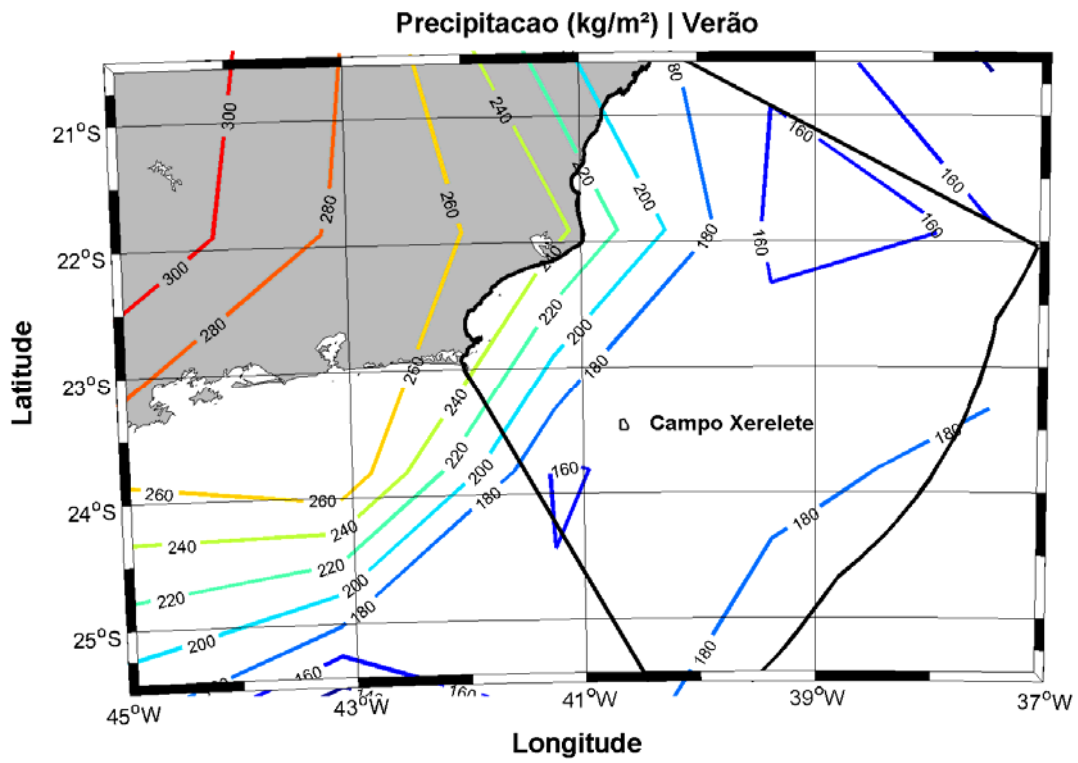


Figura 9: Precipitação (Kg/m<sup>2</sup>) na região do Campo de Xerelete no período de verão (janeiro a março).



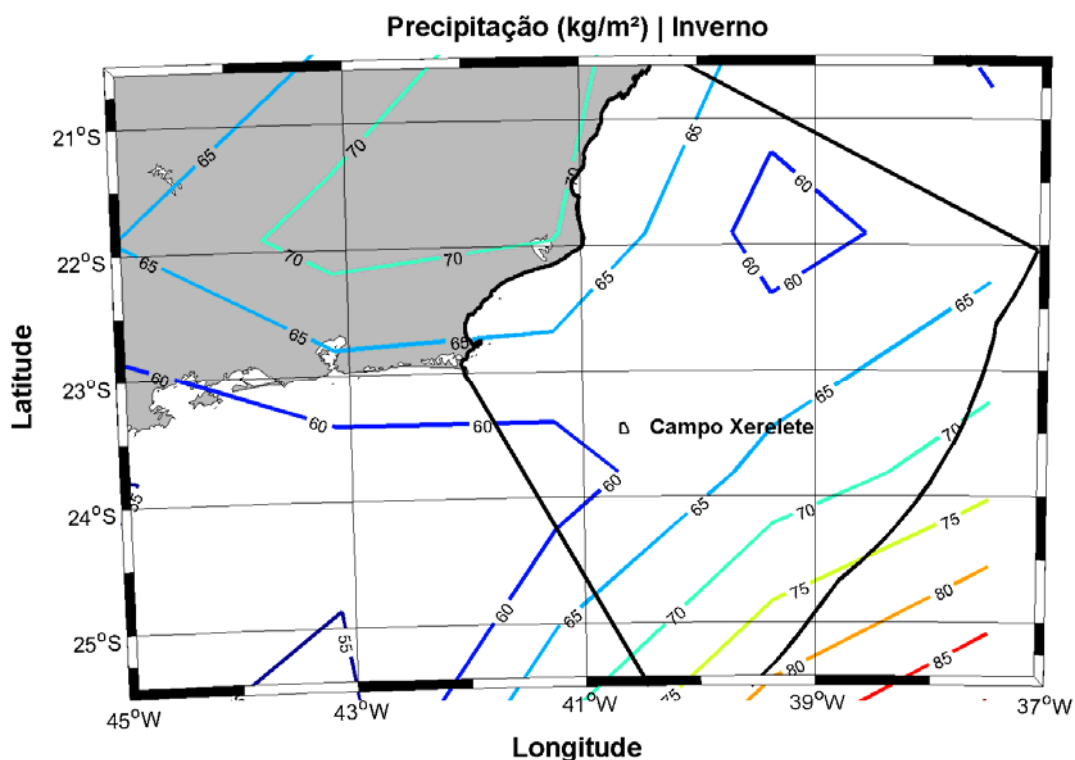


Figura 10: Precipitação (Kg/m<sup>2</sup>) na região do Campo de Xerelete no período de inverno (junho a agosto).

A seguir, na Figura 11, é apresentada a precipitação média mensal especificamente sobre o Campo de Xerelete, elaborada a partir dos dados da Reanálise II do NCEP utilizados nas análises espaciais apresentadas acima.

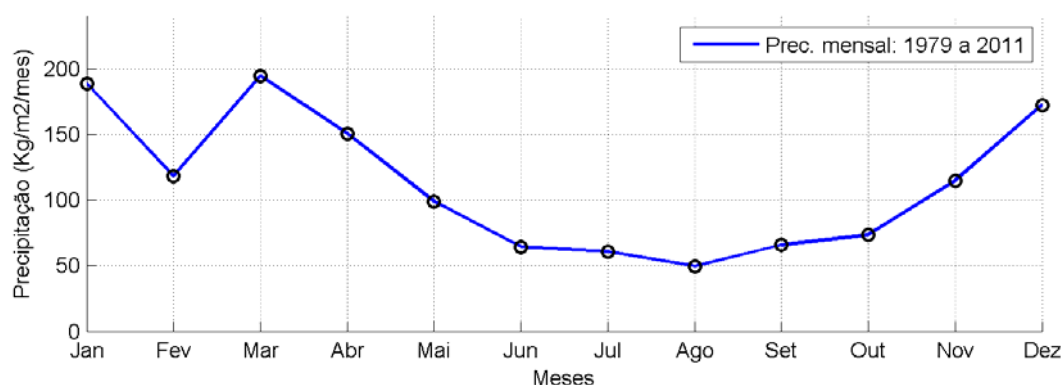


Figura 11: Precipitação média mensal sobre o Campo de Xerelete. Elaborado com dados de 1979 a 2011 da Reanálise II do NCEP.

Segundo a análise do gráfico acima, a precipitação máxima anual ocorre no mês de março e a mínima no mês de agosto, apresentando uma amplitude de aproximadamente 150 Kg/m<sup>2</sup>. Em estudo comparativo entre os dados de precipitação das estações meteorológicas do INMET e os dados de precipitação das reanálises do NCEP, Lima (2012) constata superestimação dos valores deste último de 2mm em média. Contudo, o padrão sazonal apresentado pelas normais climatológicas do INMET está de acordo com as normais elaboradas com os dados do NCEP, para este parâmetro.

Para análise da precipitação em maior frequência amostral na região próxima ao Campo de Xerelete, na Figura 12 são apresentados os dados da estação do INMET de Arraial do Cabo, no período de janeiro de 2008 a março de 2010. A linha vermelha indicada no gráfico representa o limite de precipitação de 13,80mm, sobre o qual, apenas 0,1% das ocorrências têm valor superior.

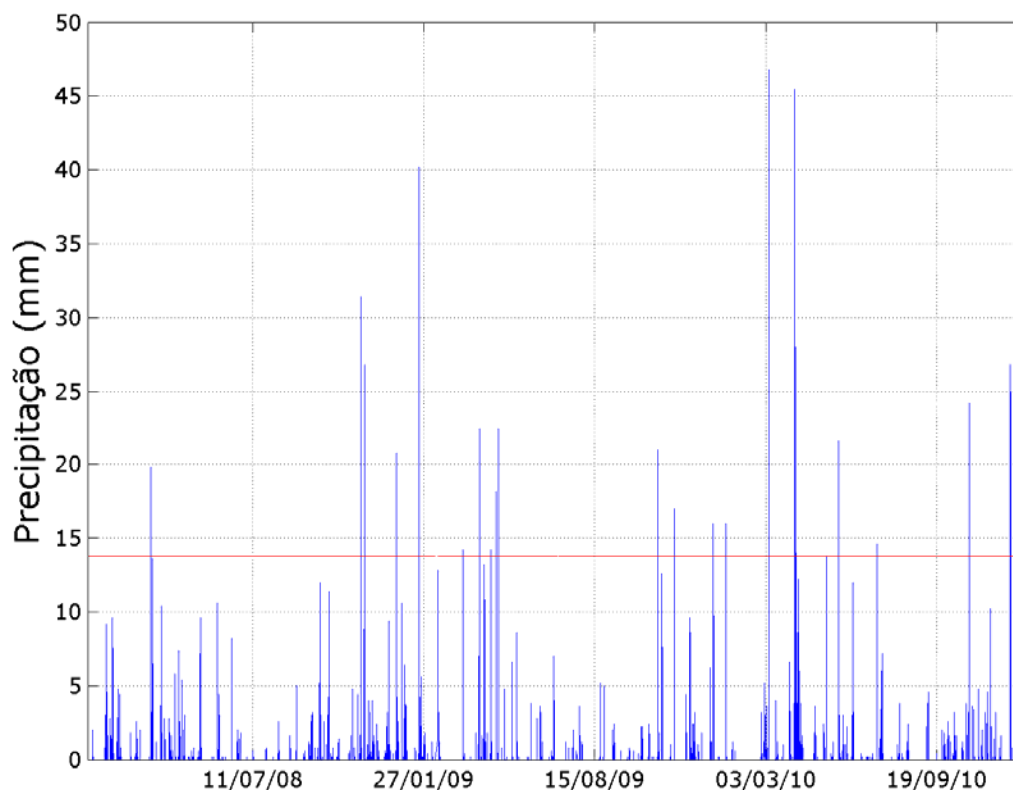


Figura 12: Série temporal de precipitação na estação de Arraial do Cabo – RJ, para o período entre janeiro de 2008 e dezembro de 2010. A linha vermelha indica o percentil 99%.

O gráfico indica um máximo de precipitação de ~45mm ocorrendo em março de 2010. Do total de eventos extremos ocorridos, o mês de abril apresentou maior número de ocorrências(6).

Nesta análise (Figura 12), observamos uma grande extrapolação dos níveis precipitados entre dezembro de 2009 e março de 2010. Estas chuvas estiveram associadas principalmente ao aumento da convergência de umidade no setor central do Brasil, reforçada pela formação de um centro de baixa pressão adjacente à costa e pela configuração de vórtices ciclônicos na média e alta troposfera (INFOCLIMA - CPTEC/INPE).

### 2.2.3. Evaporação

A evaporação apresenta menores valores no período de outono/inverno e maiores valores no período de primavera/verão (Figura 13). O máximo de evaporação ocorreu em janeiro, 112mm e 100 mm, e o mínimo em junho, 84mm e 75mm, para os períodos de 1961 a 1990 e 1931 a 1960, respectivamente. A evaporação média na estação do Rio de Janeiro apresentou valores mais altos no período de 1961 a 1990.

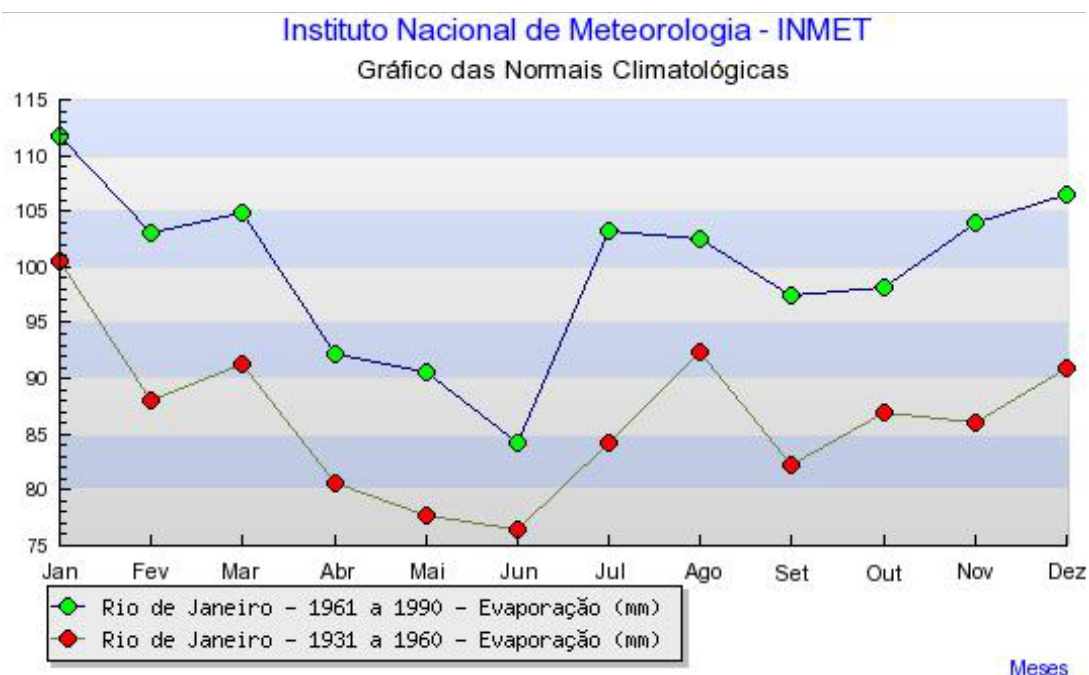


Figura 13: Evaporação na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET.

## 2.2.4. Umidade Relativa

Ao longo dos 60 anos amostrados na estação do Rio de Janeiro (Figura 14), a umidade relativa média variou de 80% a 75%. No período de 1931 a 1960, esta estação apresentou o menor valor de umidade relativa no mês de agosto (75%) e o maior em março (~79%). No período de 1961 a 1990, os valores mínimos (77%) foram registrados nos meses de julho e agosto e o maior valor (80%) ocorreu nos meses de março, abril, maio, outubro e dezembro.

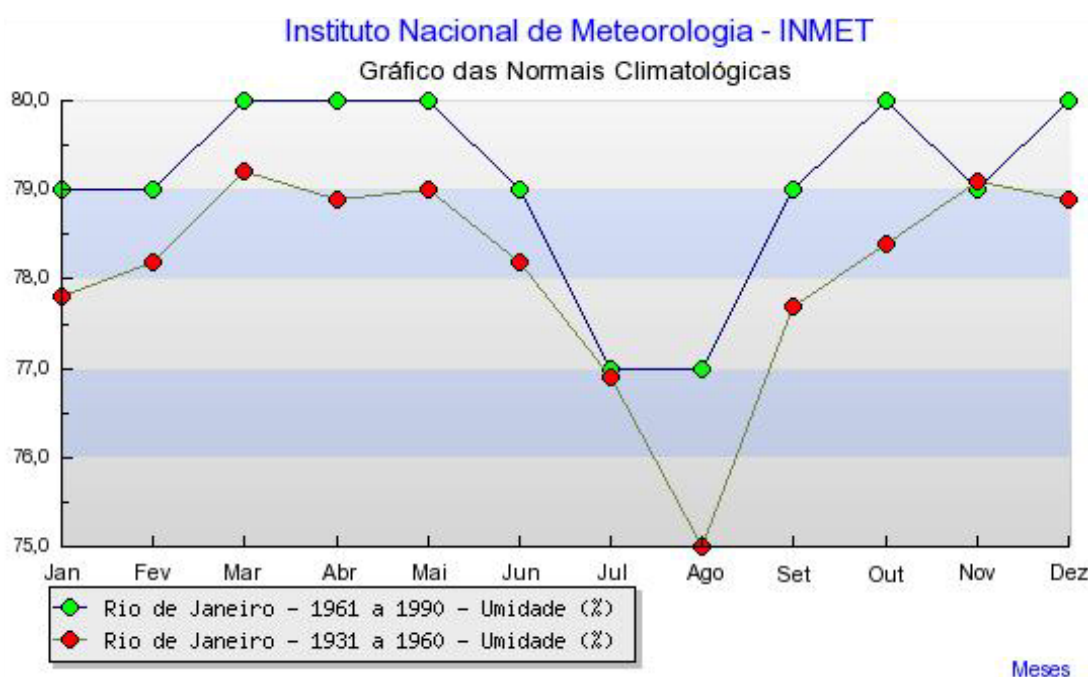


Figura 14: Umidade relativa na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET.

Para avaliação das variações espaciais e sazonais da umidade do ar na região do Campo de Xerelete, são apresentadas, na Figura 15 e na Figura 16, as médias sazonais dos dados de umidade relativa do ar, obtidos a partir das reanálises do NCEP.

Durante o verão – janeiro a março – a umidade relativa aumenta em direção ao sudoeste da região analisada. Na área do Campo de Xerelete, no verão, a umidade relativa se encontra em aproximadamente 82%. No inverno – junho a agosto – o padrão de variabilidade espacial se mantém e nas proximidades do Campo de Xerelete, a umidade relativa encontra-se entre a faixa de 82 e 83%.

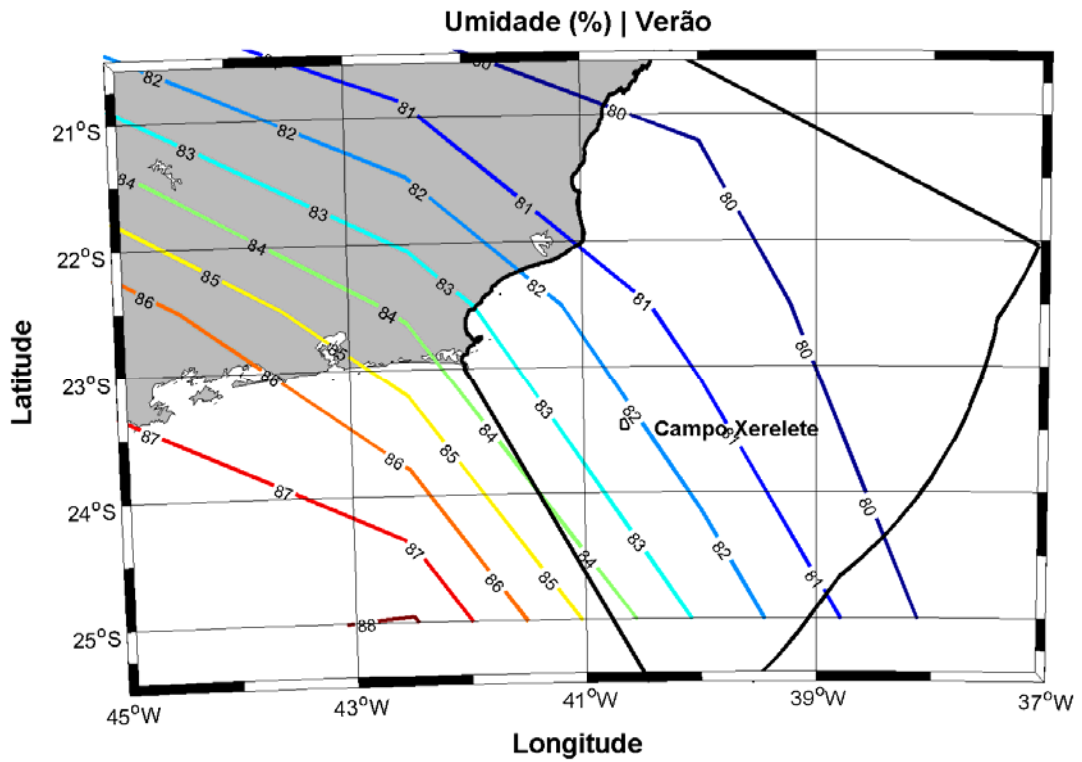


Figura 15: Umidade relativa do ar (%) na região do Campo de Xerelete, no período de verão (janeiro a março).

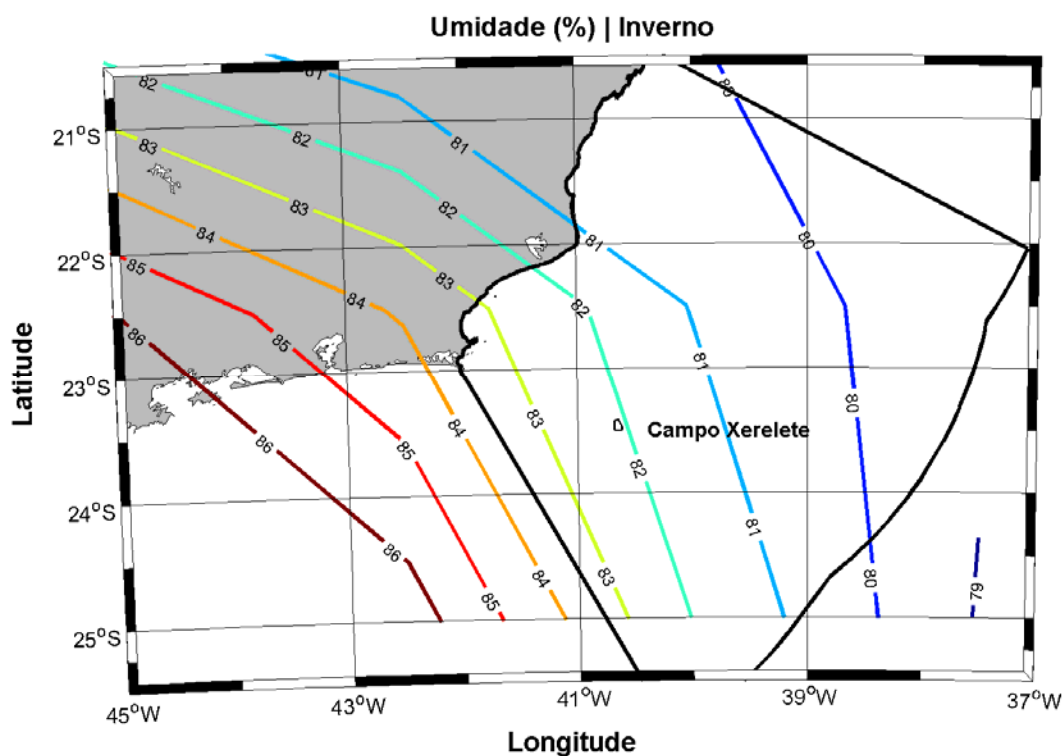


Figura 16: Umidade relativa do ar (%) na região do Campo de Xerelete, no período de inverno (junho a agosto).

A seguir, na Figura 17, são apresentadas as médias mensais da umidade relativa do ar especificamente sobre o Campo de Xerelete, extraídas dos dados da Reanálise II do NCEP.

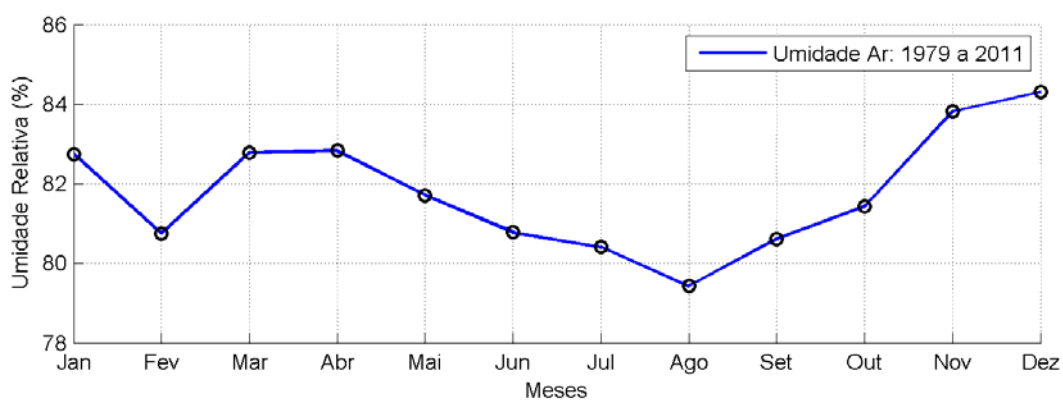


Figura 17: Umidade relativa do ar média sobre o Campo de Xerelete. Elaborado com dados de 1979 a 2011 da Reanálise II do NCEP.

Novamente, o padrão sazonal apresentado pelas normais climatológicas do INMET está de acordo com as normais elaboradas com os dados do NCEP, para este parâmetro. A amplitude anual observada foi de aproximadamente 5%, com um máximo em dezembro e mínimo em agosto.

Na Figura 18 é apresentada toda a série temporal da estação do INMET de Arraial do Cabo, para avaliação da variabilidade da umidade relativa em maior frequência amostral. No gráfico, a linha preta indica a média de umidade (83,66%), enquanto que as linhas vermelhas indicam no gráfico os limites superiores (~96%) e inferiores (~50%) para avaliação de eventos extremos.

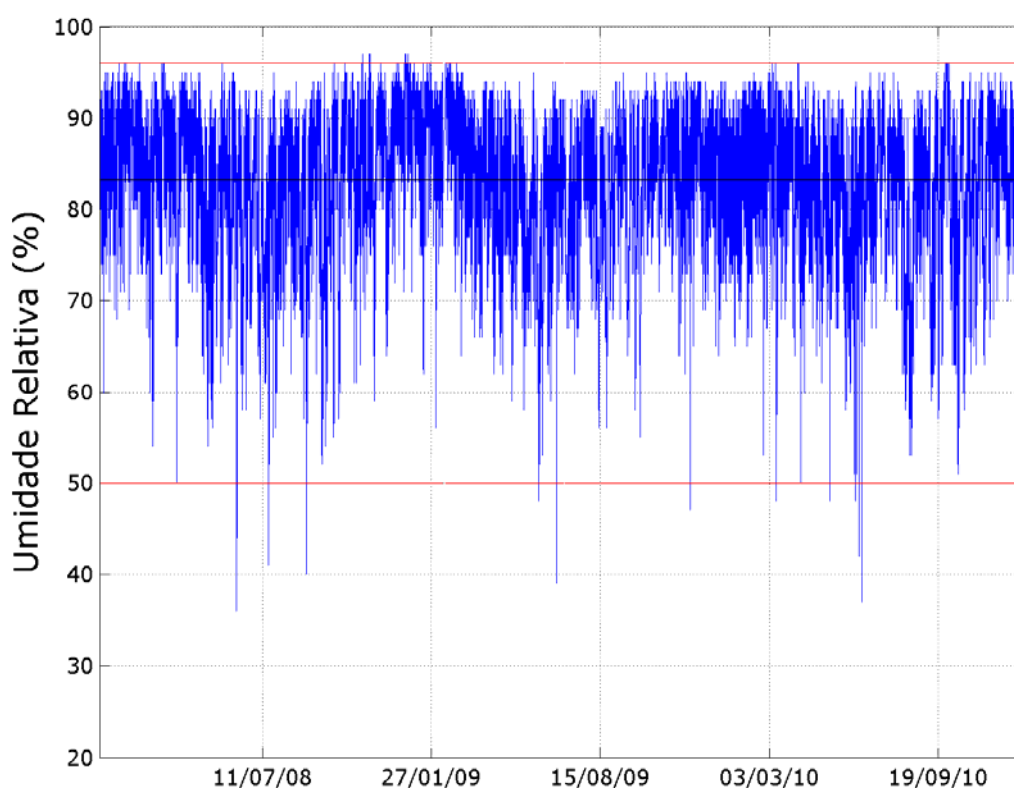


Figura 18: : Série temporal de umidade relativa do ar na estação de Arraial do Cabo - RJ, para o período entre janeiro de 2008 e março de 2010. A linha central (preta) representa a média e as linhas vermelhas correspondem ao percentil 99% superior e inferior.

O gráfico indica um máximo de umidade de ~97%, ocorrendo em 17 datas diferentes, todas variando entre novembro e dezembro de 2008, e um mínimo de ~36% verificado em junho de 2008. A maior parte dos eventos máximos que ultrapassaram o limite superior ocorreram nos meses de dezembro e novembro. Dos 25 eventos extremos que ultrapassaram o limite inferior, o mês de junho foi o que apresentou mais ocorrências (15).

## 2.2.5. Pressão Atmosférica

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) afeta o clima do Brasil oscilando em torno de sua posição média. No verão, o ASAS é encontrado predominantemente mais a sul e a oeste (30°S e 15°W), já no inverno, sua posição é deslocada a norte e a oeste (22°S e 30°W). Essa oscilação E-W decorre pois durante o inverno as temperaturas são menores sobre os continentes e, em consequência, os centros de alta pressão migram para o mesmo. No verão, as temperaturas sobre os continentes são maiores e os centros de alta pressão localizam-se sobre os oceanos. A migração do ASAS para sul resulta na sua intensificação, fazendo com que alcance máximos climatológicos em torno de 1026 hPa nos meses de agosto (HASTENRATH, 1985).

A média da pressão atmosférica, na estação do Rio de Janeiro (Figura 19), apresenta valores máximos no período de inverno, com um pico em julho, e menores valores no verão. Esse padrão de maiores valores no período de inverno coincide com a migração característica do ASAS para noroeste, se aproximando do continente, e aos menores valores de temperatura do ar no período de inverno.

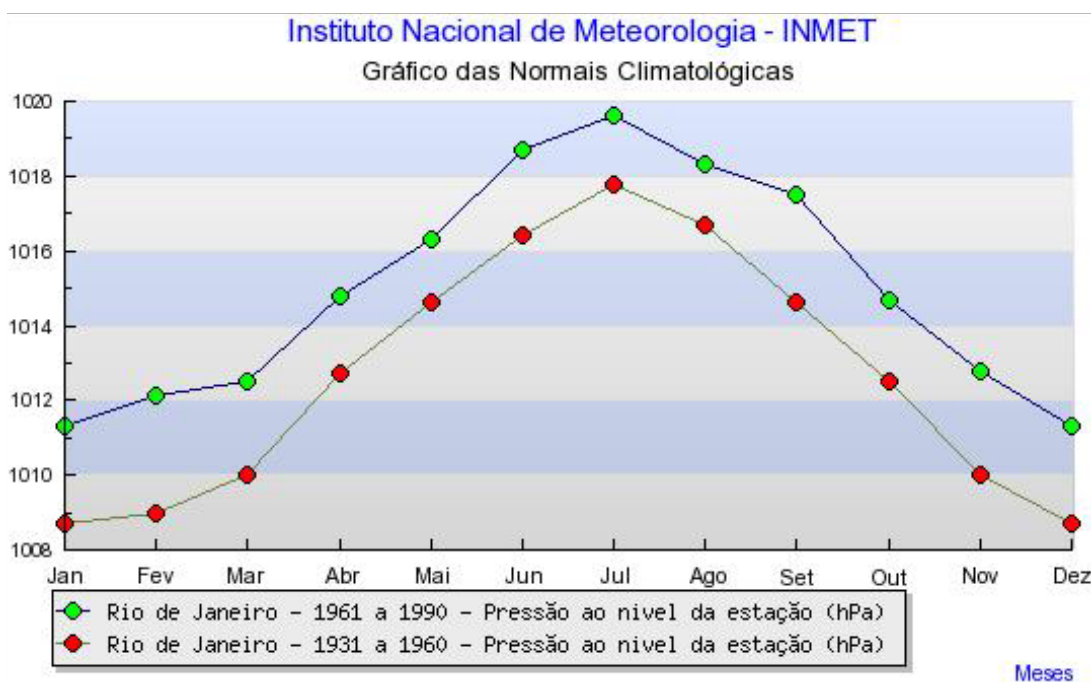


Figura 19: Pressão atmosférica na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET.



Para avaliação das variações espaciais e sazonais da pressão atmosférica na região do Campo de Xerelete, são apresentadas, na Figura 20 e na Figura 21, médias sazonais dos dados de pressão atmosférica, obtidos a partir das reanálises do NCEP.

Como poderá ser verificado nas figuras apresentadas a seguir, tanto para o período de verão – janeiro a março – (Figura 20) quanto para o período de inverno – junho a agosto – (Figura 21), o padrão espacial apresentado pelo parâmetro é semelhante, com um gradiente positivo em direção leste. Sobre o Campo de Xerelete, no verão são encontrados valores de pressão atmosférica de aproximadamente 1012,8 hPa e no inverno são encontrados valores de aproximadamente 1019,8 hPa.

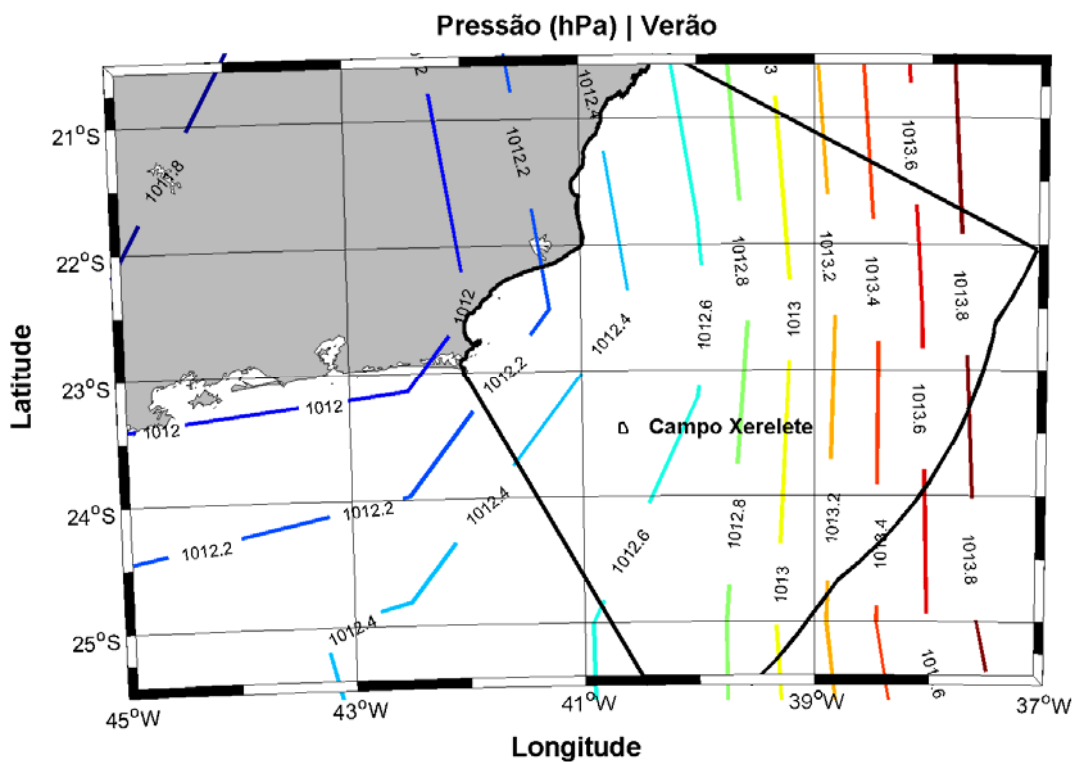


Figura 20: Pressão atmosférica (hPa) na região do Campo de Xerelete, no período de verão (janeiro a março).

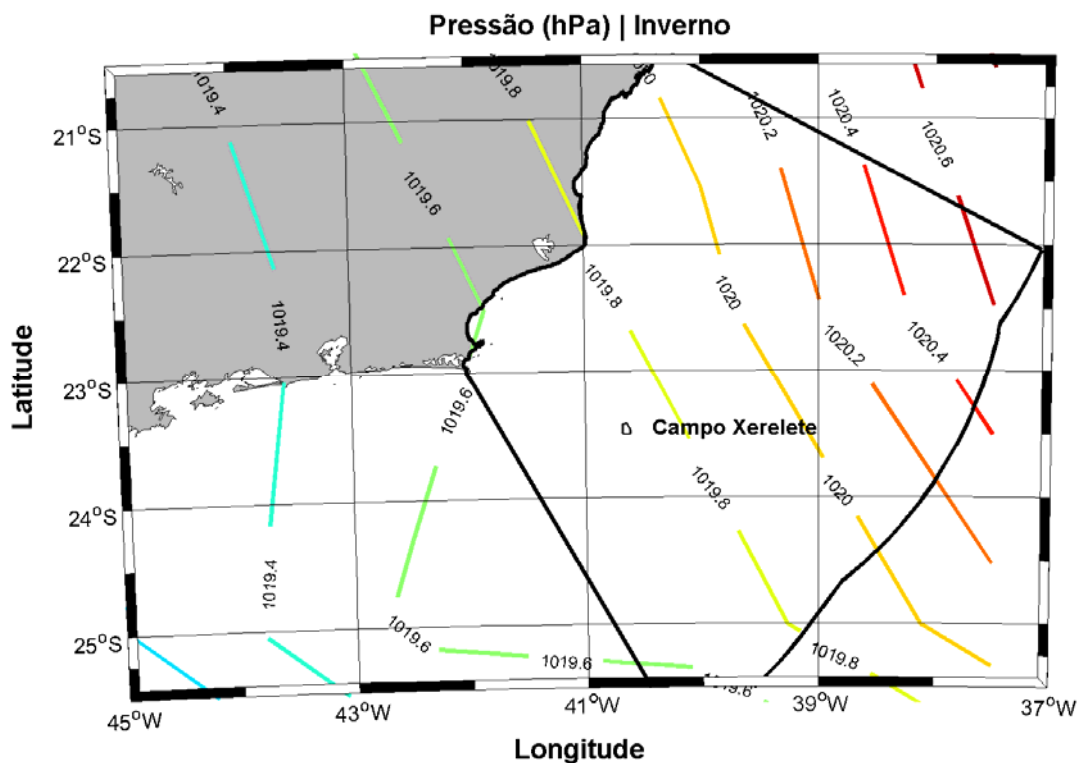


Figura 21: Pressão atmosférica (hPa) na região do Campo de Xerelete, no período de inverno (junho a agosto).

A seguir, na Figura 22, são apresentadas as médias mensais da pressão atmosférica, especificamente sobre o Campo de Xerelete, elaboradas com dados de 1979 a 2011 da Reanálise II do NCEP.

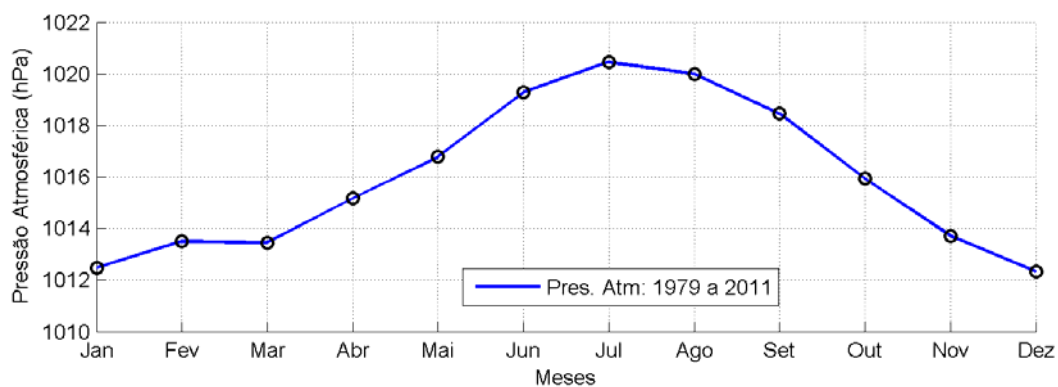


Figura 22: Pressão atmosférica média mensal sobre o Campo de Xerelete. Elaborado com dados de 1979 a 2011 da Reanálise II do NCEP.

O padrão sazonal observado nas normais climatológicas do INMET, para a estação do Rio de Janeiro, pode ser observado nas normais climatológicas elaboradas com os dados do NCEP. O máximo de pressão atmosférica ocorre no mês de Julho e o mínimo nos meses de dezembro e janeiro.

Para avaliação da variabilidade da pressão atmosférica em maior frequência amostral, na Figura 23 é apresentada toda a série temporal deste parâmetro, na estação de Arraial do Cabo.

Para verificação de eventos extremos, foram adotados dois limites em torno da média (~1014,3 hPa), um inferior (1001,2 hPa) e outro superior (~1026,4 hPa), que representam 0,2% do total de observações, metade ultrapassando o limite superior e metade o inferior.

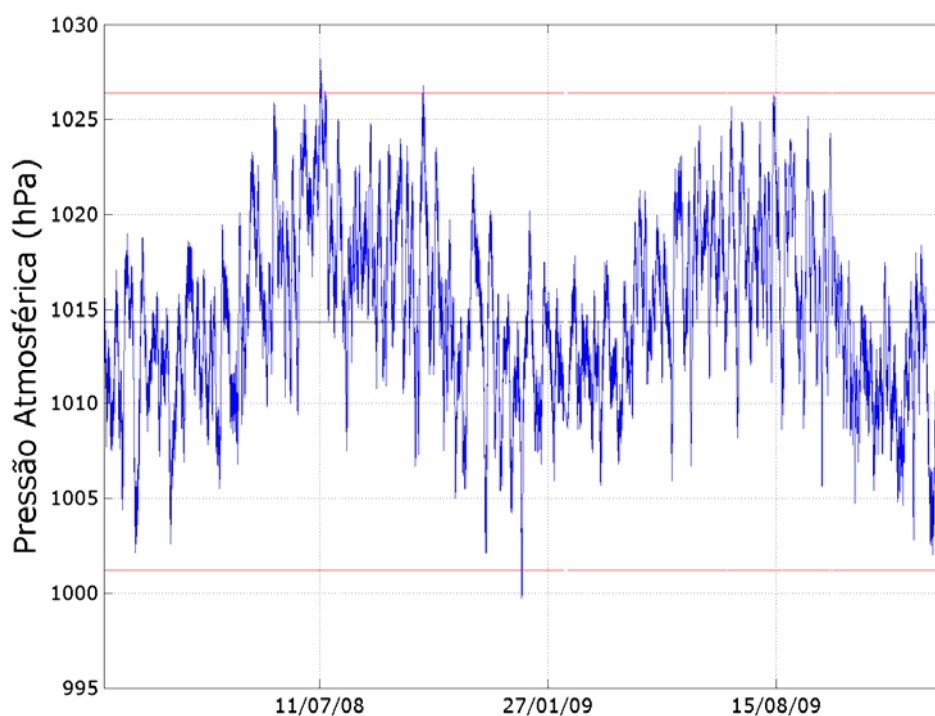


Figura 23: Série temporal de pressão atmosférica na estação de Arraial do Cabo – RJ, para o período entre janeiro de 2008 e janeiro de 2010. A linha central (preta) representa a média e as linhas vermelhas indicam o percentil 99% superior e inferior.

O gráfico indica um máximo de pressão de 1028hPa, ocorrendo em julho de 2008, e um mínimo de 1000 hPa verificado em janeiro de 2009. O mês de julho aparece como o mês com maior número de eventos máximos, enquanto que o meses de janeiro e dezembro apresentaram uma maior ocorrência de eventos mínimos.

### 2.2.6. Insolação

A média de insolação para a estação do Rio de Janeiro (Figura 24), como esperado, apresenta valores máximos para o período de verão. A menor média é registrada no mês de setembro, para ambos os períodos.

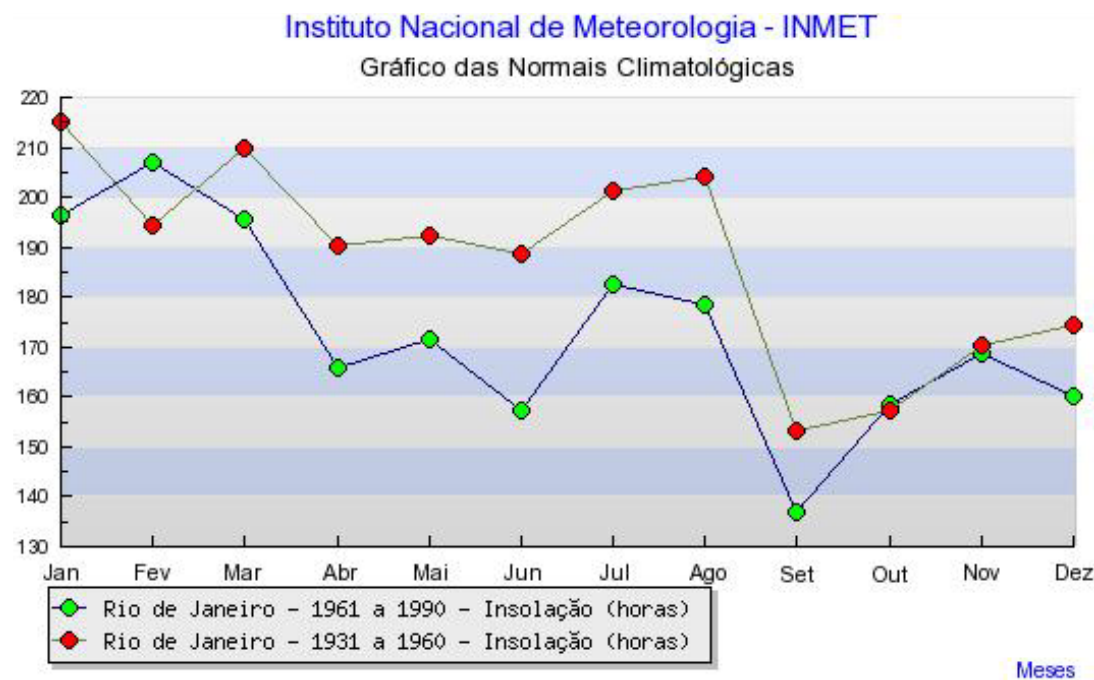


Figura 24: Insolação na estação do Rio de Janeiro. Fonte: INMET.

### 2.2.7. Ventos

A partir dos histogramas direcionais de ventos elaborados com os dados da reanálise do NCEP, verifica-se que na região da Bacia de Campos, em média, não há grande variação espacial nos campos de ventos, como demonstra a Figura 25. A situação típica na região, é marcada por ventos com direção predominante de norte e nordeste. Esse regime, entretanto é perturbado por eventos transientes associados a sistemas frontais, onde predominam os ventos de direção sul, variando de sudeste a sudoeste, nessa ordem.

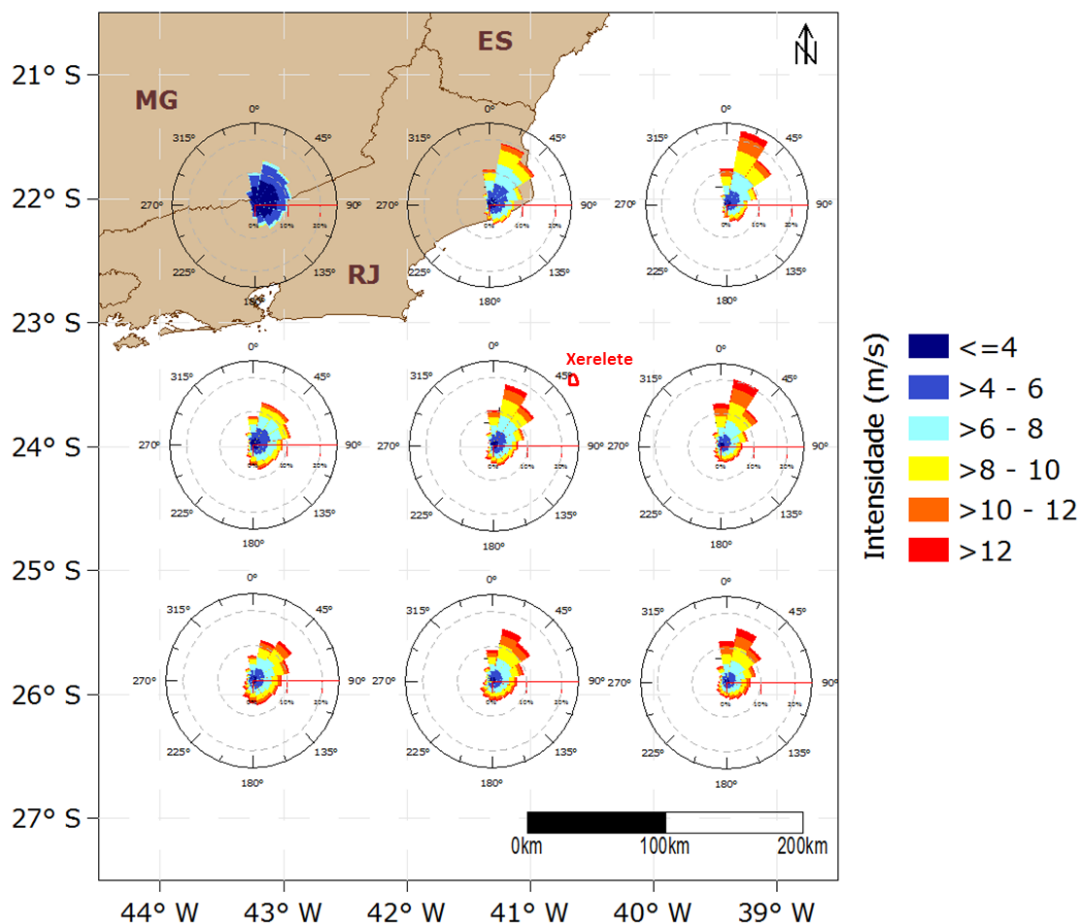


Figura 25: Histograma direcional dos ventos na região do entorno do Campo de Xerelete. Dados de 1979 a 2011. Fonte: NCEP.

Na Figura 26 e na Figura 27, são apresentadas as rosas mensais dos ventos para o ponto de grade do NCEP mais próximo ao Campo de Xerelete.

A análise dos dados de vento obtidos a partir das reanálises II do NCEP demonstra que o período compreendido entre abril e julho, nesta região, é marcado pela predominância de ventos de direção Nordeste, porém com grande incidência de ventos de direção Sul. O período que vai de agosto a março, apresenta dominância de ventos cuja direção varia de Norte a Nordeste.

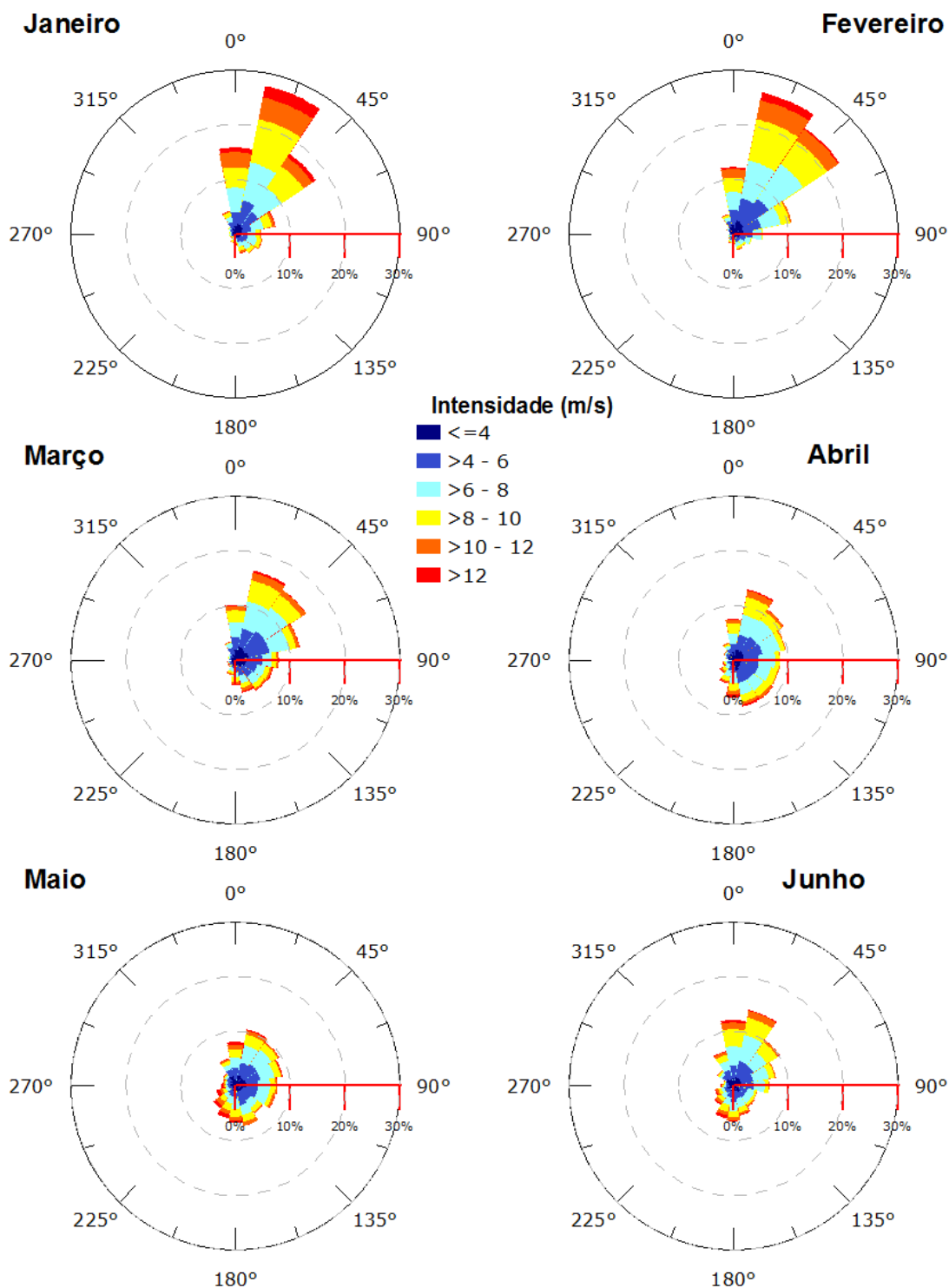


Figura 26: Rosa dos Ventos (m/s) para os meses de janeiro a junho. Figura gerada com dados do NCEP.

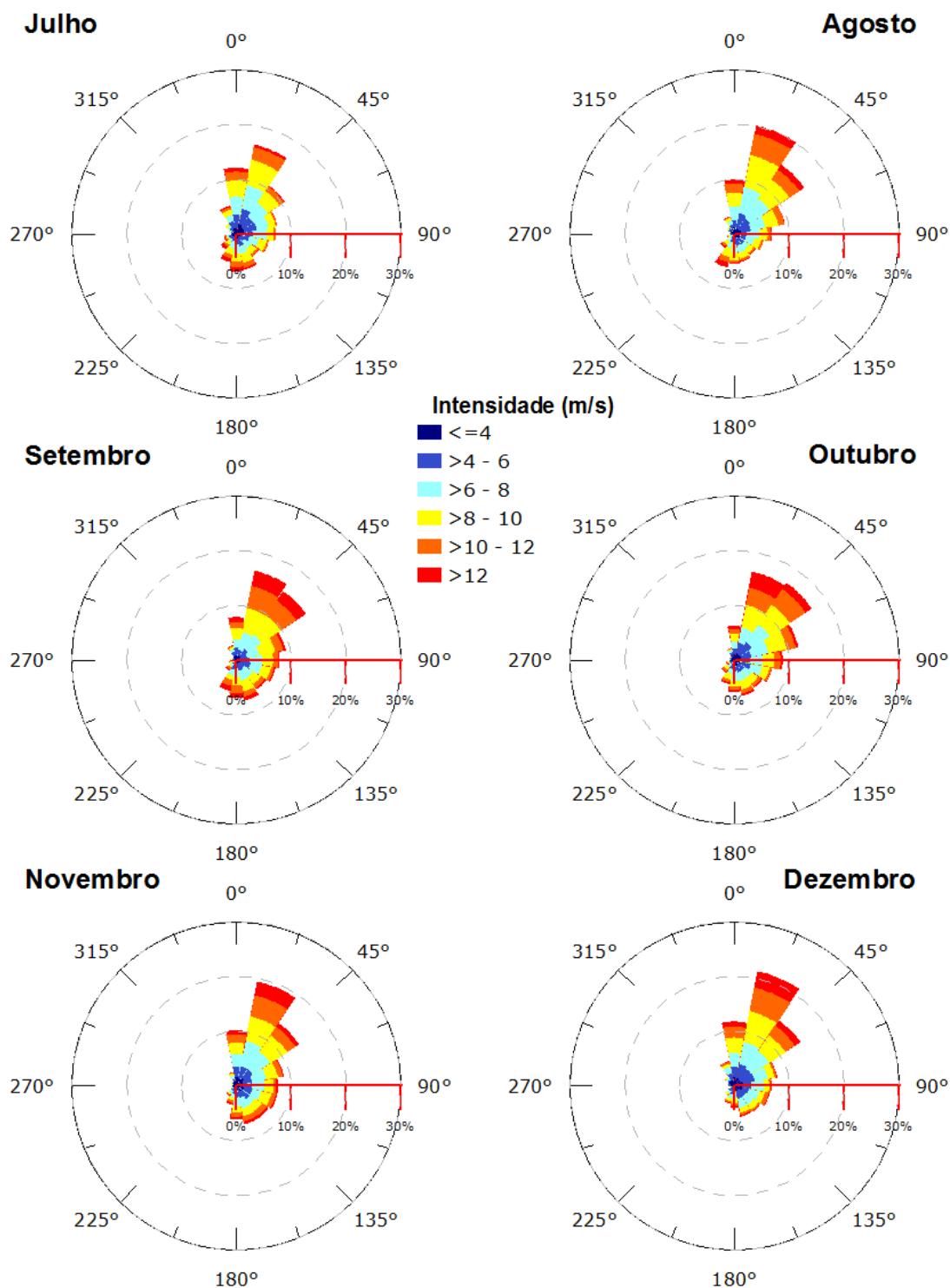


Figura 27: Rosa dos Ventos (m/s) para os meses de julho a dezembro. Figura gerada com dados do NCEP.

Na Tabela 3, é apresentada a ocorrência conjunta de intensidade e direção dos ventos na região do Campo de Xerelete usando como base os dados do NCEP para o período de 1979 a 2011. Nesta, as direções representam as seguintes faixas de direção: N (337,5°-22,5°), NE (22,5°-67,5°), E (67,5°-112,5°), SE (112,5°-157,5°), S (157,5°-202,5°), SW (202,5°-247,5°), W (247,5°-292,5°) e NW (292,5°-337,5°).

Tabela 3: Ocorrência conjunta de intensidade e direção dos ventos no Campo de Xerelete para o período de 1979 a 2011. Fonte: NCEP.

Direção >>		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total	Freq (%)
Intensidade (m/s)											
0,5	3	631	780	735	601	433	375	371	479	4405	9,42%
3	5,5	1930	2578	1971	1550	1196	592	390	613	10820	23,14%
5,5	8	2995	4638	2522	1892	1555	706	202	429	14939	31,95%
8	10,5	2770	3812	1259	1172	1214	551	98	181	11057	23,65%
10,5	13	1243	1478	288	331	540	320	46	62	4308	9,21%
>13		336	322	54	77	222	151	49	12	1223	2,62%
<b>Total</b>		9905	13608	6829	5623	5160	2695	1156	1776	<b>46752</b>	-
<b>Freq (%)</b>		21,19%	29,11%	14,61%	12,03%	11,04%	5,76%	2,47%	3,80%	-	-

Nos 32 anos analisados observa-se que das 46.752 informações, a maior incidência foi de ventos de NE, com 13.608 ocorrências (29,11%) e N, 9.905 ocorrências (21,19%), com 31,95% das intensidades situadas entre 5,5 e 8,0 m/s. Os eventos com intensidades acima de 13,0 m/s representaram 2,62 % do total de ocorrências.

A estatística mensal apresentada na Tabela 4 permite identificar a variabilidade apresentada pelo vento ao longo do ano.



Tabela 4: Estatística mensal dos ventos no Campo de Xerelete para o período de 1979 a 2011.

Fonte: NCEP.

Meses	Direção mais frequente	Intensidade média (m/s)	Desvio Padrão da intensidade	Máxima Absoluta (m/s)	Média das Máximas (m/s)	Desvio Padrão da média das máximas
Jan	NE	7,16	2,85	17,88	13,62	1,83
Fev	NE	6,65	2,72	15,73	12,95	1,51
Mar	NE	6,12	2,68	17,25	12,97	1,67
Abr	NE	6,19	2,63	18,45	13,51	2,00
Mai	NE	6,41	2,97	19,70	14,61	2,72
Jun	NE	6,42	2,77	19,34	14,21	2,18
Jul	NE	7,06	2,89	19,89	14,85	2,09
Ago	NE	7,38	2,93	20,12	14,89	2,04
Set	NE	8,05	3,10	17,96	15,65	1,41
Out	NE	7,52	3,08	17,37	14,68	1,59
Nov	NE	7,34	3,10	16,86	14,64	1,57
Dez	NE	7,14	3,15	18,86	14,90	1,99

Observa-se que a direção mais frequente dos ventos em todos os meses do ano é de NE. Setembro aparece como o mês de maior intensidade média, 8,05 m/s, e maior média das máximas (15,65 m/s), e no mês de agosto, ocorreu a maior máxima absoluta, com ventos de 20,12 m/s, provavelmente associados a passagem de um sistema frontal.

### 2.2.8. Sistemas Frontais

A penetração de frentes frias (ou sistemas frontais) é um mecanismo de grande impacto no clima do Sudeste brasileiro durante todo o ano e possui importante papel na transferência de calor, *momentum* e umidade das altas para as baixas latitudes.

No setor quente da frente, segundo Stech & Lorenzetti (1992), a velocidade média do vento é de 5 m/s, variando sua direção de predominantemente nordeste para noroeste com a aproximação da frente. Imediatamente após a passagem da frente fria, o vento tem direção sudoeste, com velocidades tipicamente em torno de 8 m/s. Aproximadamente um dia após a passagem da frente pela região, o vento novamente gira no sentido anti-horário, de sudoeste para nordeste.

Apesar de se observar sistemas frontais durante todo o ano, é no verão que eles atuam de modo a causar muita precipitação ao se associar a outros tipos de sistemas que provocam chuvas na região: os sistemas convectivos. A convecção é provocada pela associação das altas temperaturas com a umidade do ar. Estes dois fatores favorecem a formação de nuvens, causando instabilidades e chuvas isoladas em forma de pancadas, principalmente no período da tarde. No inverno os sistemas frontais estão mais relacionados com a penetração de massas de ar frio.

Durante o inverno, devido ao resfriamento do Hemisfério Sul e ao aquecimento do Hemisfério Norte, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ocupa a sua posição mais setentrional (MARTIN *et al.*, 1998). Nesse período, os sistemas frontais e os distúrbios de leste, que são aglomerados convectivos trazidos pelos ventos alísios de sudeste em direção ao continente, atuam com mais frequência sobre a Região do Sudeste brasileiro.

No verão, o resfriamento do Hemisfério Norte e o aquecimento do Hemisfério Sul deslocam a ZCIT para uma posição mais ao Sul, curvando-a em direção ao continente (MARTIN *et al.*, 1998). O deslocamento da ZCIT mais para Sul favorece a predominância dos ventos alísios de nordeste. Nesse período, os sistemas frontais dificilmente ultrapassam o Trópico de Capricórnio.

Na Tabela 5 é apresentado o número de passagens de sistemas frontais na Bacia de Campos entre os anos de 1996 a 2010. A tabela utiliza as informações do Boletim Climanálise/CPTEC/INPE para sistemas frontais que atingem a cidade de Cabo Frio, no RJ.

Tabela 5: Ocorrência de passagem de sistemas frontais em Cabo Frio entre os anos de 1996 e 2010.

Fonte: CPTEC/INPE.

Mês	Ano							
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Janeiro	1	2	4	1	3	1	1	2
Fevereiro	2	1	1	1	4	0	2	0
Março	2	2	4	2	3	1	1	2
Abril	-	4	4	3	3	2	0	3
Maio	2	5	4	6	4	2	1	3
Junho	4	4	4	4	2	2	2	2
Julho	6	3	3	3	5	2	5	2
Agosto	3	3	3	3	5	0	1	5
Setembro	5	6	5	4	2	4	4	5
Outubro	4	4	7	4	2	2	3	2
Novembro	4	7	3	5	3	3	1	5
Dezembro	3	4	2	6	4	3	3	-
Total	36	45	44	42	40	22	24	31

Mês	Ano								Média
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Total	
Janeiro	1	3	1	1	1	1	0	23	1,53
Fevereiro	4	3	1	1	1	0	1	22	1,47
Março	4	1	4	0	1	0	0	27	1,80
Abril	2	4	4	3	2	0	1	35	2,50
Maio	6	2	3	3	3	2	3	49	3,27
Junho	2	2	2	4	3	3	3	43	2,87
Julho	3	3	1	6	1	3	1	47	3,13
Agosto	4	3	2	3	2	2	3	42	2,80
Setembro	3	6	2	3	2	4	2	57	3,80
Outubro	4	4	2	0	5	1	5	49	3,27
Novembro	4	4	1	4	0	0	1	45	3,00
Dezembro	3	4	1	2	2	2	0	39	2,79
Total	40	39	24	30	23	18	20		

Observa-se, conforme destacado na tabela, que a frequência de ocorrência de sistemas frontais na região foi superior nos anos de 1997 a 1999, indicando a ocorrência de variações interanuais, apesar da série temporal relativamente curta. Os meses de julho, setembro e novembro também apresentam as maiores ocorrências de frentes frias. A Tabela 6, apresenta o intervalo médio (em dias) entre a passagem de dois sistemas frontais consecutivos na região da Bacia de

Campos para os anos de 1996 a 2010, obtidos do CPTEC. Verifica-se que os meses de junho, setembro e outubro apresentam, em média, menores intervalos entre a passagem de dois sistemas frontais consecutivos, enquanto que os meses de janeiro a março, característicos de verão, apresentam os maiores intervalos.

Tabela 6: Intervalo médio de passagem de dois sistemas frontais consecutivos na Bacia de Campos (dias). Fonte de dados: CPTEC/INPE.

Mês	Ano							
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Janeiro	31,00	15,50	7,75	31,00	10,33	31,00	31,00	15,50
Fevereiro	15,50	31,00	31,00	31,00	7,75	-	15,50	-
Março	15,50	15,50	7,75	15,50	10,33	31,00	31,00	15,50
Abril	-	7,75	7,75	10,33	10,33	15,50	-	10,33
Mai	15,50	6,20	7,75	5,17	7,75	15,50	31,00	10,33
Junho	7,75	7,75	7,75	7,75	15,50	15,50	15,50	15,50
Julho	5,17	10,33	10,33	10,33	6,20	15,50	6,20	15,50
Agosto	10,33	10,33	10,33	10,33	6,20	-	31,00	6,20
Setembro	6,20	5,17	6,20	7,75	15,50	7,75	7,75	6,20
Outubro	7,75	7,75	4,43	7,75	15,50	15,50	10,33	15,50
Novembro	7,75	4,43	10,33	6,20	10,33	10,33	31,00	6,20
Dezembro	10,33	7,75	15,50	5,17	7,75	10,33	10,33	-

Mês	Ano							Média
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Janeiro	31,00	10,33	31,00	31,00	31,00	31,00	-	24,17
Fevereiro	7,75	10,33	31,00	31,00	31,00	-	31,00	22,82
Março	7,75	31,00	7,75	-	31,00	-	-	18,30
Abril	15,50	7,75	7,75	10,33	15,50	-	31,00	12,49
Mai	5,17	15,50	10,33	10,33	10,33	15,50	10,33	11,78
Junho	15,50	15,50	15,50	7,75	10,33	10,33	10,33	11,88
Julho	10,33	10,33	31,00	5,17	31,00	10,33	31,00	13,92
Agosto	7,75	10,33	15,50	10,33	15,50	15,50	10,33	12,14
Setembro	10,33	5,17	15,50	10,33	15,50	7,75	15,50	9,51
Outubro	7,75	7,75	15,50	-	6,20	31,00	6,20	11,35
Novembro	7,75	7,75	31,00	7,75	-	-	31,00	13,22
Dezembro	10,33	7,75	31,00	15,50	15,50	15,50	-	12,52

Observa-se na Figura 28 que existem expressivas variações interanuais na frequência da passagem de frentes por essa região. É muito complexo e arriscado definir causas para tais variações observadas, diversos processos de diferentes escalas podem influenciar na formação e propagação de sistemas frontais pela costa do Brasil, como por exemplo o fenômeno ENSO.

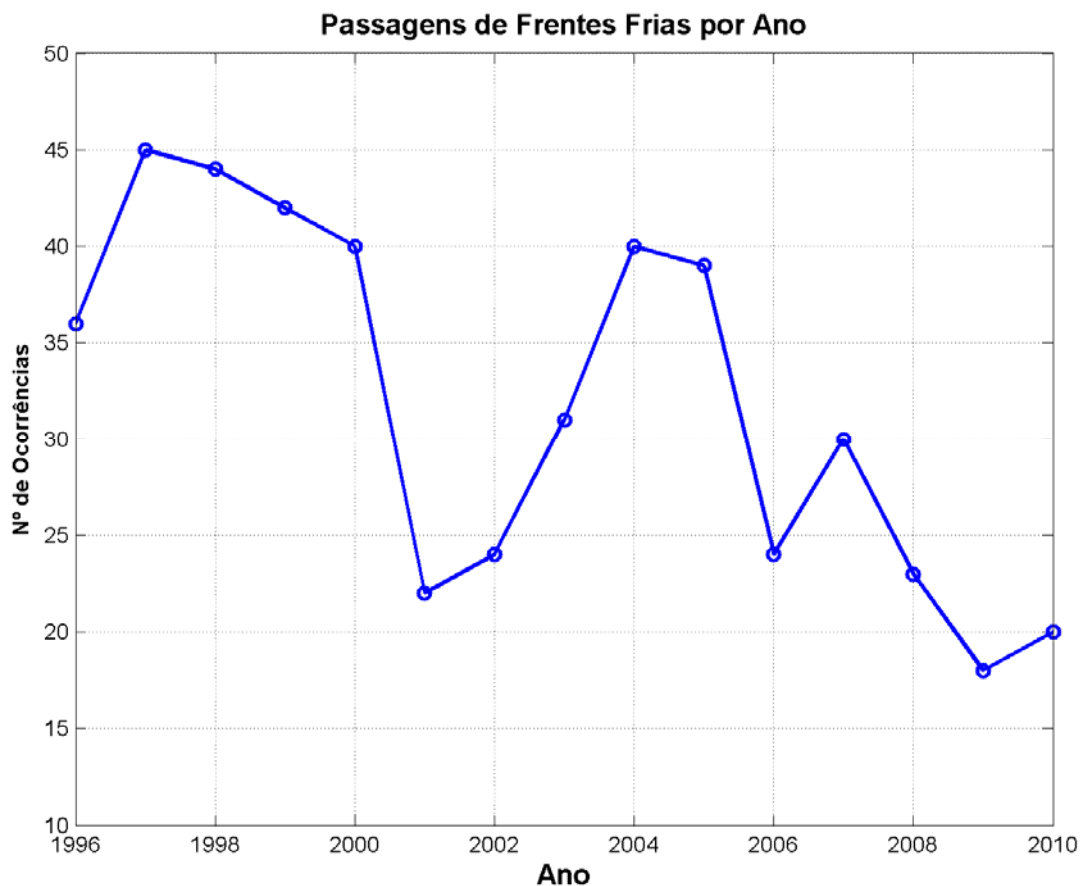


Figura 28: Número total de ocorrência de frentes por ano.

A Figura 29 apresenta a estatística mensal do número de passagens de sistemas frontais na região do campo no período analisado (1996 a 2010). Observa-se, a partir desta, que os meses de janeiro a março, característicos de verão, apresentam menor incidência desses sistemas na região de estudo, enquanto que o mês de setembro, ao longo de todo o período analisado, apresentou a maior constância na incidência de frentes frias, totalizando o maior número de ocorrências média (4.1).

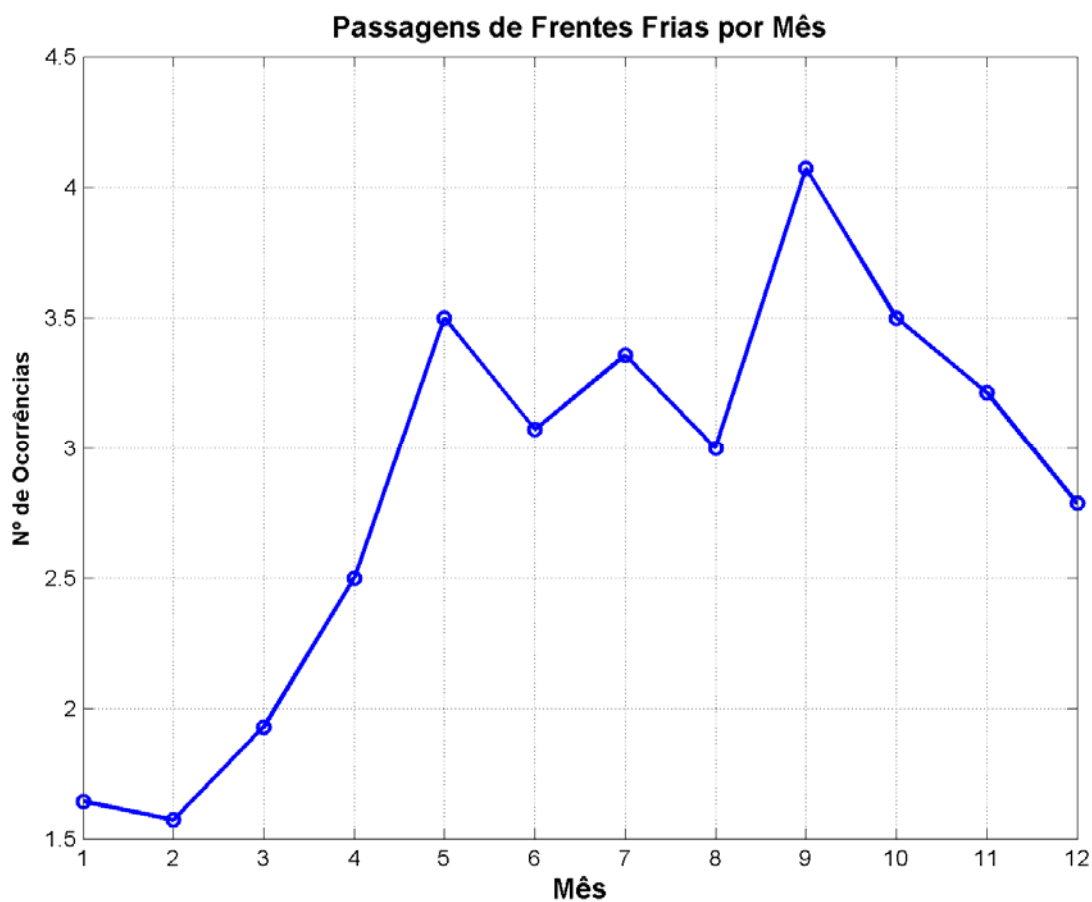


Figura 29: Média mensal de sistemas frontais entre os anos de 1996 e 2010.

### 2.2.9. Condições Extremas de Ventos

Através dos 52 anos (1960 - 2011) de dados da Reanálise-I do NCEP podemos ter uma boa estimativa da ocorrência de eventos extremos por longos períodos de tempo na região próxima ao Campo de Xerelete. A partir da ocorrência conjunta de direção e intensidade dos ventos (Tabela 7), podemos verificar que os ventos mais intensos se concentram na faixa de direção S/SW/W, direções associadas à passagem de frentes frias pela região.

Tabela 7: Ocorrência conjunta de direção (°) e intensidade (m/s) dos ventos na Bacia de Campos para o período de 1960 a 2011.

Direção ->		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total	Freq (%)
Intensidade (m/s)											
11	12	290	457	62	34	111	202	28	3	1187	63,92%
12	13	73	158	20	12	43	128	21	1	456	24,56%
13	14	17	33	1	4	12	69	13	0	149	8,02%
14	15	2	10	0	0	2	14	16	0	44	2,37%
15	16	1	1	0	0	2	8	6	0	18	0,97%
>16		1	0	0	0	0	0	2	0	3	0,16%
<b>Total</b>		384	659	83	50	170	421	86	4	<b>1857</b>	-
<b>Freq (%)</b>		20,68%	35,49%	4,47%	2,69%	9,15%	22,67%	4,63%	0,22%	-	-

Analisando a estatística mensal dos ventos (Tabela 8), conclui-se que o período de verão aparece como o menos propício à ocorrência de ventos intensos, com os eventos extremos de vento mais concentrados no outono, inverno e primavera. Ventos com intensidade acima de 15 m/s podem ocorrer de Abril a Outubro.

Tabela 8: Estatística mensal dos ventos na Bacia de Campos, para o período de 1960 a 2011.

Meses	Direção Predominante (°)	Velocidade Máxima Absoluta (m/s)
Janeiro	NE	14,10
Fevereiro	NE	12,97
Março	N	12,55
Abril	W	15,46
Maio	W	15,22
Junho	SW	16,93
Julho	SW	15,80
Agosto	SW	15,84
Setembro	W	16,14
Outubro	SW	15,60
Novembro	N	13,85
Dezembro	NE	14,76

A Figura 30 permite visualizar melhor os resultados da tabela acima. Os eventos extremos ocorridos nos meses de novembro a março aparecem associados a direções N e NE, típicas da



influência do ASAS. Os eventos extremos ocorridos de Abril a Outubro são mais intensos e aparecem associados com as direções SW e W, típicas da influência de sistemas frontais.

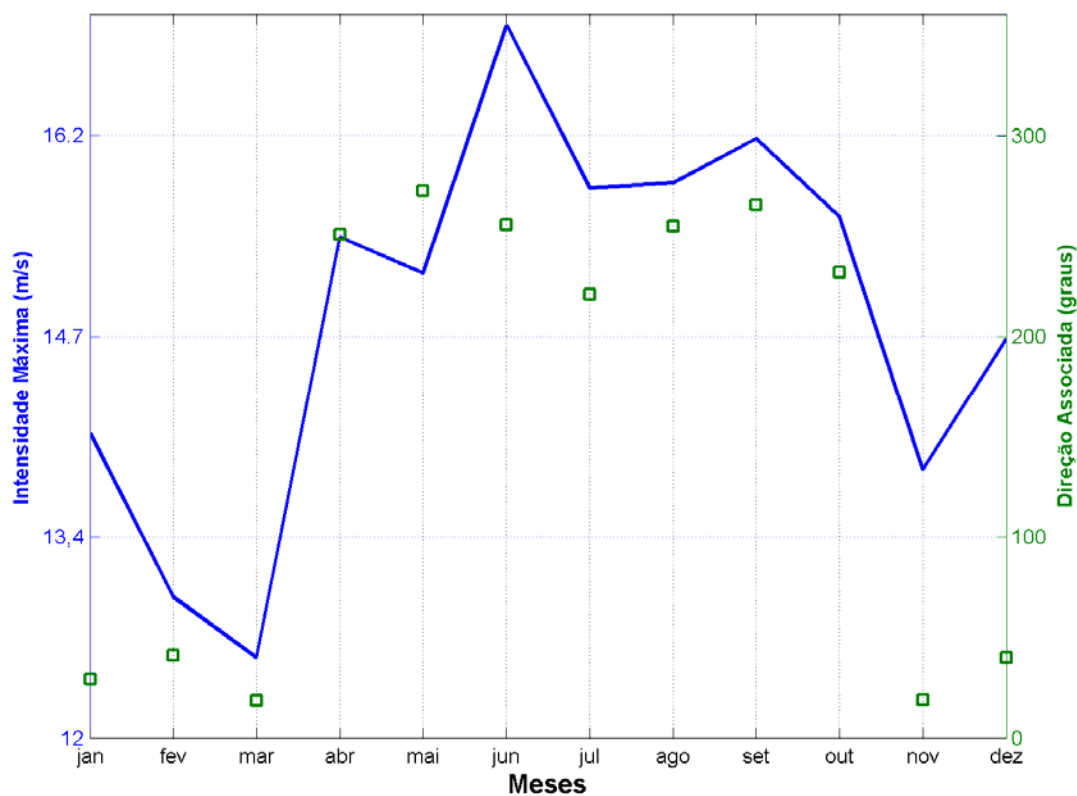


Figura 30: Intensidade máxima por direção associada, para cada mês do ano. Elaborado com dados de 1960 a 2011, da Reanálise I do NCEP.

## 2.2.10. Considerações Finais

Foram apresentadas análises temporais e espaciais dos principais parâmetros e fenômenos meteorológicos da região do entorno do Campo de Xerelete (temperatura do ar, precipitação, evaporação, umidade relativa, pressão atmosférica, insolação, ventos e passagem de sistemas frontais) de forma a fornecer uma caracterização geral da região.

Abaixo, na Tabela 9 é apresentado um sumário com a faixa de ocorrência comum (dentro da qual valores de determinada variável são esperados), médias sazonais, e valores extremos de todas as variáveis apresentadas, de forma a se ter um panorama geral da região e melhor correlacionar as variáveis. Esses valores são oriundos de uma análise integrada das fontes de dados apresentadas ao longo do relatório.

Tabela 9: Sumário dos resultados.

Parâmetro	Faixa de ocorrência habitual	Média Verão	Média Inverno	Extremo (máx.)	Extremo (mín.)
Temperatura (°C)	28 - 18	26	22	30	16
Precipitação (kg/m <sup>2</sup> /mês)	180 -60	140	60	190	40
Umidade Relativa (%)	90 - 60	82,5	81,5	97	50
Pressão (hPa)	1020 - 1010	1012,60	1019,70	1025	1005
Evaporação (mm)	100- 80	105	87	-	-
Insolação (horas/mês)	210 - 150	200	180	-	-
Vento (m/s)	3 -10	6,65	7	16.9	-

Os parâmetros analisados apresentam correlação entre si nas variações sazonais. De uma forma geral, todos as variáveis meteorológicas na região possuem correlação com a incidência de radiação solar e sua variação sazonal.

As variáveis temperatura do ar, insolação e evaporação apresentam correlação direta e positiva com esse forçante, apresentando maiores valores no verão relativamente ao inverno. A variável precipitação e umidade relativa também apresentam esse mesmo padrão sazonal porém devido a correlação indireta com o forçante radiação solar. Devido à maior taxa de evaporação, a umidade relativa do ar é maior no verão e a combinação deste fator com maiores temperaturas do ar resultam em maiores taxas de precipitação, muitas vezes influenciadas pela atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Os parâmetros pressão atmosférica, ventos e passagem de sistemas frontais apresentam correlação inversa com a taxa de incidência de radiação solar. No verão, devido ao aquecimento

do hemisfério sul e maior aquecimento da porção continental deste, a ZCIT ocupa sua porção mais ao sul e o ASAS encontra-se deslocado para sudeste. Este cenário favorece a predominância de ventos alísios de sudeste na costa brasileira e mais especificamente na região a predominância de ventos de nordeste associados ao ASAS, no verão, e de maior incidência de passagem de sistemas frontais, no inverno. A oscilação do centro do ASAS (centro de alta pressão atmosférica) no eixo sudeste-noroeste acarreta em menor pressão atmosférica local no verão e maiores no inverno.

As ocorrências extremas de vento são esperadas no período de inverno, associadas à passagem de sistemas frontais.

## 2.3. Oceanografia

A abordagem adotada na caracterização oceanográfica apresentada neste estudo parte de uma caracterização regional da Bacia de Campos e, sempre que possível, apresenta as características particulares das proximidades do Campo de Xerelete.

Para tanto, foram utilizados dados de diversas fontes, citadas a seguir:

- » Dados de temperatura e salinidade disponíveis no *National Oceanographic Data Center* (NODC);
- » Dados de onda oriundos de um hindcast de mais de 10 anos realizado com o modelo WaveWatch III pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) dentro do plano de cooperação técnica INPE/PROOCEANO;
- » Dados do modelo global de marés FES-2004 contendo a fase e a amplitude das principais constituintes de maré;
- » Dados de correntes da análise global do projeto HYCOM.
- » Dados de correntes do Projeto DEPROAS (Dinâmica do Ecossistema de Plataforma da Região Oeste do Atlântico Sul)
- » Dados de derivadores do Projeto Global Drifter Program (GDP).

Além de referências bibliográficas sobre a oceanografia local.

Na Tabela 10, observa-se um resumo com as fontes de dados utilizadas no estudo, e as suas respectivas localizações.

Tabela 10: Localização das fontes de dados utilizadas.

Fontes	Coordenadas		Parâmetros	Período
	latitude	longitude		
NODC/WOA09 (área)	20° S - 26° S	37° W – 42° W	T, S e D	1773-2009
NODC/WOA09 (Ponto)	23,625° S	41,375° W	T, S e D	1773-2009
NODC/WOD09 (área)	22,75° S – 24,25° S	39,9° W – 41,4° W	T e S	1911-2009
WaveWatch III	23° S	40° W	Ondas	01/02/1997 31/12/2009
FES-2004	23,5° S	40,625° W	Maré	-
FES-2004 (Área)	20° S - 26° S	36° W – 43° W	Maré	-
DEPROAS	23,74° S	41,75° W	Correntes	07/2002 05/2004
GDP	23,19° S – 23,69° S	40,4° W 40,9° W	Correntes	06/05/2001-08/07/2002
HYCOM (área)	20° S – 26° S	36° W - 44° W	Correntes	01/01/2007 31/12/2007

Legenda: T = Temperatura; S = Salinidade; D = Densidade

Abaixo, na Figura 31, é apresentado o mapa batimétrico da região. Observa-se que o Campo de Xerelete encontra-se entre as isóbatas de 2000 e 3000 metros. A profundidade local é de aproximadamente 2500 metros.

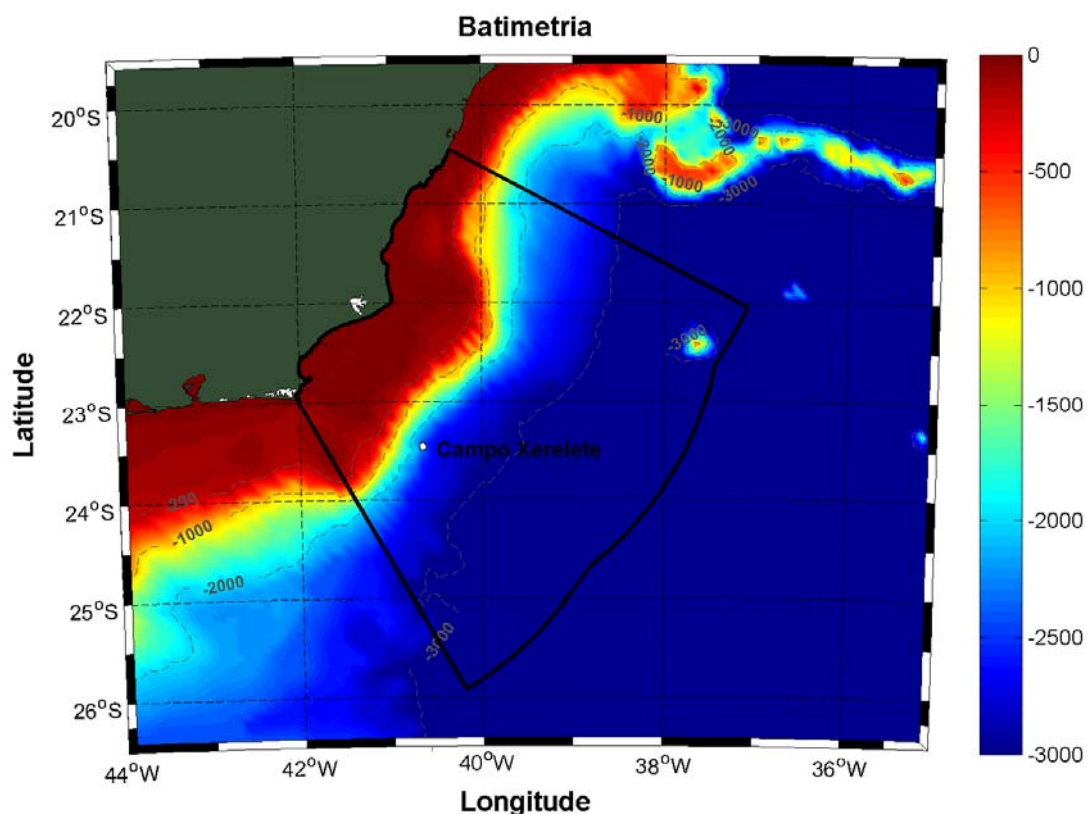


Figura 31: Mapa batimétrico local. A linha preta indica o contorno da Bacia de Campos. As linhas pontilhadas representam as isóbatas de 200, 1000, 2000 e 3000 metros.

### 2.3.1. Temperatura, Salinidade e Densidade

O estudo da temperatura e salinidade nos oceanos é de extrema importância para o conhecimento das estruturas verticais de massas d'água, bem como para o entendimento do papel dos oceanos como reservatório de sal, gases e calor (FERRERO & WAINER, 2008).

Para avaliar a variação vertical de temperatura e salinidade, na região próxima ao Campo de Xerelete, foram utilizados os dados da climatologia sazonal WOA09 (*World Ocean Atlas 09*) do NODC.

Os campos que compõem a base de dados da climatologia WOA09 consistem da análise objetiva dos dados históricos armazenados no NODC, coletados por diversas campanhas e equipamentos, em navios de pesquisa e de oportunidade. Esta análise utiliza dados irregularmente espaçados, gerando uma grade global com resolução espacial de  $1/4^\circ$ . Estes

campos são tridimensionais e os dados são interpolados em 33 profundidades padrão desde a superfície até 5.500 m de profundidade. Temporalmente, esta climatologia consiste na média realizada para o período compreendido entre os anos de 1773 e 2009. Os dados da climatologia WOA09 podem ser obtidos através da sua página na internet ([http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr\\_woa09.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr_woa09.html)). Maiores informações sobre as bases climatológicas de temperatura e salinidade podem ser obtidas em Locarnini *et al.* (2009) e Antonov *et al.* (2009). Os dados utilizados foram extraídos do ponto de grade mais próximo do Campo de Xeretele, localizado em 23,625°S e 40.625°W, conforme apresentado na Figura 32. Os perfis de temperatura e salinidade para as 4 estações do ano são apresentados na Figura 33.

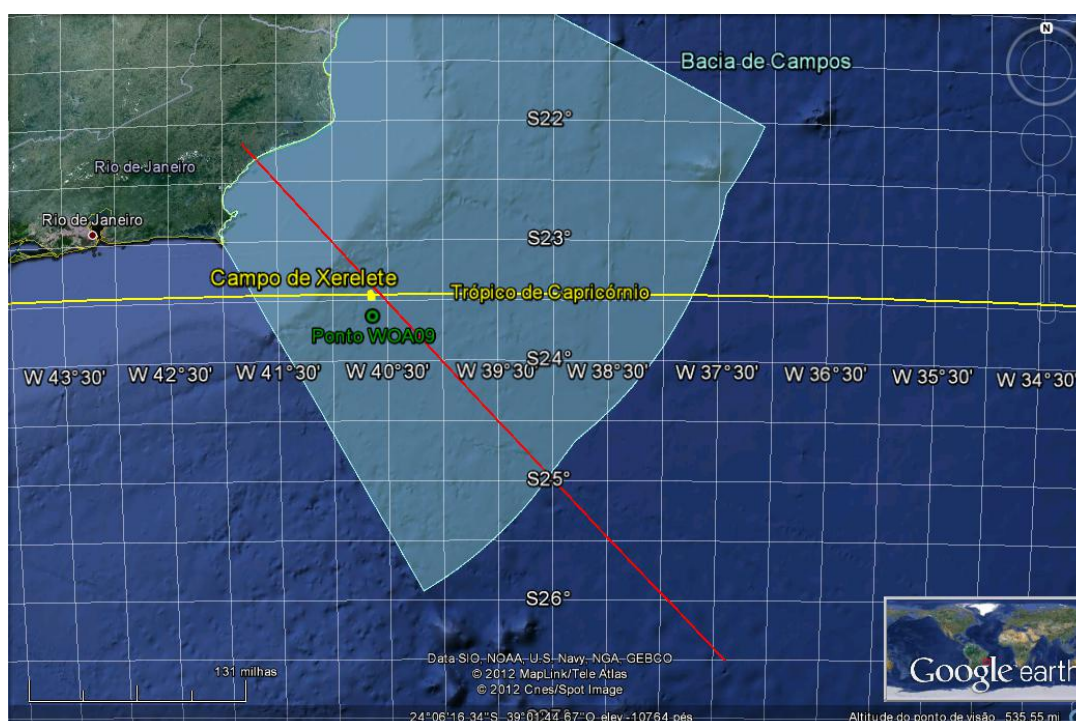


Figura 32: Localização do ponto de grade (verde) e da seção vertical (linha vermelha) de onde foram retirados os dados de temperatura e salinidade do WOA09.

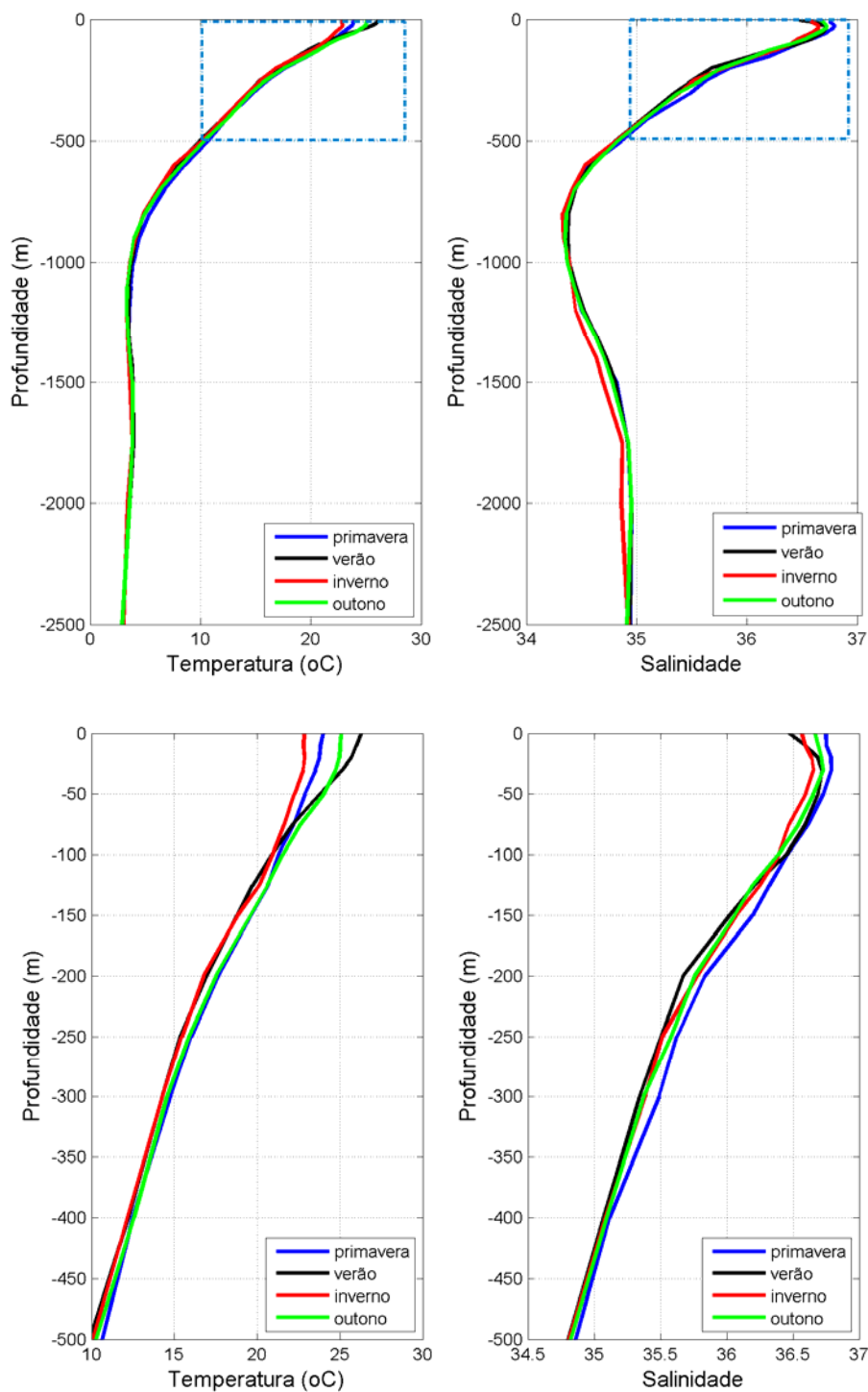


Figura 33: Perfis de temperatura e salinidade climatológicas para as quatro estações do ano na região do Campo de Xerelete. Acima, perfil completo, abaixo, zoom nos primeiros 500 metros da coluna d'água. A linha azul nas figuras de cima indicam a área ampliada.



Variações sazonais na temperatura do mar, relacionadas à variações na intensidade da radiação solar, são mais pronunciadas nos primeiros 50 metros de profundidade e na salinidade, relacionadas a variação nas taxas de precipitação e evaporação, nos primeiros 25 metros de profundidade.

No período de verão, em superfície, ocorrem as maiores temperaturas (~26 °C), e no inverno, as menores (~22.5 °C). Quanto à salinidade superficial, os maiores valores (36,75) são observados na primavera, e os menores (36,5) no verão, possivelmente devido a maior pluviosidade neste período. O máximo de salinidade pode ser observado em 25 m de profundidade.

Os perfis climatológicos de densidade potencial, elaborados com os dados de temperatura e salinidade apresentados anteriormente, nas quatro estações do ano podem ser vistos na Figura 34. Nos primeiros 50 m de profundidade, como esperado, são encontradas águas mais densas no período de inverno, e menos densas no período de verão, devido principalmente às menores temperaturas do inverno e maiores do verão. As menores densidades superficiais médias são verificadas no verão (~1024 kg/m³) e as maiores (~1025,2 kg/m³) no inverno.

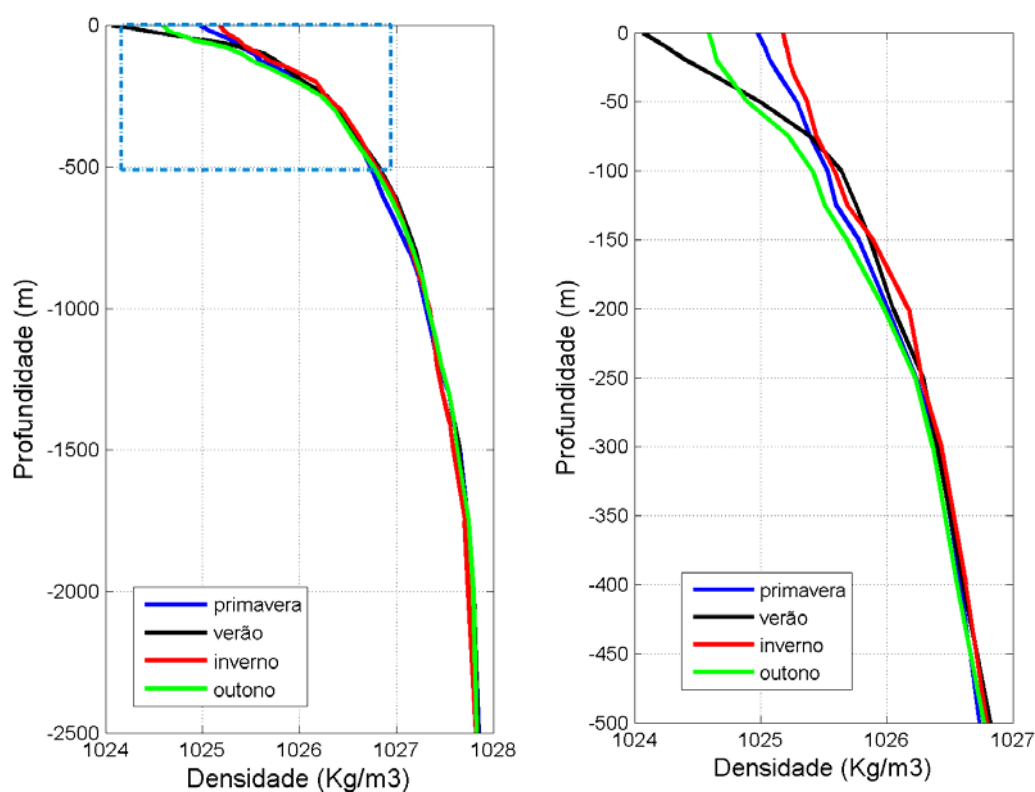


Figura 34: Perfis das densidades climatológicas para as quatro estações do ano na região do Campo de Xerelete. A direita, ampliação dos primeiros 500 metros da coluna d'água. A linha pontilhada em azul indica a área ampliada.

A partir da climatologia sazonal do WOA09 também é possível obter uma boa estimativa da variabilidade espacial da temperatura e da salinidade climatológicas na região da Bacia de Campos.

A seguir, na Figura 35, é apresentada a temperatura climatológica em superfície, para toda a Bacia no período de verão e na Figura 36, no período de inverno.

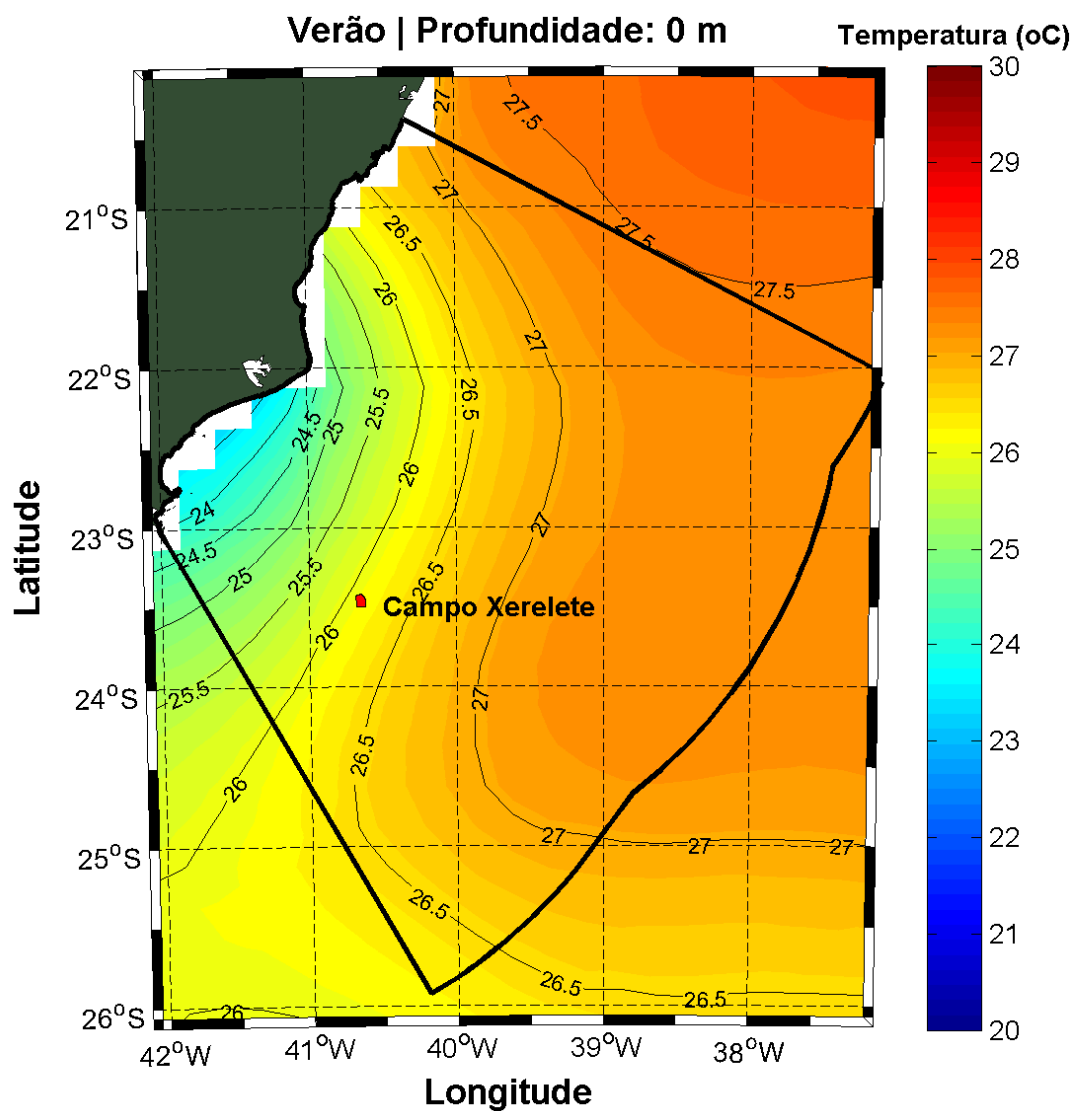


Figura 35: Temperatura climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de verão.

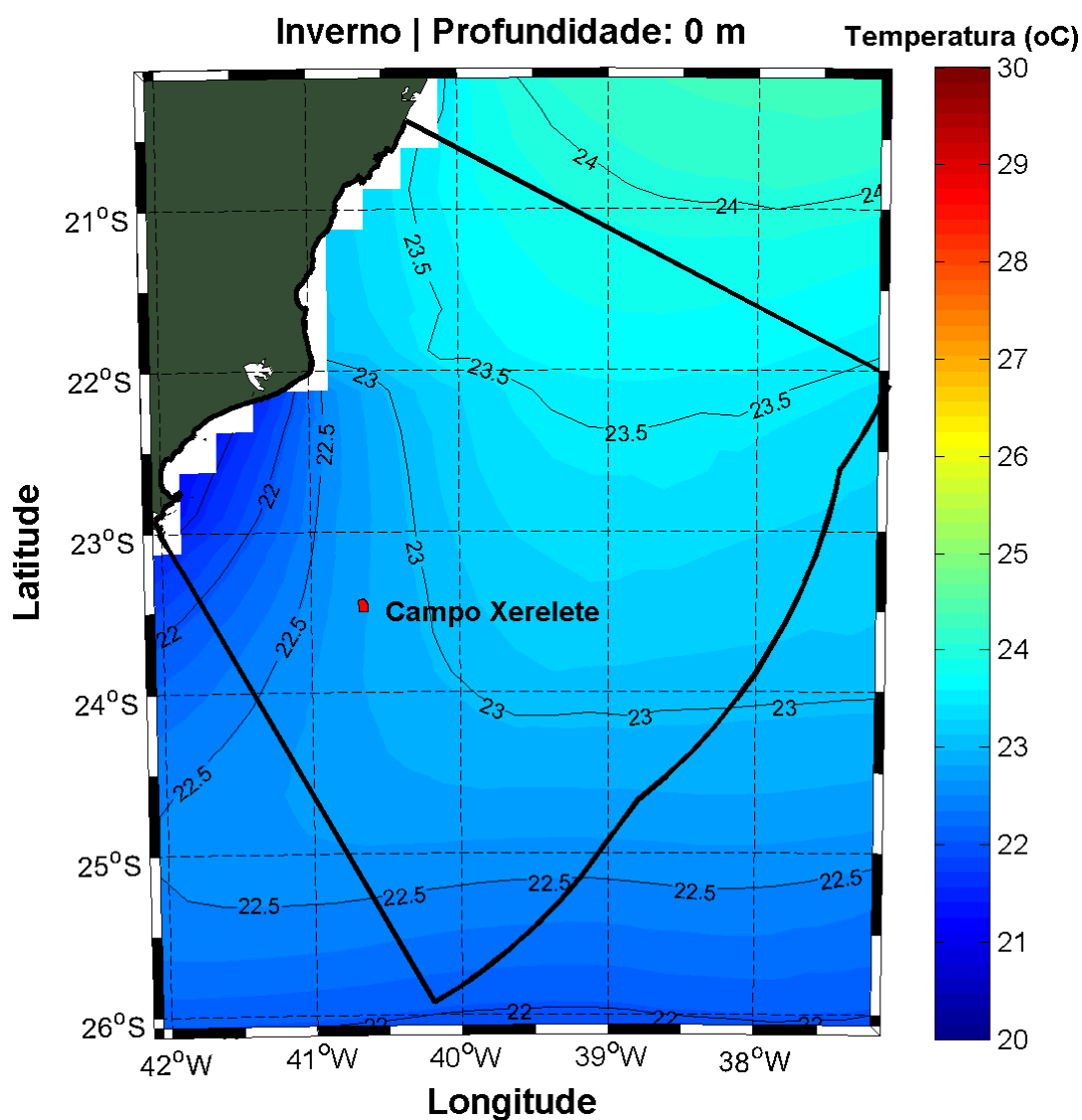


Figura 36: Temperatura climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de inverno.

São observadas variações sazonais expressivas na região, onde são encontradas temperaturas mais elevadas em praticamente toda a Bacia de Campos durante o período de verão.

Na Tabela 11, observa-se a variação da temperatura climatológica, em toda a região analisada. A tabela nos permite observar novamente que a temperatura superficial média na região é aproximadamente 4 °C mais quente no período de verão.

Tabela 11: Variação da temperatura climatológica superficial.

	<b>Verão</b>	<b>Inverno</b>
Mínima (°C)	23,23	21,28
Média (°C)	26,56	22,9
Máxima (°C)	27,89	24,32
D. Padrão (°C)	0,22	0,15

Da mesma forma, na Figura 37 e na Figura 38 são apresentados os mapas de salinidade superficial climatológica, para o período de verão e inverno, respectivamente.

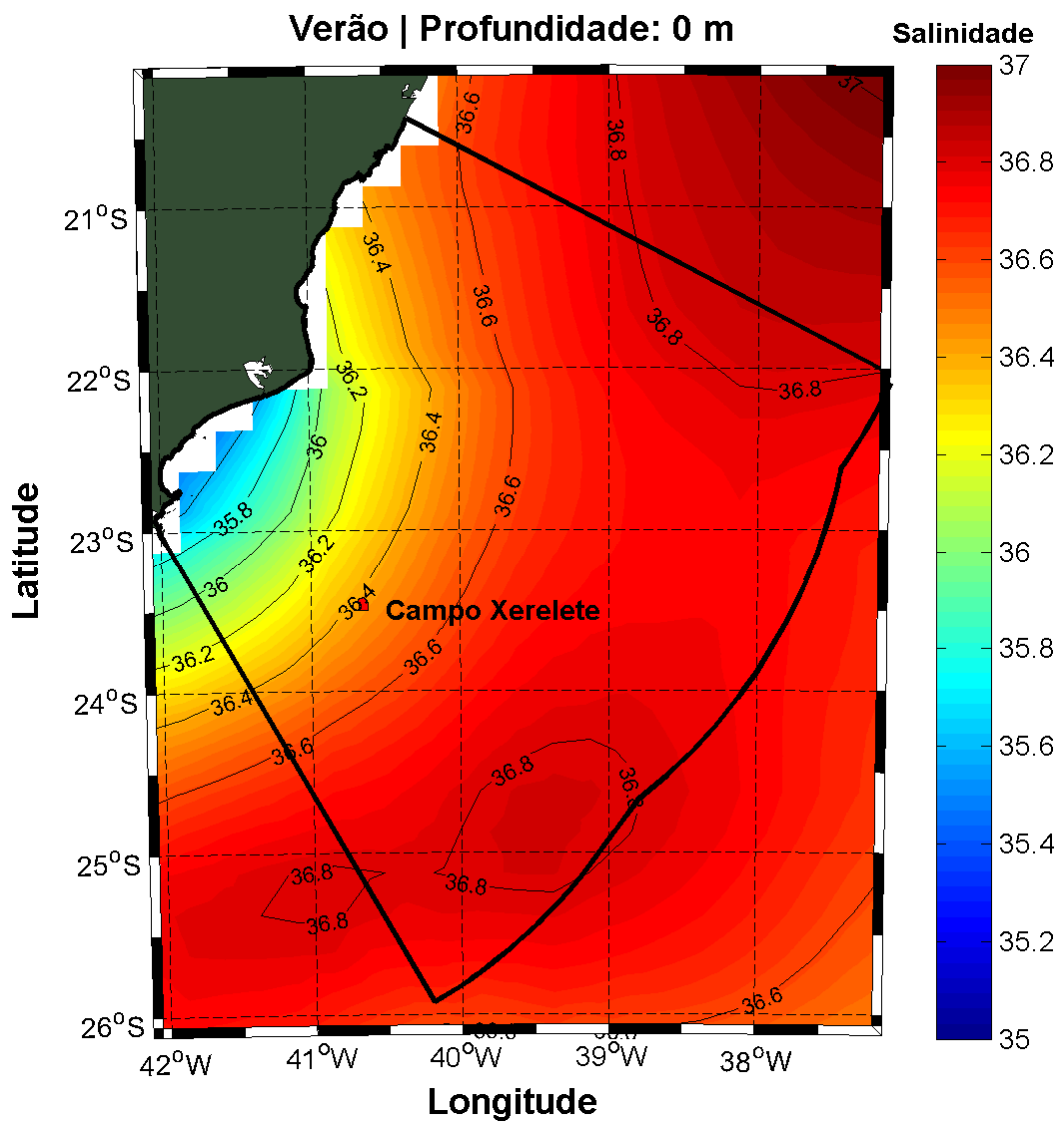


Figura 37: Salinidade climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de verão.

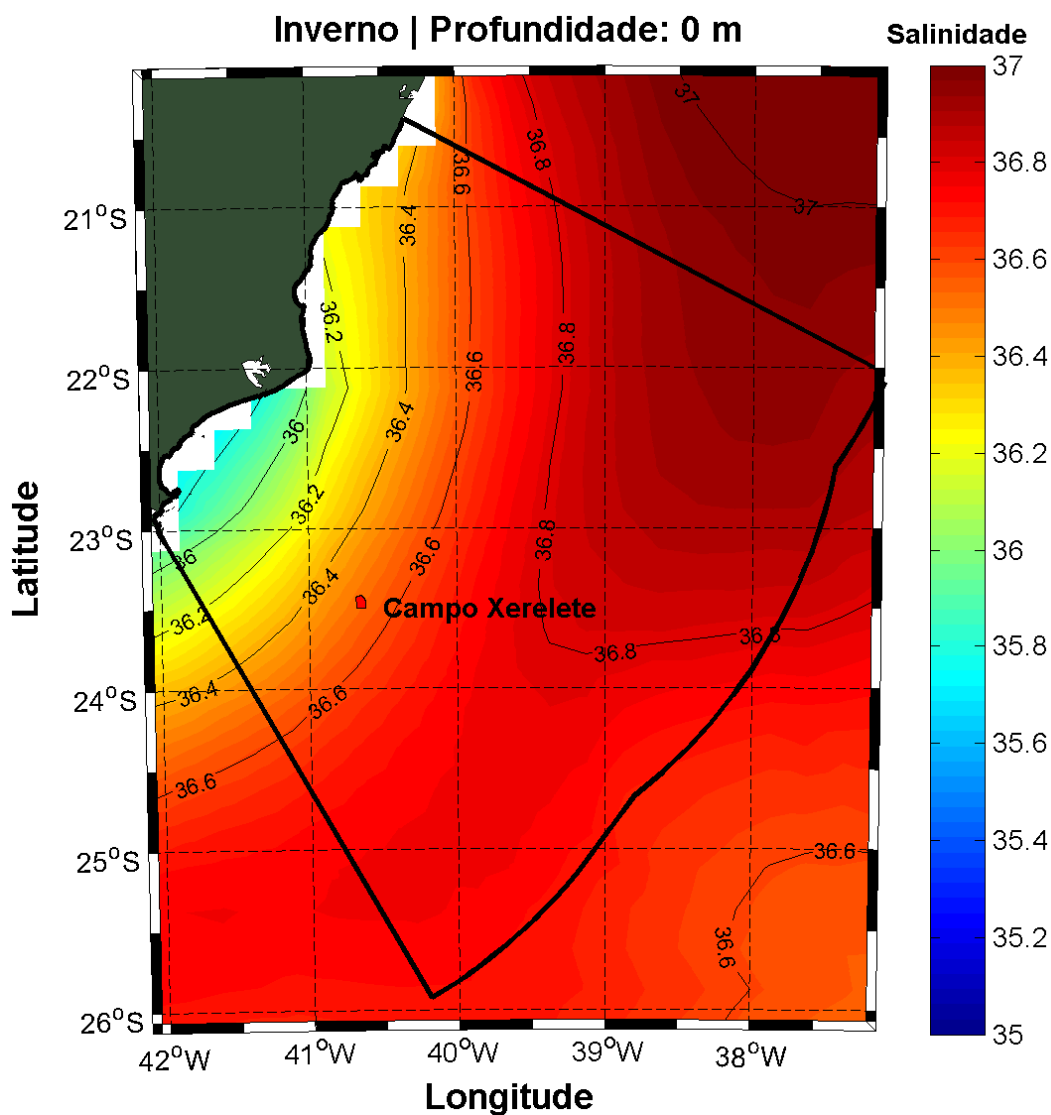


Figura 38: Salinidade climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de inverno.

Para a salinidade, não são verificadas grandes variações sazonais. De modo geral, são encontradas águas menos salinas nas proximidades da costa, e águas mais salinas associadas à região de influência da CB. Na Tabela 12, observa-se a variação da salinidade climatológica.

Tabela 12: Variação da salinidade climatológica superficial.

	<b>Verão</b>	<b>Inverno</b>
Mínima (°C)	35,49	35,72
Média (°C)	36,61	36,66
Máxima (°C)	37,03	37,08
D. Padrão (°C)	0,14	0,10

Na Figura 39 e Figura 40 são apresentados os mapas de densidade climatológica superficial para os períodos de verão e inverno, respectivamente.

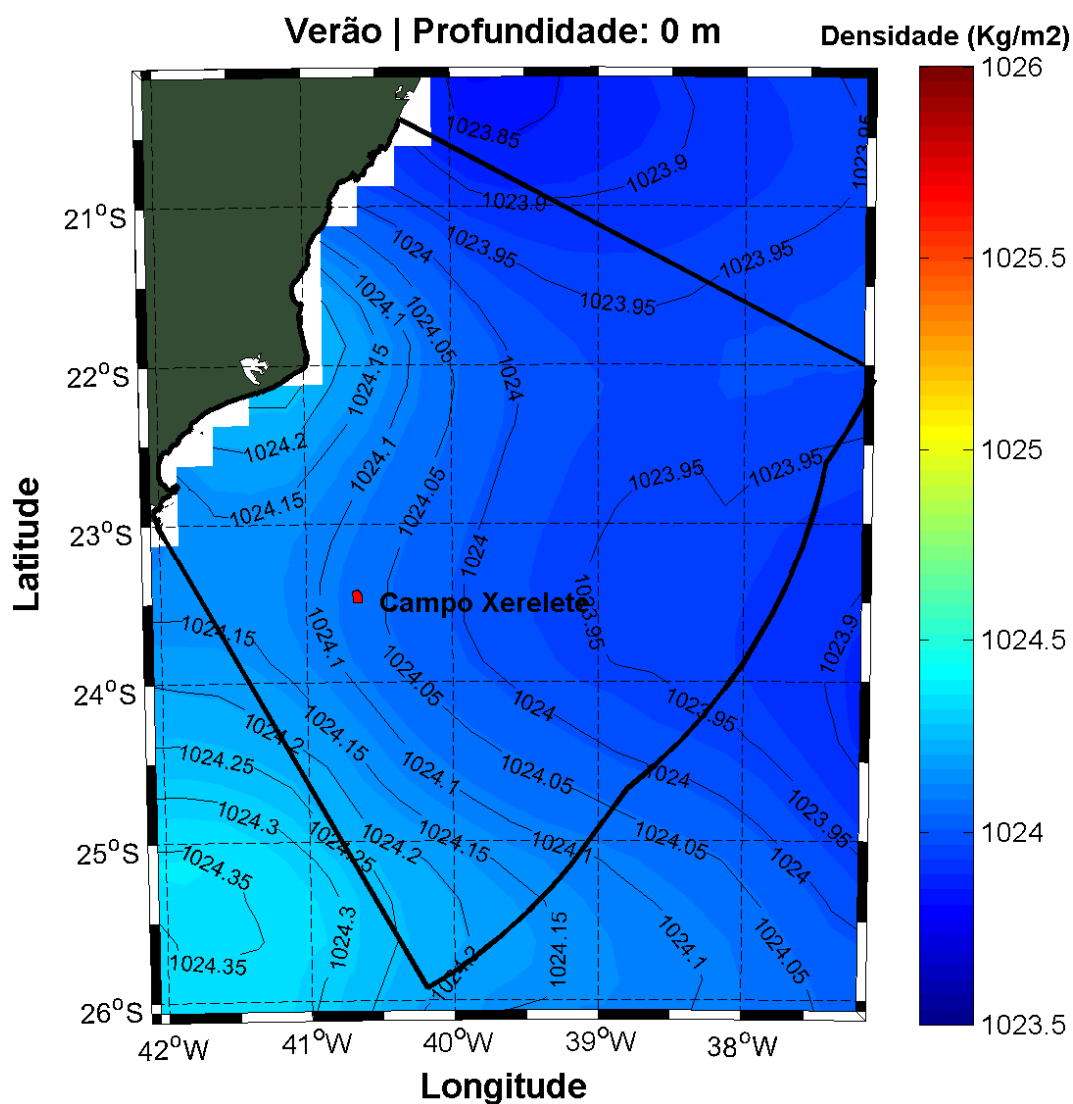


Figura 39: Densidade climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de verão.



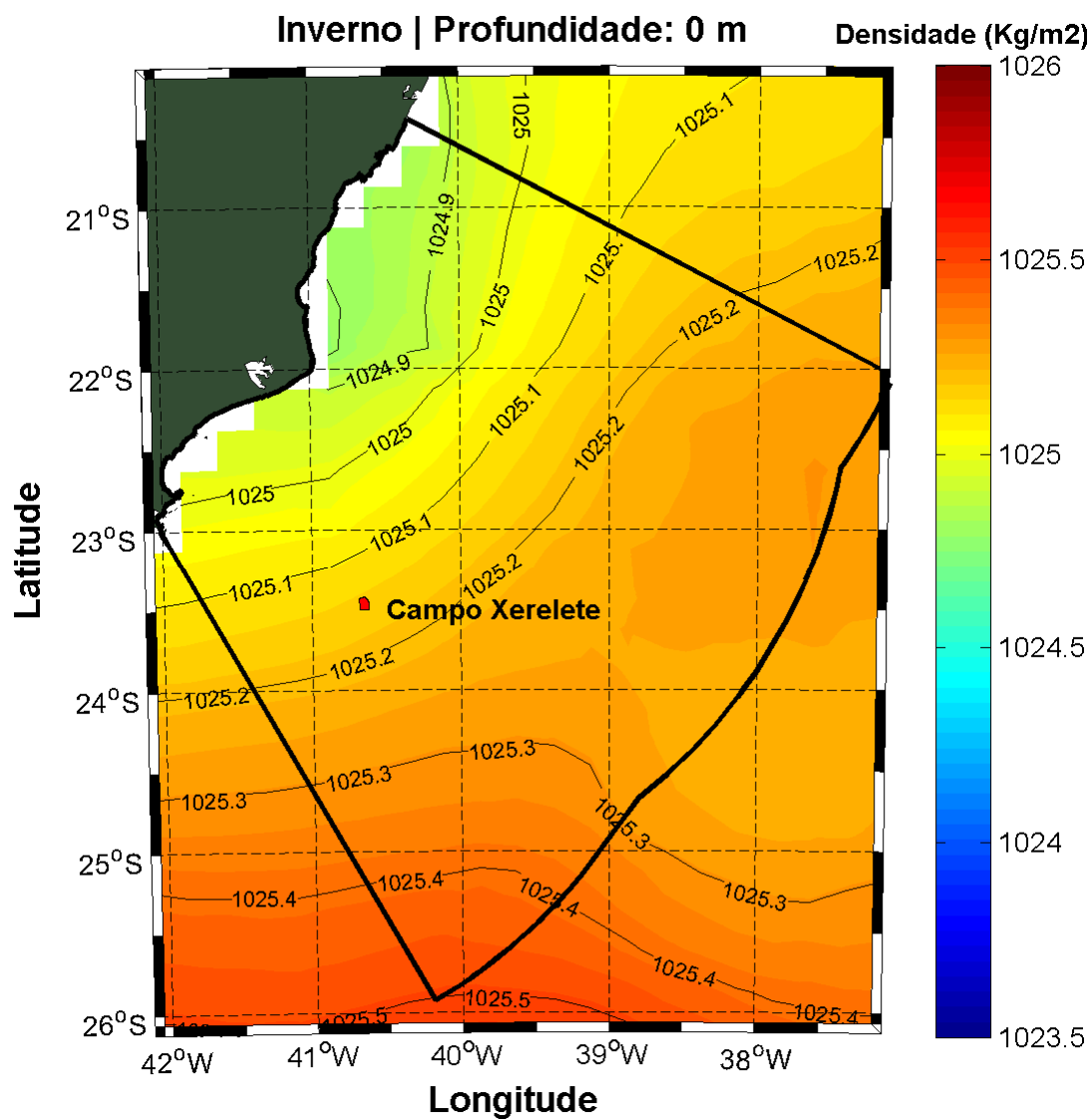


Figura 40: Densidade climatológica superficial na região da Bacia de Campos para o período de inverno.

Variações sazonais expressivas nos campos de densidade são verificadas no nível superficial, induzidas pela presença de águas mais frias na Bacia de Campos durante o inverno. Na Tabela 13 observa-se a variação da densidade climatológica

Tabela 13: Variação da densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) climatológica superficial.

	<b>Verão</b>	<b>Inverno</b>
Mínima ( $^{\circ}\text{C}$ )	1023,8	1024,8
Média ( $^{\circ}\text{C}$ )	1024,1	1025,2
Máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )	1024,4	1025,5
D. Padrão ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,02	0,06

A seguir, da Figura 41 à Figura 44 são apresentadas seções verticais de temperatura potencial e salinidade, para a seção apresentada na Figura 32. Nestas seções, podemos observar águas quentes e salinas na região superficial próxima ao Campo de Xerelete relacionada à presença da Água Tropical. Um núcleo de alta salinidade pode ser observado sobre o talude continental, entre a superfície e 200 m de profundidade associado ao fluxo da Corrente do Brasil. O núcleo de baixa salinidade associado à AIA pode ser observado entre 500 e 1200 m de profundidade, nas duas estações porém no verão esse núcleo apresenta-se ligeiramente deslocado em direção ao largo. Seções verticais de densidade serão apresentadas no próximo capítulo, na análise de massas d'água.

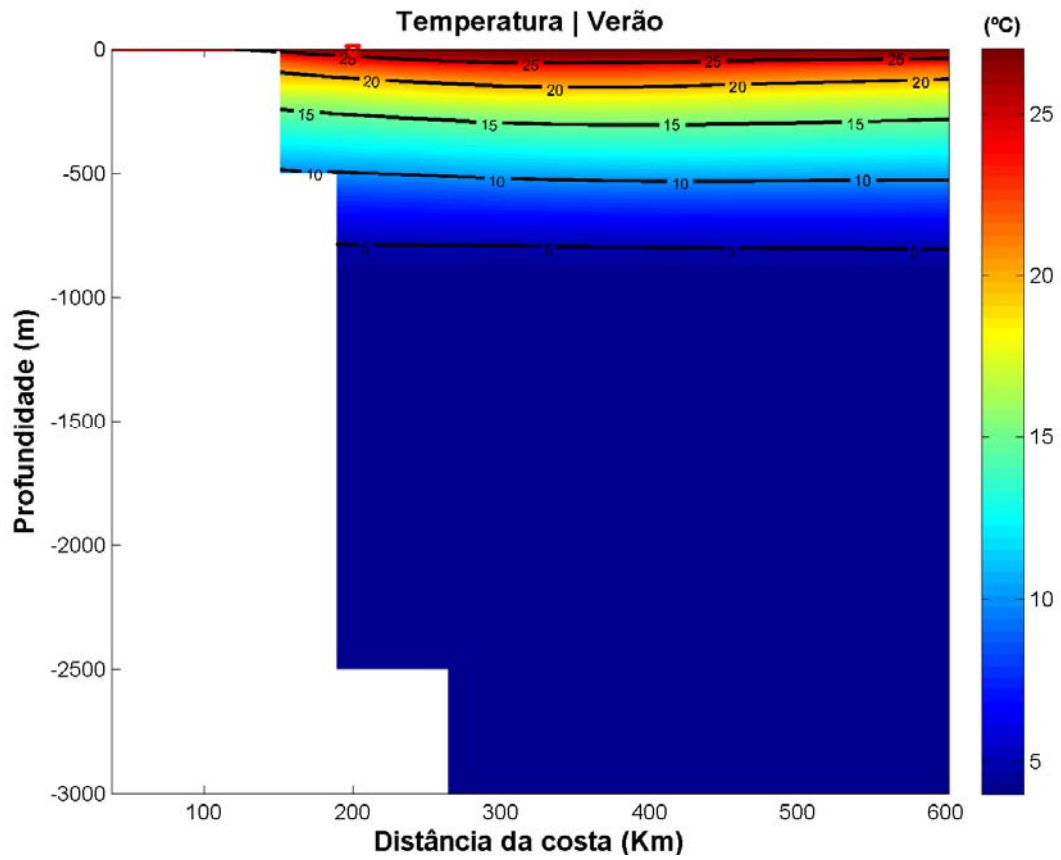


Figura 41: Seção vertical de temperatura climatológica em um perfil normal à costa, para o período de verão. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.

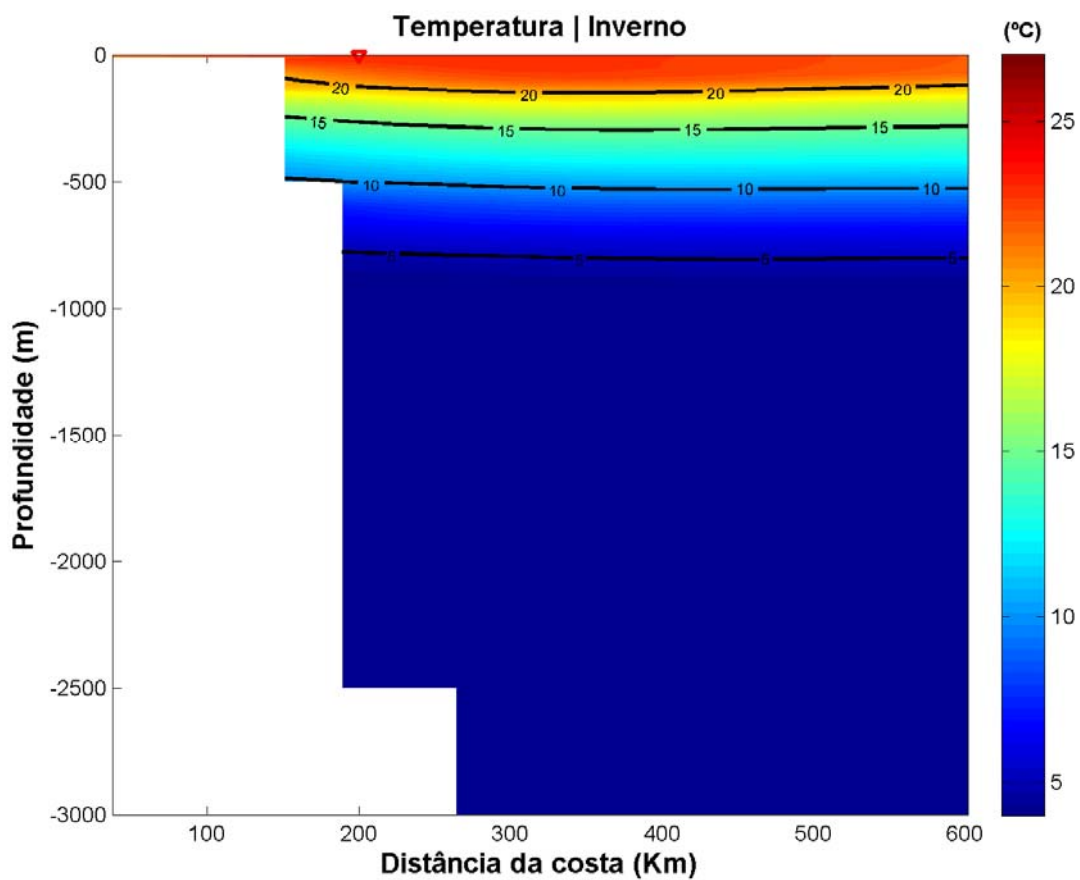


Figura 42: Seção vertical de temperatura climatológica em um perfil normal à costa, para o período de inverno. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.

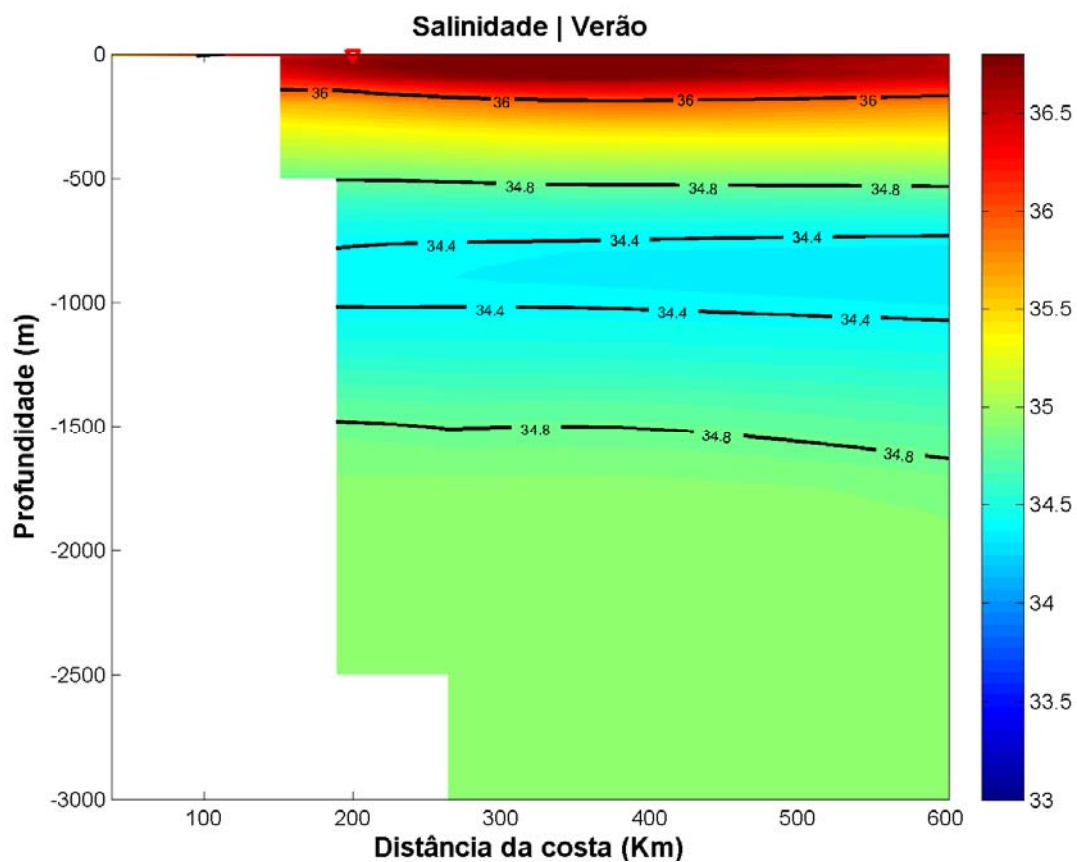


Figura 43: Seção vertical de salinidade climatológica em um perfil normal à costa, para o período de verão. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.

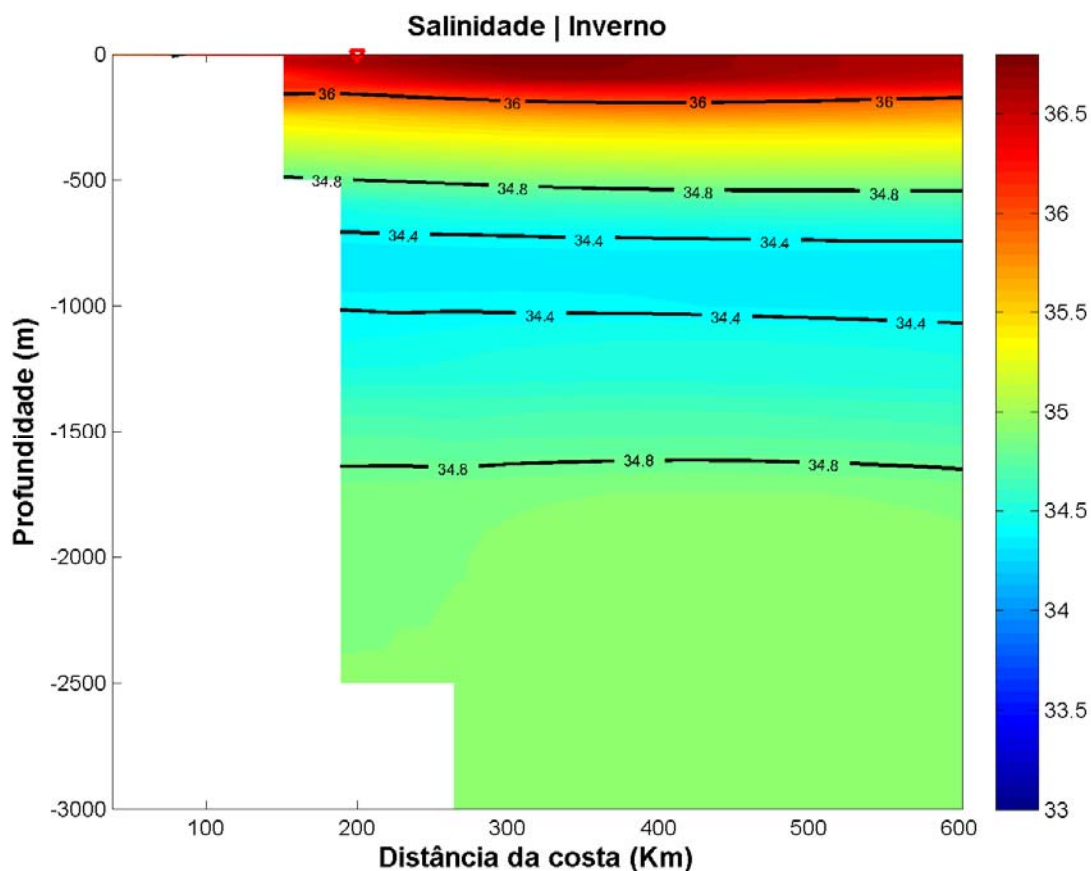


Figura 44: Seção vertical de salinidade climatológica em um perfil normal à costa, para o período de inverno. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.

### 2.3.2. Massas D'água

Normalmente, nesta região da costa brasileira são encontradas as seguintes massas d'água: AC – Água Costeira, AT - Água Tropical, AM - Água de Mistura (água proveniente da mistura entre a AT e AC), ACAS - Água Central do Atlântico Sul, AIA - Água Intermediária Antártica, APAN - Água Profunda do Atlântico Norte (MIRANDA, 1991).

Silva *et al* (1982) desenvolveram um gabarito tentativo para as massas d'água da costa sudeste brasileira, com a seguinte classificação:

- » Água Costeira (AC) – água de salinidade abaixo de 33 devido à influência de descarga fluvial.

- » Água Tropical (AT) – definida por valores de salinidade maiores que 36 e de temperatura maiores que 18°C. Esta massa d’água é transportada para o sul pela Corrente do Brasil, ocupando a camada mais superficial.
- » Água de Mistura (AM) – apresenta salinidade variando entre 33 e 36 e valores de temperatura acima de 18°C. Massa d’água proveniente da mistura entre AT e AC.
- » Água Central do Atlântico Sul (ACAS) – apresenta um mínimo de temperatura de 6°C e um máximo de 18°C; e a salinidade oscilando entre 34,5 e 36. Massa d’água situada entre a Água Tropical e a Água Intermediária Antártica. É formada na Convergência Subtropical.
- » Água Intermediária Antártica (AIA) – apresenta valores de temperatura entre 2,75°C e 5°C e de salinidade entre 34,1 e 34,5. É proveniente da Convergência Antártica e apresenta um mínimo de salinidade entre 700 e 1100 m de profundidade.
- » Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) – apresenta valores de temperatura entre 2,0°C e 4°C e de salinidade entre 34,7 e 35,0. É formada no Hemisfério Norte na junção das Correntes da Groelândia e Labrador.

Uma avaliação das massas d’água presentes na região do Campo de Xerelete foi feita com os dados dos perfis de temperatura e salinidade disponíveis no NODC, coletados entre os anos de 1911 e 2009.

Estes dados pertencem à base conhecida como WOD09 (*World Ocean Database 2009*), e correspondem aos dados históricos armazenados no NODC, coletados por diversas campanhas e equipamentos por todo o globo. Uma descrição completa sobre esta base de dados pode ser encontrada em Boyer *et al.* (2009).

Na Figura 45 é apresentada a localização do Campo de Xerelete e das estações de coleta dos dados apresentados. Os dados obtidos foram tratados, e observações com valores inferiores ou superiores a três vezes o desvio padrão para cada profundidade foram descartadas.

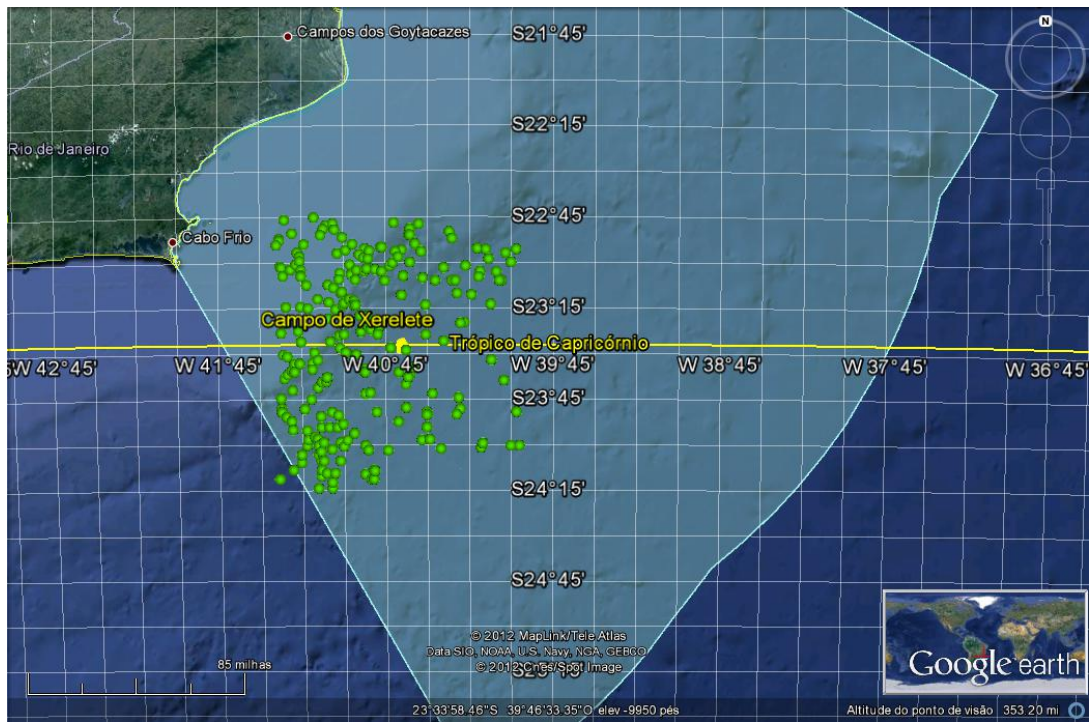


Figura 45: Localização das estações de coleta dos dados de temperatura e salinidade obtidos do NODC (pontos verdes).

Na Figura 46 é apresentado o diagrama TS espalhado elaborado com os dados do NODC. As cores são referentes às profundidades dos dados.



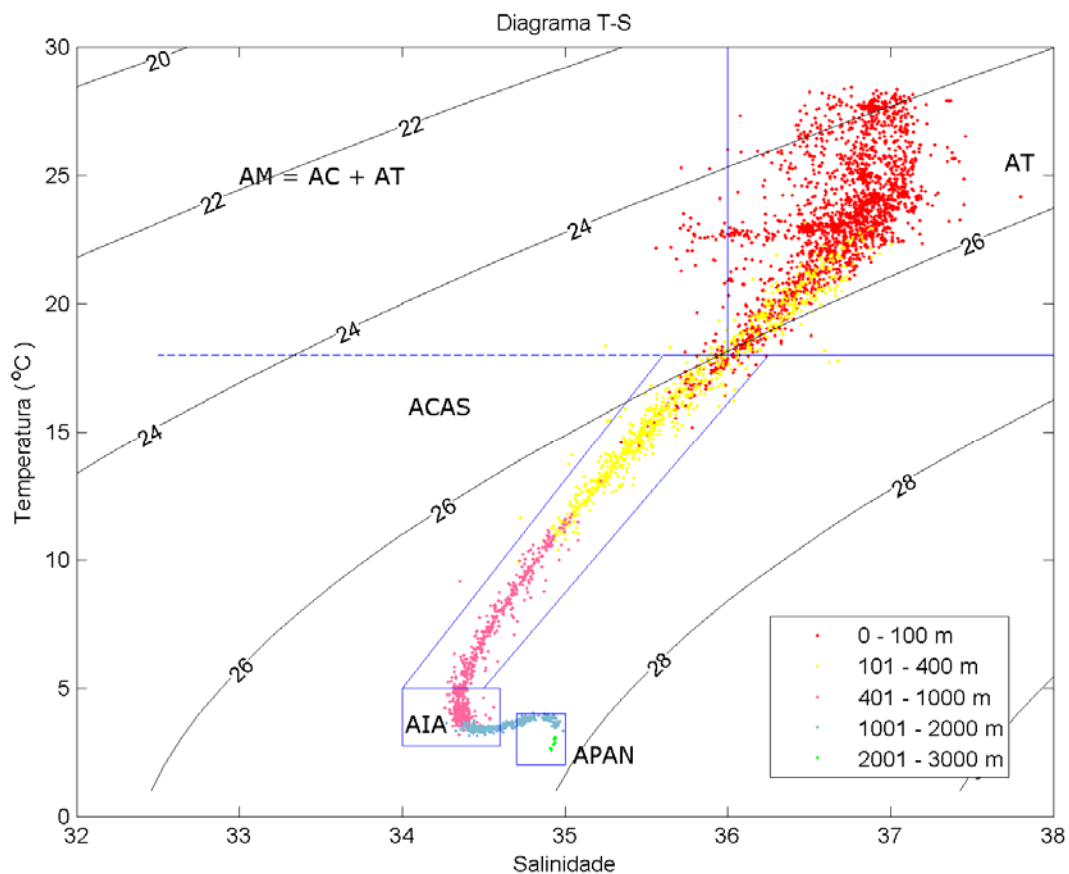


Figura 46: Diagrama TS espalhado para a região do Campo de Xerelete, elaborado com os dados do NODC. A linha em azul representa o gabarito proposto por Silva *et al* (1982).

Foram verificadas águas pertencentes à AT, ACAS e AIA e APAN na região. Para avaliar a distribuição vertical das massas d'água na região do Campo de Xerelete, na Figura 47 e na Figura 48 são apresentadas as seções verticais de densidade para o período de verão e inverno, elaboradas com os dados do WOA09 apresentados na seção anterior, para a seção normal à costa indicada na Figura 32. Nestas figuras, as linhas isopicnais representam as interfaces entre as massas d'água apresentadas. Não se apresentam diferenças significativas na localização das massas d'água entre as duas estações.

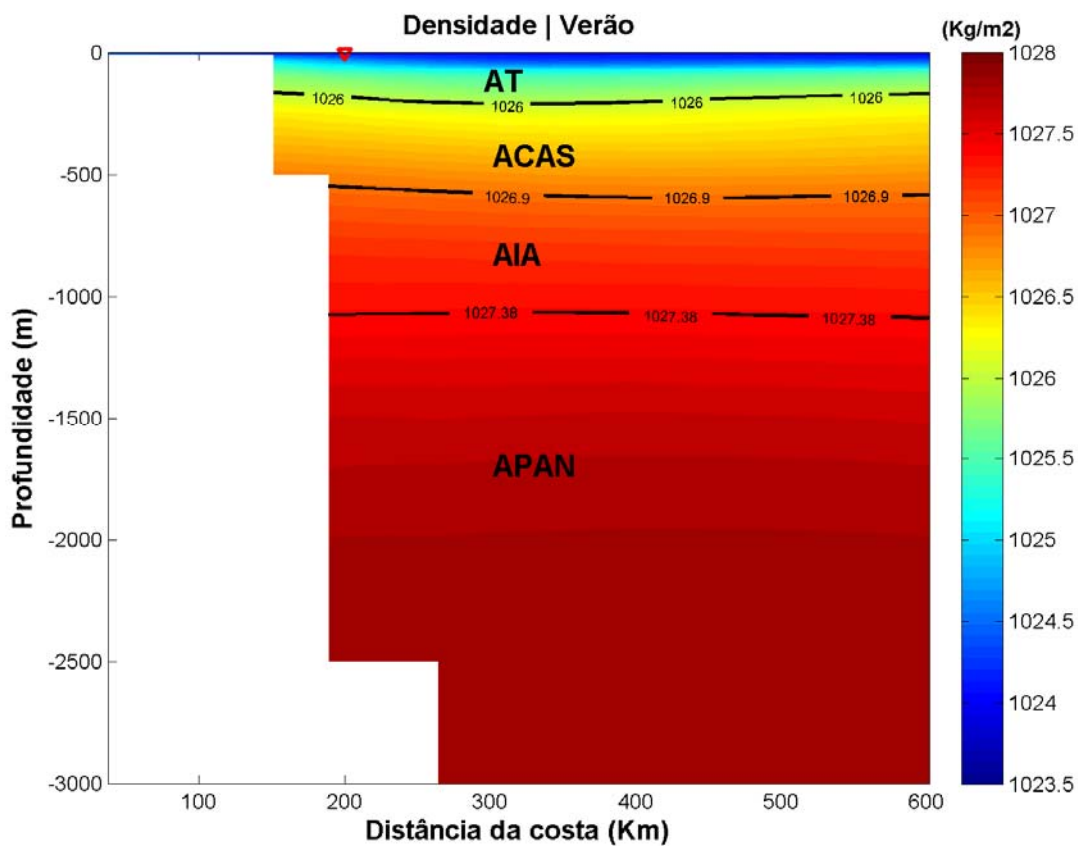


Figura 47: Seção vertical de densidade em um perfil normal à costa para o período de verão. As linhas isopícnais representam os limites entre as massas d'água. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.

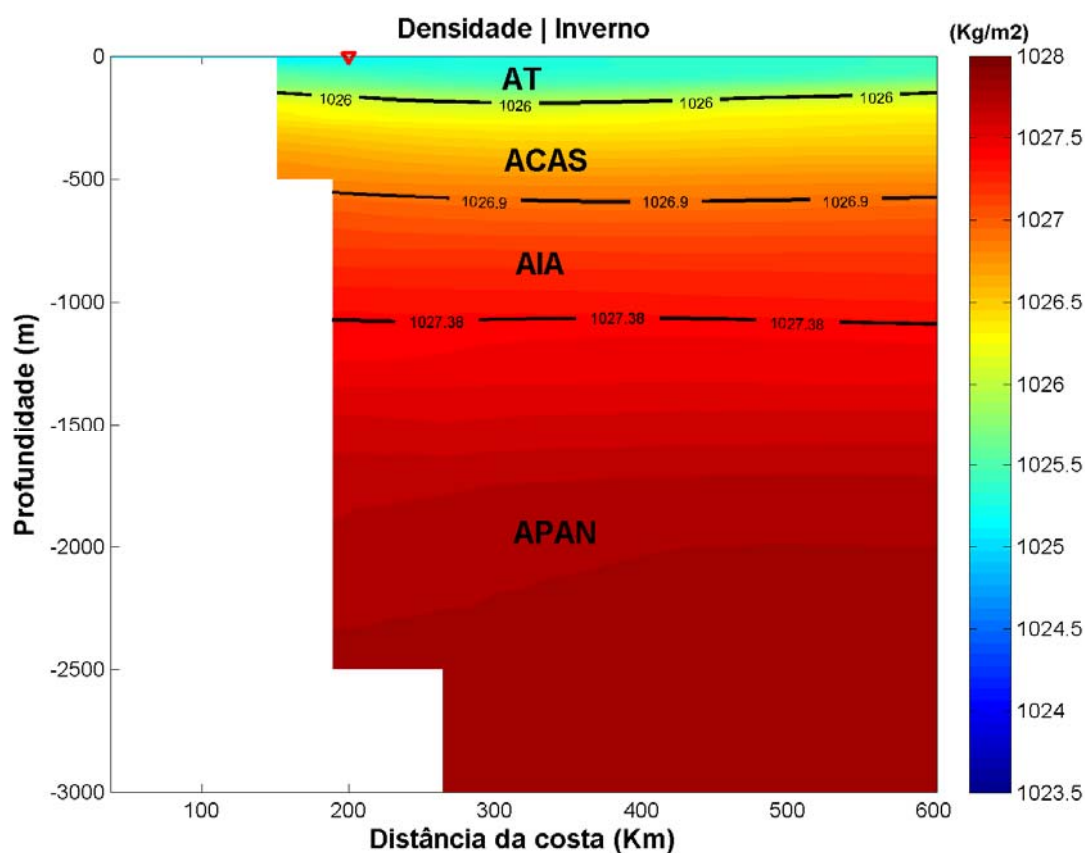


Figura 48: Seção vertical de densidade em um perfil normal à costa para o período de inverno. As linhas isopícnais representam os limites entre as massas d'água. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.

### 2.3.3. Regime de Correntes

A região de estudo encontra-se sob a influência do giro subtropical do Atlântico Sul (Figura 49), que faz parte da circulação de larga escala que ocorre nas bacias dos oceanos mundiais (PETERSON; STRAMMA, 1991). Esta circulação é complexa e apresenta características e padrões que variam ao longo da coluna d'água.

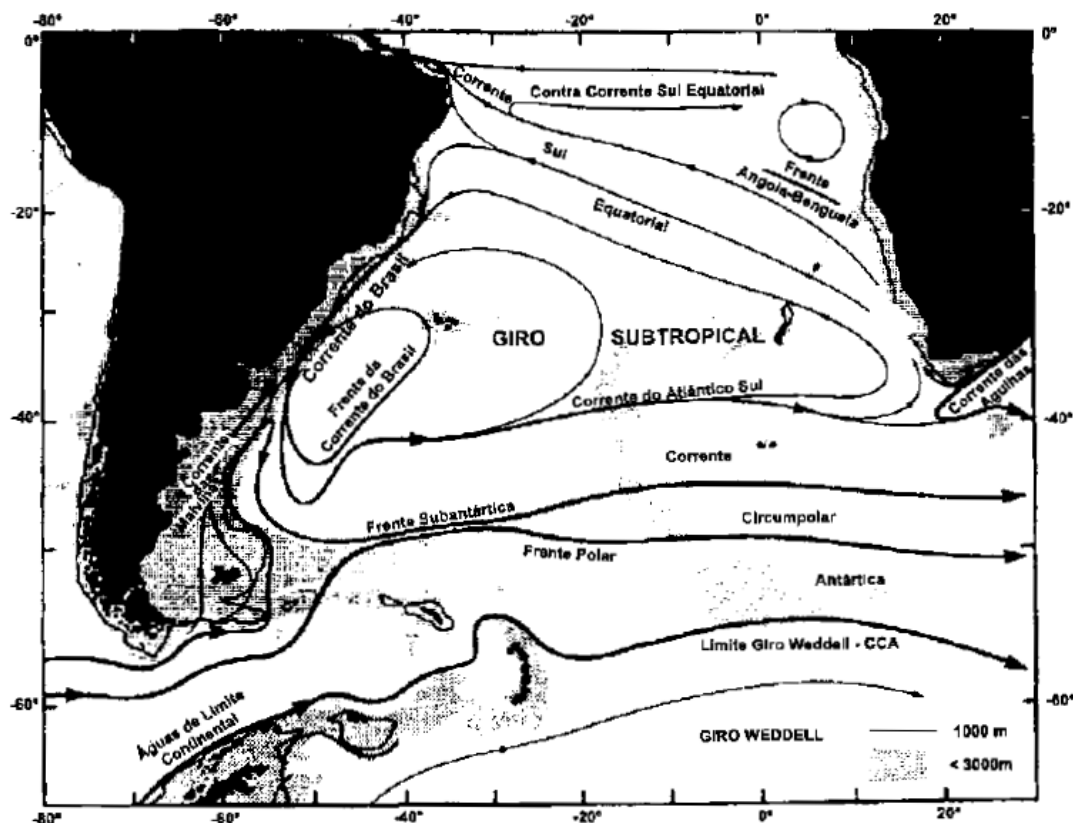


Figura 49: Representação esquemática do giro subtropical do Atlântico Sul. Fonte: Silveira (2000).

A circulação oceânica é influenciada por diversos aspectos, como a circulação atmosférica, características termohalinas, topografia de fundo e orientação da linha de costa. Esses fatores interagem para formar a dinâmica oceânica da região (FRAGOSO, 2004).

A região onde está localizado o Campo de Xerelete sofre a influência da Corrente do Brasil (CB), entre a superfície e 500m, aproximadamente, uma corrente que flui ao longo da costa brasileira (PETERSON; STRAMMA, 1991). Os campos de temperatura, salinidade e densidade apresentados nos capítulos anteriores apresentam a massa d'água (Água Tropical) transportada pela CB, relativamente quente e salina.

De acordo com os dados e informações disponíveis, a Corrente do Brasil flui no bordo oeste do giro subtropical do Atlântico Sul, podendo ser encontrada sobre a plataforma continental ou próxima ao talude continental (FUNDESPA/IOUSP/ PETROBRAS, 1994).

Na Figura 50 é apresentada uma representação esquemática do Sistema Corrente do Brasil. Denomina-se como Sistema Corrente do Brasil, o sistema formado pelas feições

oceanográficas geradas pela própria CB, seus meandros e vórtices e pela subjacente Corrente de Contorno Intermediária (GODOI, 2005).

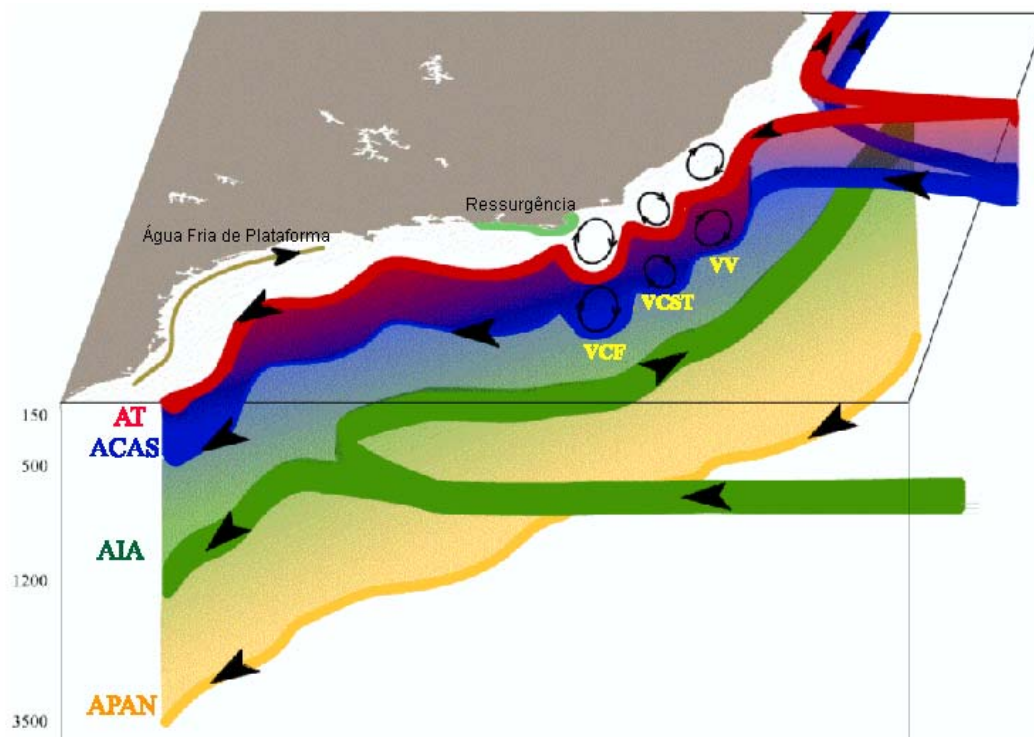


Figura 50: Representação esquemática do Sistema Corrente do Brasil. Fonte: Adaptado de Godoi (2005).

Observam-se as correntes de contorno, sua atividade de mesoescala e as massas d'água transportadas por elas. Em vermelho está a Água Tropical (AT), ocupando a camada mais superficial, indo até 150 m. Logo abaixo encontra-se a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), em azul, ocupando a lâmina d'água até aproximadamente 500 m. Em seguida encontra-se a Água Intermediária Antártica (AIA), em verde, até aproximadamente 1200 m. A Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), em amarelo, é a massa d'água mais profunda, encontrada a 3500 m de profundidade.

Também podem ser observados os vórtices ciclônicos e anticiclônicos que fazem parte dos Sistema: o Vórtice de Cabo Frio (VCF), o Vórtice Cabo de São Tomé (VCST) e o Vórtice Vitória (VV), respectivamente localizados ao largo de Cabo Frio - RJ, Cabo de São Tomé - RJ e Vitória - ES.

Os fenômenos transientes da Corrente do Brasil (vórtices e meandros) são fatores bastante relevantes de sua dinâmica, sendo primeiro observados no final da década de 1950 (DHN, 1969,

*apud* FRAGOSO, 2004). Apesar da Corrente do Brasil apresentar transporte inferior ao de outras correntes de contorno oeste, possui muitos vórtices e meandros (CALADO, 2000). Essas feições oceanográficas representam um desafio à previsão oceânica, uma vez que sua variabilidade espaço-temporal irá acrescentar um alto grau de variabilidade na circulação local, o que contribui para uma menor precisão das previsões de curto e médio período.

Segundo Silveira *et al.* (2000), uma das primeiras descrições de meandros e vórtices da CB foi realizada por Mascarenhas *et al.* (1971, *apud* SILVEIRA, 2000), que descreveram a presença de vórtices e meandros ciclônicos e anticiclônicos ao largo de Cabo Frio utilizando mapas de topografia dinâmica. Eles especulam que as feições topográficas da região favoreceriam a geração destes vórtices e meandros. Campos *et al.* (1996) atribui a ocorrência destes fenômenos transientes à mudança de orientação da costa a partir de Cabo Frio e ao gradiente de batimetria, já que a plataforma ao norte de Cabo Frio é estreita e se torna mais larga e suave na Baía de Santos. Assim, a CB que flui ao longo da quebra da plataforma, por inércia, dirigiria-se em direção às águas mais profundas na latitude de Cabo Frio. Utilizando o princípio de conservação de vorticidade potencial, o autor mostra que a CB iria meandrar ciclonicamente. Evidências de meandros e vórtices ciclônicos e anticiclônicos foram também detectados em imagens de satélite, sugerindo que o início da atividade ciclogênica pode ocorrer ao largo do Cabo de São Tomé (22°S). Um exemplo de meandramentos e vórtices obtidos a partir de imagens de satélite é observado na Figura 51.

## Temperatura da Superfície do Mar - TSM Carta - Imagem

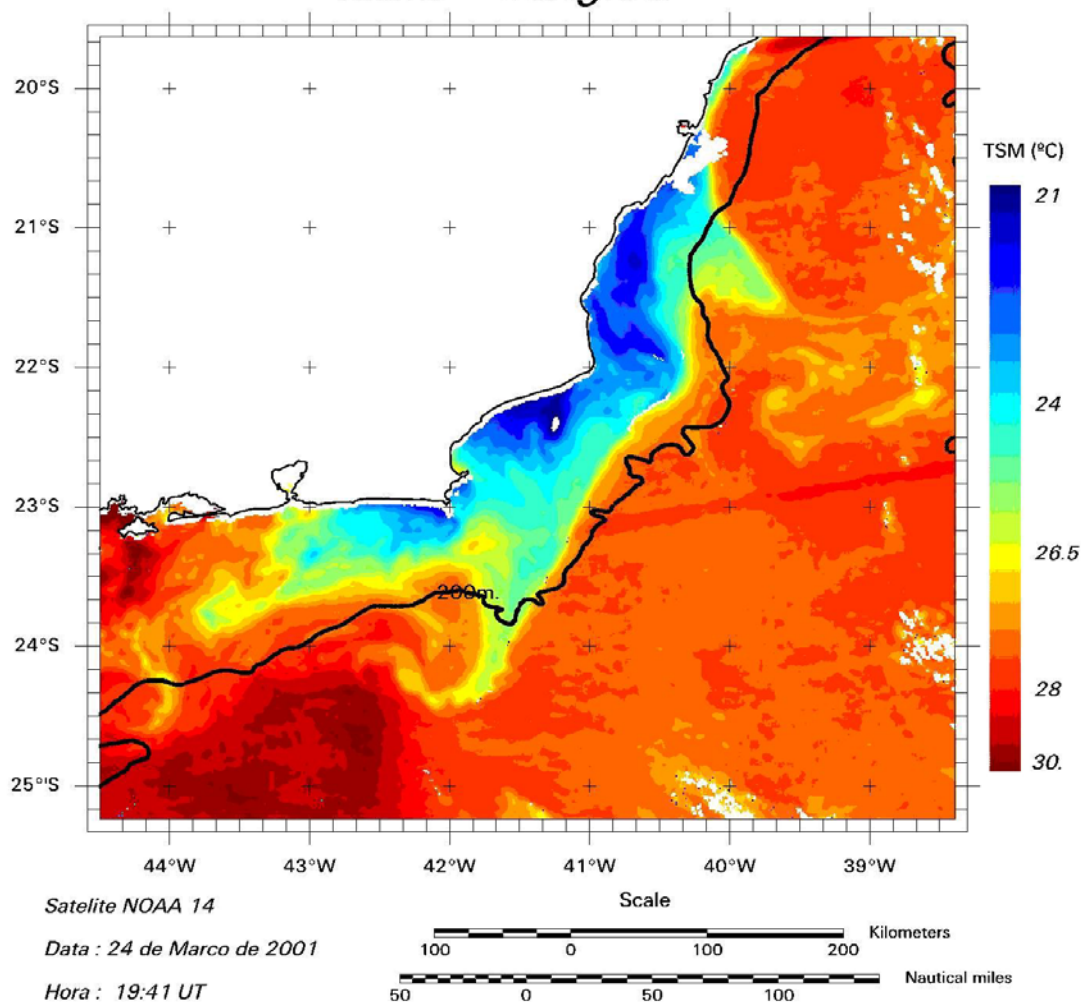


Figura 51: Carta-imagem da temperatura da superfície do mar processada pelo INPE do dia 24 de março de 2001 mostrando feições vorticais próximas ao Cabo de São Tomé e Cabo Frio. Fonte: Fragoso, 2004.

Fragoso (2004) realizou uma análise mais detalhada dessas feições a partir de resultados obtidos por modelagem numérica. Nesses resultados (Figura 52 à Figura 55) foram encontrados vários vórtices com meia vida da ordem de alguns dias na Bacia de Campos ao longo de um ano. Alguns apresentaram deslocamentos de até dezenas de quilômetros. Um exemplo do comportamento dessas feições é apresentado a seguir.

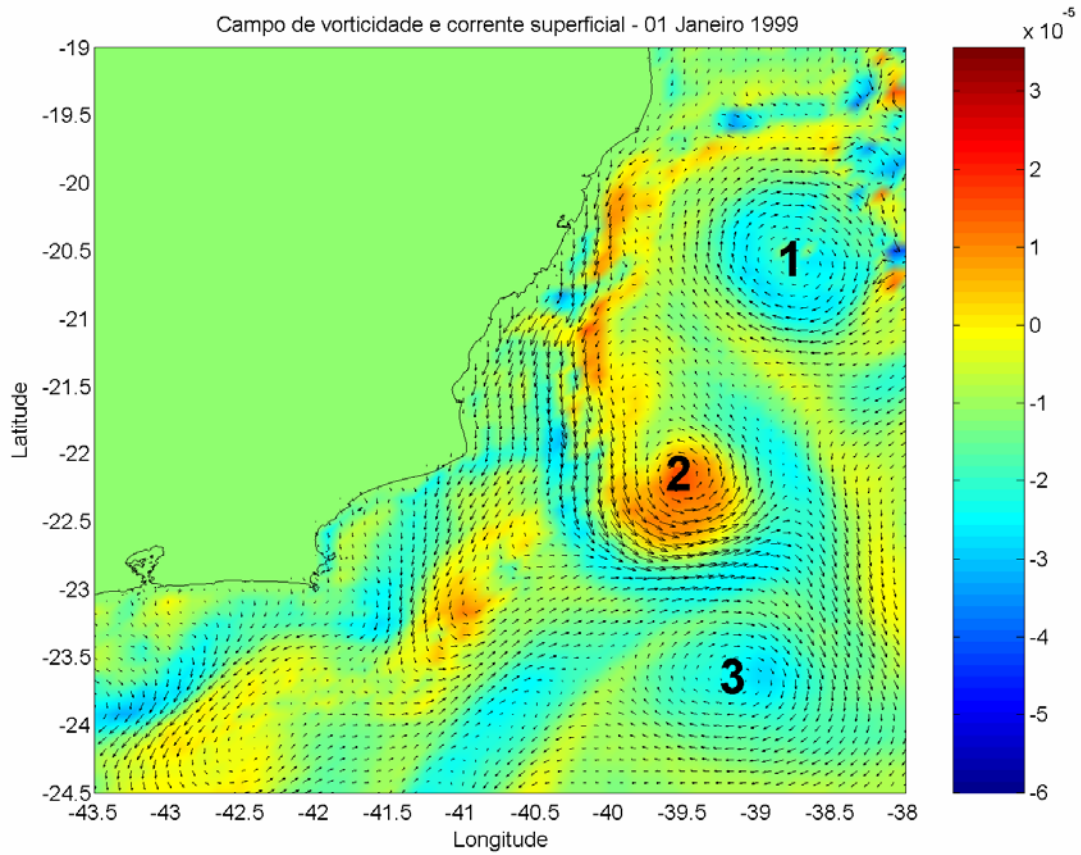


Figura 52: Campo de vorticidade relativa (s-1) e velocidade em superfície para 1º de janeiro de 1999 resultante do modelo numérico de Fragoso, 2004.



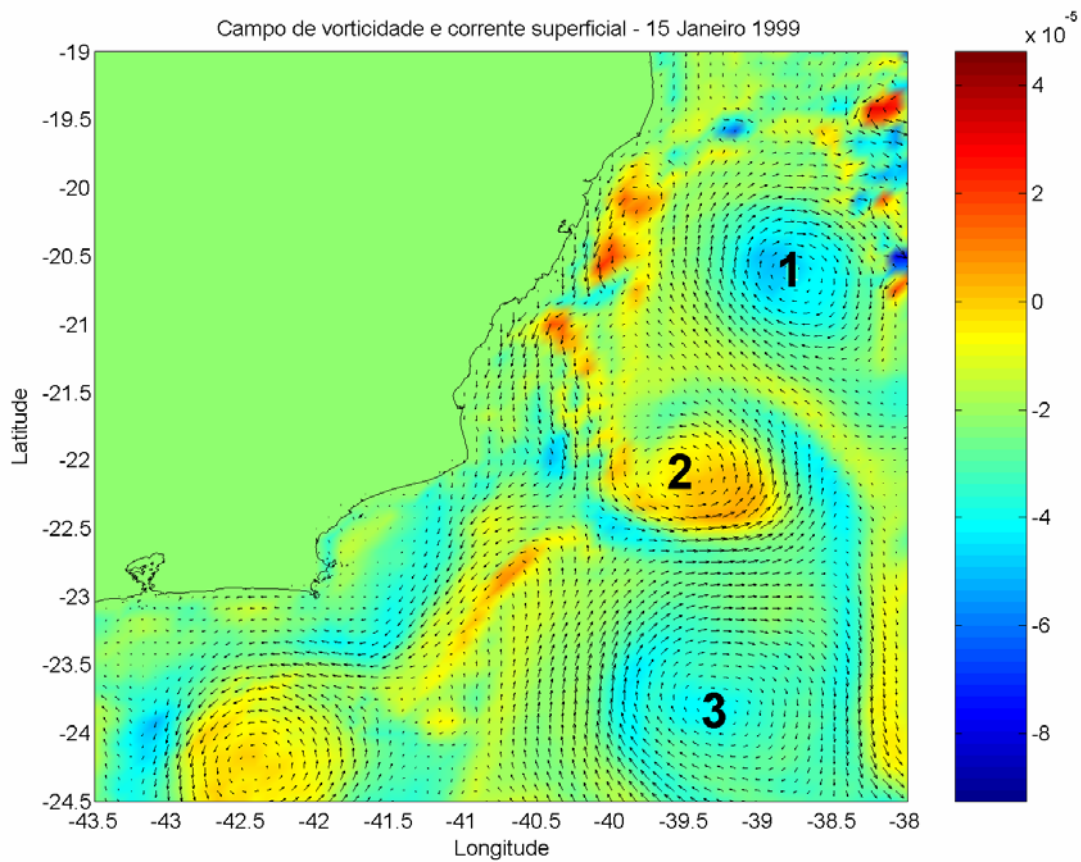


Figura 53: Campo de vorticidade relativa ( $s^{-1}$ ) e velocidade em superfície para 15 de janeiro de 1999 resultante do modelo numérico de Fragoso, 2004.

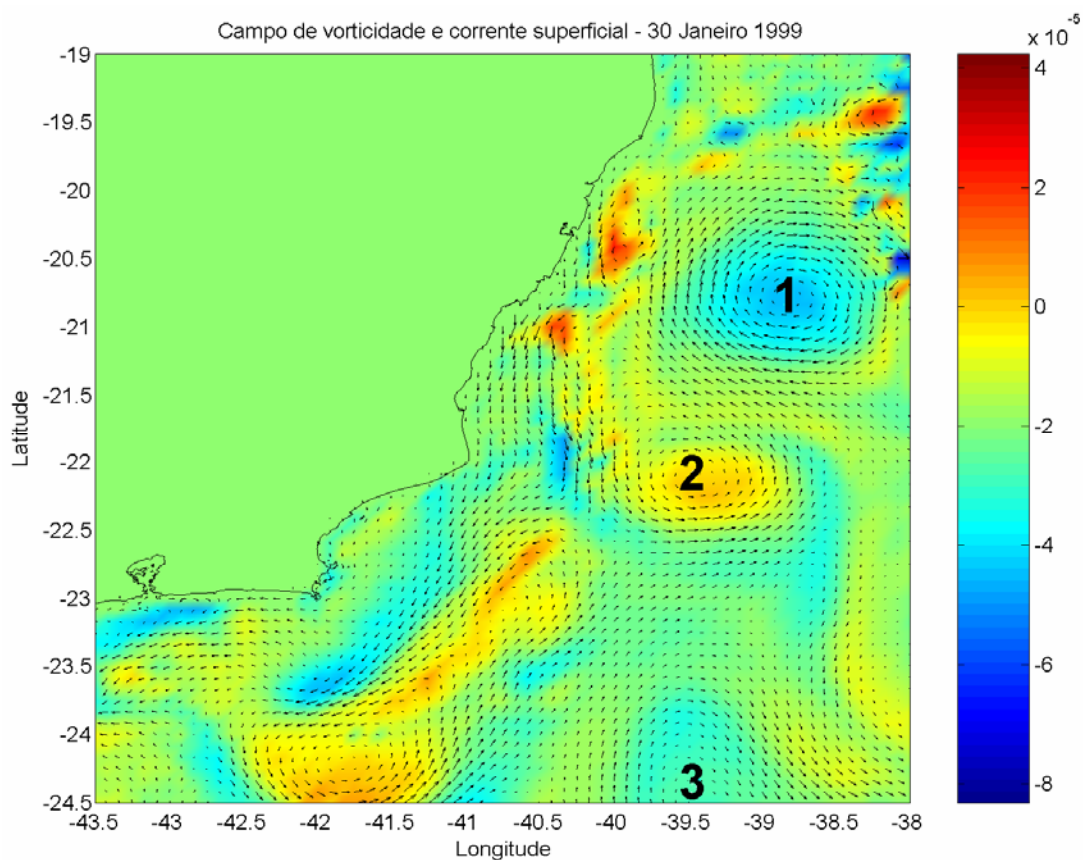


Figura 54: Campo de vorticidade relativa ( $s^{-1}$ ) e velocidade em superfície para 30 de janeiro de 1999 resultante do modelo numérico de Fragoso, 2004.

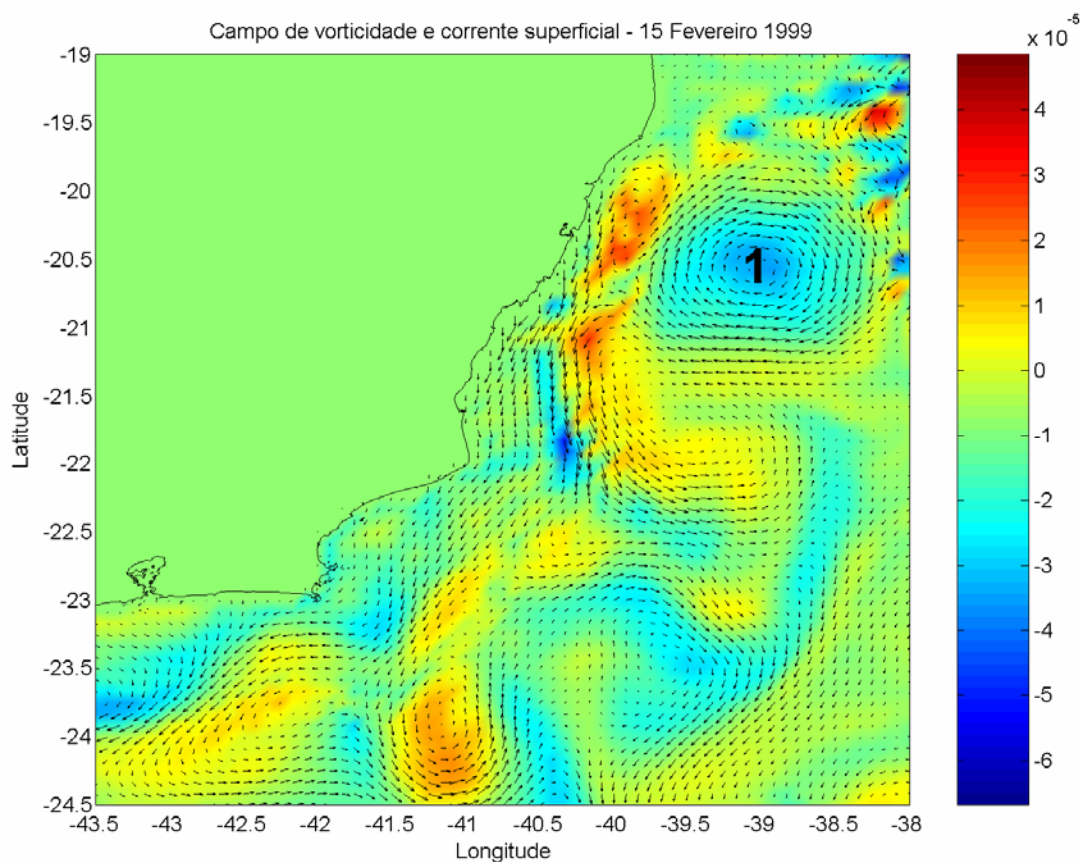


Figura 55: Campo de vorticidade relativa ( $s^{-1}$ ) e velocidade em superfície para 15 de fevereiro de 1999 resultante do modelo numérico de Fragoso, 2004.

A sequência de 1º de janeiro a 15 de fevereiro mostra a evolução de três vórtices marcados nas figuras como 1, 2 e 3. O vórtice 1 não apresenta variação significativa de posição, estando presente ao longo de todo o período. Esse é um vórtice de duração longa, o Vórtice de Vitória. O vórtice anticiclônico identificado com o número 2, não apresenta deslocamento significativo, mas sua intensidade gradualmente diminui, até não ser mais observado no dia 15 de fevereiro. O vórtice 3, ciclônico, ao mesmo tempo que se desloca para sul, aumenta de tamanho, mas vai se enfraquecendo, até se dissipar ainda no dia 30 de janeiro. Portanto, tem-se um vórtice de longa duração ciclônico, um anticiclônico que durou cerca de 45 dias e um ciclônico que se dissipou em 30 dias. Tal quadro representa bem a quantidade de vórtices e a diversidade de suas dinâmicas na região da Bacia de Campos e arredores.

A seguir serão apresentadas algumas estimativas de valores de transporte e de velocidade da Corrente do Brasil de acordo com a literatura.

Evans *et al.* (1983) observaram a Corrente do Brasil fluindo através dos bancos mais próximos à costa, a partir de uma pesquisa batitermográfica (XBT) e um estudo hidrográfico realizado entre as latitudes de 19° S e 25° S. O estudo desses autores permitiu localizar a corrente tanto ao norte quanto ao sul da cadeia Vitória-Trindade (20,30°S). Transportes geostróficos foram estimados para uma seção hidrográfica assumindo-se níveis de 500 e 1000 m e valores de aproximadamente 3,8 Sv e 6,8 Sv (1Sv = 106 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) foram registrados para o transporte através do canal nos bancos, em 20° 28' S, relativos a 500 m e 1.000m, respectivamente. A velocidade superficial observada foi igual a 0,52 m/s.

Utilizando-se relações T-S, também foram calculados transportes para seções de XBT, resultando em uma estimativa de 4,4 Sv para a latitude de 21° 40' S. A velocidade da corrente registrada nesta latitude foi de 0,61 m/s.

Lima (1997) calculou o transporte para sul da Corrente do Brasil como sendo de 5,5 ± 2,6 Sv na latitude de 22° S, estando de acordo com as estimativas do transporte geostrófico feitas anteriormente para a região.

Para obter informações sobre a variação espacial da estrutura térmica e localizar a Corrente do Brasil, ao norte e ao sul dos bancos submarinos da Cadeia Vitória-Trindade (20°30' S), Signorini *et al.* (1978) realizou, em abril de 1973 um levantamento oceanográfico na região.

A estrutura da corrente e o transporte de volume, relativos à 500 m de profundidade, foram obtidos usando-se dados hidrográficos e também medidas com XBT. O balanço do transporte de volume, através de todas as seções entre 19° S e 22° S, indicou que a Corrente do Brasil flui através da passagem entre os bancos localizados mais próximos da costa. O transporte de volume resultante obtido foi de 2,9 Sv.

Um resumo dos resultados obtidos a partir do levantamento bibliográfico pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14: Valores de velocidade e transporte da corrente do Brasil na região da Bacia de Campos obtidos da bibliografia. Fonte: Silveira (2007).

Latitude	Prof. De Referência (m)	Transporte (Sv)	Velocidade Máxima (m/s)	Referência
21° S	600	-9,4	-	Schimid <i>et al.</i> (1995)
21° S	Numérico	-6,7	-0,83	Silveira <i>et al.</i> (2005)
21° S	Numérico	-7,9	-0,6	Silveira <i>et al.</i> (2005)
21° 40'S	500	-4,4	-0,61	Evans <i>et al.</i> (1983)
22° S	600	-5,2	-0,55	Signorini (1978)
22° S	Por fundeio	-5,5 ± 2,6	-	Lima (1997)
22° S	Numérico	-7,1	< -0,55	Lima (1997)
23° S	600	-6	-0,7	Signorini (1978)
23° S	550	0,81	-0,49	Miranda & Castro Filho (1979)
23° S	Pegasus	-11	-0,5	Evans & Signorini (1985)
23° S	Pegasus	-6	-0,7	Garfield (1990)
23° S	600/1300	-0,93	-	Stramma (1989)
23° S	Por fundeio	-1,3	-0,28	Müller <i>et al.</i> (1998)
23° 30'S	600	-9,4	-0,55	Signorini (1978)
24° S	1300	-7,5	-0,25	Fisher (1964)
24° S	600	-7,5	-0,57	Signorini (1978)
24° S	500/1000	0,53	-0,31	Evans <i>et al.</i> (1983)
24° S	600/1300	0,93	-	Stramma (1989)
24° S	750/900	0,83	-	Campos <i>et al.</i> (1995)

Para exemplificar os campos médios de circulação na região da Bacia de Campos foram utilizados os dados da Análise Global do modelo Hycom (*Hybrid Coordinate Ocean Model*) para o período de janeiro a dezembro de 2007. O HYCOM é um modelo de circulação oceânica global, que utiliza discretização horizontal em diferenças finitas (GABIOUX, 2008), e tem como principal característica a utilização de um sistema de coordenadas verticais híbridas, isto é, utiliza o sistema de coordenadas isopicnais para as áreas de oceano aberto e estratificado, coordenadas z (cartesianas) para a camada de mistura e regiões pouco estratificadas, e coordenadas sigma para regiões com menores profundidades e topografia de fundo variável (zonas costeiras). Utilizando esses três sistemas de coordenadas, o modelo pode conservar as características das massas d'água por longos períodos de tempo em regiões oceânicas (coordenada isopicnal), obter alta resolução na camada de mistura ou em regiões com pouca estratificação (coordenada z), e resolver melhor a topografia de fundo em áreas costeiras ou sobre a plataforma continental (coordenada sigma).

Na Figura 56, Figura 57 e Figura 58 são apresentados os campos médios elaborados a partir de todo o período analisado (média anual), para o período de verão (dezembro a fevereiro) e para o período de inverno (junho a agosto), respectivamente.

Observa-se a CB, caracterizada pelos valores mais altos de intensidade, fluindo na direção S/SW ao longo da Bacia de Campos durante todo o ano e a localização do Campo de Xerelete na borda oeste da CB.

O padrão direcional médio apresentado pelo fluxo da CB não apresentou variações significativas entre os três períodos analisados, entretanto, no período de verão a CB encontra-se mais larga.

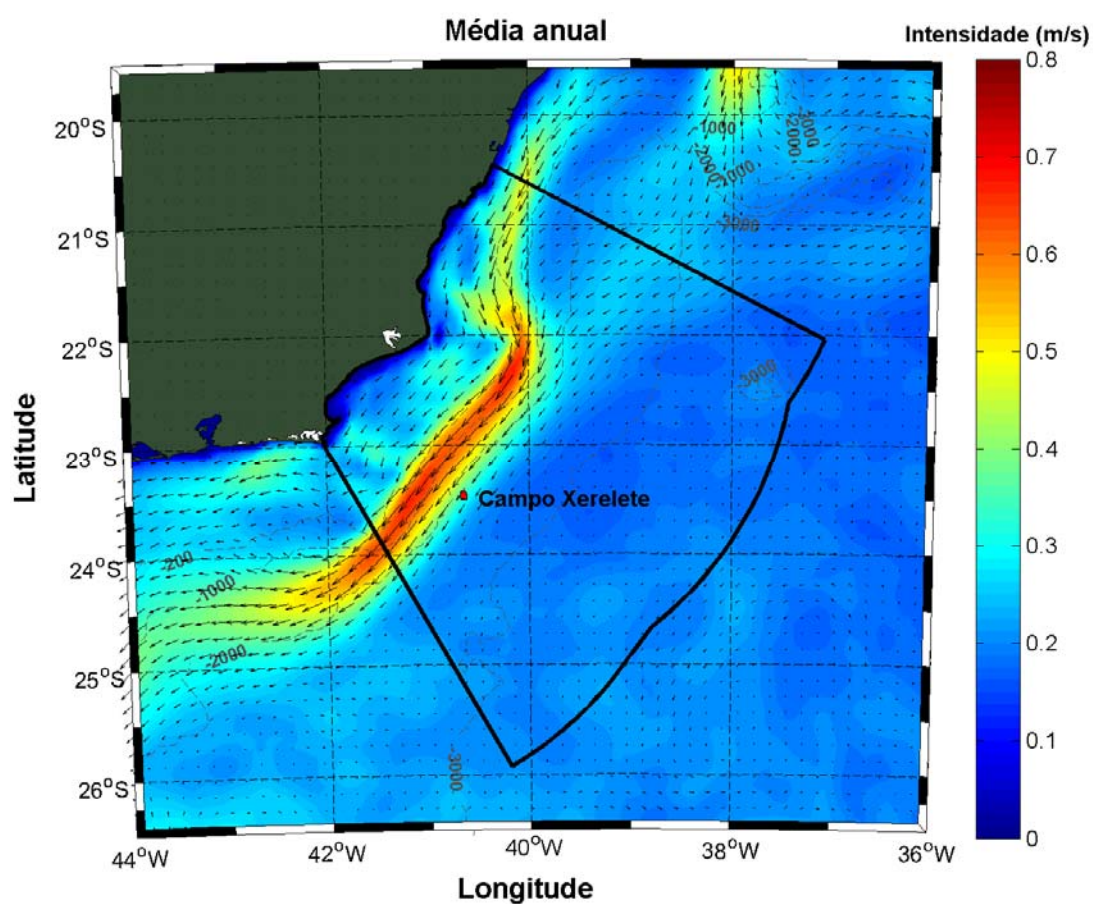


Figura 56: Campo médio anual das velocidades de corrente na região da Bacia de Campos.

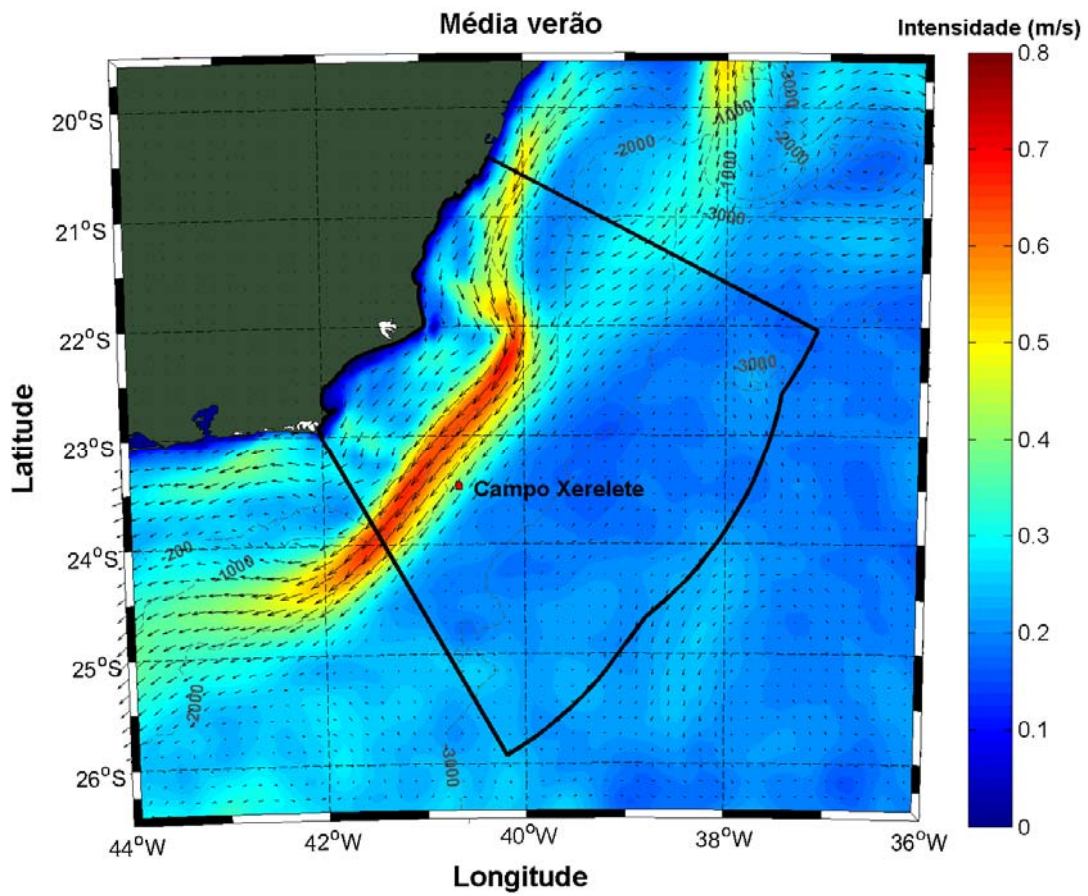


Figura 57: Campo médio sazonal de verão das velocidades de corrente na região da Bacia de Campos.

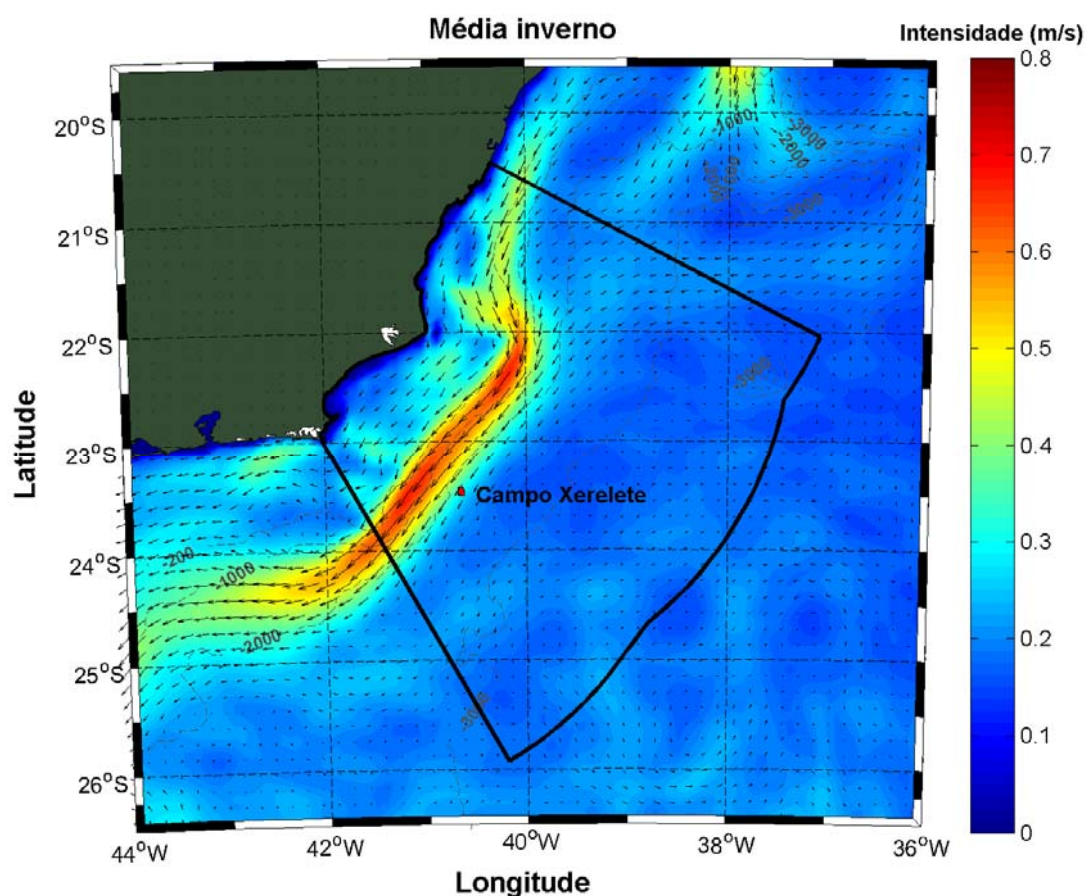


Figura 58: Campo médio sazonal de inverno das velocidades de corrente na região da Bacia de Campos.

Para análise das correntes em profundidade na região do Campo de Xerelete, foram utilizados dados coletados por correntômetros acústicos do projeto DEPROAS (Dinâmica do Ecossistema de Plataforma da Região Oeste do Atlântico Sul) em 4 níveis de profundidade: 23, 85, 155 e 195 m (Figura 59). O fundeio foi instalado na quebra da Plataforma Continental (profundidade nominal de 200 m) na região de Cabo Frio (23.75°S e 41.8°W) em dois períodos diferentes. O primeiro, de julho a novembro de 2002, e o segundo, de janeiro de 2003 a maio de 2004. A Figura 60 apresenta a localização do fundeio utilizado e a Figura 61 apresenta as rosas de corrente para as quatro profundidades.



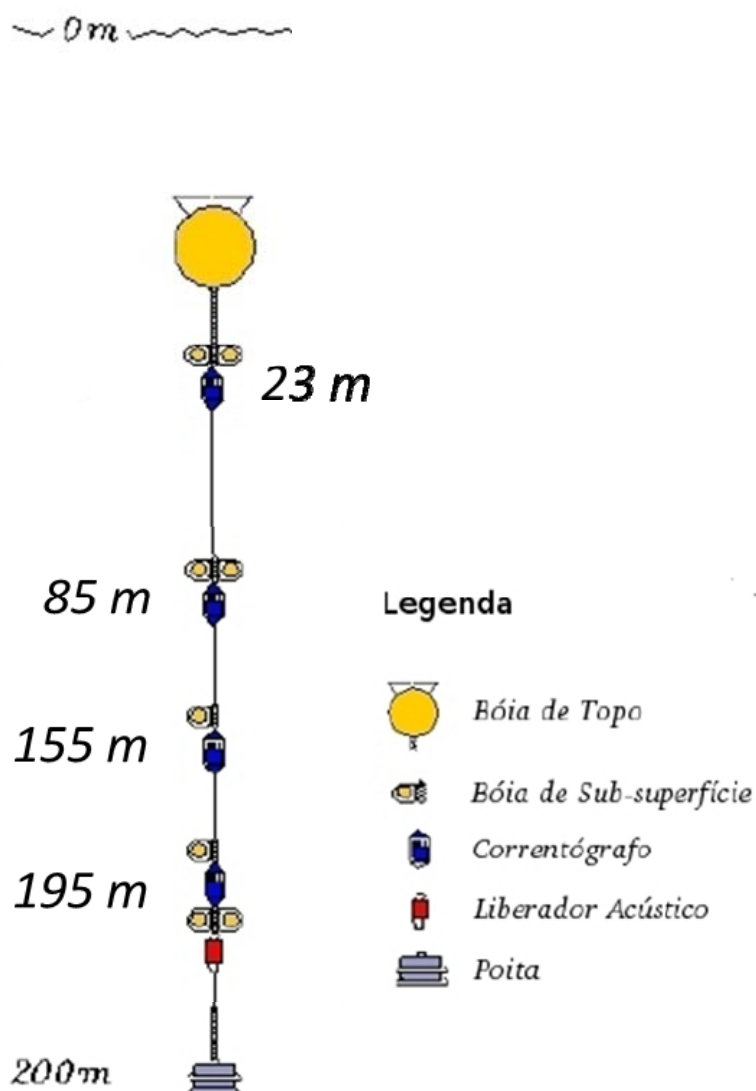


Figura 59: Ilustração esquemática da estrutura do fundeio. Fonte: adaptado de Santos (2009).

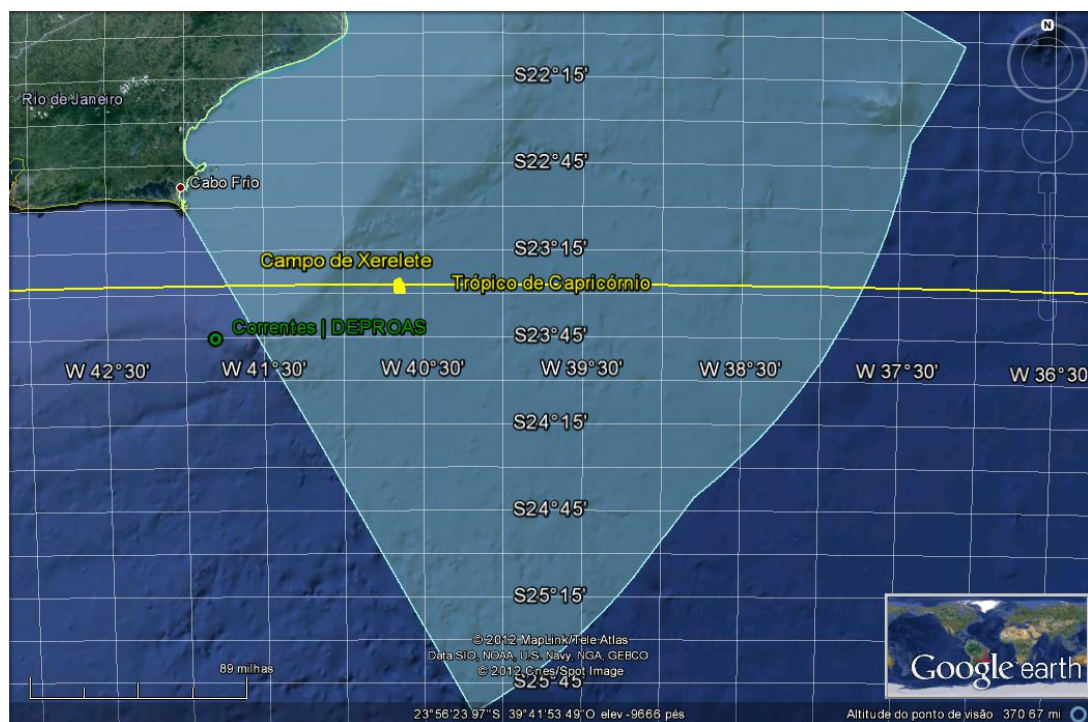


Figura 60: Localização do fundo do DEPROAS utilizado em relação ao Campo de Xerelete.

No nível de 23 m (mais próximo a superfície), a distribuição das direções e velocidades das correntes demonstra uma clara predominância das direções W e SW. As velocidades mais frequentes estão entre 20 e 40 cm/s. Esta distribuição reflete o domínio da Corrente do Brasil que flui nessa região, tendendo a seguir as isóbatas.

Para o nível de 85 m, além das direções W e SW, também há a ocorrência significativa de correntes rumo a SE e E. As velocidades mais recorrentes estão situadas entre 10 e 30 cm/s. Estes fluxos para E/SE podem estar associados ao movimento de água da costa em direção ao oceano, quando da ocorrência de eventos de ressurgência, porém, esta conclusão deve ser confirmada por estudos mais detalhados.

Em 155 m de profundidade, a direção SE é predominante e velocidades entre 20 e 40 cm/s são as mais comuns nesta profundidade. Correntes para E e S também são verificadas em frequências menores.

As direções E/SE e S/SW são dominantes no nível de 195 m. Correntes para N também são significativas, e intensidades entre 10 e 30 cm/s são as mais frequentes.

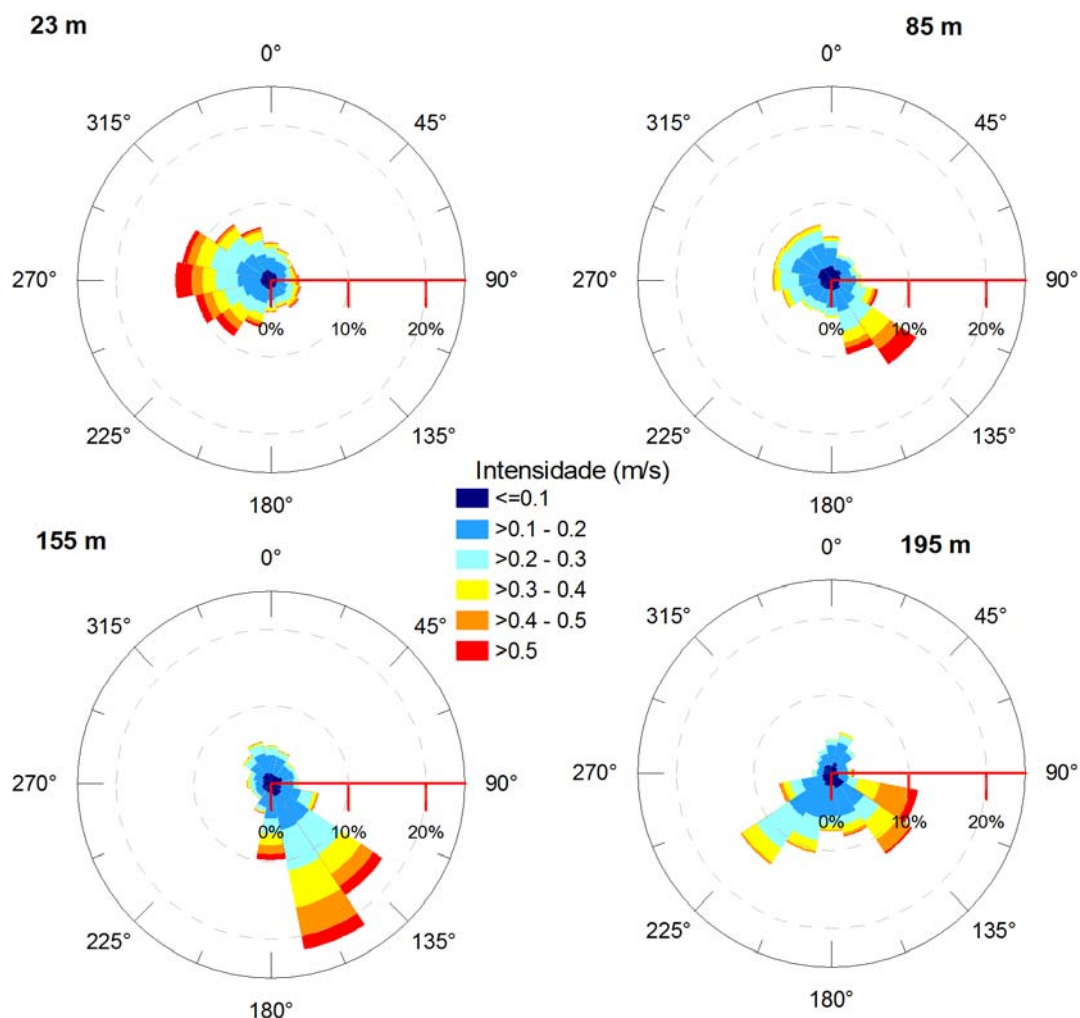


Figura 61: Rosa de corrente para as profundidades de 23, 85, 155 e 195 metros.

A Tabela 15 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as quatro profundidades. Em média, há um pequeno decréscimo das velocidades com o aumento da profundidade, entretanto, este decréscimo é mais acentuado em relação aos máximos observados, passando de 0,94 m/s em 23 m de profundidade para 0,60 m/s no nível de 195 m.

Tabela 15: Estatística básica de correntes para os quatro níveis analisados.

Profundidade (m)	Mínima (m/s)	Média (m/s)	Máxima (m/s)	D. Padrão (m/s)
23	0,0009	0,24	0,94	14,76
85	0,0008	0,20	0,77	12,64
155	0,0012	0,21	0,85	13,45
195	0,0023	0,20	0,60	12,05

Como pode ser observado na Figura 56, devido a mudança de orientação das isóbatas na região, e à localização do fundeio analisado, as informações de direção obtidas no fundeio não são significativas para o Campo de Xerelete, apenas informações de intensidade o são.

Para avaliar a distribuição espacial vertical das correntes na região do Campo de Xerelete, foi traçada uma seção da linha de costa até 300 Km distante da mesma, passando próximo ao Campo de Xerelete, seguindo uma orientação normal à costa (Figura 62). Mapas da componente da velocidade perpendicular à seção foram elaborados. Os mapas para todo o período, assim como para o período de verão e inverno podem ser observadas na Figura 63, Figura 64 e Figura 65. Nestas seções verifica-se a presença da corrente do Brasil fluindo na direção SW sobre a região da quebra da plataforma continental e do talude, desde a superfície, até 400 m de profundidade.

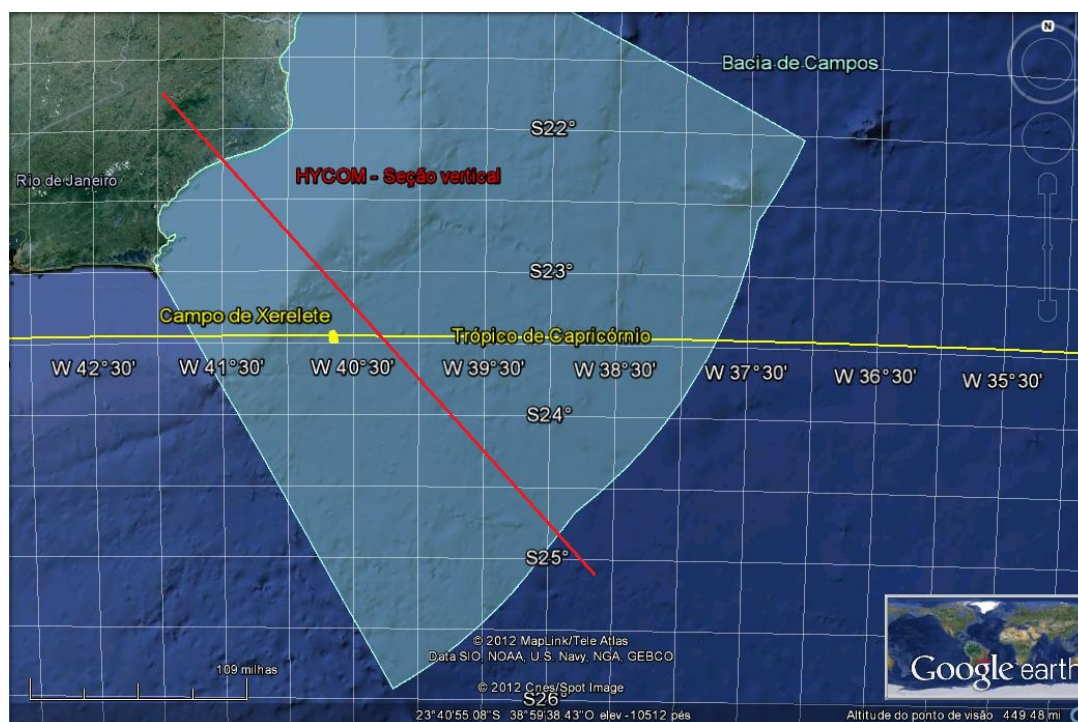


Figura 62: Seção utilizada na análise da distribuição espacial vertical de correntes indicada pela linha vermelha.

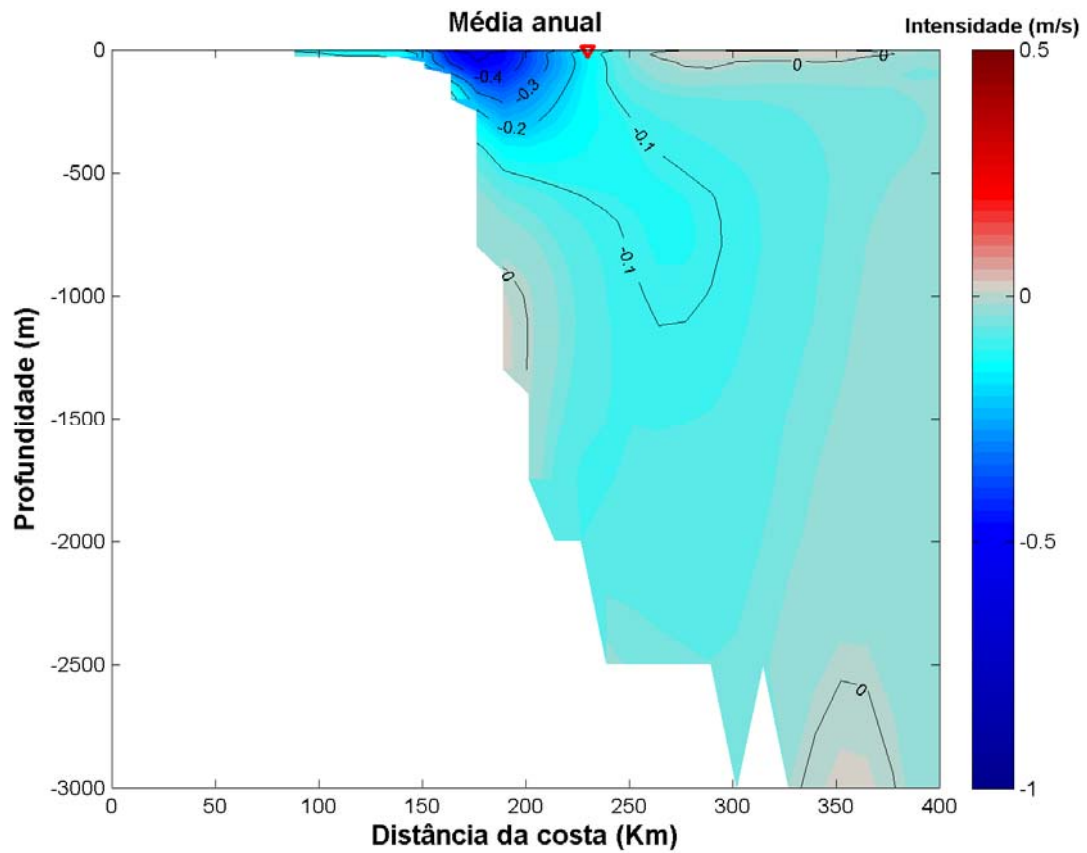


Figura 63: Seção vertical das correntes na seção 1, para todo o período analisado. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.

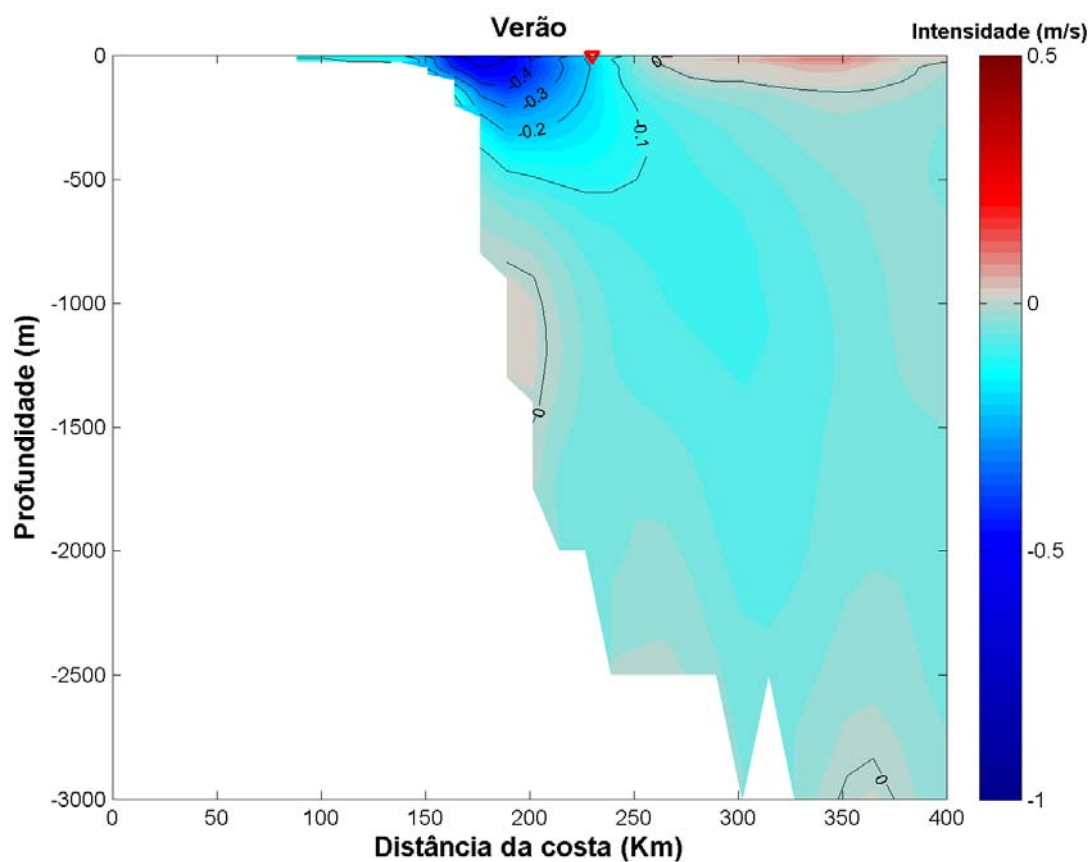


Figura 64: Seção vertical das correntes na seção 1, para o período de verão. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.

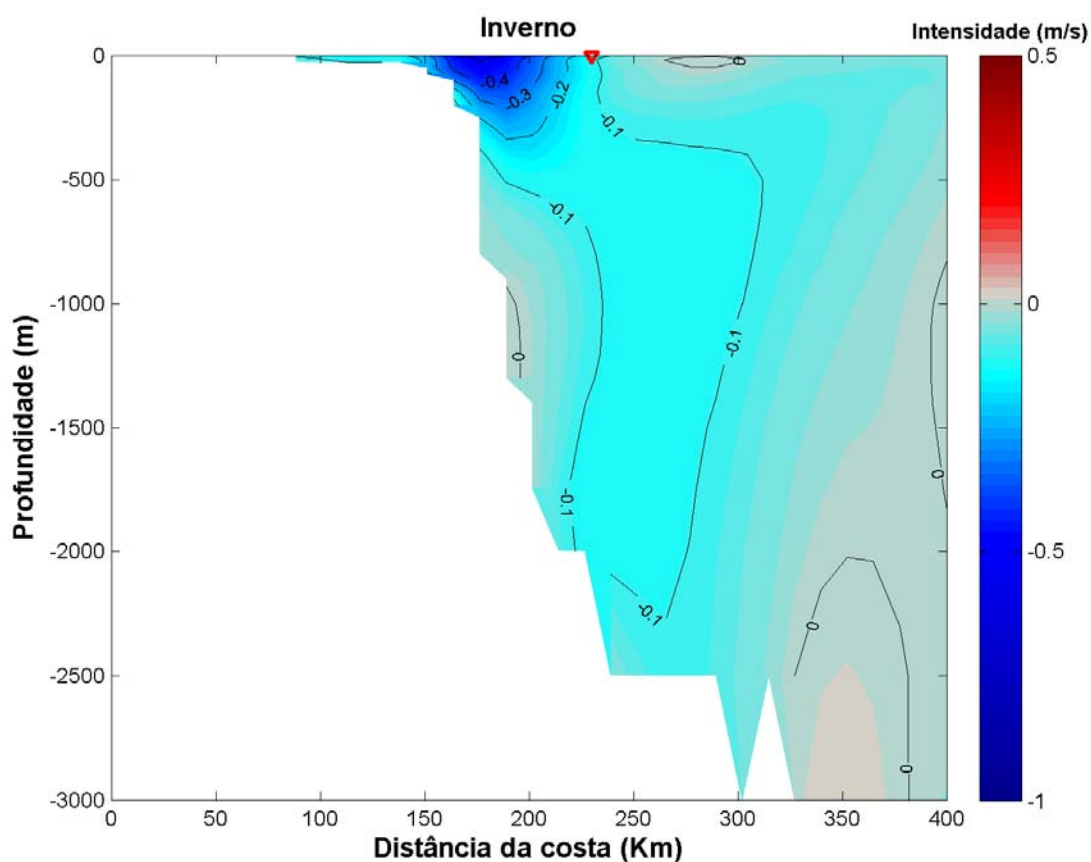


Figura 65: Seção vertical das correntes na seção 1, para o período de inverno. O triângulo vermelho indica a posição aproximada do Campo de Xerelete.

O núcleo da CB apresenta-se nos primeiros 100 metros da coluna d'água, com intensidade de aproximadamente 0.5 m/s em todos os períodos analisados. O Campo de Xerelete se situa na borda oeste do fluxo da CB, em uma região com intensidade média de aproximadamente 0,2 m/s. No período de verão o fluxo da CB se apresenta mais largo em relação ao período de inverno, mesmo que sutilmente.

De forma complementar são apresentados dados de correntes superficiais na região do Campo de Xerelete, obtidos do projeto *Global Drifter Program* (GDP - <http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac>). Todos os dados disponíveis são oriundos de derivadores do tipo SVP-WOCE (SYBRANDY; NIILER, 1991). O derivador SVP-WOCE, cujo nome deriva do programa no qual foi usado, WOCE – *World Ocean Circulation Experiment*, é composto por duas partes principais: a bóia de superfície, onde se encontra toda a parte eletrônica do equipamento, e um *drogue* (vela), responsável por “sentir” as correntes e forçar a deriva do equipamento (Figura 66).

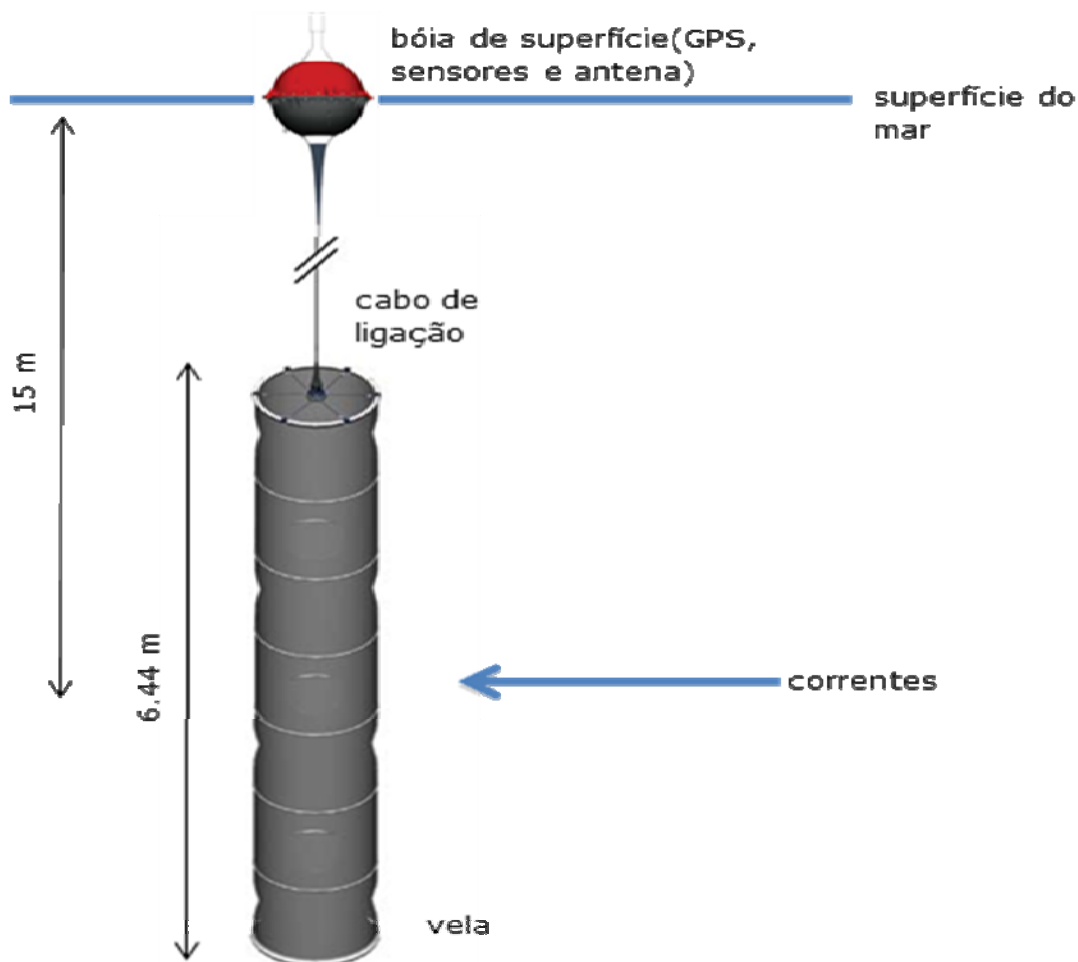


Figura 66: Representação esquemática do derivador do tipo SVP – WOCE..

Com o intuito de minimizar possíveis erros, para as estimativas da velocidade, foram selecionadas somente as trajetórias realizadas nas quais as velas ainda estavam acopladas ao equipamento. Para conferir representatividade dos dados de corrente oriundos destes derivadores para a região de estudo e ao mesmo tempo contemplar os critérios estatísticos propostos por Fratantoni (2001), optou-se por delimitar uma área centrada no Campo de Xerelete com  $0,5^\circ$  de lado, de forma a restringir a análise aos derivadores do projeto GDP contidos nesta área.

A área de  $0,5^\circ$  de lado utilizada para restringir a análise, assim como as trajetórias dos derivadores contidos na mesma, pode ser vista na Figura 67.



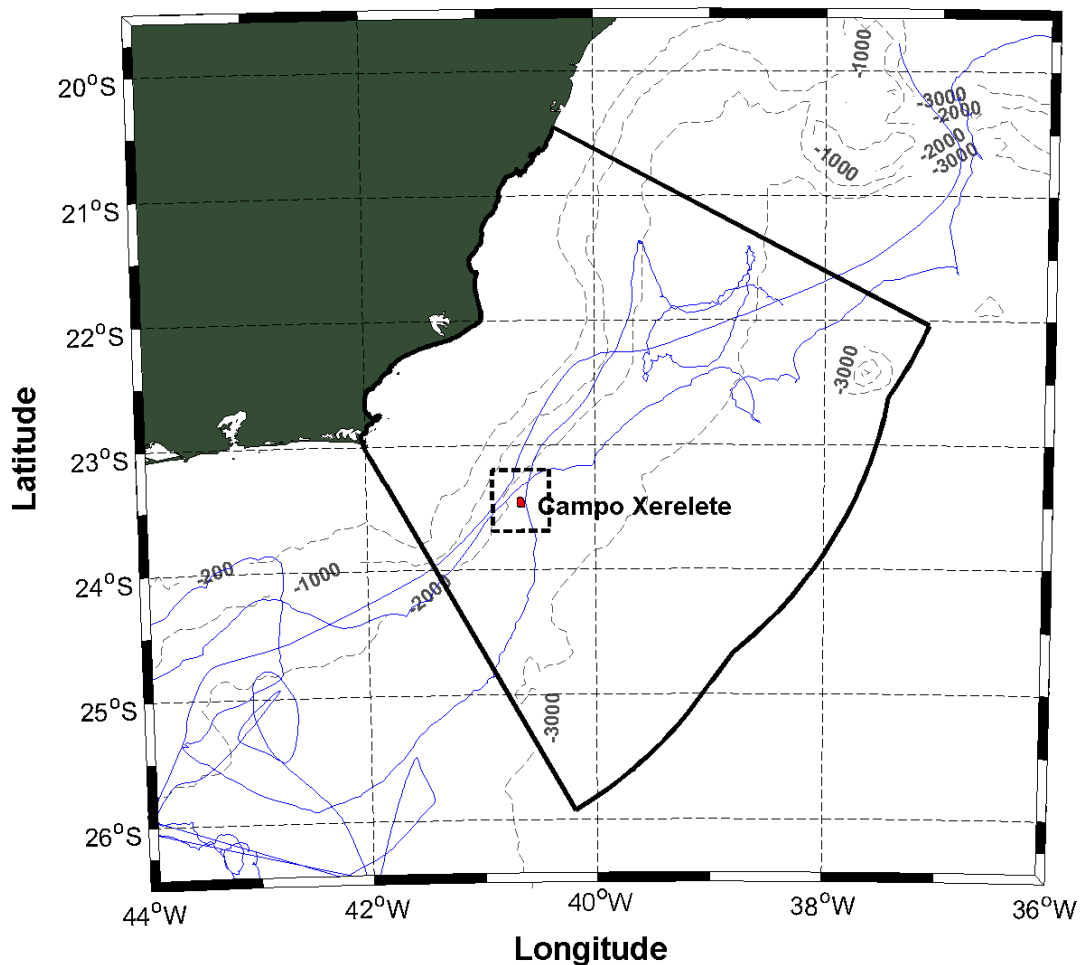


Figura 67: Trajetória dos derivadores. As linhas em cinza representam as isobatimétricas de 200m, 1000m, 2000m e 3000m. A área destacada representa a Bacia de Campos. A linha pontilhada representa a área de análise delimitada.

Dentro da área delimitada são observados três derivadores, presentes na região entre os anos de 2001 e 2002 e suas respectivas séries de corrente podem ser observadas na Figura 68.

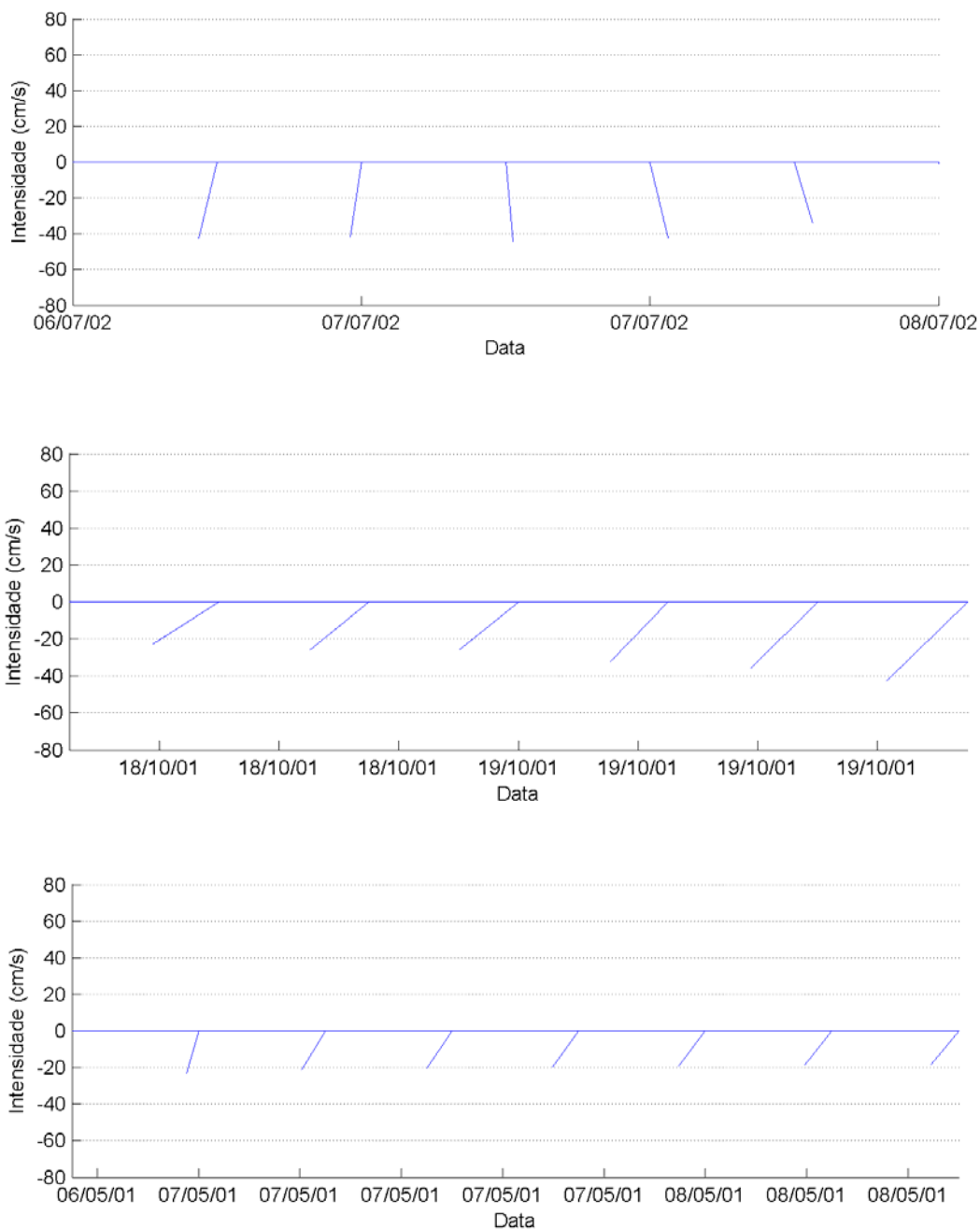


Figura 68: Stickplot de corrente dos 3 derivadores contidos na área de análise.

Os gráficos demonstram que os derivadores seguiram o fluxo da CB na região, fluindo para SSW ao logo da quebra da plataforma.

A estatística básica das velocidades de correntes obtidas destes derivadores é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16: Estatística básica de correntes superficiais obtidas dos derivadores.

Vel. Mínima (cm/s)	Vel. Média (cm/s)	Vel. Máxima (cm/s)	D. Padrão (cm/s)
23,8	35	60,8	11,4

Conclui-se que o campo de corrente na região é dominado o ano inteiro pela influência da Corrente do Brasil, que apresenta direção predominante SW e intensidade de até 0,8 m/s em seu núcleo, e que o campo está situado no bordo leste da CB. Segundo os dados utilizados na análise, o campo de corrente sob o Campo de Xerelete, apresenta direção predominante de SW e intensidade média de aproximadamente 0,35 m/s, podendo chegar a 0,6 m/s.

### 2.3.4. Regime de Ondas

Na costa da região sudeste brasileira, especialmente na Bacia de Campos, as condições meteorológicas têm sido divididas, basicamente, em duas situações (VIOLANTE -CARVALHO, 1998; PINHO, 2003):

- » bom tempo, quando prevalece a influência do anticiclone semipermanente do Atlântico Sul (ASAS), com vento dominante de Nordeste/Leste (NE/E) e, a priori, condições de mar mais amenas.
- » mau tempo, quando da passagem de sistema frontais, com ventos dos quadrantes Sudoeste/Sudeste (SW/SE) e maior agitação.

Deve-se levar em consideração, no entanto, que ventos do quadrante NE/E podem gerar ondas com altura significativa de mais de 2 m, conforme demonstrado por Candella (1997, 2008), constituindo situações de agitação que podem interferir em trabalhos no mar.

Devido à escassez de medições de ondas na costa brasileira, especialmente de campanhas de longa duração, a modelagem numérica torna-se essencial para caracterização do estado do mar ao longo do litoral e áreas *off-shore* do Brasil. Nesse relatório será empregada a reconstituição da agitação marítima realizada com o modelo de ondas *WaveWatch III*, em escala global, resolução de 1° em longitude e latitude, forçado por ventos oriundos da Reanálise da NOAA/NCEP, para o período de 1° de fevereiro de 1997 a 31 de dezembro de 2009, com resultados gravados a cada 6 horas.

Informações e documentação de todas as versões do modelo de ondas *WaveWatch III* podem ser encontradas no seguinte endereço eletrônico: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>. Para o estudo em questão, foi utilizada a versão 2.22 e informações técnicas referentes à utilização e instalação do modelo encontram-se em Tolman (2002).

O ponto de grade utilizado tem coordenadas 23°S; 40°W, cuja localização pode ser observada na Figura 69.

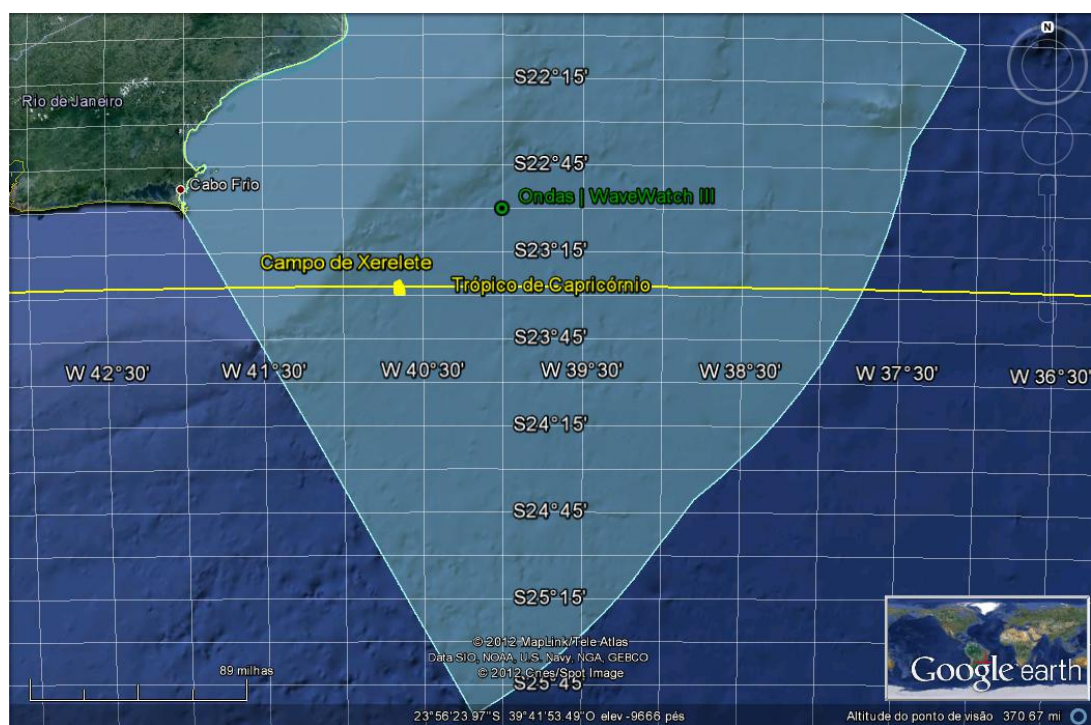
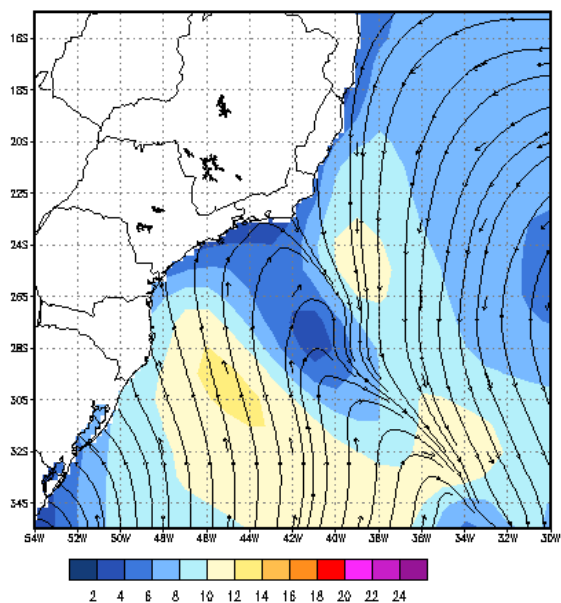


Figura 69: Localização do ponto para o qual foram utilizados os resultados do modelo WaveWatch III neste relatório.

A Figura 70 (a) representa um exemplo de um campo de vento gerado a partir de um ciclone extratropical, associado a uma frente fria, enquanto a Figura 70 (b) ilustra o estado do mar nas regiões sudeste e sul do Brasil.

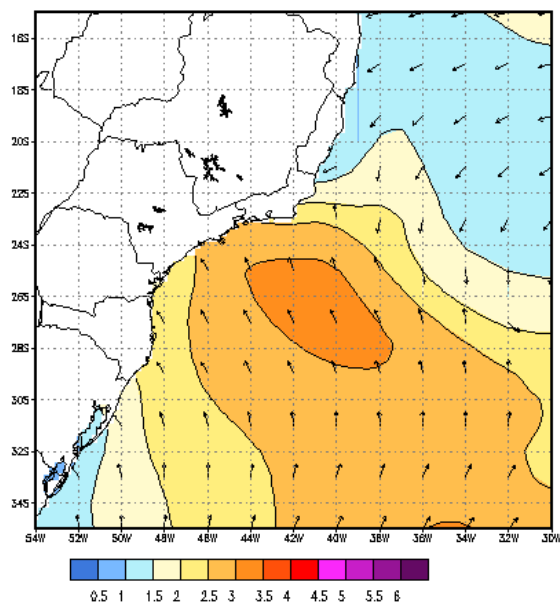
Na Figura 71 (a) é possível verificar um campo de vento gerado pelo ASAS e, na Figura 71 (b), vê-se o campo de alturas significativas por ele gerado.

MODELO WAVE-WATCH III/ATLASUL VEL. (m/s) E DIR. DO VENTO  
ANALISE:20/DEC/2004 00UTC (SEGUNDA) +36h SUL E SUDESTE  
VALIDO PARA:21/DEC/2004 12UTC ( TERÇA )



(a)

MODELO WAVE-WATCH III/ATLASUL ALT. (m) E DIR. DA ONDA  
ANALISE:20/DEC/2004 00UTC (SEGUNDA) +66h SUL E SUDESTE  
VALIDO PARA:22/DEC/2004 18UTC (QUARTA )

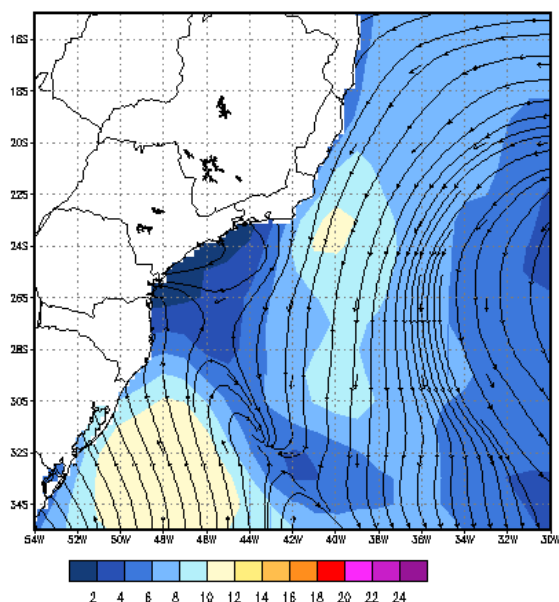


(b)

Figura 70: Exemplo de passagem de uma frente fria pela Baía de Santos. Nesse evento, os ventos se SW associados foram fracos, como pode ser visto na previsão de para 36 horas (a). Porém, com a evolução do sistema, ventos fortes de SE geraram ondas com altura significativa entre 3 e 3,5 m (b).

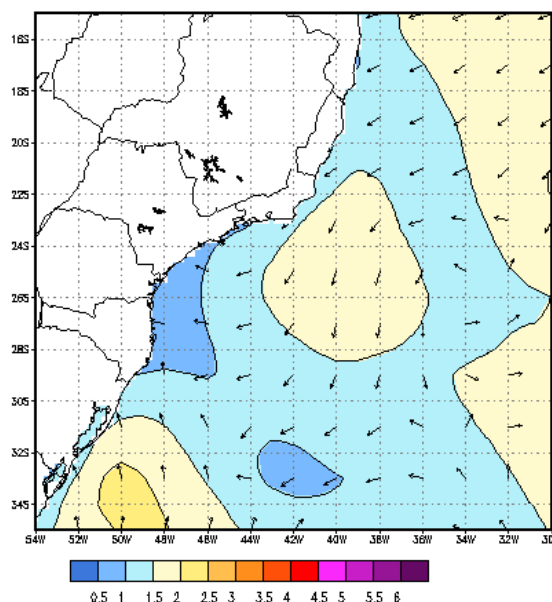
Fonte: ATLASUL.

MODELO WAVE-WATCH III/ATLASUL VEL. (m/s) E DIR. DO VENTO  
ANALISE:20/DEC/2004 00UTC (SEGUNDA) +24h SUL E SUDESTE  
VALIDO PARA:21/DEC/2004 00UTC ( TERCA )



(a)

MODELO WAVE-WATCH III/ATLASUL ALT. (m) E DIR. DA ONDA  
ANALISE:20/DEC/2004 00UTC (SEGUNDA) +24h SUL E SUDESTE  
VALIDO PARA:21/DEC/2004 00UTC ( TERCA )



(b)

Figura 71: Exemplo de atuação do vento de NE, associado ao ASAS (a), levando ao desenvolvimento de um mar local de até 2 m (b). Fonte: ATLASUL.

As nomenclaturas *swell* e *wind sea*, equivalentes a marulho e vaga, são amplamente utilizadas na literatura técnica, mesmo em língua portuguesa, para designar ondas fora da ou sob a influência do vento e serão empregadas neste estudo.

No diagrama de dispersão de altura versus direção das ondas (Figura 72), pode-se verificar que existem duas direções predominantes para as maiores ondas, ENE e SSW, tanto para a altura significativa, nesse caso, comparada com a direção média dos registros, quanto para as distribuições de altura de *swell* e *wind sea*. Na rosa de ondas relativa à direção média, pode-se notar que há uma distribuição entre SW e S.

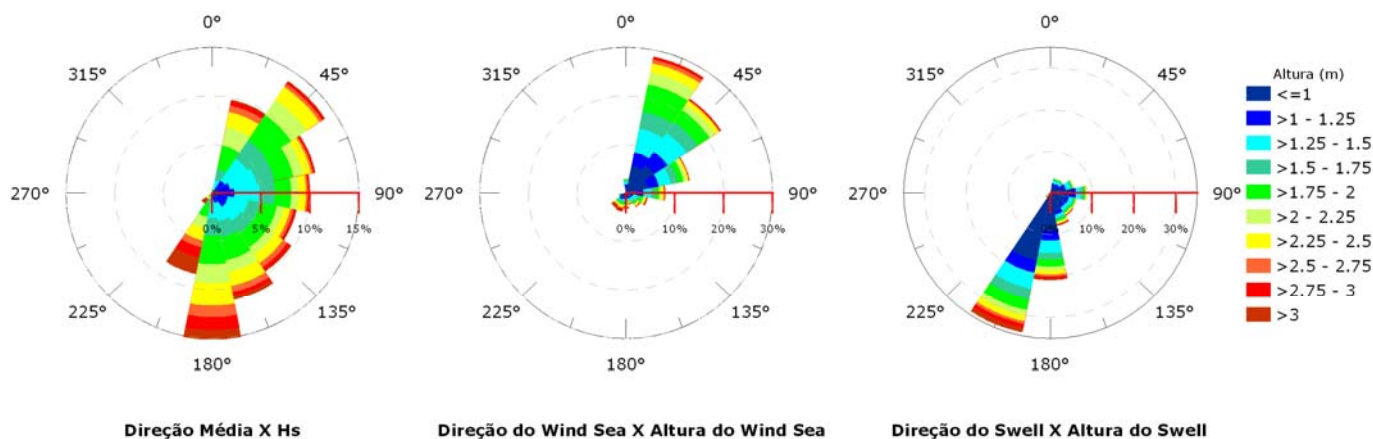


Figura 72: Rosas de dispersão para altura e direção para Hs (esquerda), *Wind sea* (centro) e *swell* (direita).

Pela localização do ponto, praticamente não há ondas de oeste, embora ondas de formação local possam ser geradas dessa direção. Os máximos de altura estão associados ao quadrante sul. Da Tabela 17 à Tabela 19, são apresentados esses resultados. A maioria dos registros para ondas do tipo *swell* são provenientes de S (52,09 %), com alturas entre 0,5 e 1,5 m (54,26 %). Para ondas do tipo *wind sea*, a maioria dos registros são provenientes de NE (~50 %), com alturas entre 1 e 2 m (55,5 %).

Tabela 17: Correlação entre altura significativa e direção média.

Direção ->		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total	Freq (%)
Hs (m)											
0,00	0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
0,50	1,00	2	65	174	101	29	2	1	0	374	1,98
1,00	1,50	42	1006	1229	945	616	39	3	3	3883	20,58
1,50	2,00	178	1894	1348	1326	1463	137	10	7	6363	33,72
2,00	2,50	240	1572	692	797	1525	184	3	4	5017	26,59
2,50	3,00	83	401	232	381	919	150	3	2	2171	11,51
> 3,00		21	68	57	108	547	259	0	0	1060	5,62
Total		566	5006	3732	3658	5099	771	20	16	18868	
Freq (%)		3,00	26,53	19,78	19,39	27,02	4,09	0,11	0,08		

Tabela 18: Correlação entre altura e direção do *swell*.

Direção ->		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total	Freq (%)
Hswell (m)											
0,00	0,50	134	128	295	419	1864	129	1	0	2970	15,84
0,50	1,00	20	431	1210	802	2404	309	2	0	5178	27,62
1,00	1,50	46	650	921	684	2303	389	0	1	4994	26,64
1,50	2,00	45	270	449	323	1536	347	0	0	2970	15,84
2,00	2,50	12	53	128	170	885	237	0	0	1485	7,92
2,50	3,00	0	2	28	88	474	106	0	0	698	3,72
> 3,00		0	0	2	28	299	122	0	0	451	2,41
Total		257	1534	3033	2514	9765	1639	3	1	18746	
Freq (%)		1,37	8,18	16,18	13,41	52,09	8,74	0,02	0,01		

Tabela 19: Correlação entre altura e direção do *wind sea*.

Direção ->		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total	Freq (%)
Hsea (m)											
0,00	0,50	71	191	102	63	61	102	31	5	626	4,84
0,50	1,00	282	1118	408	166	178	188	40	18	2398	18,55
1,00	1,50	447	2023	737	224	167	156	14	4	3772	29,18
1,50	2,00	441	1869	549	236	166	133	4	2	3400	26,31
2,00	2,50	247	981	242	132	136	107	1	0	1846	14,28
2,50	3,00	66	237	84	70	69	63	0	0	589	4,56
> 3,00		10	38	35	37	53	121	0	0	294	2,27
Total		1564	6457	2157	928	830	870	90	29	12925	
Freq (%)		12,10	49,96	16,69	7,18	6,42	6,73	0,70	0,22		

Na Figura 73, pode ser visualizada a distribuição de período por altura para *swell* e *wind sea*. Embora as duas distribuições sejam, praticamente, normais, nota-se que aquela referente ao *swell* (a) possui ocorrências em períodos mais elevados, maiores que 18 s, embora as maiores alturas (> 3 m) estejam concentradas entre 10 e 14 s. Para o *wind sea* (b), as maiores ondas (> 3 m) estão associadas a períodos de 7 a 11 s, típicos de tempestades na região sudeste do Brasil (Candella, *et al.* 2008), podendo-se perceber, em pouquíssimas oportunidades, a ocorrência de períodos de até 15 s, com ondas de, aproximadamente, maiores que 3 m. Os detalhes dessa distribuição podem ser vistos na Tabela 20 e na



Tabela 21. De maneira geral, as ondas do tipo *wind sea* apresentaram maiores alturas, associadas a menores períodos de ondas, entre 1 e 2,0 m (55,5 %) e entre 4 e 8 s (~81 %), enquanto o *swell*, entre 0,5 e 1,5 m (54,26 %) e 8 e 12 s (~63 %).

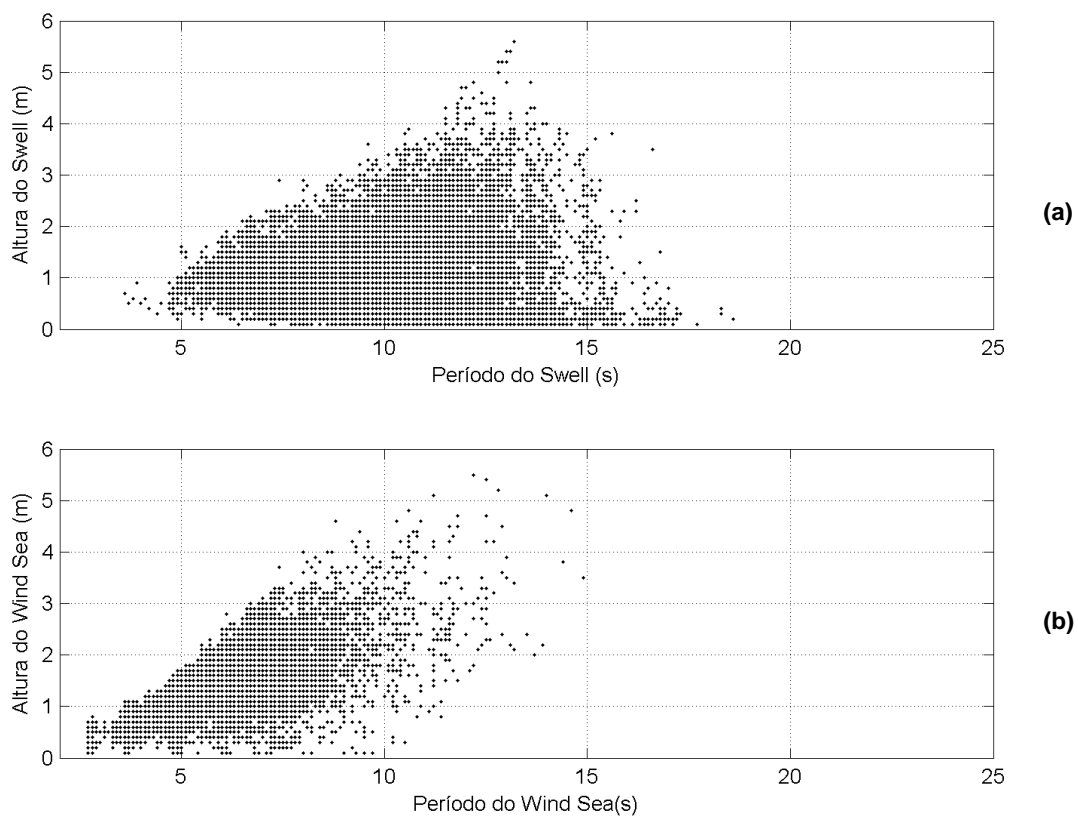


Figura 73: Diagrama de dispersão para altura e período de pico para *swell* (a) e *wind sea* (b).

Tabela 20: Correlação entre altura e período (T) do *swell*.

Tswell (s) ->		2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-28	Total	Freq (%)
Hswell (m)											
0,00	0,50	0	24	299	951	904	537	211	40	2966	15,83
0,50	1,00	4	176	1454	1785	1303	373	71	12	5178	27,63
1,00	1,50	0	122	1283	1643	1431	457	56	2	4994	26,65
1,50	2,00	0	8	468	1002	981	455	55	1	2970	15,85
2,00	2,50	0	0	78	412	686	268	40	1	1485	7,92
2,50	3,00	0	0	1	102	375	190	29	1	698	3,72
> 3,00		0	0	0	18	198	200	34	1	451	2,41
Total		4	330	3583	5913	5878	2480	496	58	18742	
Freq (%)		0,02	1,76	19,12	31,55	31,36	13,23	2,65	0,31		

 Tabela 21: Correlação entre altura e período (T) do *wind sea*.

Direção ->		2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	Total	Freq (%)
Hswell (m)											
0,00	0,50	400	127	84	12	3	0	0	0	626	4,84
0,50	1,00	674	1344	340	36	4	0	0	0	2398	18,55
1,00	1,50	41	2579	966	165	21	0	0	0	3772	29,18
1,50	2,00	0	1719	1403	246	30	2	0	0	3400	26,31
2,00	2,50	0	110	1388	290	46	12	0	0	1846	14,28
2,50	3,00	0	0	356	184	44	5	0	0	589	4,56
> 3,00		0	0	58	140	73	19	4	0	294	2,27
Total		1115	5879	4595	1073	221	38	4	0	12925	
Freq (%)		8,63	45,49	35,55	8,30	1,71	0,29	0,03	0,00		

Deve-se levar em consideração que *swell* são ondas que, praticamente não recebem energia do vento local. Portanto, podem apresentar menor contribuição no espectro, caso o vento local esteja, por exemplo, em sentido contrário à sua propagação, dando lugar a espectros multimodais, tanto em duas (frequência x energia), quanto em três dimensões (frequência x energia x direção). Na Figura 74, é apresentado um exemplo de espectro polar, retirado do site ATLASUL (<http://www.lamma.ufjf.br/spo>), no qual pode-se perceber grande concentração de energia trazida pelas ondas de longo períodos, acima de 10s, caracterizando um *swell* de S/SW. Na figura também podem ser observada uma pequena contribuição de ondas típicas de *wind sea*, com direção NE, e períodos entre 5 e 10 s.

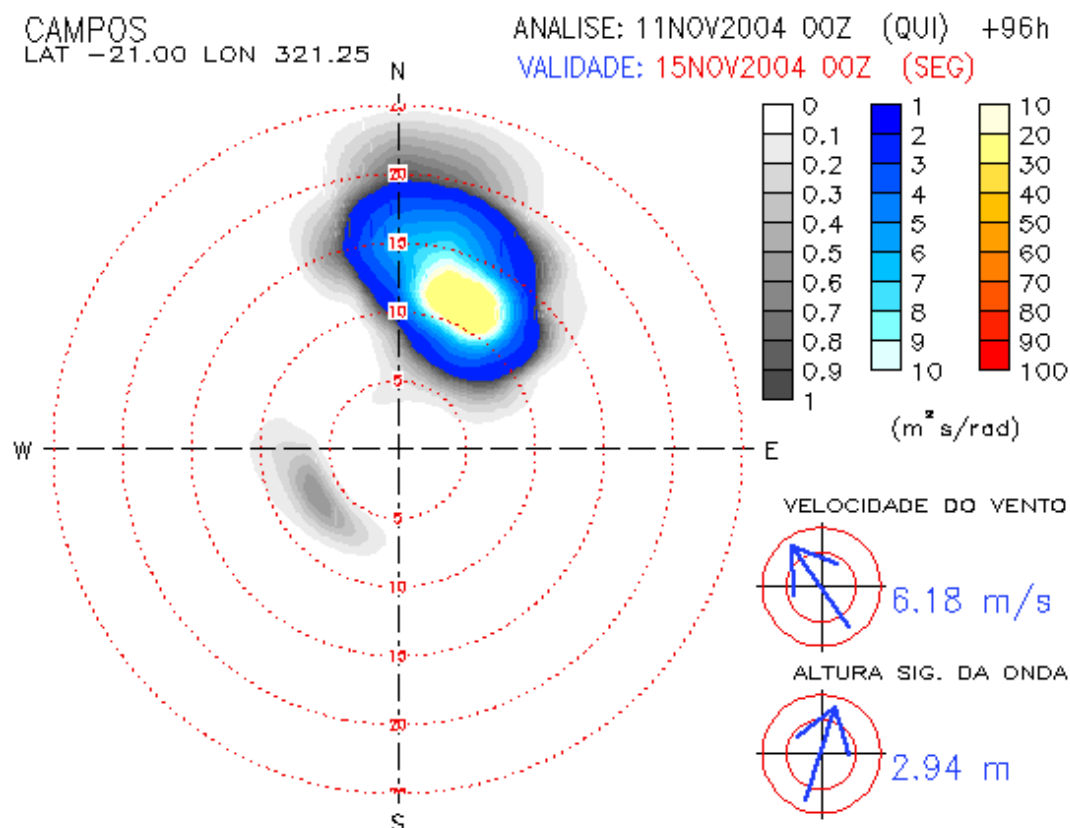


Figura 74: Espectro Direcional de Ondas para um ponto na Baía de Campos, ilustrando a presença de um forte *swell* de SW. Fonte: Projeto ATLASUL ([www.atlasul.com.br](http://www.atlasul.com.br)).

Na Figura 75 são apresentadas as correlações entre direção e período para *swell* e *wind sea*. Para o *swell*, os maiores períodos estão associados com as direções S e SW. Estas ondas são geradas pela evolução de sistemas frontais, onde tanto o ciclone extratropical, quanto o anticiclone polar, podem formar longas pistas, gerando, assim, ondas com período elevado.

Os maiores períodos de *wind sea* estão associados à direção sul, enquanto aqueles mais comumente relacionados ao ASAS (5 a 12 s) distribuem-se entre as direções E e N.

Os resultados detalhados dessas figuras podem ser vistos na Tabela 22 e na Tabela 23.

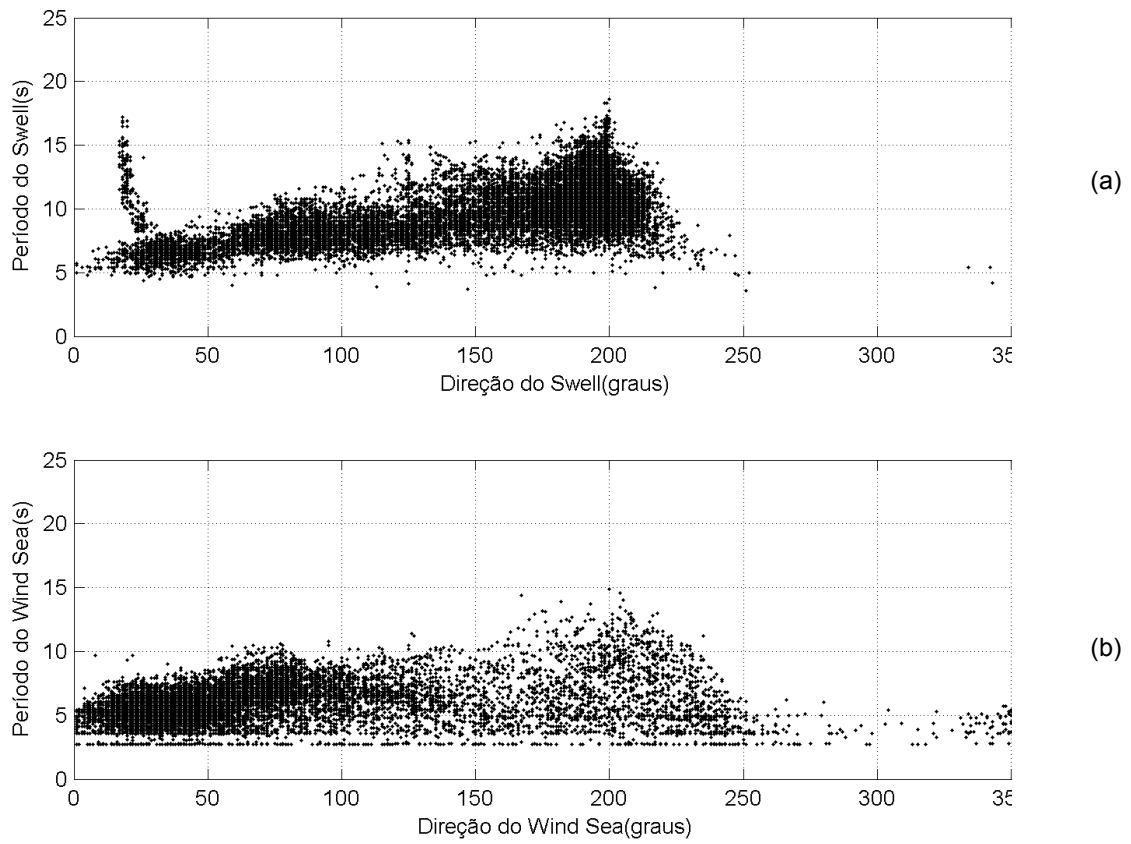


Figura 75: Diagrama de dispersão para direção e período de pico para *swell* (a) e *wind sea* (b).

Tabela 22: Correlação de direção e período para o *swell*.

Direção ->		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total	Freq (%)
Período swell (s)											
2	4	0	0	0	2	0	1	1	0	4	0,02
4	6	50	214	28	11	13	11	2	1	330	1,76
6	8	71	1095	1379	519	358	161	0	0	3583	19,11
8	10	5	212	1445	1249	2468	534	0	0	5913	31,54
10	12	46	12	178	533	4380	729	0	0	5878	31,36
12	14	50	0	3	175	2063	189	0	0	2480	13,23
14	16	28	1	0	25	428	14	0	0	496	2,65
> 16		7	0	0	0	55	0	0	0	62	0,33
Total		257	1534	3033	2514	9765	1639	3	1	18746	
Freq (%)		1,37	8,18	16,18	13,41	52,09	8,74	0,02	0,01		

Tabela 23: Correlação de direção e período para o *wind sea*.

Direção ->		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total	Freq (%)
Período wsea(s)											
2	4	182	391	126	107	93	144	56	16	1115	8,63
4	6	991	3551	481	274	259	281	29	13	5879	45,49
6	8	387	2330	1128	373	191	181	5	0	4595	35,55
8	10	4	181	408	153	172	155	0	0	1073	8,30
10	12	0	4	14	21	93	89	0	0	221	1,71
12	14	0	0	0	0	20	18	0	0	38	0,29
14	16	0	0	0	0	2	2	0	0	4	0,03
16		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Total		1564	6457	2157	928	830	870	90	29	12925	
Freq (%)		12,10	49,96	16,69	7,18	6,42	6,73	0,70	0,22		

O histograma de altura significativa (Figura 76-a) indica que os valores típicos desse parâmetro são de 1,5 a 2,5 m, mas alturas de até 5,5 m podem ser observadas. Seja em medições, seja em modelagem, valores de Hs inferiores a 1,0 são bastante raros, como indicado no gráfico. Grande parte do *swell* (Figura 76-b) possui altura reduzida, entre 0,5 e 1,0 m. Já para o *wind sea* (Figura 76-c), as maiores ocorrências são para as classes centradas em 1,0 e 1,5 m.

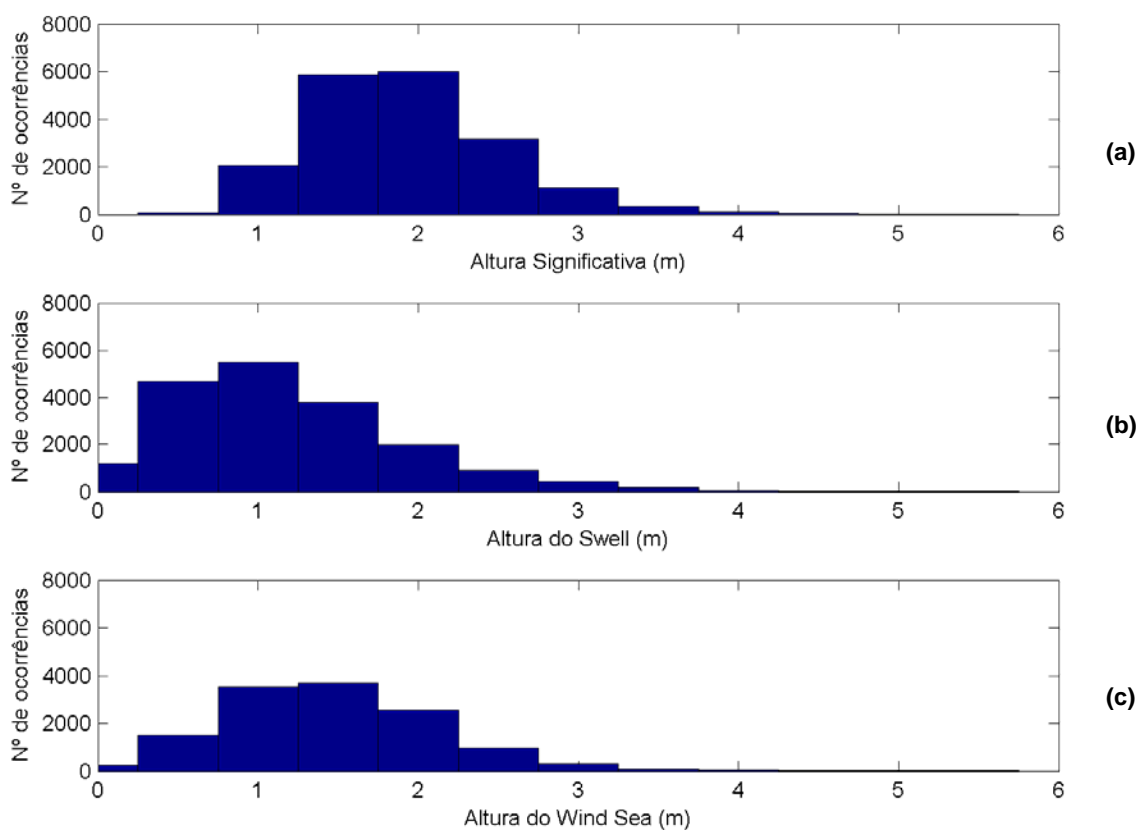


Figura 76: Distribuição de alturas para altura significativa (a), *swell* (b) e *wind sea* (c), em classes de 0,5 m.

As séries temporais das alturas significativas (Figura 77-a), alturas de *swell* (Figura 77-b) e alturas do *wind sea* (Figura 77-c) apresentam um claro ciclo sazonal nos valores dos três parâmetros.

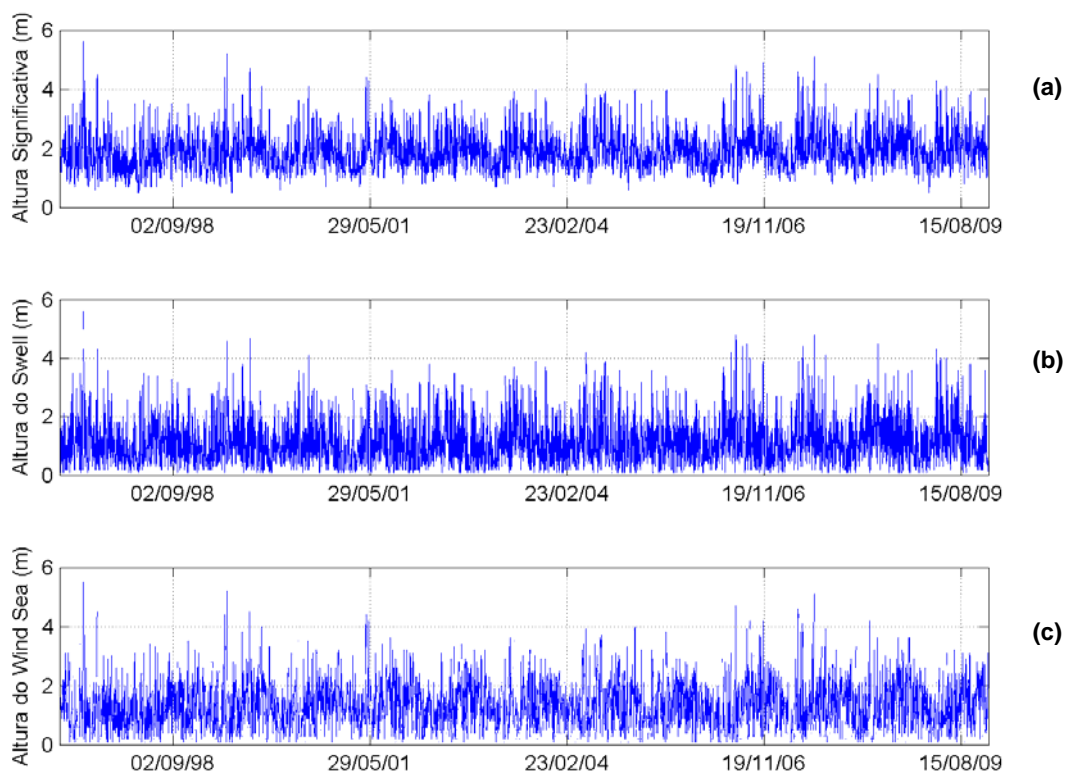


Figura 77: Série temporal de altura significativa (a), altura do *swell* (b) e altura do *wind sea* (c).

Na Figura 78, evidencia-se o ciclo sazonal da altura significativa média (a), sendo observados dois picos principais, em maio e setembro. No mesmo gráfico, percebe-se que as alturas tendem a ser maiores no período central do ano, entre o fim do outono (maio) e meados da primavera (novembro).

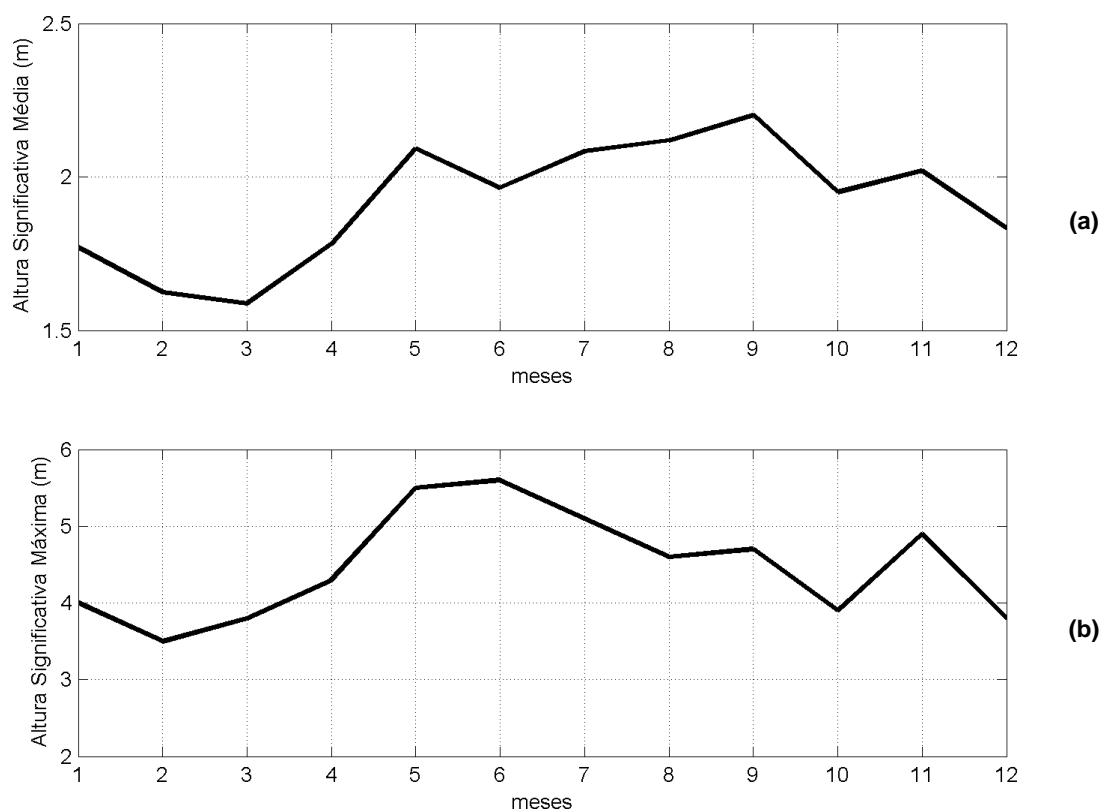


Figura 78: Valores médios (a) e máximos (b) mensais da altura significativa.

O gráfico referente às alturas médias do *swell* (Figura 79-a) indicam maiores valores no período de inverno, com alturas máximas (Figura 79-b) de até 5,5 m provocadas por tempestades de inverno no Atlântico Sul.



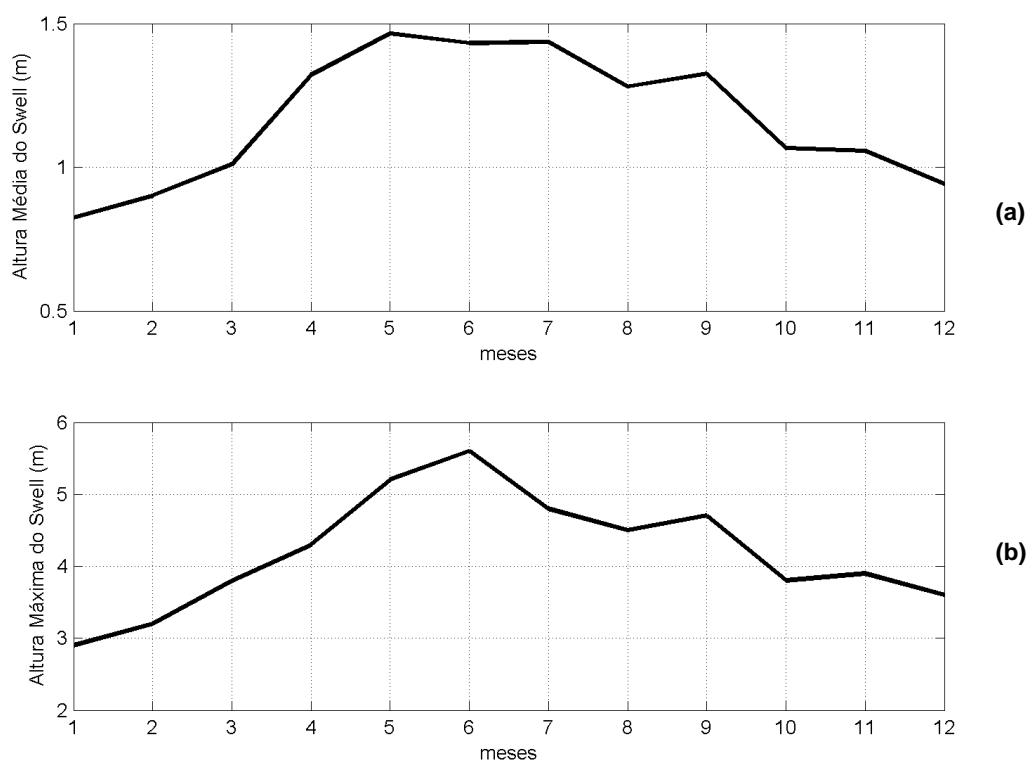


Figura 79: Valores médios (a) e máximos (b) mensais do *swell*.

Assim, como nas séries temporais mostradas na Figura 78-a, o comportamento das alturas médias (Figura 80-a) e máximas (Figura 80-b) do *wind sea* é muito semelhante ao da altura significativa, indicando que o estado de mar na região da Bacia de Campos é composto, principalmente, por este parâmetro.

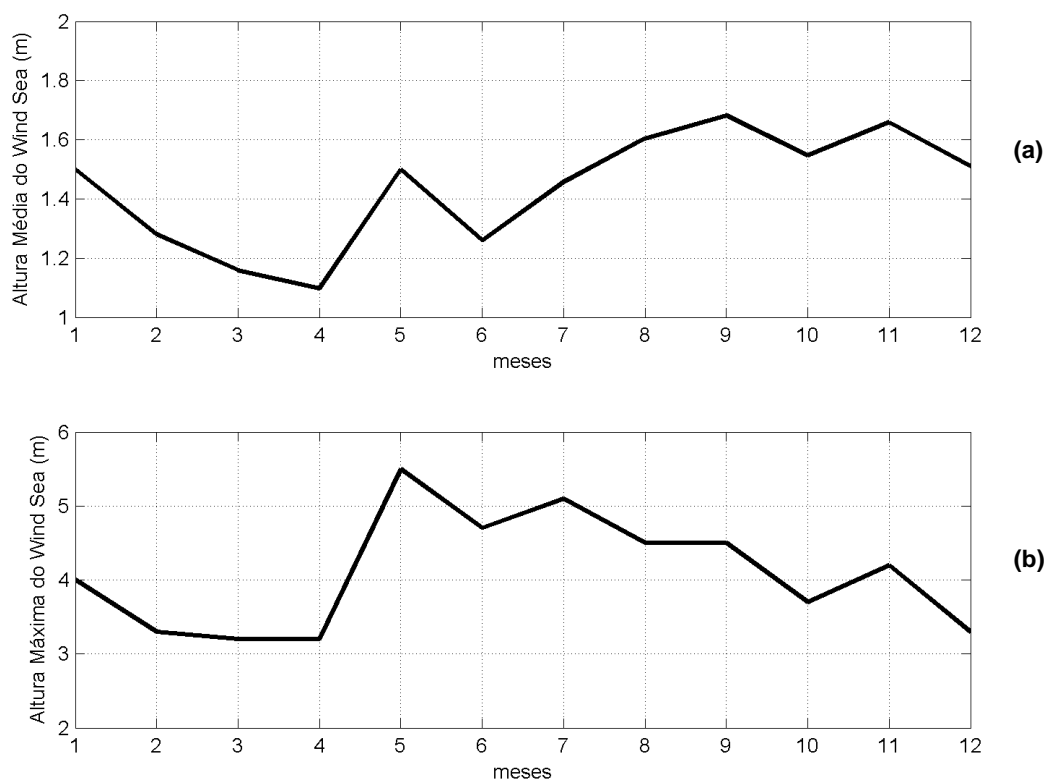


Figura 80: Valores médios (a) e máximos (b) mensais do *wind sea*.

A Tabela 24 apresenta os valores médios e máximos mensais de  $H_s$ , altura do *swell* e altura do *wind sea*. Novamente verifica-se que o período compreendido entre o final do outono e início da primavera é o mais propício a ocorrência de extremos de ondas na região da Bacia de Campos.

Tabela 24: Valores médios e máximos mensais e máximos para altura significativa, *swell* e *wind sea*.

mês	Hs		Swell		Wind Sea	
	média	máxima	média	máxima	média	máxima
janeiro	1,8	4,0	0,8	2,9	1,5	4,0
fevereiro	1,6	3,5	0,9	3,2	1,3	3,3
março	1,6	3,8	1,0	3,8	1,2	3,2
abril	1,8	4,3	1,3	4,3	1,1	3,2
maio	2,1	5,5	1,5	5,2	1,5	5,5
junho	2,0	5,6	1,4	5,6	1,3	4,7
julho	2,1	5,1	1,4	4,8	1,5	5,1
agosto	2,1	4,6	1,3	4,5	1,6	4,5
setembro	2,2	4,7	1,3	4,7	1,7	4,5
outubro	2,0	3,9	1,1	3,8	1,5	3,7
novembro	2,0	4,9	1,1	3,9	1,7	4,2
dezembro	1,8	3,8	0,9	3,6	1,5	3,3

Em resumo, a agitação marítima com características de *wind sea* (mar de formação local) na área da Bacia de Campos tem, basicamente, 3 fontes principais: o anticiclone semipermanente do Atlântico Sul (ASAS), que pode gerar ondas das direções norte a leste; a passagem de sistemas frontais, que produzem, em geral, ondas de sul e sudoeste; e a evolução desses sistemas frontais, onde o deslocamento do anticiclone polar, aliado àquele do ciclone extratropical, tendem a formar ondas principalmente da direção S.

Segundo os resultados da simulação, as mesmas fontes podem formar *swell*, tendo, porém, maior contribuição de SW.

### 2.3.5. Regime de Marés

Podemos classificar a maré quanto ao seu período, ou seja, pode-se determinar se a maré é diurna, semi-diurna, mista principalmente diurna ou mista principalmente semi-diurna (POND; PICKARD, 1978).

Para classificar a maré, calcula-se um fator que leva em consideração a amplitude das principais componentes diurnas e semi-diurnas. Segundo Pond & Pickard (1978), esse fator é definido por:

$$F = \left( \frac{(K_1 + O_1)}{(M_2 + S_2)} \right) \quad (1)$$

De acordo com essa classificação temos:

F = 0 a 0,25: Maré semi-diurna, ou seja, a maré cujo período é de aproximadamente 12h. Neste caso, tem-se duas marés altas e duas marés baixas em 24 horas. A altura de uma preamar é praticamente igual a outra, o mesmo acontecendo com a baixamar.

F = 0,25 a 1,5: Maré mista, principalmente semi-diurna, ou seja, a maré com grandes diferenças de altura entre suas preamares e baixamares. Essa maré é, na maioria das vezes, semi-diurna, podendo ser diurna em algumas épocas do ano.

F = 1,5 a 3,0: Maré mista, principalmente diurna, ou seja, a maré com grandes diferenças de altura entre suas preamares e baixamares. Essa maré é, na maioria das vezes, diurna, podendo ser semi-diurna em algumas épocas do ano.

F > 3,0: Maré diurna, ou seja, a maré cujo período é de 24h, aproximadamente. Nesse caso, tem-se apenas uma maré alta e uma maré baixa em 24 horas.

Para a caracterização da maré na região do Campo de Xerelete, foram utilizadas as constantes harmônicas obtidas do modelo global de marés FES-2004 (de “*Finite Element Solutions*”). Esta é uma versão completamente revisada do modelo hidrodinâmico global de marés iniciado por Le Provost *et al.* (1994). Esta nova versão é baseada na resolução das equações barotrópicas de maré em uma nova grade global de elementos finitos (~1 milhão de nodos), que permitem a resolução independente de dados *in situ* e de sensoriamento remoto. A acurácia destas soluções têm sido otimizada pela assimilação de dados de marégrafos e de altimetria (TOPEX/POSEIDON e ERS-2). São disponibilizados dados de amplitude e fase de 15 constituintes de maré em uma grade com resolução de 1/8°. Uma descrição mais detalhada do FES-2004 pode ser obtida em Lyard *et al.* (2006).

A partir destes, foram então retirados os dados de fase e amplitude de sete componentes (M2, S2, N2, K2, K1, O1 e Q1) para o ponto localizado na latitude 23,5° S e longitude 41,5° W.

A localização desse ponto na bacia de Campos pode ser observada na Figura 81 e as constantes harmônicas encontram-se na Tabela 25.

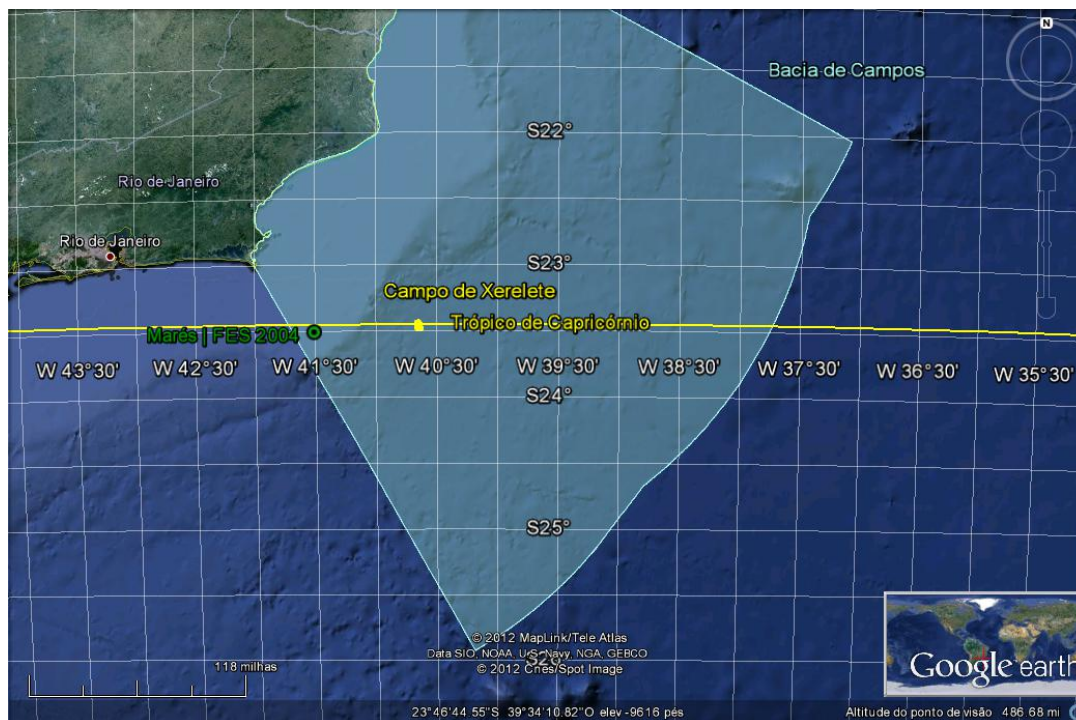


Figura 81: Posicionamento do ponto de grade do FES-2004 utilizado.

Tabela 25: Constantes harmônicas obtidas pelo modelo global de maré FES-2004 no ponto de latitude 23.5° S e longitude 41.5° W.

Componente	Nome	Amplitude (m)	Fase (em relação à Greenwich)
Q1	lunar elíptica diurna	0,0235	98,4069
O1	lunar principal diurna	0,0934	131,1983
K1	luni-solar principal diurna	0,0582	200,1578
N2	lunar elíptica semi-diurna	0,0484	187,3391
M2	lunar principal semi-diurna	0,3295	169,9910
S2	solar principal semi-diurna	0,1550	180,9493
K2	luni-solar semi-diurna	0,0431	182,5220

Exemplos dos campos de amplitude e fase da componente  $M_2$  (mais significativa na região) podem ser vistos na Figura 82 e na Figura 83. A amplitude da componente  $M_2$  na região da Baía de Campos apresenta um gradiente em direção ao norte da Baía (menores valores ao sul, e maiores ao norte). Na região do Campo de Xerelete, a componente  $M_2$  apresenta amplitude de aproximadamente 0,33 m e fase de  $\sim 170^\circ$ .

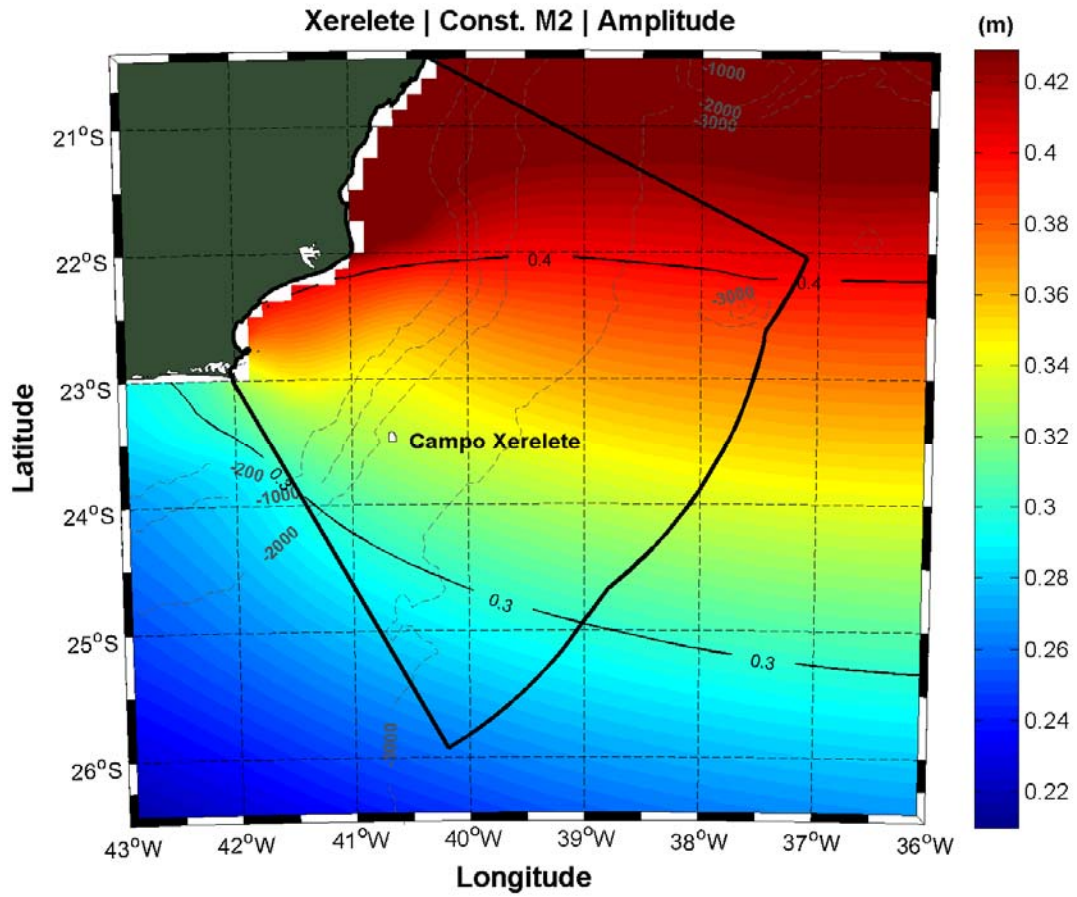


Figura 82: Amplitude da componente M2 para região da Bacia de Campos.

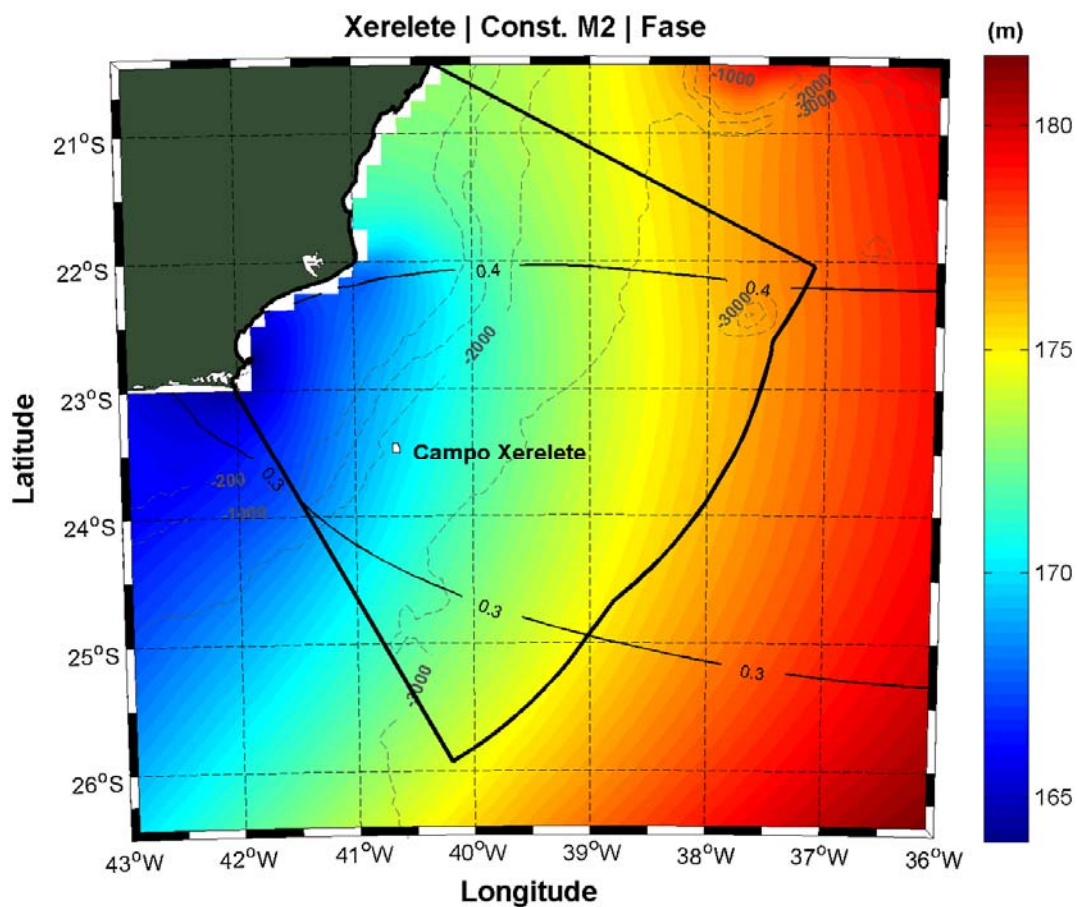


Figura 83: Fase da componente M2 para região da Bacia de Campos.

Utilizando os valores apresentados na Tabela 25, podemos concluir que na região de interesse temos:

$F = 0,3128$  – maré mista predominantemente semidiurna.

Podemos calcular também, segundo a formulação de Pond & Pickard (1978), a média da amplitude das marés de sizígia, que nesse caso será:

$2(M2+S2) = 97$  cm, para os dados do FES-2004;

Portanto, podemos classificar a maré na região como sendo mista predominantemente semidiurna com desigualdade e com amplitudes médias de maré de sizígia variando em torno de 97 cm.

Na Figura 84 é apresentada a série de elevação para todo o ano de 2011. Foram verificadas alturas máximas de aproximadamente 60 cm, e mínimas de -63 cm. Através da figura, podemos concluir que as maré de quadratura na região possuem amplitudes médias da ordem de 40 cm.

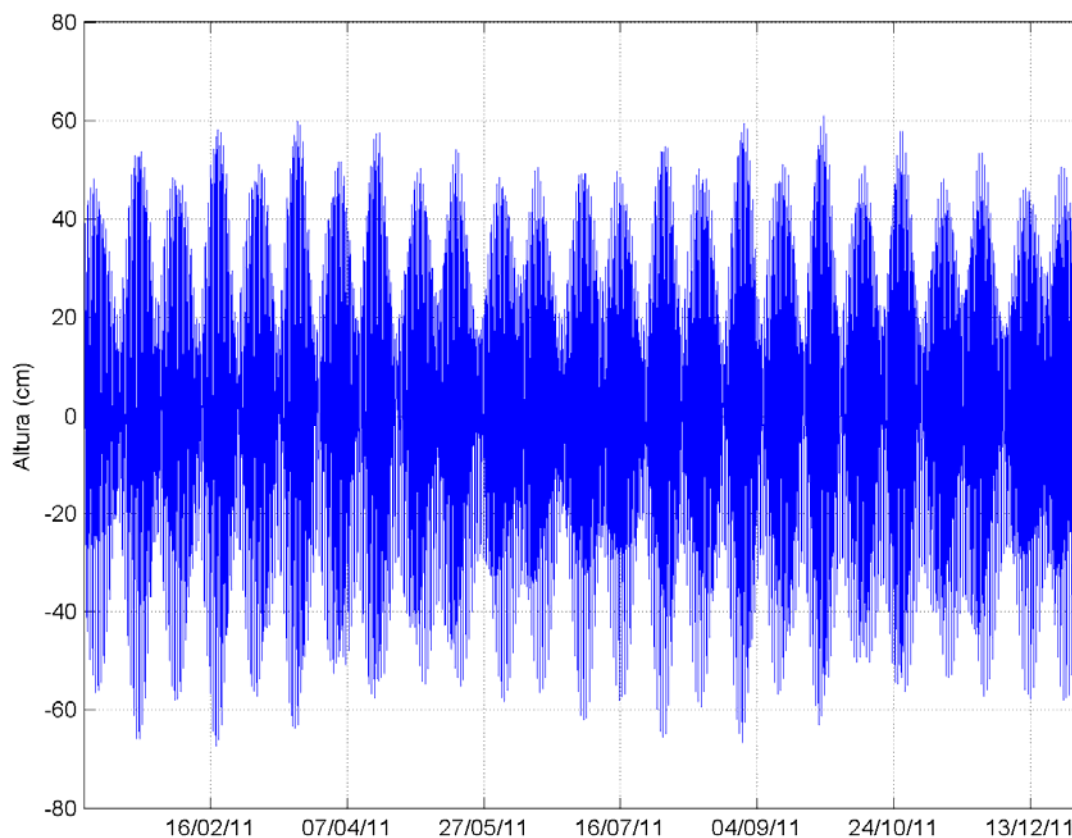


Figura 84: Elevação da superfície do mar (cm) para todo o ano de 2011.

### 2.3.6. Condições Extremas

As regiões sul e sudeste do Brasil são, frequentemente, influenciadas pela passagem de sistemas frontais. A influência desses sistemas no oceano é expressa em alterações substanciais no regime de ondas, seja em função de efeitos locais ou de fenômenos sinóticos, tais como a chegada de grandes ondulações geradas, por exemplo, em altas latitudes.

As condições extremas de ondas observadas na região podem estar associadas a 3 sistemas sinóticos diferentes: ASAS, passagem de Sistemas Frontais ou deslocamento do anticiclone polar.



No caso de domínio do ASAS, ondas com direções de NE-E podem chegar a até 4,0 m de Hs, configurando um cenário crítico para operações no mar. Entretanto, as condições mais severas de mar observadas na região estão associadas à evolução de Sistemas Frontais, onde ondulações de SW a SE podem atingir a região com 5,0 m de Hs. A maior passagem de sistemas frontais na região durante o período de inverno e de primavera, faz com que esses períodos sejam mais propícios a ocorrência de eventos extremos de ondas, como demonstrado pela Tabela 26, que apresenta os máximos mensais de Hs obtidos dos dados do WaveWatchIII. Através da Tabela 27, podemos verificar que mais de 75% das ondas com Hs maiores que 3 m, estão associadas às ondulações de S e SW, geradas pela passagem de sistemas frontais, ou em tempestades em áreas mais ao sul do Atlântico.

Tabela 26: Valores médios e máximos mensais e máximos para altura significativa.

mês	Hs	
	média	máxima
janeiro	1,8	4,0
fevereiro	1,6	3,5
março	1,6	3,8
abril	1,8	4,3
maio	2,1	5,5
junho	2,0	5,6
julho	2,1	5,1
agosto	2,1	4,6
setembro	2,2	4,7
outubro	2,0	3,9
novembro	2,0	4,9
dezembro	1,8	3,8

Tabela 27: Ocorrência de altura significativa superior a 3 metros por direção.

Direção ->	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
Hswell (m)									
> 3,00	21	68	57	108	547	259	0	0	1060
Freq (%)	1,98	6,42	5,38	10,19	51,60	24,43	0	0	

No regime hidrodinâmico, os valores máximos de velocidades de correntes observados na região próxima ao Campo de Xerelete, através dos dados do DEPROAS, foram de 0,94 m/s e

de 1,06, como verificado pelos dados do mondoOGX. Estas velocidades ocorrem associadas à direção SW, característica da influência da CB na região.

Tabela 28: Velocidades máximas (m/s) em superfície obtidas pelos dados do DEPROAS e pelos derivadores do Projeto mondoOGX.

<b>Deproas</b>	<b>mondoOGX</b>
0,94	1,06

### 2.3.7. Considerações Finais

Foram apresentadas análises temporais e espaciais dos principais parâmetros e fenômenos oceanográficos da região do entorno do Campo de Xerelete (temperatura, salinidade, massas d'água, correntes, ondas e marés) de forma a fornecer uma caracterização geral da região e específica do campo.

A seguir, na Tabela 29, é apresentado um sumário dos resultados encontrados nas análises, de forma a se obter um panorama geral da região e melhor correlacionar as variáveis.

Tabela 29: Sumário dos resultados.

Variável	Média		Extremos
	Verão	Inverno	
Temperatura (°C)	26,56	22,9	21,28 - 27,89
Salinidade	36,61	36,66	-
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	1024,1	1025,2	-
Corrente (m/s)	0,2	0,15	1,2
Onda (m)	1,7	2,1	5,6
Marés (m)	0,7	0,7	1,2

Todos os parâmetros, exceto a salinidade e a maré, esta devido ao seu período mensal, apresentaram significativa variabilidade sazonal.

A análise de massas d'água na região adjacente ao Campo de Xerelete, mostrou a presença da AT, ACAS, AIA e APAN. Em superfície, sob o Campo de Xerelete, a massa d'água AT é encontrada durante todo o ano, transportada pela CB e apresentando variações sazonais na temperatura e salinidade devido a variabilidade da incidência de radiação solar e do balanço precipitação/evaporação, esta última todavia não muito significativa.

Os dados de correntes mostram que a região é influenciada principalmente pela Corrente do Brasil, com velocidades médias de aproximadamente 0,15 – 0,20 m/s, sob o Campo de Xerelete, e direção preferencial de SW. A região também está sujeita à variabilidade espaço-temporal dos vórtices associados.

As condições de ondas observadas na região podem estar associadas a 3 sistemas sinóticos diferentes: o ASAS, passagem de Sistemas Frontais ou deslocamento do anticiclone polar.

No caso de domínio do ASAS, ondas com direções de NE-E podem chegar a até 4,0 m de Hs, configurando um cenário crítico para operações no mar. Entretanto, as condições mais severas

de mar observadas na região estão associadas à evolução de Sistemas Frontais, onde ondulações de SW a SE podem atingir a região com 5,6 m de altura significativa.

Tanto o regime de ondas quanto o de correntes são forçados pelo regime de ventos, dependendo principalmente da atuação de sistemas meteorológicos como o ASAS e a passagem de sistemas frontais. Entretanto, deve-se ressaltar que o regime de correntes depende de outros fatores, sendo o efeito do vento observado de forma mais direta na região sobre a plataforma continental.

As marés na região do Campo de Xerelete são mistas e predominantemente semidiurnas, com amplitudes médias de maré de sizígia da ordem de 0,97 m, e amplitudes médias de quadratura de aproximadamente 0,40 m.

## 2.4. Bibliografia

- Antonov, J. I., D. Seidov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson, 2010. World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 184 pp.
- Boyer, T. P., Antonov J. I., O. K. Baranova, H. E. Garcia, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T. D. O'Brien, D. Seidov, I. V. Smolyar, M. M. Zweng, 2009. World Ocean Database 2009. S. Levitus, Ed., NOAA Atlas NESDIS 66, U.S. Gov. Printing Office, Wash., D.C., 216 pp., DVDs.
- Calado, L., 2000. Dinâmica da Formação dos Meandros e Vórtices da Corrente do Brasil ao Largo do Sudeste Brasileiro. Dissertação de Mestrado em Oceanografia Física. Instituto Oceanográfico, USP, São Paulo, SP, 86 p.
- Campos, E. J. D.; Ikeda, Y.; Castro, B. M.; Gaeta, S. A.; Lorenzetti, J. A.; Stevenson, M. R. Experiment studies circulation in the Western South Atlantic. Eos, Transactions American Geophysical Union, v. 77, n. 27, p. 253-259, 1996.
- Candella, R. N, 1997.; Estudo de Casos de Ondas no Oceano Atlântico Sul Através de Modelagem Numérica. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Candella, R. N. ; Rabinovich, A. B. ; Thomson, R. E. . The 2004 Sumatra Tsunami as Recorded on the Atlantic Coast of South America. Advances in Geosciences, v. 14, p. 117-128, 2008.
- CPTEC/INPE - Boletim de Informações Climáticas do CPTEC/INPE (<http://infoclima1.cptec.inpe.br/>). Acessado em junho de 2012.
- Evans, D. L.; Signorini, S. R. & Miranda, L. B. 1983. A note on the transport of the Brazil Current. J. Phys. Oceanogr., 13(9):1732-1738.
- Ferrero, B. and Wainer, I., 2008. "Estudo Comparativo da Temperatura e Salinidade Entre os Resultados do Community Climate System Model, os Dados Hidrográficos do World Ocean Data Atlas 2001 e da Reanálise Oceânica Simple Ocean Data Assimilation." Revista Atlântica, 30(2) 89 – 100, 2008.
- Fragoso, M. R., 2004. Um Modelo Numérico da Circulação Oceânica para as Bacias Leste e Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 173p.

- FRATANTONI, D. M., 2001, "North Atlantic surface circulation during the 1990's observed with satellite-tracked drifters", *Journal of Geophysical Research*, v. 106, pp.22067-22093.
- FUNDESPA / IOUSP / PETROBRAS, 1994: – Diagnóstico ambiental oceânico e costeiro das regiões sul e sudeste do Brasil.
- Gabioux, M. Estudo numérico dos meandros e vórtices da corrente do Brasil entre 22°S e 30°S [Rio de Janeiro] 2008 XVII, 138 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2008) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- Godoi, S.S., 2005: Dinâmica Quase-Geostrófica do Sistema Corrente do Brasil no Embaiamento de São Paulo (23,5° - 27° S). Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto Oceanográfico. 157p.
- Hastenrath, S., 1985: *Climate and Circulation of the Tropics*. D. Reidel Publish. Co., 455 pp.
- INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), <http://www.inmet.gov.br/>, acessado em setembro de 2010.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M. R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W.Higgins, J. Janowiak, K. C. MO, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, Roy Jenne, Dennis Joseph (1996). "The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project". *Bulletin of the American Meteorological Society* 77 (3): 437–471.
- Le Provost, C., M.L. Genco, F. Lyard, P. Vincent & P. Canceil, 1994. Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model. *Journal of Geophysical Research*, 99(C12): 24.777-24.797.
- Lima, C. H. R. 2012. Estudo Comparativo para o Brasil entre os Dados Observados Diários de Temperatura e Precipitação de Estações do INMET e Dados *Reanalysis* NCEP/NCAR. Depto. Engenharia Civil e Ambiental. UNB.
- Lima, J. A. M., 1997. Oceanic Circulation on the Brazilian Shelf Break and Continental Slope at 22° S. Tese de Doutorado. The University of New South Wales. Austrália, 164 p.
- Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson, 2010. *World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature*. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 184 pp.

- Lyard, F., F. Lefèvre, T. Letellier and O. Francis. Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004, *Ocean Dynamics*, 56, 394-415, 2006.
- Martin, L.; Dominguez, J.M.L. & Bittencourt, A.C.S.P. 1998. Climatic control of coastal erosion during a sealevel fall episode. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 1998.
- Miranda, L.B., 1991. Notas de aula do curso "Análise de Massa D'água" - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- NCEP (National Centers for Environmental Prediction), <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>, acessado em maio de 2012.
- Peterson, R. G. e Stramma, L., Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean, *Progress in Oceanography*, vol.26, pp 1-73, 1991.
- Pinho, U. F., 2003, Caracterização dos Estados de Mar na Bacia de Campos, Tese de Mestrado do Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 123 pp.
- Pond, S. & G.L. Pickard, 1978. *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press, Oxford. 329p
- Santos, L. F. S. 2009. Variabilidade subinercial das correntes na plataforma continental ao largo de Cabo Frio (RJ): observações. 172 pg. (IOUSP, M.Sc., Oceanografia Física, 2009) Dissertação - Universidade de São Paulo.
- Signorini, S. R., 1978, "On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between São Tomé and Guanabara Bay", *Deep-Sea Research*, 25, pp. 481-490.
- Silva, L.C.F., C.A.F. Albuquerque, W.W. Cavalheiro, C.M.P. Hansen, 1982: Gabarito tentativo para as massas de água da costa sudeste brasileira. Separata dos Anais Hidrográficos - Tomo XLI. 30p.
- Silveira, I.C.A., 2000. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 48(2): 171-183p.
- Silveira, I. C., 2007: O Sistema Corrente do Brasil na Bacia de Campos, RJ - Tese de Livre Docência - Universidade de São Paulo - SP.
- Stech, J. L., and J. A. Lorenzetti (1992), The Response of The South Brazil Bight To The Passage of Wintertime Cold Fronts, *J. Geophys. Res.*, 97(C6), 9507-9520, doi:10.1029/92JC00486.

Tolman. 2002. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 133 pp.

Violante de Carvalho N., 1998: Investigação sobre a evolução do clima de ondas na Baía de Santos e a correlação com as situações meteorológicas associadas. Dissertação de Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 186p.

World Meteorological Organization (WMO), 1989. Calculation of Monthly and Annual 30-years Standard Normals. Prepared by a meeting of experts, Washington D.C.



## 3. Modelagem Hidrodinâmica

### 3.1. Introdução

Para simular o transporte de qualquer material no oceano é necessário conhecer o comportamento das correntes marinhas da região em questão. Para tal, pode-se recorrer à técnica conhecida como fluidodinâmica computacional, que consiste em reproduzir o comportamento de fluidos em resposta às forças atuantes no meio, através da solução numérica das equações que governam os processos envolvidos. Com isso, podem ser obtidos resultados sinóticos e sob diferentes condições de contorno e iniciais, como por exemplo, condições de verão e inverno, de maré de sizígia e quadratura etc.

A capacidade de simular diferentes condições, aliada à obtenção de resultados sinóticos em quatro dimensões (as três do espaço e o tempo), faz da fluidodinâmica computacional uma opção interessante, e em determinados casos, como em regiões com pouca ou nenhuma medição, a única para obter os resultados necessários à modelagem de transporte de materiais no oceano. É imprescindível, no entanto, a realização de comparações dos resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico com dados observados na região, para se ter uma medida da representatividade do modelo em relação ao observado.

O presente relatório apresenta uma descrição das simulações hidrodinâmicas e seus resultados, que serão utilizados nas modelagens de transporte de óleo e cascalho do Campo Xerelete, Bacia de Campos.

## 3.2. Base de Dados Utilizada

Para representar a dinâmica da região foram utilizados os resultados da análise global do HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*). O HYCOM é um modelo de circulação oceânica global, que utiliza discretização horizontal em diferenças finitas (GABIOUX, 2008). Esse modelo tem como principal característica a utilização de um sistema de coordenadas verticais híbridas, isto é, utiliza o sistema de coordenadas isopícnais para as áreas de oceano aberto e estratificado, coordenadas  $z$  (cartesianas) para a camada de mistura e regiões pouco estratificadas, e coordenadas sigma para regiões com menores profundidades e topografia de fundo variável (zonas costeiras).

Utilizando esses três sistemas de coordenadas, o modelo pode conservar as características das massas d'água por longos períodos de tempo em regiões oceânicas (coordenada isopícnal), obter alta resolução na camada de mistura ou em regiões com pouca estratificação (coordenada  $z$ ), e resolver melhor a topografia de fundo em áreas costeiras ou sobre a plataforma continental (coordenada sigma). Desta forma, o HYCOM é basicamente um modelo em camadas isopícnais, que pode realizar uma transição suave para os sistemas de coordenadas  $z$  e sigma próximo aos contornos superiores e inferiores, ou quando a resolução vertical é inadequada (GABIOUX, 2008). Assim, o HYCOM combina as vantagens dos diferentes sistemas de coordenadas, simulando de forma otimizada as características da circulação oceânica e costeira, sendo atribuída ao usuário a determinação das zonas de transição entre os sistemas de coordenadas (CHASSIGNET *et al.*, 2003). A Figura 85 e a Figura 86 ilustram a estrutura híbrida do modelo.

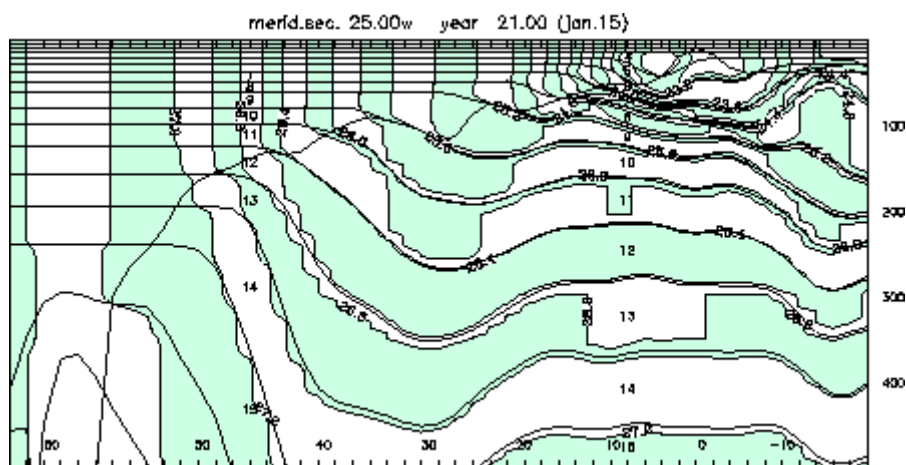


Figura 85: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html>

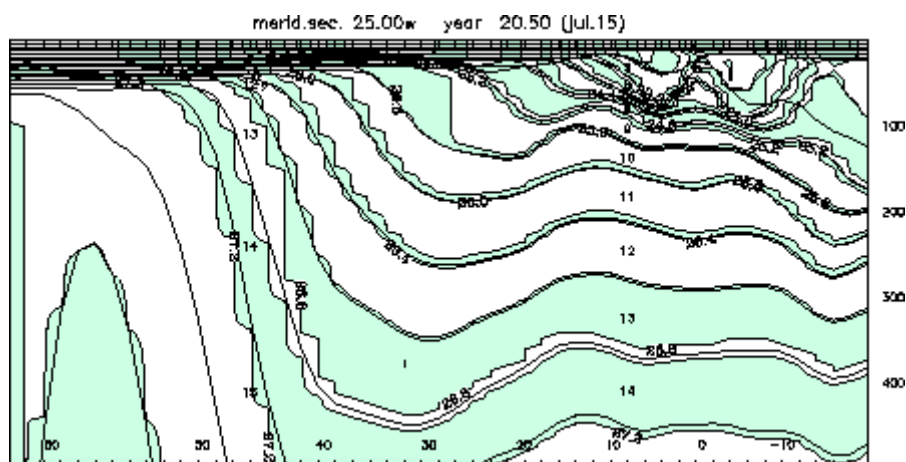


Figura 86: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25°W, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html>

A utilização de modelos globais oceânicos, como o HYCOM, com o objetivo de simular o transporte de óleo na Bacia Oceânica Sudeste/Sul do Brasil era até pouco tempo uma opção inviável, em virtude da baixa resolução espacial e temporal desse tipo de modelo. O aumento da capacidade computacional fez com que essa limitação fosse sendo minimizada, e atualmente existem diversos modelos globais com alta resolução, que desta forma são capazes de resolver as feições de mesoescala, responsáveis pela maior parte da energia da circulação oceânica. Além disso, os modelos globais não necessitam da imposição de condições de contorno em fronteiras abertas, uma das maiores fontes de problemas em se tratando de modelagem numérica geofísica. Somado a isso, os modelos globais contam, em geral, com sistemas robustos de assimilação de dados, o que possibilita que as simulações sejam realizadas por longos períodos, sem que haja grande divergência em relação à realidade. Diante disso, optou-se por utilizar os dados do HYCOM nesta simulação.

Embora seja verificada a ausência da maré astronômica nas condições de contorno do HYCOM, as correntes de maré na região de estudo (costa sudeste/sul do Brasil) apresentam energia desprezível em relação às demais forçantes, mesmo em locais abertos muito próximos à costa, como as praias. Esse fato é demonstrado através da análise das velocidades obtidas dos derivadores 12 e 13 do Projeto MondoCorcovado (<http://mondocorcovado.prooceano.com.br>), que durante cerca de dois meses e meio derivaram a menos de 10 km da costa, conforme a Figura 87. Ao realizar o espectro de energia das velocidades (utilizando apenas a parte das trajetórias onde os derivadores já se encontram sobre a plataforma - Figura 88), nota-se que a energia da banda de frequência da maré (entre 12 e 24 horas) apresenta valores insignificantes em relação à baixa frequência. O espectro foi calculado através da transformada rápida de

Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*), sem a utilização de filtros ou alisamentos. O pico correspondente à maré semi-diurna, por exemplo, contém apenas 3,5% da energia contida no pico de cerca de 6 dias, associado às forçantes atmosféricas. As correntes de maré serão apenas significativas no interior de baías como a Baía de Guanabara, Ilha Grande e Paranaguá, por exemplo, por conta dos afunilamentos nas entradas desses corpos de água.

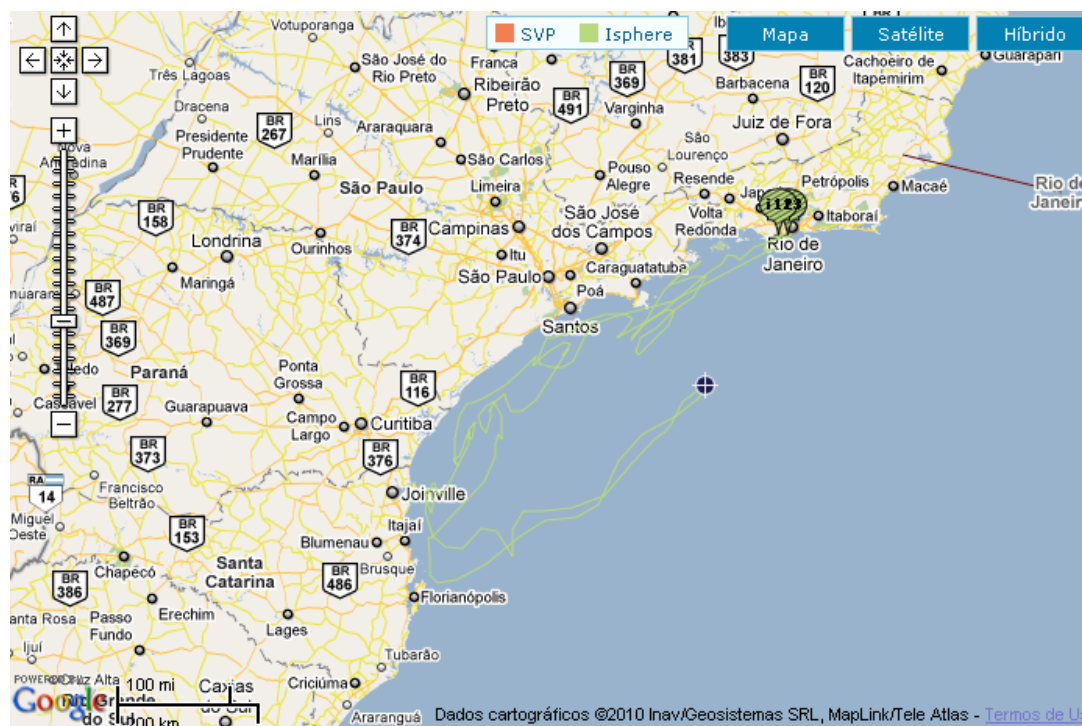


Figura 87: Trajetórias dos derivadores i12 e i13, lançados no Projeto MondoCorcovado (mondocorcovado.prooceano.com.br).

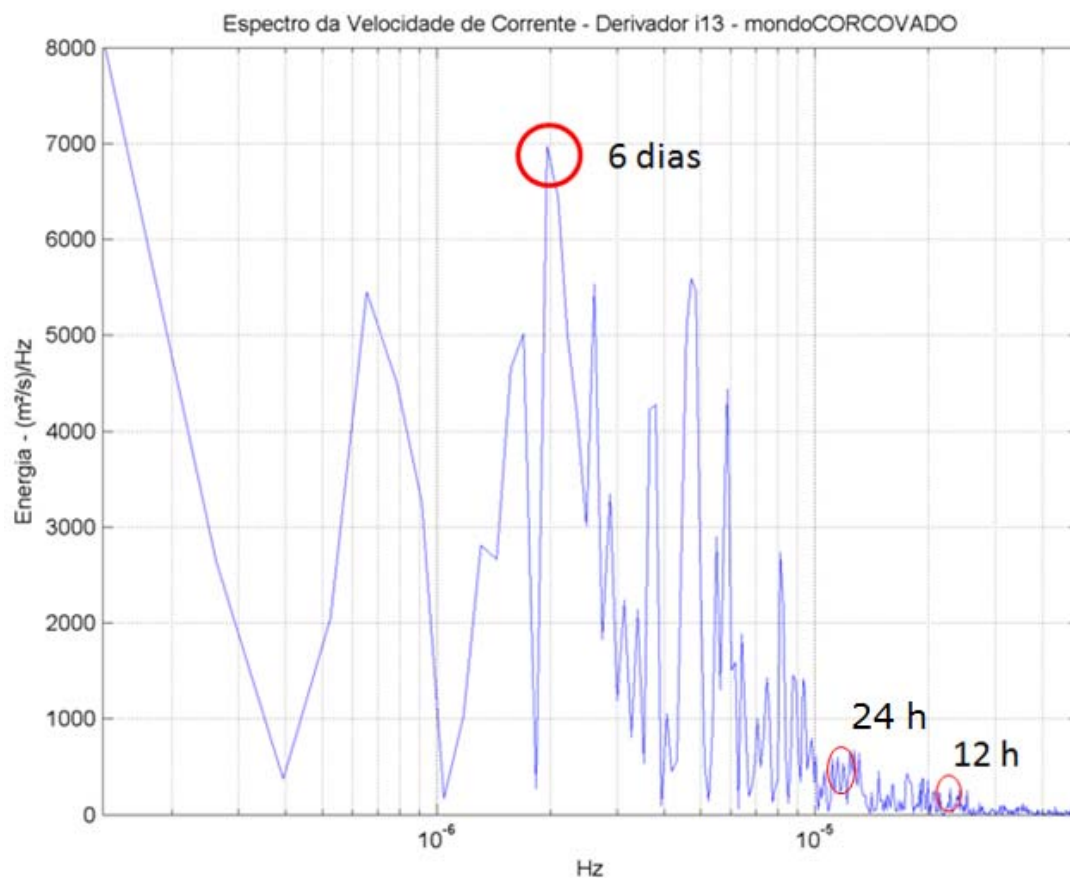


Figura 88: Espectro da velocidade de corrente. Destaque para os picos correspondentes aos períodos aproximados de 6 dias, 24 h e 12 h.

Para avaliar os efeitos da maré, também foram utilizados dados de correntes obtidos de uma campanha de medição realizada pela empresa PROOCEANO entre 8 de setembro e 25 de novembro de 2005. As medições foram realizadas em um fundeio posicionado em 23° 15' 03,54" S e 44° 12' 10,14" W (Figura 89), em região com lâmina d'água de aproximadamente 50 m. Esta campanha teve como objetivo caracterizar o comportamento hidrodinâmico da região.



Figura 89: Local de medição das correntes.

Os dados de correntes foram obtidos nessa campanha, em duas profundidades (10 m e 40 m), com o uso de correntômetro da marca *Sensordata*, modelo SD-6000. Este equipamento registra os valores de velocidade e direção de correntes e temperatura da água, em intervalos regulares de amostragem, podendo realizar medições em até 500 m de profundidade.

O equipamento permite a medição de velocidades de corrente de até 8 m/s, com resolução de 0,005 m/s, e valores de temperatura variando entre -2° C a 32° C, com autonomia para até 6000 registros. O correntômetro foi posicionado a 10 m abaixo da superfície, realizando medições a cada 30 min. As séries temporais obtidas para as componentes zonais e meridionais das correntes podem ser observadas na Figura 90.

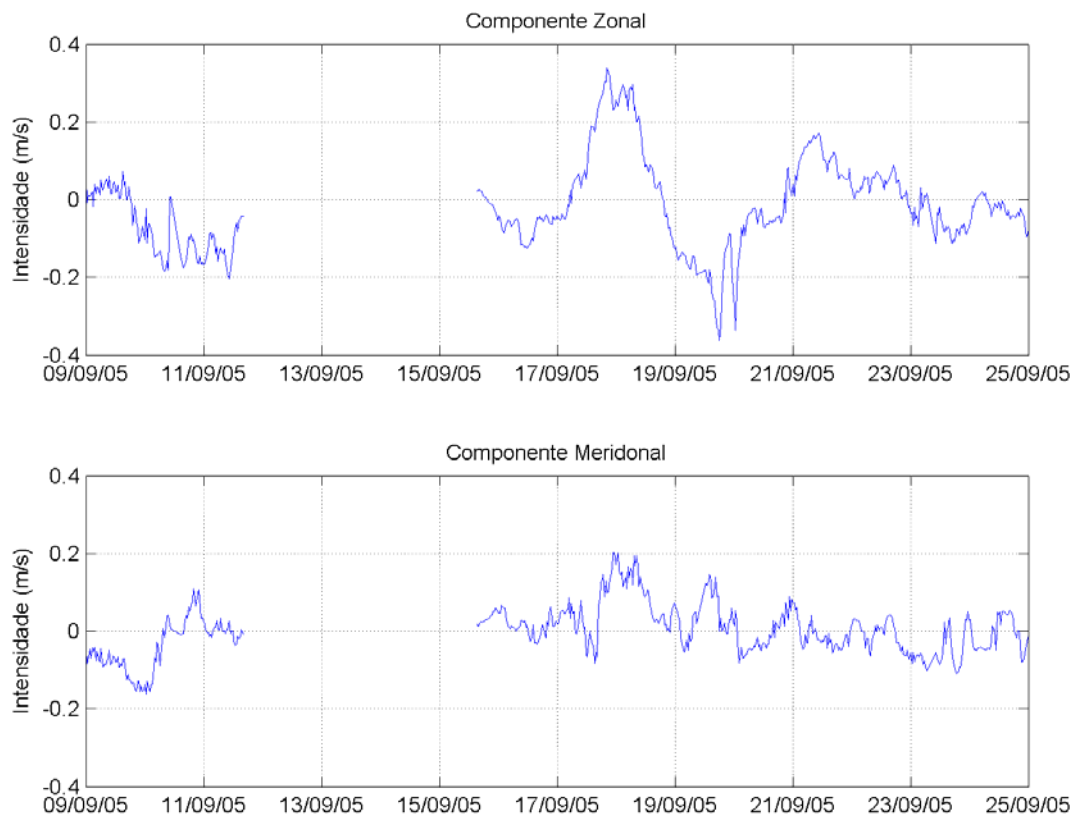


Figura 90: Série temporal da componente zonal e meridional das correntes.

Para verificar a influência da maré foi feito um espectro de energia das componentes da corrente medida no fundeio mais superficial. Neste, pretende-se observar quais são as frequências (ou períodos) responsáveis pela maior parte da energia das correntes. Embora seja recomendada a utilização de uma série temporal mais longa para avaliar as oscilações no ciclo de maré, o período que constitui a série avaliada corresponde à transição do ápice da maré de sizígia (lua nova em 17/09) até o meio da quadratura (quarto - minguante 25/09) abrangendo assim, os dois cenários possíveis de maré. Na Figura 91, observa-se que a maior parcela da energia da componente meridional da corrente ( $v$ ) está associada à frequência de 0,008 ciclos por hora (ou 125 horas de período). Esse é o período correspondente ao período de oscilação presente na circulação atmosférica da região, como as passagens de sistemas frontais, ou seja, o período em que os ventos variam entre E/NE e S/SW.

Já para a componente zonal ( $u$ ), a maior parte da energia encontra-se na banda de frequência correspondente aos períodos entre 20 e 30 horas e comparando-se com a energia total presente na componente  $v$ , possui uma ordem de grandeza inferior. Nessa faixa de períodos estão presentes três fenômenos principais; a oscilação inercial, o efeito de brisa e a componente

diurna da maré. Como a maré na região é a semi-diurna e não há energia significativa no período de 12 horas (~0,08 ciclos por hora) em nenhuma das duas componentes (u e v), demonstra-se que a maré não exerce papel de significativa importância nas correntes.

Pode-se inferir então que a componente v da corrente nessa região possui a maior parte da energia das correntes que é mais influenciada pelas passagens de frentes frias, enquanto os a componente u possui menor energia e sofre maior influência dos fenômenos com períodos próximos ao diurno, provavelmente associada à oscilação inercial e à brisa marinha. Portanto, baseado nesses dados e nos anteriormente apresentados (de derivadores) conclui-se que a influência da maré pode ser considerada desprezível em relação aos demais forçantes na geração das correntes no local.

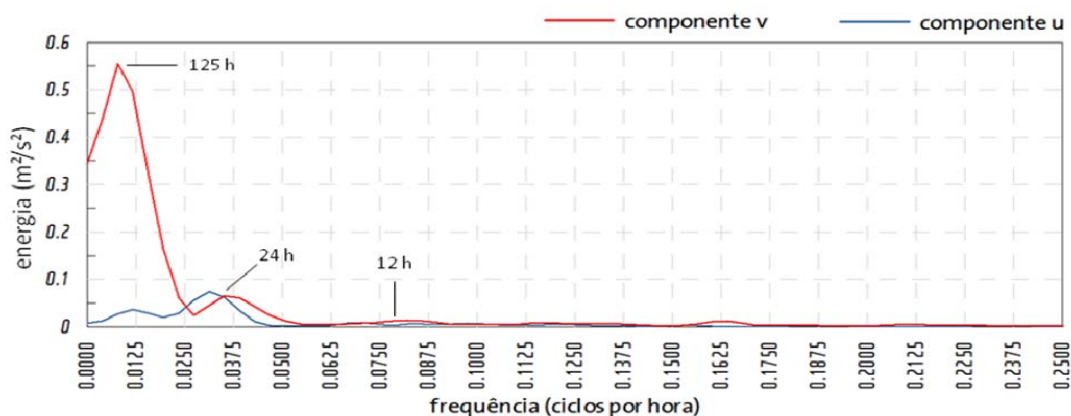


Figura 91: Espectro de Energia das Componentes Zonal e Meridional de Corrente.

### 3.2.1. Equações Governantes

O HYCOM é um modelo de equações primitivas contendo 5 equações prognósticas – duas para as componentes horizontais de velocidade, uma equação de continuidade de massa ou tendência de espessura da camada, e duas equações para o par de variáveis termodinâmicas, como temperatura e salinidade ou densidade e salinidade. As equações do modelo podem ser descritas em coordenadas (x,y,s), onde s é a coordenada vertical não especificada, na forma de (BLECK, 2002):



$$\frac{\Delta v}{\Delta t_s} + \nabla_s \frac{v^2}{2} + (\zeta + f)k \times v + \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) \frac{\partial v}{\partial p} + \nabla_s M - p \nabla_s \alpha \quad (2)$$

$$= -g \frac{\partial \tau}{\partial p} + \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right)^{-1} \nabla_s \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s v \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \nabla_s \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \nabla_s \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) = \nabla_s \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s \theta \right) + H_\theta \quad (5)$$

Onde  $v=(U, V)$  é o vetor velocidade horizontal,  $p$  é a pressão,  $\theta$  representa as variáveis termodinâmicas,  $\alpha$  é o volume específico potencial,  $\zeta$  é a vorticidade relativa,  $M$  é o potencial de Montgomery,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $k$  é o vetor vertical unitário,  $V$  é o coeficiente variável de viscosidade/difusividade,  $\tau$  é o vetor de estresse de cisalhamento induzido pelo vento ou pelo fundo e  $H_\theta$  representa o somatório dos termos fonte diabáticos, incluindo a mistura diapicnal, que atua em  $\theta$ . Os subscritos indicam quais variáveis permanecem constantes durante a diferenciação parcial (BLECK, 2002).

Após integração vertical sobre uma camada coordenada, limitada pelas duas superfícies  $S_{sup}$  e  $S_{inf}$  (superfície, fundo do mar e todos os limites de camadas são superfícies S), a equação de continuidade (II-2) se torna equação prognóstica para o peso da camada por unidade de área,  $\Delta p = p_{inf} - p_{sup}$  (BLECK, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \Delta p + \nabla_s \cdot (v \Delta p) + \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{inf} - \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{sup} = 0 \quad (6)$$

O termo  $\left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)$  representa o fluxo vertical de massa por uma superfície S.

A multiplicação de (1) por  $(\partial p / \partial s)$  e integração no intervalo  $(S_{sup}, S_{inf})$ , seguida pela divisão por  $(\Delta p / \Delta s)$ , modifica o termo de estresse de cisalhamento nesta equação para (BLECK, 2002):

$$\frac{g}{\Delta p} (\tau_{sup} - \tau_{inf}) \quad (7)$$

Enquanto o termo de mistura lateral de momentum é integrado para:

$$(\Delta p)^{-1} \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s v) \quad (8)$$

Estresses induzidos pelo vento e pelo fundo são admitidos como linearmente variáveis sobre determinado intervalo de profundidade, geralmente da ordem 10 m (BLECK, 2002).

A equação (II-4) expressa em camadas integradas é da forma de:

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \theta \Delta p + \nabla_s \cdot (v \theta \Delta p) + \left( s \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{inf} - \left( s \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{sup} = \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s \theta) + H_\theta \quad (9)$$

O sistema de equações prognósticas é complementado por equações diagnósticas, que incluem:

A equação hidrostática:  $\partial M / \partial \alpha = p$ ;

Uma equação de estado relacionando salinidade, temperatura e pressão à  $\alpha^{-1}$ , e

Uma equação descrevendo o fluxo vertical de massa sobre uma superfície S:  $\partial p / \partial s$

Esta última equação controla o espaçamento e o movimento das interfaces de camadas, sendo a essência da modelagem com coordenadas híbridas (BLECK, 2002).

### 3.2.2. Características da Simulação

Foi utilizada uma simulação para o oceano global, com o HYCOM 2.2 como modelo dinâmico. Os cálculos foram feitos para uma grade gerada na projeção de Mercator entre 78° S e 47° N (resolução de 1/12° no equador). Para regiões acima de 47° N é usada uma grade bipolar. A grade global tem dimensões horizontais de 4500 (longitude) x 3298 (latitude) pontos de grade, resultando num espaçamento médio de ~7 km. Apresenta 32 camadas verticais e a batimetria é derivada de uma base de dados qualificados NRL DBDB2. As forçantes superficiais são obtidas do NOGAPS (*Navy Operational Global Atmospheric Prediction System*) e incluem o cisalhamento do vento, velocidade do vento, fluxo de calor e precipitação.

Essa simulação utiliza o sistema para assimilação de dados NCODA (*Navy Coupled Ocean Data Assimilation*). Este sistema usa uma modelagem de previsão como partida em um esquema multi variável de interpolação ótima, que assimila observações de altimetria por satélites (pela trajetória obtida pelo NAVOCEANO *Altimeter Data Fusion Center*), temperatura da superfície do mar (*in-situ* e por satélites), assim como perfis de temperatura e salinidade obtidos por XBTs, flutuadores Argo e outras plataformas.

Esse *hindcast* foi conduzido para o período compreendido entre novembro de 2003 até os dias atuais, e seus resultados estão disponíveis via OPeNDAP no endereço: [http://hycom.coaps.fsu.edu/thredds/dodsC/glb\\_analysis.html](http://hycom.coaps.fsu.edu/thredds/dodsC/glb_analysis.html). Esses arquivos contêm a saída diagnóstica nos níveis de profundidade da base Levitus para várias variáveis, incluindo: correntes, temperatura e salinidade.

Para as simulações de dispersão de óleo apresentadas foram utilizados dados das componentes zonais (u) e meridionais (v) das velocidades das correntes. Os dados foram baixados na área compreendida entre as longitudes de 34° e 62°W, e as latitudes 16° e 40°S, com um total de 121.446 pontos, simulados para os anos entre 2005 e 2010 (6 anos). Os limites da grade hidrodinâmica utilizada são apresentados na Figura 92.

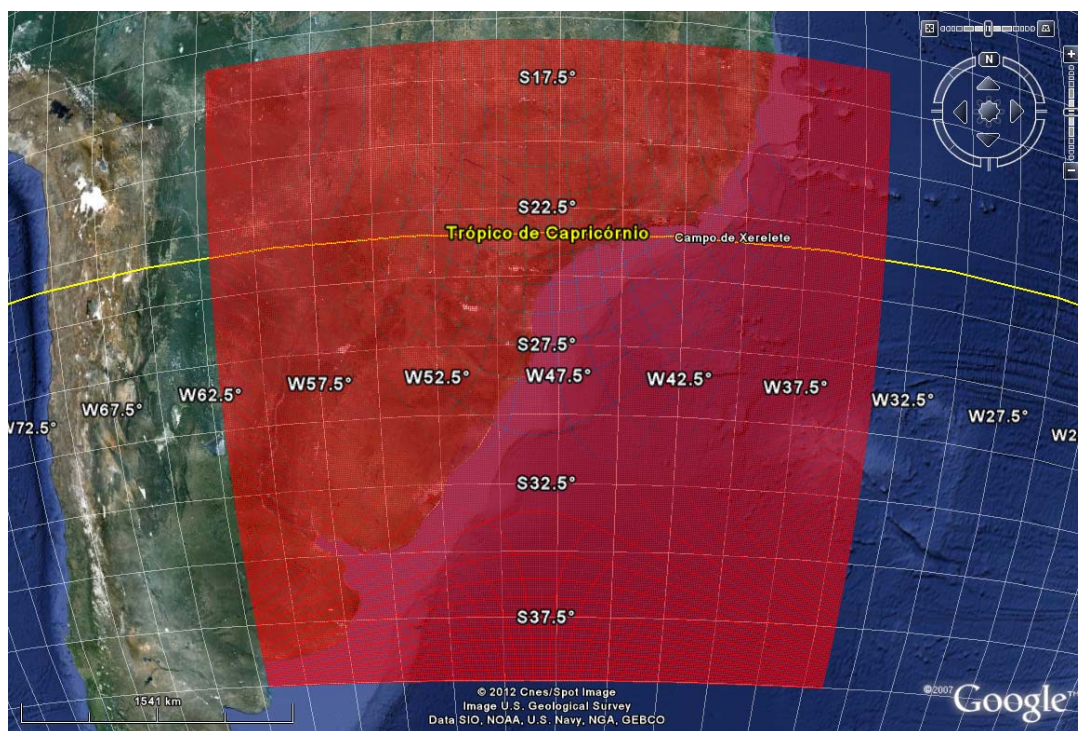


Figura 92: Exemplo da grade hidrodinâmica do HYCOM utilizada para forçar o modelo de óleo.

Os campos médios de circulação obtidos das simulações do HYCOM, para o período de verão e inverno, são apresentados na Figura 93 e na Figura 94.

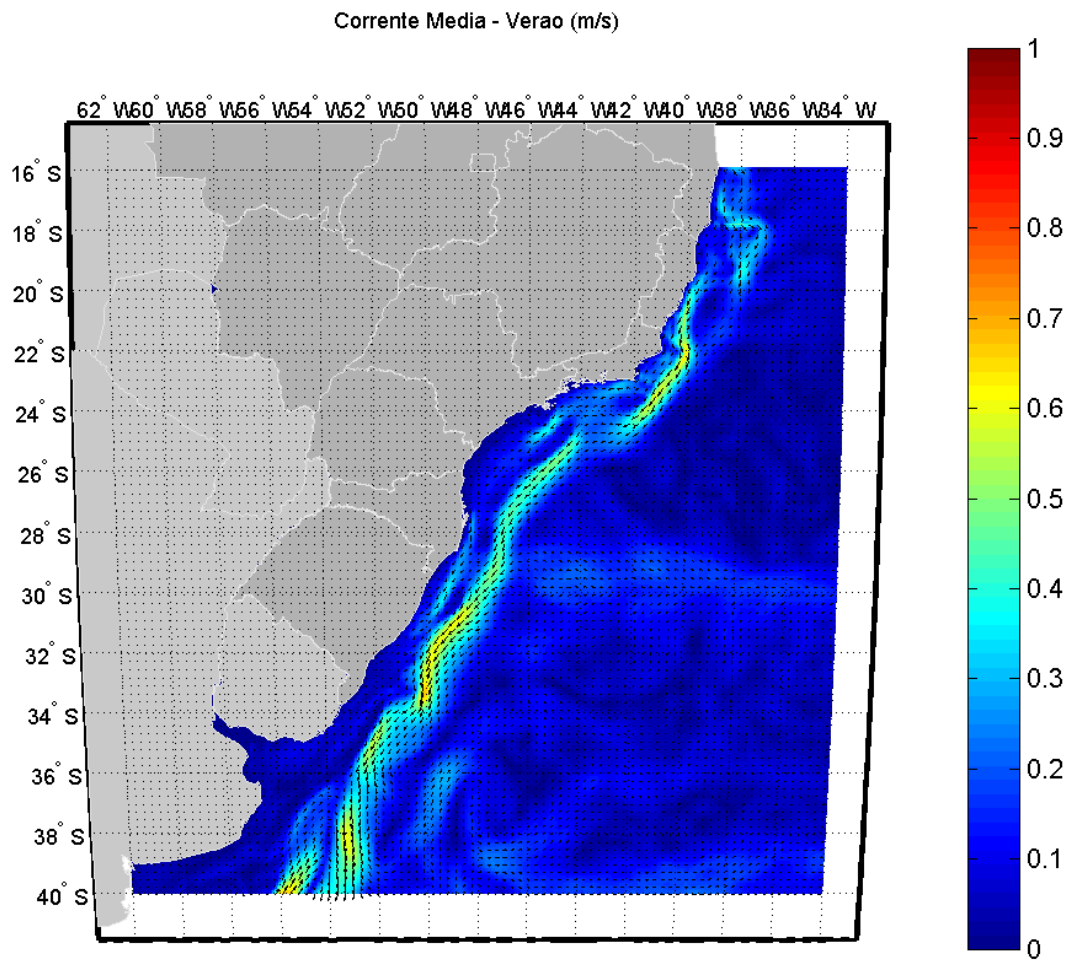


Figura 93: Campo médio das simulações do HYCOM para o período de verão.

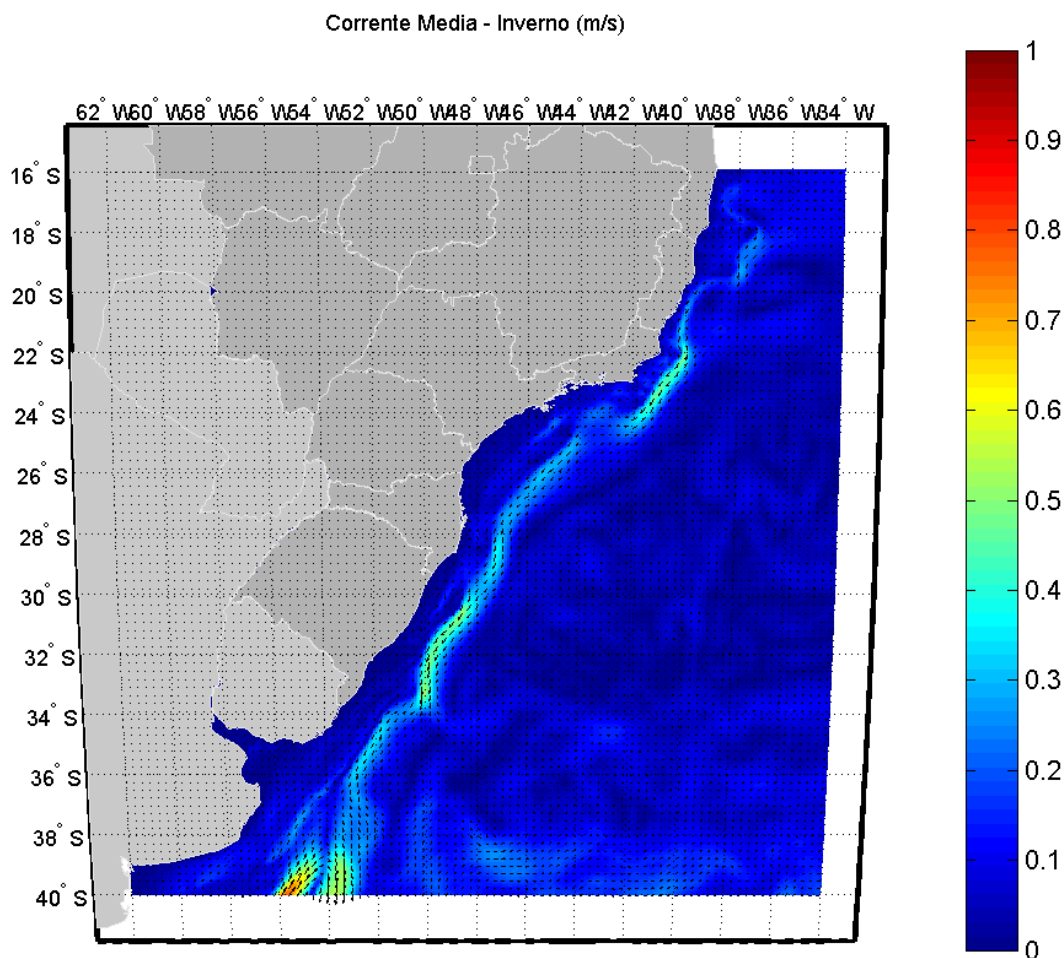


Figura 94: Campo médio das simulações do HYCOM para o período de inverno.

### 3.2.3. Avaliação do Modelo

Para que possamos saber se o comportamento do sistema de previsão é suficientemente compatível com o “sistema real” é necessário realizar uma comparação entre os resultados obtidos nos dois mundos; o “real” e o simulado.

A nomenclatura contemporânea para tal estudo é “avaliação”. Embora possa parecer um rótulo de pouca importância, os termos anteriormente utilizados para tal fim, sempre foram controversos. A primeira nomenclatura “validação” foi substituída por “comparação histórica”, a qual foi complementada com o termo “garantia de qualidade”. A dificuldade em se definir um termo reside no fato de que as palavras “validação” e “garantia” trazem em si uma expectativa

de positivo e negativo em relação aos resultados. O modelo poderia ser somente válido ou não válido, garantido ou não garantido. Nesse sentido, o termo “avaliação” torna-se mais adequado, uma vez que é neutro e pode abarcar uma gama maior de definições em termos de qualificação do modelo ou sistema (BECK, 2002).

Em essência, são duas as principais perguntas que devem ser respondidas quando se avalia um modelo ou sistema:

1. O modelo foi construído com materiais aprovados, i.e. as hipóteses constituintes são consagradas e adequadas?
2. O seu comportamento se aproxima bem do observado com respeito ao “mundo real”?

A primeira pergunta pode ser respondida com o grande número de artigos publicados em revistas internacionais utilizando o HYCOM para estudos de circulação oceânica (SHAJI *et al.*, 2005; KARA *et al.*, 2005; KELLY *et al.*, 2007; CHANG *et al.*, 2008).

Para responder a esta segunda questão a PROOCEANO simulou, utilizando os resultados de corrente do HYCOM, os lançamentos dos derivadores SVP's dos projetos mondoENI (<http://mondo.prooceano.com.br>), mondoCORCOVADO (<http://mondocorcovado.prooceano.com.br>) e mondoOGX (<http://mondoogx.prooceano.com.br>). Vale lembrar que derivadores do tipo SVP são aqueles que foram desenhados para “sentir” somente o efeito das correntes superficiais, e seus dados são classificados como lagrangeanos, ou seja, atuam como uma parcela demarcada do fluido em função do tempo.

Na Tabela 30, são apresentadas informações referentes aos derivadores dos distintos projetos utilizados.

Para simular o comportamento de partículas virtuais sobre os resultados do HYCOM, foram realizadas 100 simulações com 10 partículas cada uma, para o mesmo período de lançamento de derivadores de cada projeto. As simulações foram finalizadas após 60 dias do lançamento das partículas.

Ressalta-se, entretanto, que comparações diretas entre modelos numéricos e observações lagrangeanas são difíceis de serem realizadas, já que a física dos modelos e os dados utilizados na modelagem (batimetria, forçantes externas e parametrizações sub-grade) não são idênticos à realidade. É fato que a comparação entre modelos numéricos e dados lagrangeanos deve ser realizada somente em termos estatísticos (CHU *et al.*, 2004). Desta forma, optamos por realizar uma comparação probabilística entre os dados dos projetos de monitoramento por derivadores e os numéricos, simulados com uso do HYCOM. Além disso, também foram feitas comparações

com dados de temperatura da superfície do mar (TSM) do Programa OSTIA (*Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis*).

Tabela 30: Informações sobre os projetos de monitoramento por derivadores utilizados.

Projeto	Pto. de Lançamento	Data Inicial	Data Final	Nº de derivadores
mondoENI	24,4276°S 43,7931°W	20/09/2007	13/11/2007	36
mondoCORCOVADO	24,944°S; 44,445°W	26/01/2009	16/10/2009	11
mondoOGX (Bacia de Campos)	23,033°S 41,05°W	04/03/2011	05/12/2011	20
mondoOGX (Bacia de Santos)	24°S 44°W	02/03/2011	31/12/2011	19

*De forma a manter o padrão proposto para o tempo total de simulação das partículas do HYCOM, ressaltá-se que os dados dos derivadores também foram limitados aos primeiros 60 dias no mar.*

Da Figura 95 a Figura 98, são apresentadas as trajetórias dos derivadores sobrepostas às obtidas pela simulação numérica. São também apresentados os mapas de probabilidade de presença dessas partículas e os obtidos pelos derivadores.



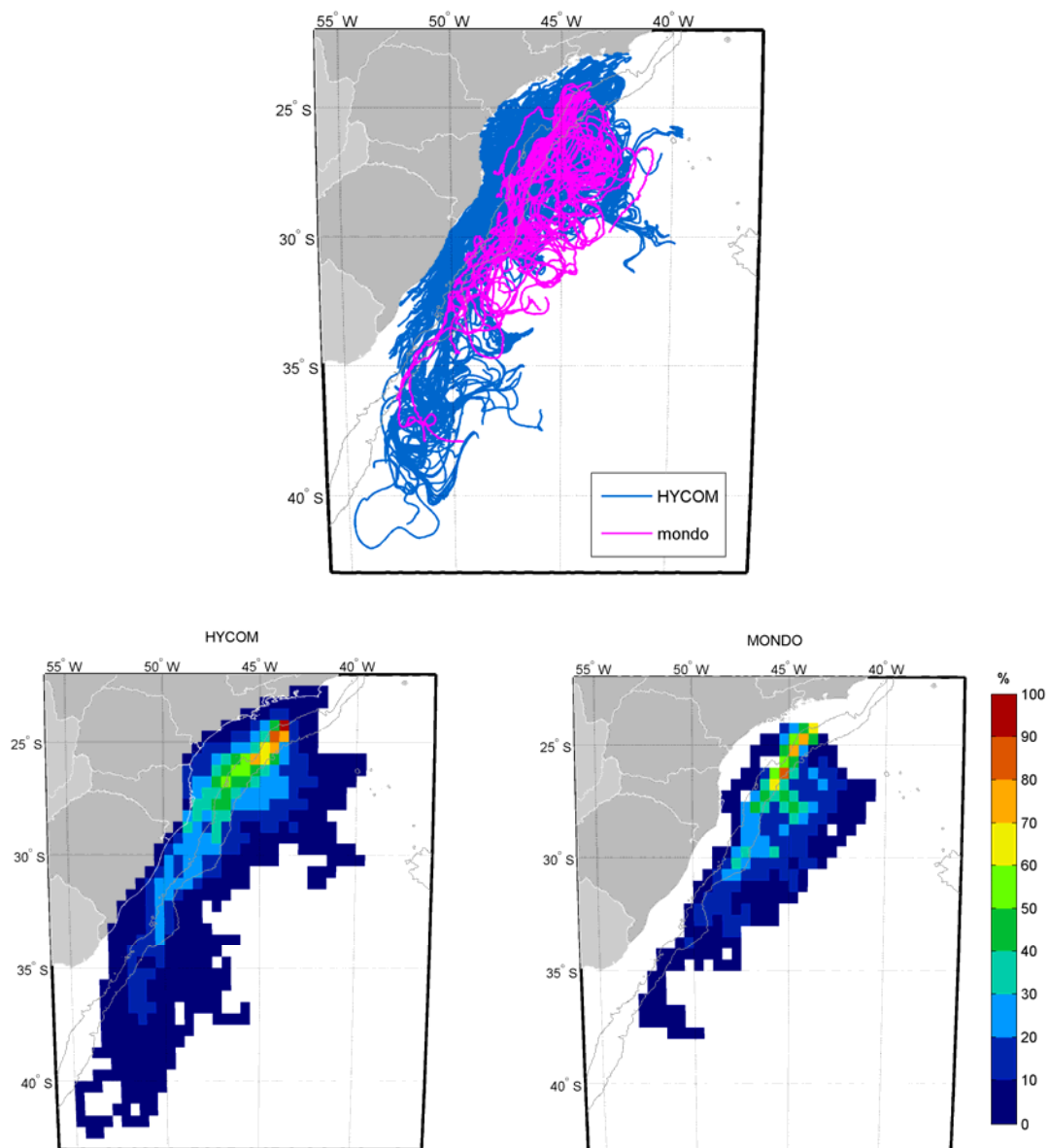


Figura 95: Trajetórias dos derivadores do Projeto MONDO e trajetórias das partículas simuladas a partir dos resultados do HYCOM (painel superior). Mapas de probabilidade de presença das partículas simuladas (painel inferior à esquerda) e obtidos pelos derivadores do Projeto MONDO (painel inferior à direita).

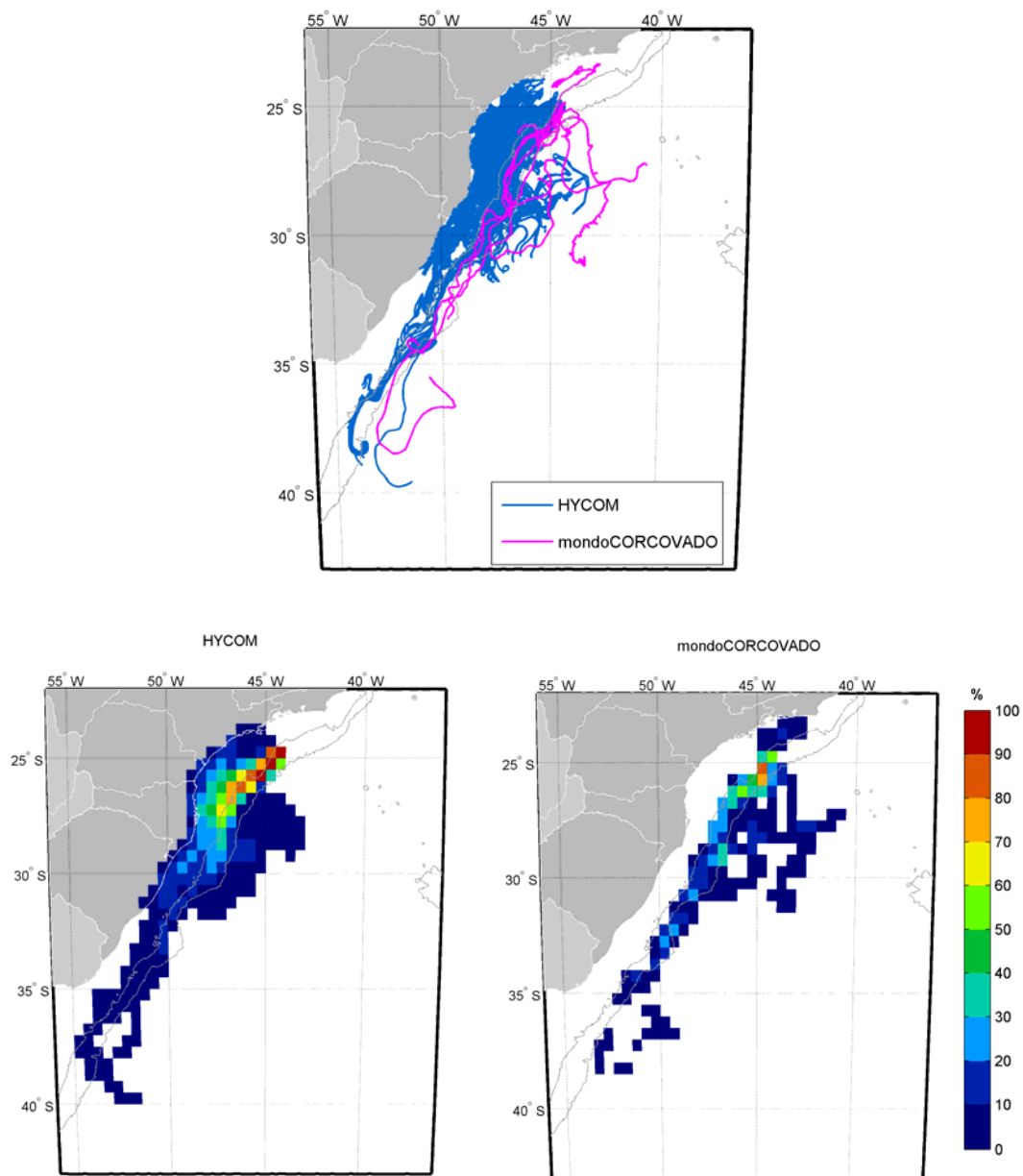


Figura 96: Trajetórias dos derivadores do Projeto mondoCORCOVADO e trajetórias das partículas simuladas a partir dos resultados do HYCOM (painel superior). Mapas de probabilidade de presença das partículas simuladas (painel inferior à esquerda) e obtidos pelos derivadores do Projeto mondoCORCOVADO (painel inferior à direita).

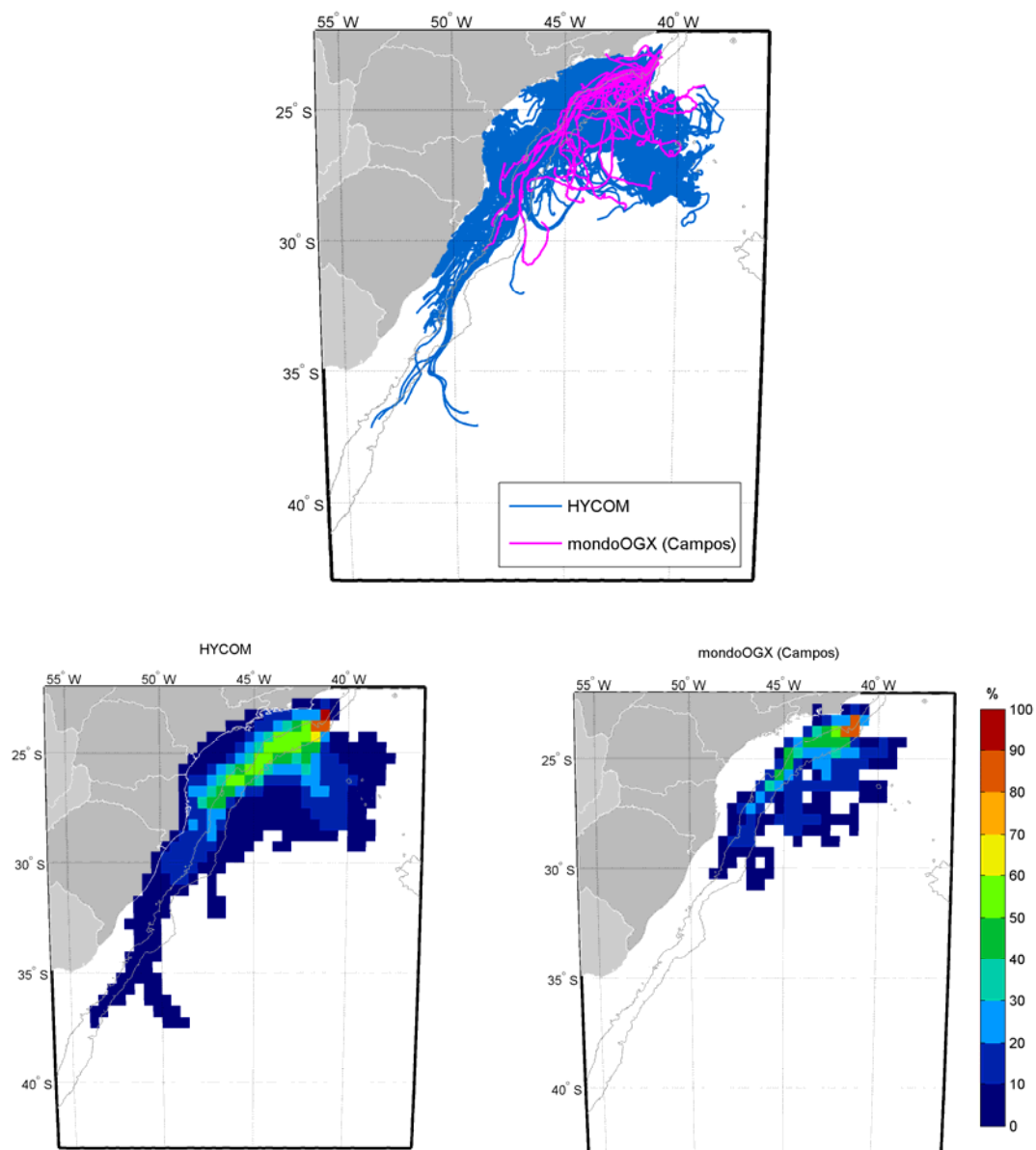


Figura 97: Trajetórias dos derivadores do Projeto mondoOGX Campos e trajetórias das partículas simuladas a partir dos resultados do HYCOM (painel superior). Mapas de probabilidade de presença das partículas simuladas (painel inferior à esquerda) e obtidos pelos derivadores do Projeto mondoOGX Campos (painel inferior à direita).

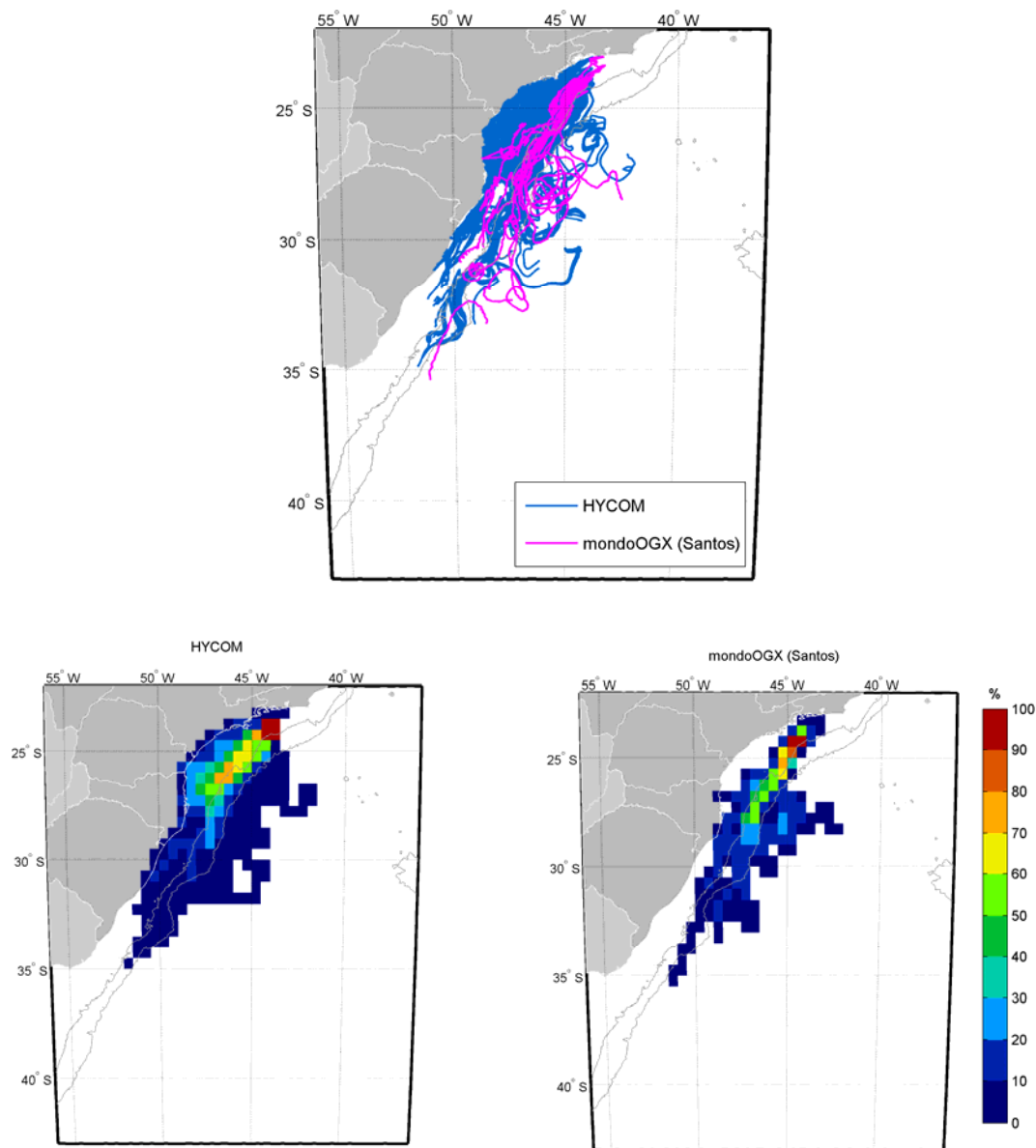


Figura 98: Trajetórias dos derivadores do Projeto mondoOGX Santos e trajetórias das partículas simuladas a partir dos resultados do HYCOM (painel superior). Mapas de probabilidade de presença das partículas simuladas (painel inferior à esquerda) e obtidos pelos derivadores do Projeto mondoOGX Santos (painel inferior à direita).

Observa-se que os conjuntos de trajetórias e os mapas de probabilidade de presença de óleo possuem padrão semelhante, em termos de extensão, tanto em latitude, quanto em longitude. As feições oceânicas como a Corrente do Brasil e os vórtices de mesoescala estão representados nos dois conjuntos de forma similar, como pode ser notado na maior densidade

de trajetórias sobre a quebra da plataforma e nos padrões circulares de várias trajetórias de ambos os conjuntos.

Nota-se também que as simulações conduzidas pelo modelo numérico apresentaram resultados próximos aos verificados com os derivadores, principalmente nas regiões com altas probabilidades. No entanto, os mapas elaborados com os resultados do HYCOM apresentam maiores probabilidades de presença em regiões mais próximas à costa.

A última comparação realizada, desta vez tem como foco a circulação costeira da plataforma SE/S do Brasil. O objetivo desta comparação é avaliar quão bem o HYCOM reproduz a Corrente Costeira do Brasil, descrita pela primeira vez em Souza & Robinson (2004). Essa corrente exerce importante influência na circulação costeira na plataforma SE/S do Brasil, principalmente durante os meses de inverno e primavera. Trata-se de um fluxo confinado entre a Plataforma interna e a costa com sentido sul/norte, que atinge toda a costa Sul do Brasil, podendo chegar até a costa do Rio de Janeiro. Souza & Robinson (2004) utilizaram como traçador do limite do fluxo da CCB, a isoterma de 20° C e determinaram sua posição na costa ao longo do tempo, através da análise de dados obtidos por derivadores.

Santos *et al.* (2011) determinou a posição da CCB (isoterma de 20°C) com dados de TSM do Programa *Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis - OSTIA* ([http://ghrsst-pp.metoffice.com/pages/latest\\_analysis/ostia.html](http://ghrsst-pp.metoffice.com/pages/latest_analysis/ostia.html)), dados de TSM do HYCOM, e os comparou com os resultados obtidos por Souza e Robinson (2004). O produto OSTIA abrange todo o globo, possui alta resolução (~6 km) e é oferecido diariamente, sendo resultado da combinação de diversos sensores infravermelhos e micro-ondas, além de dados *in situ* por meio de processo de Análise Objetiva. Este produto tem oferecido dados acurados de TSM, com um erro médio quadrático menor que 0,6°C, em alta resolução e disponibilizados em tempo quase real (STARK *et al.* 2007). A Figura 99 mostra os resultados obtidos por Santos *et al.* (2011).

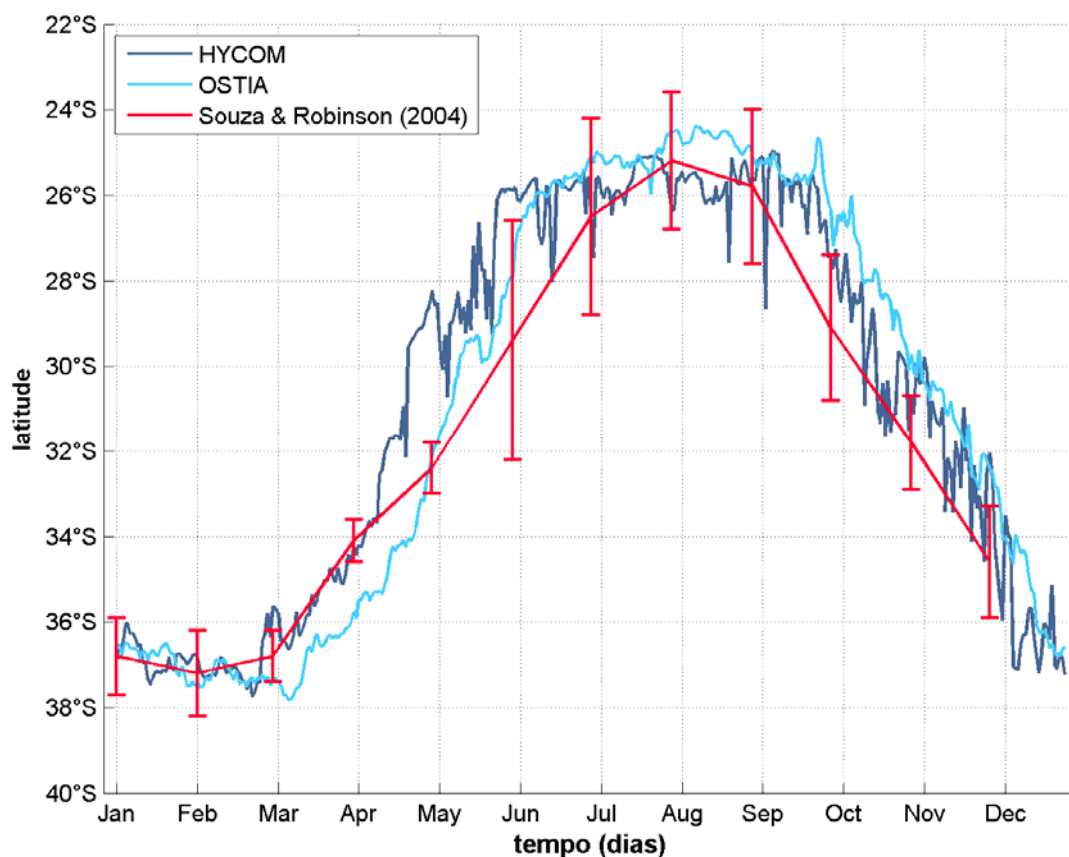


Figura 99: Limite norte da isoterma de 20° C a partir de dados do produto OSTIA, do HYCOM e dos resultados de Souza e Robinson (2004). Fonte: Santos *et al.* (2011).

Pode-se observar que o comportamento das curvas é bastante semelhante nas três bases de dados analisadas, indicando que o HYCOM é capaz de reproduzir esse fluxo de maneira satisfatória em seus resultados.

Em síntese, podemos concluir que a avaliação realizada mostra que os resultados do HYCOM reproduzem de forma satisfatória a dinâmica de maior escala (como a Corrente do Brasil), as feições de mesoescala (como vórtices e meandros) e também a circulação costeira e de plataforma.

### 3.3. Bibliografia

- BECK, B., 2002. Model evaluation and performance. In Encyclopedia of Environmetrics, Eds. A. H. El-Shaarawi and W. W. Piegorsch, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- BLECK, R., 2002. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycniccartesian coordinates. *Ocean Modeling*, 4, 5588.
- CHANG, Y. S., ÖZGÖKMEN, T. M. PETERS, H. XU, X. 2008. Numerical Simulation of the Red Sea Outflow Using HYCOM. And Comparison With REDSOX Observations. *J. Phys. Oceanogr.* 38(2). 357 – 358.
- CHASSIGNET, E. P., SMITH, L. T., HALLIWEL, G. R., et al., 2003, “North Atlantic Simulations with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): Impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and termobaricity”, *Journal Physical Oceanography*, v. 33, n. 12, pp. 2504-2526.
- CHU, P.C., L.M. IVANOV, L.H. KANTHA, T.M. MARGOLINA, O.M. MELNICHENKO, and Y.A. POBERENZHNY, 2004: Lagrangian predictability of high-resolution regional ocean models: the special case of the Gulf of Mexico. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 47-66.
- GABIOUX, M. Estudo numérico dos meandros e vórtices da corrente do Brasil entre 22°S e 30°S [Rio de Janeiro] 2008 XVII, 138 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2008) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- HYCOM, 2008. Assimilative Global Simulation (10/2008 to 11/2008), [online] Disponível via WWW. URL: [http://hycom.coaps.fsu.edu/data/glb\\_simulation.html](http://hycom.coaps.fsu.edu/data/glb_simulation.html).
- KARA, A. B., WALLCRAFT, A. J., HULBURT, H. E. (2005). Sea Surface Temperature Sensitivity to Water Turbidity from Simulations of the Turbid Black Sea Using HYCOM. *J. Phys. Oceanogr.*, 35. 33-54.
- KELLY, K. A., THOMPSON, L., CHENG, W., METZGER. E. J. 2007. Evaluation of HYCOM in the Kuroshio Extension Region Using New Metrics. *J. Geophys. Res.* 112.
- SANTOS, N.G., CERRONE, B.N., SOUZA, R.B., dos SANTOS, F.A. 2011. Estudo sobre a sazonalidade da corrente costeira do Brasil através de um algoritmo não-supervisionado de tratamento de dados de TSM. Apresentação no COLACMAR. Balneário Camboriú, Santa Catarina, Brasil.

SHAJI, C., WANG, C., HALLIWEL, G. R., WALLCRAFT, A.J. 2005. Simulation of Tropical Pacific And Atlantic Oceans Using a Hybrid Coordinate Ocean Model. Ocean Modelling, 9, pp. 359-87.

SOUZA, R.B. and ROBINSON, I., 2004. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. Continental Shelf Research vol. 24 (2) pp. 241-262.

STARK, J. D. CRAIG J. DONLON, MATTHEW J. MARTIN and MICHAEL E. MCCULLOCH, 2007, OSTIA : An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system., Oceans '07 IEEE Aberdeen, conference proceedings. Marine challenges: coastline to deep sea. Aberdeen, Scotland.IEEE.



## 4. Modelagem de Dispersão de Óleo

### 4.1. Introdução

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica do transporte de óleo no mar para cenários acidentais de vazamento no Campo de Xerelete, Bacia de Campos. A localização do ponto de vazamento, cujas coordenadas geográficas são 23°27'27,04"S e 40°39'18,44"W, é apresentada na Figura 100.

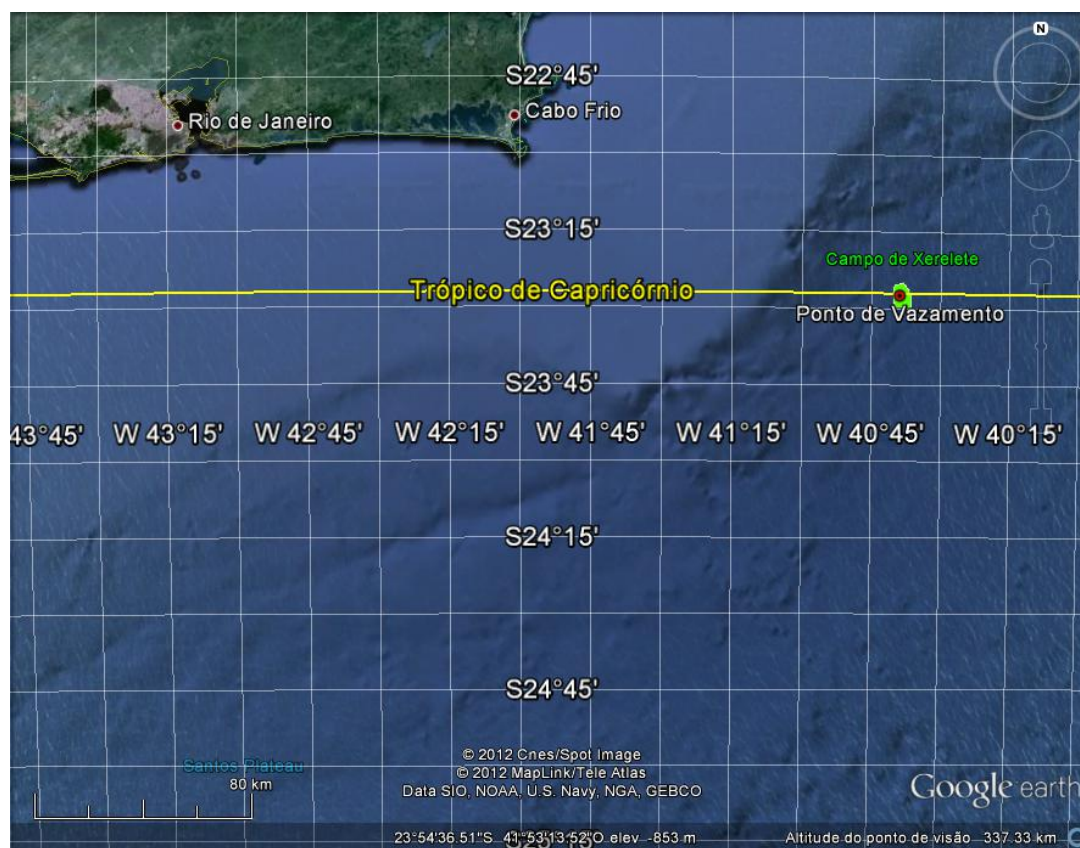


Figura 100: Localização do ponto de vazamento, em relação ao Campo de Xerelete (área em verde).

O estudo foi dividido em duas etapas. A primeira consiste na análise das características meteorológicas e simulações hidrodinâmicas da região, mais especificamente os parâmetros capazes de afetar o comportamento do óleo derramado (item *Modelagem Hidrodinâmica*).

Na segunda etapa foi realizada a simulação da dispersão do óleo, para as condições meteo-oceanográficas características, estimando o comportamento do óleo a ser derramado em cada uma delas.

Foram considerados três possíveis casos de vazamentos acidentais para cada locação. O montante de óleo relacionado a cada caso é:

- » Pequeno porte - 8 m<sup>3</sup>;
- » Médio Porte - 200 m<sup>3</sup>;
- » Pior caso (maior volume): 270.000 m<sup>3</sup>.

Esses volumes simulados estão em concordância com a resolução CONAMA nº 398/2008, que dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional.

O volume de pior caso é baseado na associação da capacidade de produção diária do poço (estimada em 9.000 m<sup>3</sup>/dia, segundo a contratante), com a perda de controle do poço (30 dias de vazamento).

No estudo de dispersão de óleo, dois tipos de simulações serão conduzidos no estudo: probabilísticas e determinísticas. Na Tabela 31 é apresentado o resumo dos cenários simulados.

Tabela 31: Resumo dos cenários de vazamento simulados.

Modelo	Volume Total (m <sup>3</sup> )	Estação	Vazamento	Tempo
Probabilístico				
Pequeno Porte	8	Verão e inverno	instantâneo	30 dias
Médio Porte	200	Verão e inverno	instantâneo	30 dias
Pior Caso	270.000	Verão e inverno	contínuo (30 dias)	60 dias
Determinístico				
Crítico	270.000	Inverno	contínuo (30 dias)	60 dias
Meteo-oceanográfico frequente	270.000	Verão e inverno	contínuo (30 dias)	60 dias

Além dos modelos numéricos usados, são também descritos em detalhes os dados usados como forçantes.

## 4.2. Metodologia

### 4.2.1. Modelo de Transporte

As simulações numéricas apresentadas nesse estudo foram feitas com o OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response*), modelo desenvolvido pela SINTEF para o cálculo da dispersão de manchas de óleo. O OSCAR é capaz de avaliar a evolução de óleo na superfície da água, ao longo de costas, na coluna d'água e no sedimento. Os principais componentes do sistema OSCAR são um modelo de intemperismo, um modelo de trajetória em três dimensões e um modelo de combate a vazamentos acidentais (REED, 2001; REED *et. al* 2004).

Na Figura 101 é apresentado um esquema ilustrativo das três principais etapas no processo da simulação: os dados de entrada (características do vazamento e condições ambientais), os processos realizados em diferentes intervalos de tempo (intemperismo atuante no óleo) e os resultados (balanço de massa do óleo, distribuição geográfica e propriedades).

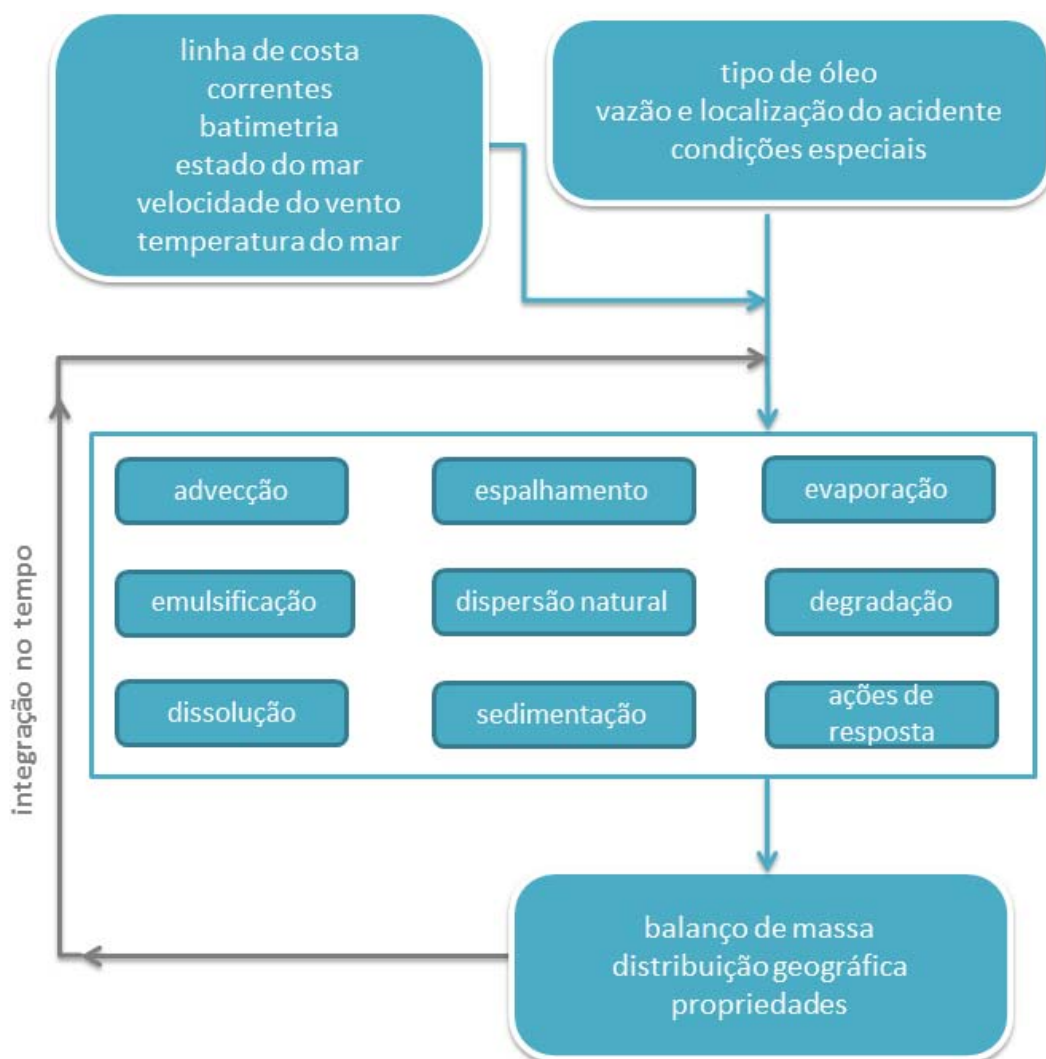


Figura 101: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).

Uma breve descrição dos processos físicos/químicos atuantes no óleo e de como eles são representados no modelo OSCAR, será apresentada a seguir, com base no relatório desenvolvido por Reed (2001).

#### 4.2.1.1. Processos de Intemperismo

##### 4.2.1.1.1. Advecção

A advecção é calculada a partir da soma de uma velocidade local média e de uma componente turbulenta de base aleatória. A velocidade local média é a soma das velocidades de correntes, ventos e a componente governada pela onda (Stokes) e a componente turbulenta ( $w'$ ) é expressa como:

$$w' = \sqrt{6K / \Delta t} \quad (10)$$

onde  $K$  é o coeficiente de dispersão turbulenta, estimado para as direções horizontais e verticais, e  $t$  o tempo.

O coeficiente de dispersão horizontal pode ser calculado a partir de dados aproximados de estudos de dispersão de traçadores (OKUBO (1971, 1974) *apud* REED, 2001; BOWDEN, 1983 *apud* REED, 2001):

$$K_x = 0,0027 t^{1,34} \quad (11)$$

para  $K$  em  $\text{cm}^2/\text{s}$  e  $t$  em segundos.

O coeficiente de difusão turbulenta acima da picnoclina relacionado às condições de onda, segundo Ichiye (1967 *apud* REED, 2001), é:

$$K_z = 0,0028 \frac{H^2}{T} \exp(-2Kz) \quad (12)$$

sendo  $H$  a altura de onda,  $T$  o período de onda e  $K$  o número de onda. Abaixo da profundidade da picnoclina,  $K_z$  é assumido como uma constante igual a  $10^{-4} \text{ m/s}^2$  (KULLENBERG, 1984 *apud* REED, 2001). Na ausência da picnoclina, a equação de Ichiye é aplicada da superfície ao fundo.

O deslocamento vertical das gotículas de óleo é calculado pela soma da velocidade turbulenta de base aleatória e uma velocidade vertical (subida ou descida). As velocidades verticais são calculadas usando a média harmônica de dois extremos, sendo o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds (JOHANSEN, 2000):

$$w_{ascendente} = 1/(w_1^{-1} + w_2^{-1})$$

onde,

$$w_1 = d^2 g' / 18\nu, \text{ (para número de Reynolds } < 1000), \text{ e}$$

$$w_2 = \sqrt{3d/|g'|}, \text{ (para número de Reynolds } > 1000),$$

sendo  $g' = g(\rho_\alpha - \rho_0) / \rho_\alpha$  onde  $g$  é a aceleração gravitacional e  $\nu$  a viscosidade cinemática da água ( $\sim 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

O coeficiente de arrasto do vento na deriva superficial do óleo utilizada neste estudo foi 3% da intensidade do vento (REED *et al.*, 1994; WANG *et al.*, 2005; GUO *et al.*, 2009).

#### 4.2.1.1.2. Espalhamento

O espalhamento do óleo na superfície do mar envolve diversas interações entre forças e processos, e alguns estudos (FAY, 1969, HOULT, 1972 e FANNELØP & WALDMAN, 1972) já mostraram que o espalhamento passivo do óleo ocorre devido às forças da gravidade, momento e viscosidade. Para a representação do espalhamento transversal de uma mancha de vazamento contínuo, é utilizada neste modelo uma equação unidimensional:

$$x_{LE} = C_0 \left( \frac{g \Delta \rho}{\rho_w} \right)^{1/4} \frac{m^{1/2}}{(\rho_w \mu_w)^{1/8}} t^{3/8} \quad (13)$$

onde  $x_{LE}$  é a largura da mancha de óleo (m),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ),  $\Delta \rho$  é a diferença entre as densidades da água e do óleo ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_w$  é a densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu_w$  é a viscosidade da água (cP),  $m$  é  $1/2$  da taxa de liberação de massa dividido pela corrente superficial ( $\text{kg/m}$ ) e  $C_0$  é a constante de espalhamento.

Esta equação representa o regime de gravidade-viscosidade no processo de espalhamento e somente é utilizado para a parte espessa da mancha de óleo.

#### 4.2.1.1.3. Evaporação

A taxa de evaporação é controlada pela pressão de vapor dos componentes individuais do óleo as suas frações molares em qualquer localização da mancha superficial, e calculada como. (MACKAY *et al.*, 1980; SEBASTIÃO & SOARES, 1995; REED *et al.*, 1999):

$$dm_i / dt = K_e P_i A M_i F_i / (RT) \quad (14)$$

onde  $m_i$  é a massa associada ao  $i$ -ésimo componente do vazamento;  $t$  é o tempo (s);  $K_e$  é o coeficiente de transferência de massa evaporada (m/s);  $T$  é a temperatura (K);  $P_i$  é a pressão de vapor para o  $i$ -ésimo componente (atm);  $A$  é a área da mancha de óleo (m<sup>2</sup>);  $M_i$  é o peso molecular da  $i$ -ésimo componente (g/mol);  $F_i$  é a fração molar do  $i$ -ésimo componente remanescente na mancha; e  $R$  é a constante universal do gases,  $8,206 \times 10^{-5}$  atm-m<sup>3</sup>/mol-K.

O coeficiente de transferência de massa,  $K_e$ , depende do vento e é calculado por (AMOROCHO & DEVRIES, 1980 *apud* REED, 2001):

$$K_e = C_d U(t) \quad (15)$$

sendo  $C_d$  o coeficiente de atrito entre a atmosfera e o ar, e  $U(t)$  a velocidade do vento (m/s). O coeficiente de arrasto  $C_d$  é calculado em função da velocidade do vento:

$$C_d = \left( \frac{U^*}{U(t)} \right)^2 \quad (16)$$

em que

$$U^* = CU(t), \text{ quando } U(t) < u_1$$

$$U^* = Cu_1 + (Du_2 - Cu_1) \frac{U(t) - u_1}{u_2 - u_1}, \text{ quando } u_1 \leq U(t) \leq u_2$$

$$U^* = DU(t), \text{ quando } U(t) > u_2$$

sendo  $C$ ,  $D$ ,  $u_1$  e  $u_2$  valores constantes (0,0323; 0,0474, 7 e 20, respectivamente).

#### 4.2.1.1.4. Dispersão natural

A dispersão de óleo na superfície do mar é obtida por (DELVIGNE & SWEENEY, 1988):

$$Q_{di} = C^* D^{0,57} S F d_i^{0,7} \Delta d \quad (17)$$

onde  $Q_{di}$  é a taxa de dispersão por unidade de área das gotículas de óleo com diâmetros entre  $(d_i - \Delta d)$  e  $(d_i + \Delta d)$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ );  $C^*$  é um coeficiente de dispersão derivado empiricamente;  $D$  é a energia da onda dissipada por unidade de área ( $\text{kg}/\text{s}^2$ );  $S$  é a fração da superfície do oceano coberta por óleo;  $F$  é a fração da superfície do mar coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo ( $1/\text{s}$ );  $d_i$  é o diâmetro médio das partículas na classe de tamanho  $i$  (m); e  $\Delta d$  é o intervalo do diâmetro das partículas (m).

O coeficiente empírico  $C^*$  é uma função da viscosidade do óleo:

$$C^* = 4450\nu^{-0,4} \quad (18)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do óleo ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). A energia dissipada da quebra da onda  $D$ , é aproximadamente:

$$D = 0,0034\rho_w g H_b^2 \quad (19)$$

onde  $\rho_w$  é a densidade da água do mar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ ); e  $H_b$  é altura de quebra da onda (m). A fração  $F$  de superfície do oceano coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo é, aproximadamente:



$$F = 3 \cdot 10^{-6} U(t)^{3,5} \quad (20)$$

onde  $U(t)$  é a velocidade do vento (m/s). O tamanho das partículas é dado por:

$$d_0 = \frac{C_0 \nu^{0,34}}{\sqrt{e}} \quad (21)$$

sendo  $\nu$  é a viscosidade cinemática do óleo (m<sup>2</sup>/s);  $e$  é a taxa de dissipação de energia (geralmente 1000 J/m<sup>3</sup>s);  $C_0$  é, aproximadamente, 500 para o menor tamanho de partícula e 3400 para o maior tamanho de partícula. As gotículas são divididas em intervalos entre os tamanhos, mínimo e máximo, encontrados.

#### 4.2.1.1.5. Emulsificação

A emulsificação  $W(t)$  é calculada a partir de uma regressão exponencial:

$$W(t + \Delta t) = W_m(t) - [W_m(t) - W(t)] 0,5^{\frac{\Delta t}{t_{1/2}}} \quad (22)$$

onde  $W_m(t)$  é o teor máximo de água (%);  $\Delta t$  é o passo de tempo (s);  $t_{1/2}$  é o tempo de meia-vida dependente do vento para emulsificação (s).

O valor  $t_{1/2}$  e a função  $W_m(t)$  são derivados de dados de laboratório e, correlacionam a taxa de emulsificação e o teor máximo de água pela fração evaporada. A partir desses dados, a meia-vida de referência  $t_{ref}$  para um vento de 10 m/s de velocidade, é encontrada em:

$$t_{ref} = C t_{lab} \quad (23)$$

onde,  $t_{lab}$  é a média de valores de meia-vida encontrados em laboratório para amostras de óleo artificialmente intemperizados (s), e  $C$  é uma constante empírica. Esses dados são baseados no estudo de Cormack (1983 *apud* REED, 2001):

$$t_{1/2} = \left[ \frac{1 + U_{ref}}{1 + U(t)} \right]^2 t_{ref} \quad (24)$$

onde  $U_{ref}$ , é de 10 (m/s), e  $U(t)$  é a velocidade do vento (m/s).  $W_m$  como função da fração evaporada é obtida a partir de dados de laboratório, assumindo-se que a quantidade máxima de água é linearmente dependente da fração evaporada.

#### 4.2.1.1.6. Dissolução

Como a evaporação, a dissolução, é dependente da fração molar de cada componente em uma mancha de óleo.

$$dm_i / dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad (25)$$

onde  $K_d$  é o coeficiente de transferência de massa por difusão (m/s);  $A$  é a área superficial da mancha de óleo (m<sup>2</sup>);  $F_i$  é a fração molar do componente  $i$  remanescente na mancha;  $S_i$  é a solubilidade do componente  $i$  (g/m<sup>3</sup>, ppm); e  $C_i$  é a concentração ambiente do componente  $i$  (g/m<sup>3</sup>).

Para uma mancha de óleo, o coeficiente de transferência de massa  $K_d$  é calculado (THIBODEAUX, 1979 *apud* REED, 2001):

$$K_d = Sh_i D_i / L \quad (26)$$

Para manchas na superfície, é feita a correlação de superfície plana para o Número de Sherwood:

$$Sh_i = 0,578 Re^{0,5} Sc_i^{0,33} \quad (27)$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds;  $Sc_i$  é o número de Schmidt;  $U_{rel}$  é a velocidade relativa entre o óleo e a água (m/s);  $L$  é a extensão da mancha (m);  $\nu_w$  é a viscosidade cinemática da água ( $\sim 8,9 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s a 25°C) e  $D_i$  a difusividade molecular do componente  $i$  (m<sup>2</sup>/s).

Para as partículas de óleo, a correlação da transferência de massa para esferas é usada para o número de Sherwood:

$$Sh = 2 + 0,347 Re^{0,62} Sc_i^{0,31i} \quad (28)$$

#### 4.2.1.1.7. Degradação

O cálculo da degradação do óleo no modelo OSCAR é feita através da soma da transformação de cada componente do óleo por diferentes formas de degradação. A Figura 102 mostra o esquema de transformação dos componentes considerados no modelo OSCAR.

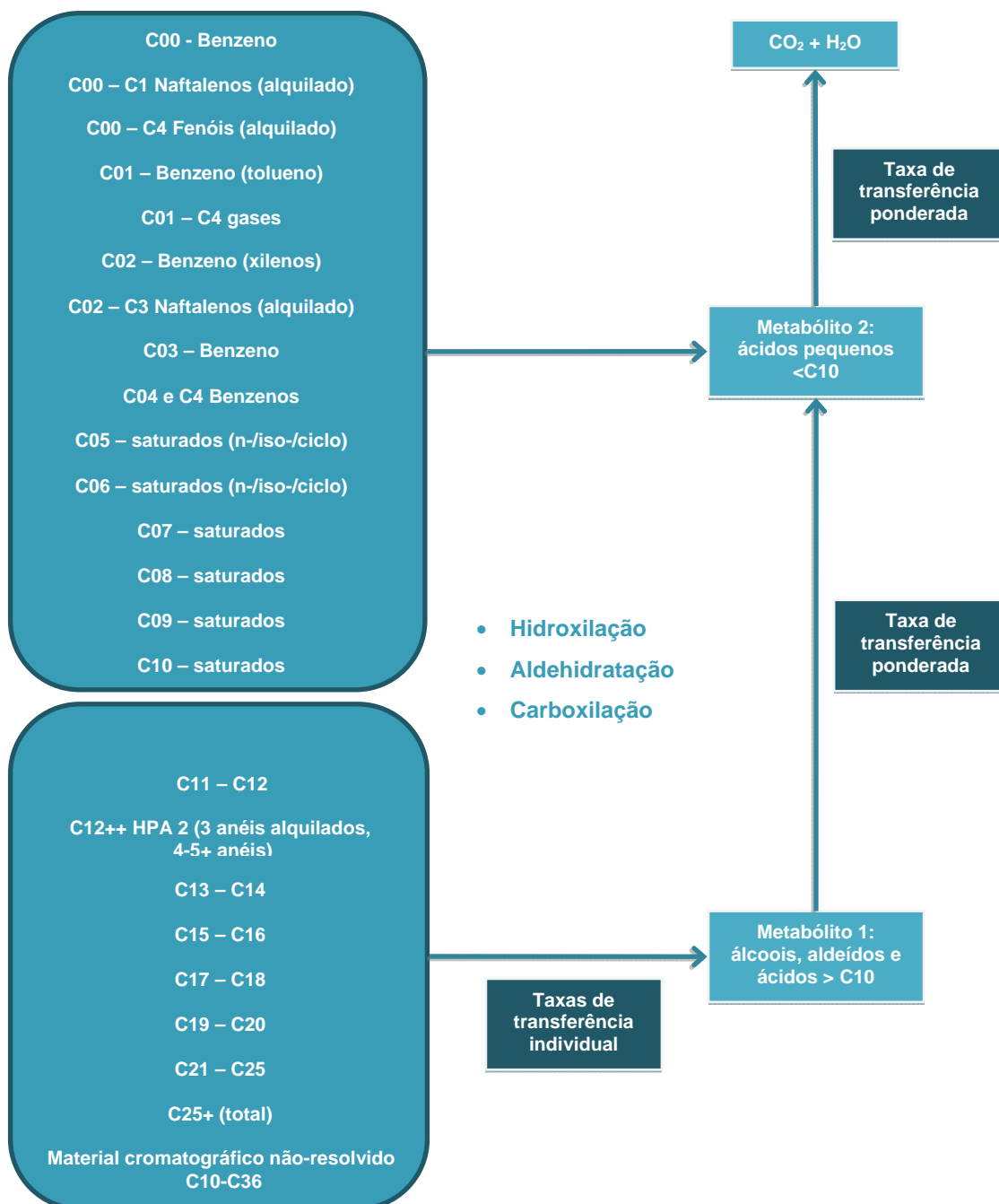


Figura 102: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001).

#### 4.2.1.1.8. Sedimentação

No OSCAR a separação entre a fase dissolvida e particulada/adsorvida é calculada com base na teoria de equilíbrio linear. A fração de óleo particulada, ou adsorvida em material particulado, é passível de sedimentação no fundo, misturando-se aos sedimentos, e podendo ser dissolvida novamente para a coluna d'água (REED *et al.*, 1996).

A relação entre a concentração de equilíbrio de um poluente na fase aquosa ( $C_w$ ) e a concentração de equilíbrio na fase sólida ( $C_s$ ) pode ser obtida a uma determinada temperatura. Existem várias teorias que descrevem as isotermas de adsorção, tais como as isotermas de Langmuir (Equação 29) e de Freundlich (Equação 30) (REED, 2001).

$$C_s = \frac{K_1 K_2 C_w}{1 + K_1 C_w} \quad (29)$$

$$C_s = K_f C_w^{1/n} \quad (30)$$

Segundo Reed (2001), em ambiente aquático, o valor da fase aquosa do poluente,  $C_w$ , é geralmente baixo, e em consequência, o termo  $n$  na equação 30 é geralmente igual a 1 e o termo  $K_1 C_w$  na equação 29 é muito menor do que 1. Dessa forma, as equações podem ser reduzidas a uma equação linear

$$C_s = K_p C_w C_{ss} \quad (31)$$

onde  $C_{ss}$  é a concentração de sedimentos suspensos. O coeficiente de partição de uma substância química,  $K_p$ , é dependente da temperatura, do pH e das características físicas e químicas do sólido adsorvido. Através de estudo do comportamento de compostos orgânicos, principalmente os hidrofóbicos não-iônicos, observou-se que o carbono orgânico é o fator predominante no processo de adsorção (REED, 2001). Assim, se  $K_p$  é normalizado pela fração de carbono orgânico do sólido ( $f_{oc}$ )

$$K_{OC} = \frac{K_p}{f_{oc}} \quad (32)$$

então  $K_{oc}$  torna-se independente de sorventes. Somado a isso, o coeficiente de partição baseado no carbono orgânico apresenta ótima correlação tanto com  $K_{ow}$  (coeficiente de partição octanol/água) como com a solubilidade em água ( $S$ ) (Equações 33 e 34, respectivamente).

$$\log K_{oc} = A \log K_{ow} + B \quad (33)$$

$$\log K_{oc} = a \log S + b \quad (34)$$

Assim, é possível determinar  $K_{oc}$  tanto do valor de  $K_{ow}$  como da solubilidade, sendo que as constantes de correlação ( $A$ ,  $B$ ,  $a$  e  $b$ ) são normalmente dependentes da estrutura do composto. A Tabela 32 mostra algumas equações de correlação entre  $K_{oc}$ ,  $K_{ow}$  e  $S$  usados no modelo.

Tabela 32: Equações de regressão para estimativa dos parâmetros  $K_{oc}$  e  $K_{ow}$  para diferentes componentes químicos. Fonte: Reed, 2001.

Equação	R <sup>2</sup>	Classe
<b>Parâmetro: <math>K_{ow}</math></b>		
$\log 1/S = 1.113 \log K_{ow} - 0.926$	0,935	Álcool
$\log 1/S = 1.229 \log K_{ow} - 0.720$	0,960	Cetona
$\log 1/S = 1.013 \log K_{ow} - 0.520$	0,980	Éster
$\log 1/S = 1.182 \log K_{ow} - 0.935$	0,880	Éter
$\log 1/S = 1.294 \log K_{ow} - 1.043$	0,908	Alcino
$\log 1/S = 1.294 \log K_{ow} - 0.248$	0,970	Alceno
$\log 1/S = 0.996 \log K_{ow} - 0.339$	0,951	Aromático
$\log 1/S = 1.237 \log K_{ow} - 0.248$	0,908	Alcano
<b>Parâmetro: <math>K_{oc}</math></b>		
$\log K_{oc} = 0.937 \log K_{ow} - 0.006$	0,950	Aromático
$\log K_{oc} = 0.544 \log K_{ow} + 1.377$	0,740	Todos os outros

#### 4.2.1.2. Propriedades físicas do óleo

As propriedades do óleo utilizadas pelo modelo são o ponto de fluidez (*pour point*), ponto de fulgor (*flash point*), densidade e a viscosidade do óleo. Essas propriedades variam de acordo com curvas obtidas em laboratório e a fração de óleo evaporado. A seguir são apresentadas as equações para os cálculos das propriedades do óleo (JOHANSEN, 1991 *apud* REED, 2001):

$$\text{Ponto de fluidez (}^{\circ}\text{C)} \quad P = e^{(a_p + b_p f)} - 273 \quad (35)$$

$$\text{Ponto de fulgor (}^{\circ}\text{C)} \quad F = e^{(a_p + b_p f)} - 273 \quad (36)$$

$$\text{Densidade (g/L)} \quad \rho_0 = a_p + b_p f \quad (37)$$

$$\text{Viscosidade (cP)} \quad \mu_0 = e^{(a\mu + b\mu f)} \quad (38)$$

sendo  $f$  a fração evaporada (%) e  $a$  e  $b$  fatores de regressão. A densidade da emulsão  $\rho(t)$  é calculada:

$$\rho(t) = \frac{W(t)\rho_w + [100 - W(t)]\rho_0(t)}{100} \quad (39)$$

sendo  $W(t)$  a porcentagem de água (%),  $\rho_w$  a densidade da água do mar, e  $\rho_0(t)$  a densidade do óleo livre de água (g/L).

A equação de Mooney, de 1951, é usada para calcular a viscosidade de emulsão  $\mu(t)$ :

$$\mu(t) = \mu_0(t) e^{\frac{aW(t)}{100 - bW(t)}} \quad (40)$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes empíricas.

#### 4.2.1.3. Concentração na coluna d'água

O modelo resolve a seguinte equação de transporte advectivo-difusivo:

$$\frac{\delta C_i}{\delta t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla} \cdot D_k \vec{\nabla} C_i + \sum_{j=1}^n r_j C_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n r_{ij} C_i \quad (41)$$

onde  $C_i$  é a concentração do  $i$ -ésimo constituinte químico do vazamento;  $t$  é o tempo;  $\vec{V}$  é o vetor do transporte advectivo; e  $D_k$  é o coeficiente de difusão turbulenta para  $k = x, y$  e  $z$ .

O primeiro termo da equação é a taxa de variação temporal da concentração de um determinado constituinte em uma determinada localização espacial. Esta taxa de variação é calculada através da determinação dos outros termos da equação utilizando partículas lagrangeanas para representar o campo de concentração. Os termos  $r_j$  são taxas de vários processos, tais como a evaporação, emulsificação e espalhamento das manchas superficiais e volatilização dos compostos do óleo.

Os termos de degradação  $r_{ij}$  aparecem no modelo para determinar os subprodutos da degradação como transferência de massa de um componente à outro. Desta forma, as modificações nas propriedades toxicológicas são incorporadas no modelo.

#### 4.2.1.4. Massa Máxima de Óleo na Costa

Para obter a massa máxima de óleo na costa, os elementos de grade são monitorados ao longo de toda a simulação. São armazenadas as informações de massa máxima de óleo que atingiram cada elemento de grade ao longo das  $n$  simulações. Ao final, têm-se um mapa dos volumes máximos por unidade de área, ou espessuras máximas, que atingiram os elementos de grade que representam a costa.

Para contabilizar os volumes máximos por município, são utilizados os maiores valores de volumes máximos de óleo presentes nos elementos de grade mais próximos a cada município costeiro.

#### 4.2.2. Estratégias de Modelagem

As simulações foram realizadas considerando eventos de *blowout* com vazamentos contínuos por 30 dias (720 horas) em 2 (dois) períodos sazonais, verão e inverno. Após os 30 dias de vazamento foram ainda simulados mais 30 dias para observação do comportamento da deriva do óleo, totalizando 60 dias (1440 horas) de simulação.

Além da simulação de *blowout*, na qual é considerado o volume de pior caso, 270.000 m<sup>3</sup>, foram ainda realizadas simulações para vazamentos instantâneos de pequeno e médio porte, 8 m<sup>3</sup> e



200 m<sup>3</sup>, respectivamente. Para todos os casos simulados a deriva do óleo foi acompanhada por 30 dias nos vazamentos instantâneos e 60 dias para *blowout*.

Em todas as simulações considerou-se o critério de existência de óleo nas regiões onde este apresentou espessura maior ou igual ao limiar de  $3 \times 10^{-7}$  metros (limiar de detecção) (ELPN/IBAMA, 2002).

Segundo informações da contratante, para a região do Campo de Xerelete o óleo esperado é de 27° API. As características deste óleo são apresentadas na Tabela 33.

Tabela 33: Características do óleo informado pela contratante.

Propriedade	Valor	Unidade
API	27	°
Densidade	0,83 (0 °C)	g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade Dinâmica	4,09 (23,9 °C)	cP

Devido à ausência de uma caracterização mais completa dos óleos em questão, tais como seus componentes e suas respectivas frações, necessários para alimentar o modelo, foi escolhido um óleo de características próximas no banco de dados do OSCAR para utilização nas simulações (Tabela 34).

Tabela 34: Características do óleo escolhido no banco de dado do OSCAR.

Óleo	Parâmetro	Valor	Unidade
TROLL (IKU)	API	27	°
	Densidade	0,893	g/cm <sup>3</sup>
	Viscosidade dinâmica	27 (13°C)	cP
	Ponto de Fluidez ( <i>Pour Point</i> )	-12	°C
	Ponto de Fulgor ( <i>Flash Point</i> )	3	°C

### 4.2.3. Descrição das Grades

Neste estudo utilizou-se uma grade regular com resolução espacial de 3,5 km nas direções zonal e meridional. Os limites da grade são: ao sul, 40° 11' S, ao norte, 17° 0' S, a oeste, 58° 32' O e a leste, 33° 45' O. Com isso, obteve-se uma matriz com 689 por 735, totalizando 506.415 elementos. A grade com os habitats e a batimetria são apresentadas nas Figura 103 e Figura 104, respectivamente.

A definição do tipo de costa e da batimetria estão contidos no banco de dados do modelo OSCAR. Os dados de batimetria são provenientes do SeaTopo (SMITH & SANDWELL, 1997). O tipo de costa definido para todo domínio foi de praia arenosa (Figura 103 – em amarelo).

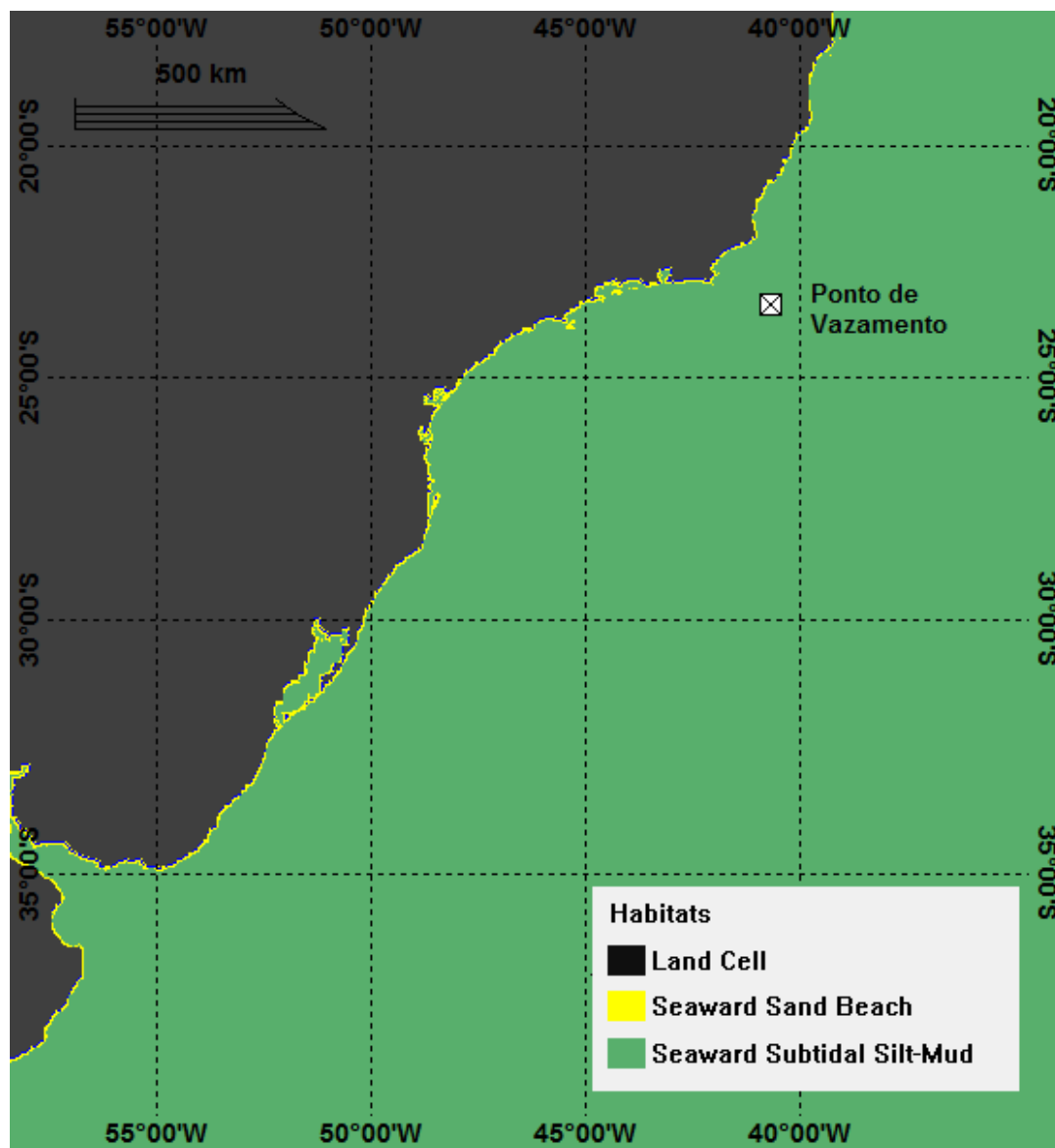


Figura 103: A grade de habitats utilizada na simulação.

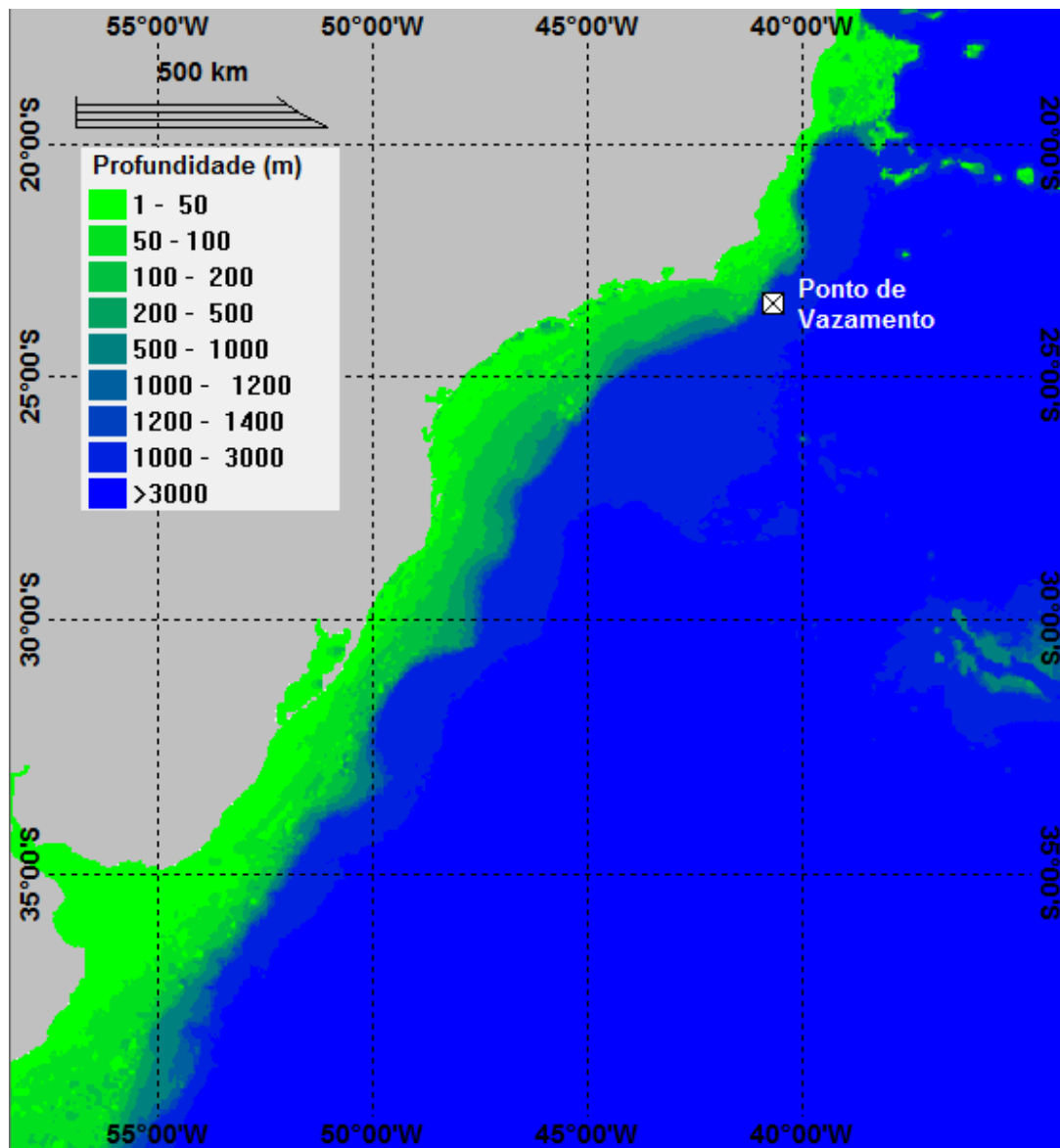


Figura 104: A grade de batimetria utilizada na simulação.

#### 4.2.4. Forçantes

Os dados de vento utilizados como forçante no modelo são provenientes das Reanálises do NCEP – *National Centers for Environmental Prediction* – (KALNAY *et al.*, 1996). A base de dados conhecida como “Reanálises do NCEP” foi originada a partir de uma cooperação entre o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) e o NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), com intuito de produzir inicialmente uma rede de 40 anos de dados meteorológicos globais com base nas análises dos campos atmosféricos (KALNAY *et al.*, 1996). Posteriormente, esse projeto foi ampliado para uma janela de tempo de 50 anos (KISTLER *et al.*, 2001), e atualmente, estão disponíveis mais de 60 anos (1948-atual) de dados.

A Reanálise do NCEP (R-1) usa o estado da arte em sistemas de assimilação de dados e um banco de dados mais completo possível, abrangendo informações meteorológicas primárias das mais diversas fontes associadas aos dados do modelo atmosférico global do NCEP (KISTLER *et al.*, 2001).

Estes dados são amplamente utilizados pela comunidade científica, sendo, portanto adequados para utilização em estudos dessa natureza. Os dados primários utilizados para gerar as reanálises são de diferentes origens:

- » Dados globais de radiossondas.
- » Dados da superfície do mar obtidos através do projeto COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) no período de 1983 a 1996 (14 anos), originados de diversas fontes, dentre elas, observações de navios, bóias fixas, bóias móveis e estações oceânicas próximas à superfície.
- » Dados aéreos, originados de observações por aeronaves em todo o globo, geralmente associados a projetos como GARP (Global Atmospheric Research Program) e GATE (Global Atlantic Tropical Experiment), por exemplo.
- » Dados de Satélite, que começaram a ser obtidos em 1967, através de diversos programas. Atualmente, o NCEP/NCAR utiliza dados fornecidos pelo projeto TOVS (Operational Vertical Sounder System), com variáveis em três dimensões, cuja resolução espacial média é de 2,5 graus.
- » Dados de vento em superfície, obtidos pelo sensor espacial Microwave/Imager (SSM/I) a partir de 1987, submetidos ao tratamento feito pela rede neural de Kransnopolsky *et al.* (1995) apud Kalnay *et al.* (1996).
- » Dados de cobertura de nuvens obtidos por estimativas dos dados de Satélites Meteorológicos Geoestacionários (SMG). Esses dados estão disponíveis desde 1978.

Todos os dados utilizados nas reanálises passam por um rigoroso controle de qualidade e recebem um tratamento diferenciado de acordo com a forma de obtenção. Utilizando-se técnicas de interpolação espaço-temporal, que levam em consideração não somente a estatística como também a dinâmica dos fenômenos meteorológicos (análise objetiva).

As reanálises foram criadas por um sistema complexo de programas, bibliotecas, algoritmos e dados, que envolvem diversas etapas no processamento, tais como, decodificação, controle de qualidade, análises, previsão, pós-processamento e armazenamento. Consequentemente, o processo se tornou propenso a erros humanos. Neste contexto, surgiu a Reanálise 2 (R-2), que além de minimizar os erros humanos no processamento, incorporou atualizações no modelo de previsão e diagnóstico (KANAMITSU *et al.*, 2002). Outro fator determinante para o desenvolvimento da R-2 foi o aumento significativo da quantidade e da qualidade dos dados coletados a partir do final dos anos 70. Assim, ao contrário da R-1 que está disponível de 1948 até os dias de hoje, a R-2 encontra-se disponível a partir de 1/1/1979 (CAMPOS, 2009).

O projeto R-2 (NCEP - DOE AMIP-II *Reanalysis*) refere-se a uma série global atualizada, de 1979 até 2008, que corrige os erros de processamento da R-1, utilizando um modelo de previsão e um sistema de assimilação de dados mais robustos. Assim, é gerada uma reanálise mais consistente e recomendada para usuários que eram afetados por alguns erros presentes na R-1. Dentre estes erros, podemos citar as análises de transientes no Hemisfério Sul; o uso de temperaturas próximas à superfície e cobertura de neve sobre os continentes no Hemisfério Norte durante o inverno; análise da umidade dos solos; análises do balanço de neve; e sensibilidade das análises a mudanças no modelo de assimilação (KANAMITSU *et al.*, 2002).

Deve ser ressaltado que a R-2, embora tenha passado por melhorias significativas, consiste em uma atualização da R-1, e não uma nova geração da reanálise. Os produtos da R-2 estão disponíveis para o público através do Centro de Diagnósticos Climáticos do NCAR, e através da página: <http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>.

Para este estudo foram tratados 6 anos de dados (2005 a 2010) com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia). A resolução espacial na área em questão é de aproximadamente 1.8°, tendo sido utilizado o ponto de grade do NCEP mais próximo aos pontos de simulação de vazamento do Campo de Xerelete (Figura 105). Essa análise subsidiou a definição de dois períodos com características distintas na direção do vento, fato que influencia diretamente o transporte do óleo.

A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos mensais (Figura 106 e Figura 107), elaboradas para o período analisado (2005 a 2010).

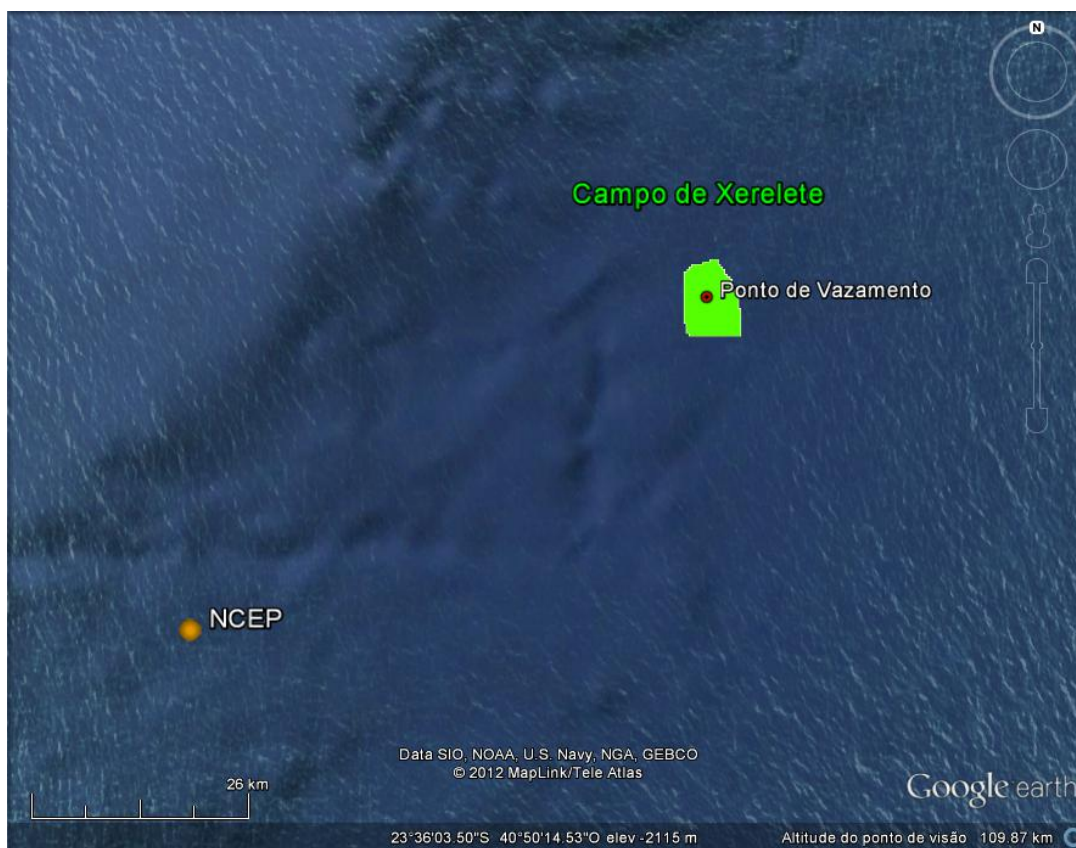


Figura 105: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo do ponto de vazamento no Campo de Xerelete.

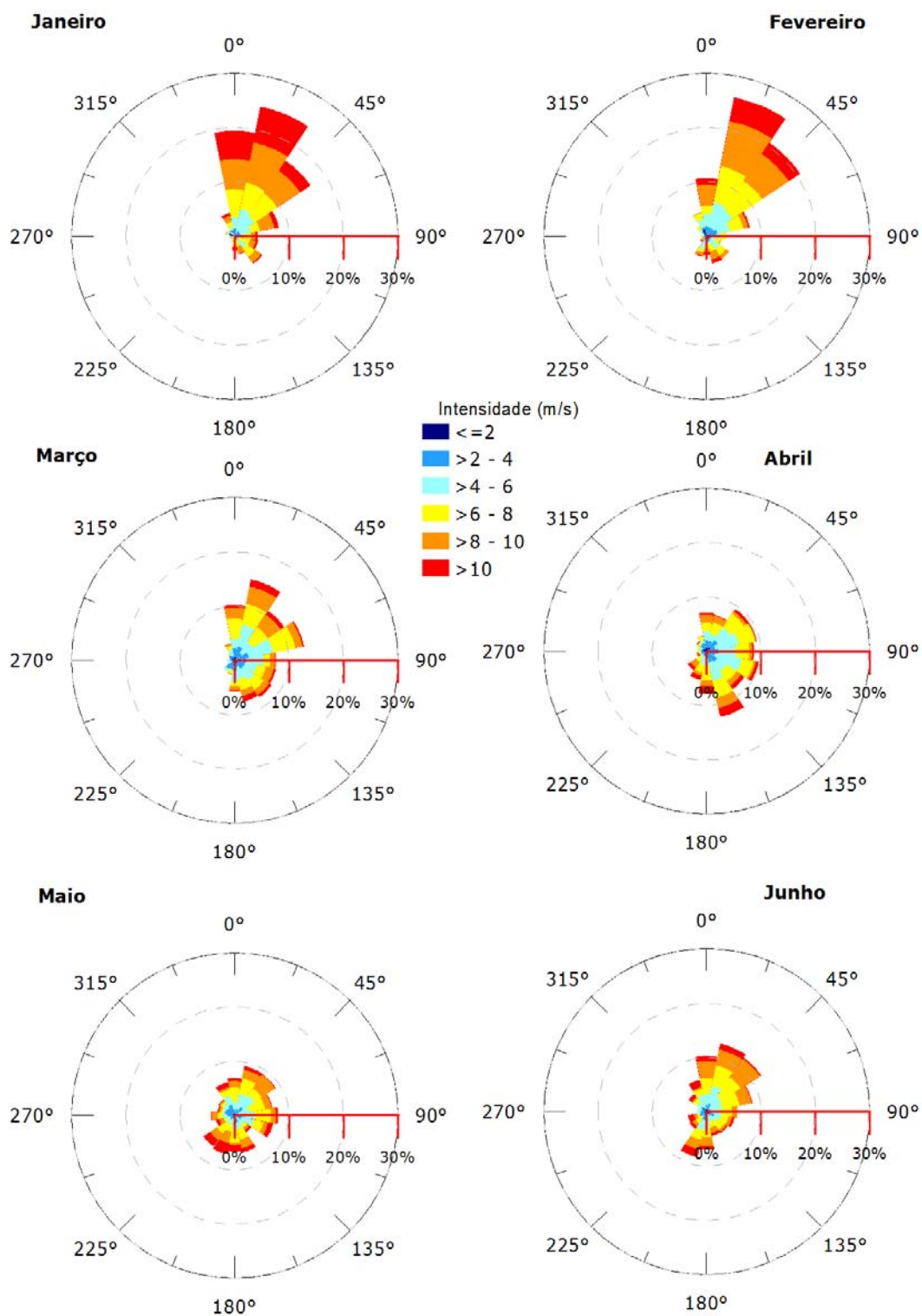


Figura 106: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho no ponto mais próximo do Campo de Xerelete.

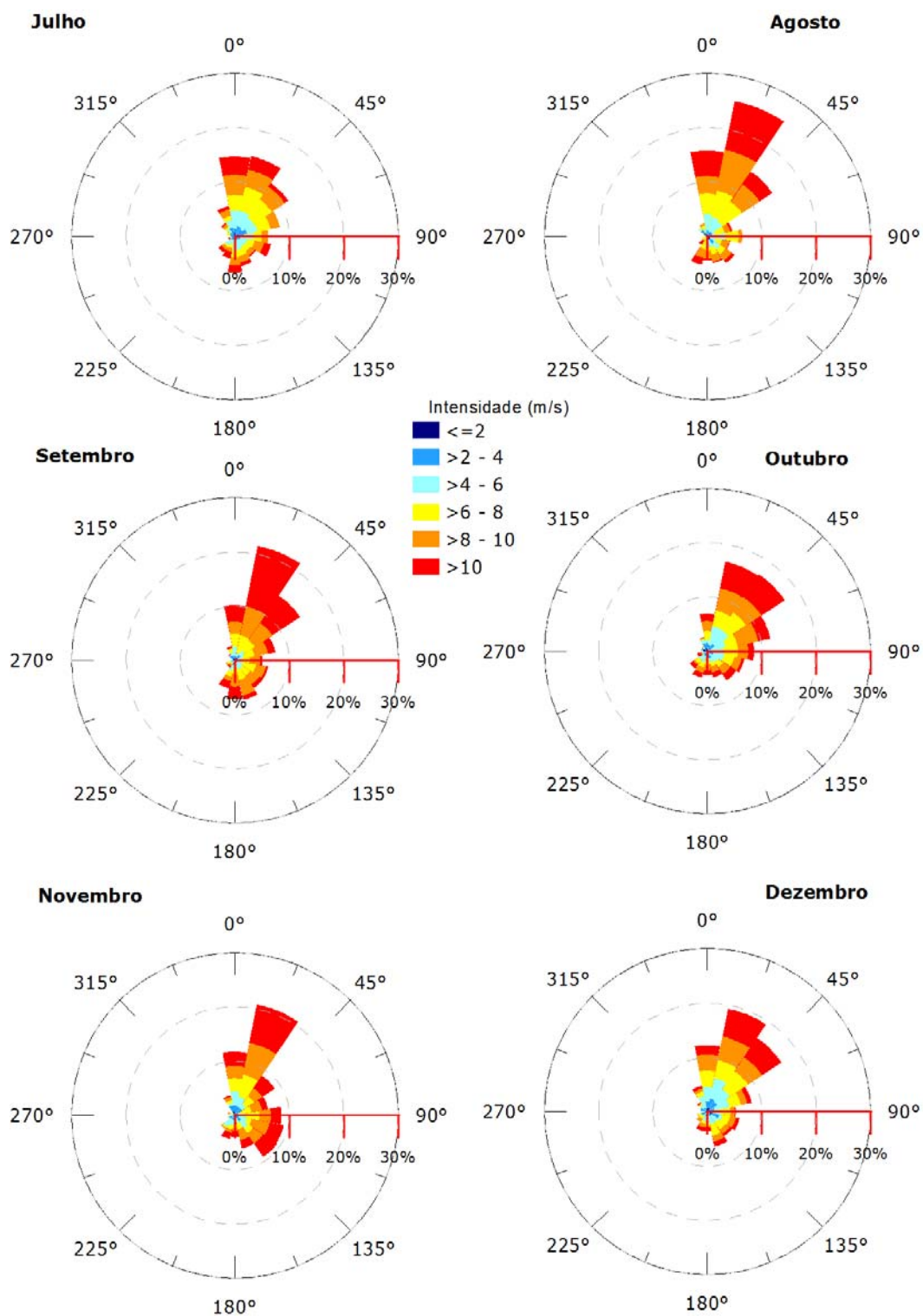


Figura 107: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro no ponto mais próximo do Campo de Xerelete.



A partir da observação da rosa dos ventos, que trazem informações sobre as frequências de ocorrência conjunta de direção e intensidade dos ventos na região, são identificadas duas condições sazonais a serem utilizadas no estudo.

A primeira, denominada **período de verão**, compreende os meses de **setembro a fevereiro** é caracterizado pela maior frequência e incidência de ventos do primeiro quadrante, com predominância de ventos de norte a nordeste. No segundo período, entre os meses de **março e agosto**, denominado **período de inverno**, existe a predominância dos ventos do primeiro quadrante, porém, esses se apresentam menos frequentes que os observados no período de verão. Além disso, a frequência de ventos de sul e sudeste, neste segundo período, foram maiores.

Pequenas diferenças entre as direções das rosas dos ventos aqui apresentadas, e as rosas dos ventos apresentadas no *item Meteorologia*, devem-se às diferenças nos períodos analisados. Enquanto na meteorologia foram utilizados 30 anos de dados (1981 - 2010), na modelagem de óleo, foram utilizados 6 anos de dados (2005 - 2010) para forçar o modelo. Entretanto, deve-se ressaltar que as diferenças verificadas foram pequenas, e que o padrão de ventos observado entre 2005 e 2010 apresentou-se coerente com o verificado ao longo dos 30 anos analisados na meteorologia.

Como forçante na modelagem de dispersão do óleo, utilizam-se todos os pontos do NCEP disponíveis na região da grade do modelo hidrodinâmico ao longo de todo o período analisado (Figura 108).

Nesse estudo foram utilizados como forçante hidrodinâmica uma série temporal de 6 anos de dados (2005 a 2010) dos resultados do modelo global disponibilizado pelo HYCOM *consortium*, descrito no item *Modelagem Hidrodinâmica*.

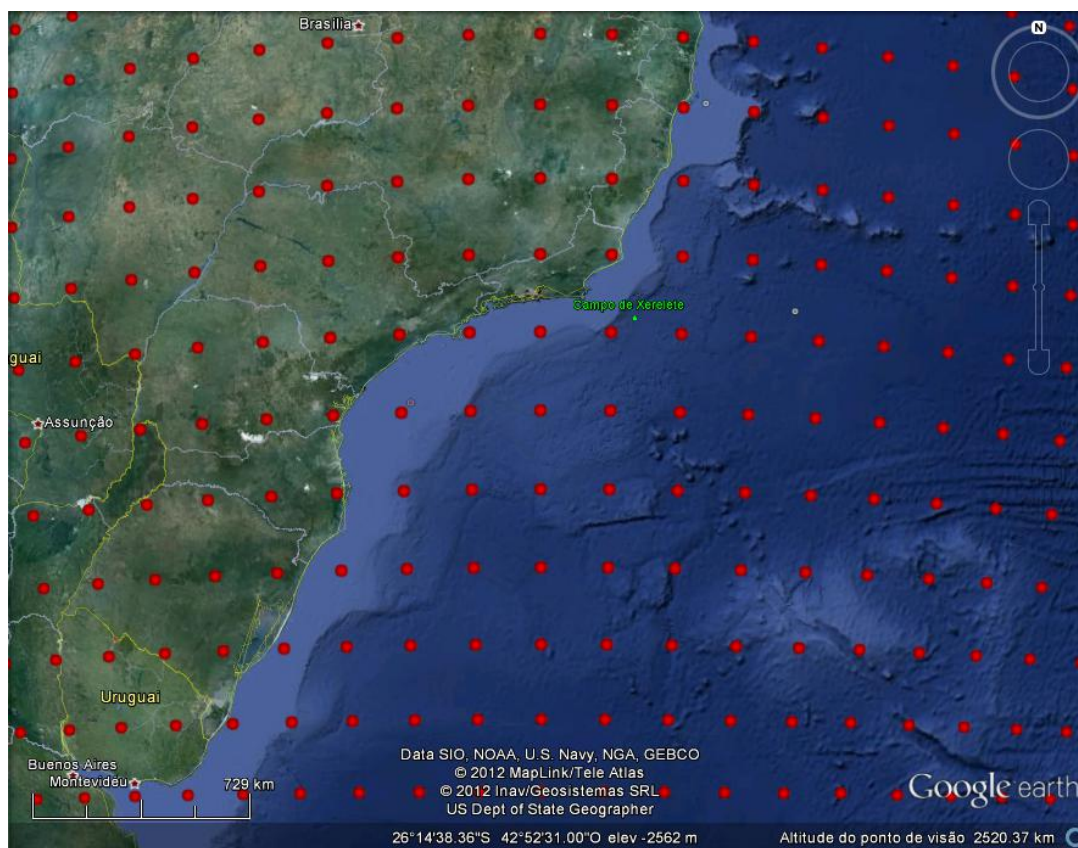


Figura 108: Localização dos pontos de grade do NCEP para região de estudo.

#### 4.2.5. Variabilidade Ambiental

Na implementação de um modelo probabilístico de vazamento de óleo é necessária a definição de um universo amostral que represente a variabilidade ambiental da região. No modelo OSCAR, o universo amostral é criado por  $n$  repetições com condições de vento e corrente correlacionadas (*i.e.* condição de vento e de corrente são para o mesmo dia), o que cria a necessidade de se definir o número de simulações que serão conduzidas na realização da modelagem. Este número deve ser suficiente para representar de forma adequada a variabilidade ambiental presente na região, obtendo um mapa de probabilidade estatisticamente coerente.

A metodologia proposta por Elliot (2004) sugere o número adequado de simulações baseado na análise do número de zeros-ascendentes (*zero-up-crossing*) do vento, que consiste na identificação do número de vezes em que as componentes zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ) do vento trocam de sinal. De forma prática, a alteração de sentido nas componentes está ligada a mudanças no padrão sinótico do vento, como por exemplo, no período de passagem de um sistema frontal pela região.

Dessa forma, com objetivo de avaliar a variabilidade das escalas temporais transientes presentes nos dados de ventos analisados e utilizados nesse relatório, foi realizada uma análise de zeros ascendentes (*zero-up-crossing*) do ponto do NCEP mais próximo aos pontos de vazamento no Campo de Xerelete (Figura 105). Os resultados podem ser observados na Figura 109.

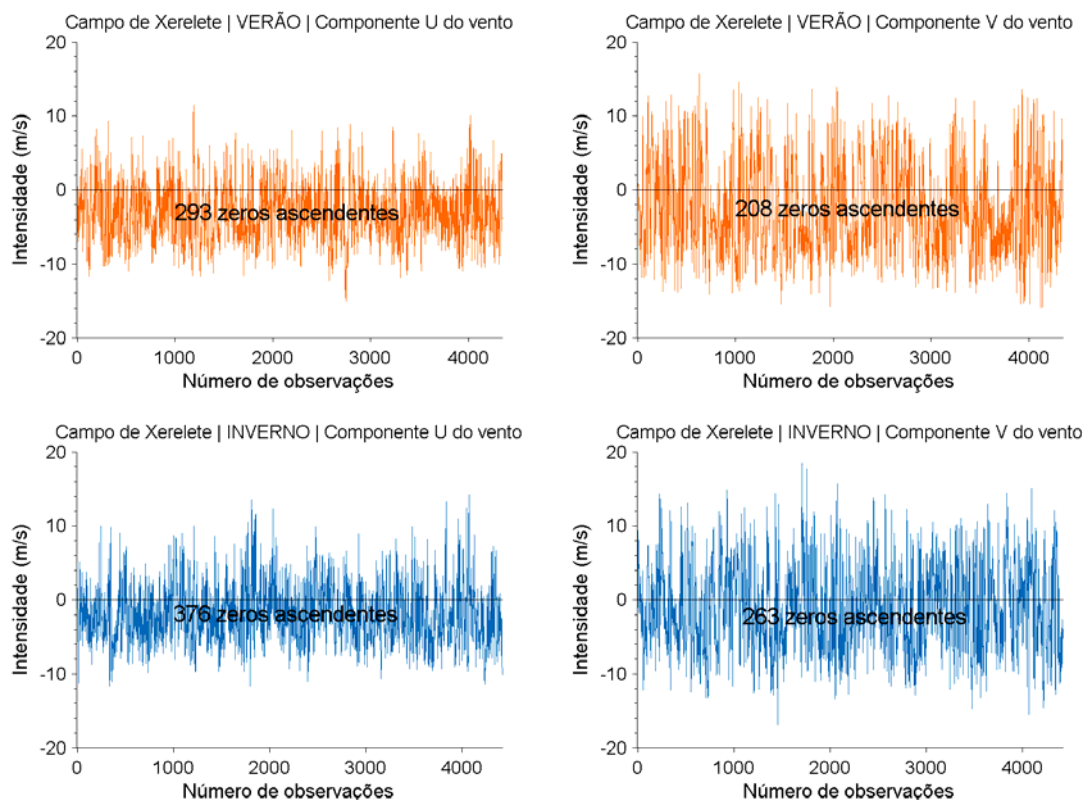


Figura 109: Séries temporais das componentes “u” e “v”, do vento, para a região do Campo de Xerelete, Bacia de Santos, com o número de zeros ascendentes presentes nas séries.

Observa-se que a no período de verão, o número de zeros ascendentes foi de 293, para a componente zonal (u) e 208 para a meridional (v). No período de inverno, o número de zeros ascendentes para componente zonal (u) subiu para 376 e da componente meridional (v) para 263. Considerando que os dados correspondem a um período de 6 anos (aproximadamente 3 anos para cada condição ambiental: verão e inverno), e que o intervalo entre as medições é de 6 horas, podemos estimar uma escala mínima de variabilidade significativa de aproximadamente 3,74 dias no período de verão e de 2,91 dias no período de inverno.

Assim, tendo como base a metodologia proposta por Elliot (2004), para uma correta representação dessa variabilidade na modelagem probabilística de óleo, os números mínimos de simulações aconselháveis seriam de 293 e 376 para os períodos de verão e inverno, respectivamente. No estudo em questão foram utilizadas 400 simulações para cada condição sazonal.

### 4.3. Resultados

A seguir serão apresentados os resultados das simulações de deriva do óleo para vazamentos de 8 m<sup>3</sup>, 200 m<sup>3</sup> e *blowout*, nos modos probabilístico e determinístico.

Na abordagem probabilística são realizadas diversas simulações determinísticas, considerando todos os processos citados nos itens anteriores, em diferentes condições meteo-oceanográficas. Os resultados do modo probabilístico são de grande importância porque ilustram tanto a abrangência da área passível de ser afetada pelo vazamento quanto o tempo mínimo de chegada do poluente em cada local com probabilidade de ser atingido, além de identificar as regiões com maiores probabilidades de serem alcançadas nas diferentes condições simuladas.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas 400 diferentes simulações para cada período (verão e inverno) nos diferentes volumes de vazamento, totalizando 2.400 possíveis cenários ambientais de vazamento.

O cenário crítico, para ser simulado no modo determinístico, foi definido através da análise dos resultados sazonais de pior caso (*blowout*), sendo escolhida a situação onde o óleo atingiu a costa no menor período de tempo possível após o início do vazamento.

Também serão apresentadas duas trajetórias que representam a deriva do óleo nas condições meteo-oceanográficas mais frequentes da região, nos períodos sazonais de verão e inverno.

O intemperismo do óleo será apresentado ao final de cada simulação determinística, através de gráficos que apresentam o balanço de massa do constituinte ao longo da simulação.

A Figura 110 e a Figura 111 resumem a forma como os resultados dos modos probabilísticos e determinísticos serão apresentados, respectivamente.

Volume	Resultado	Tempo de Simulação
8 m <sup>3</sup>	Mapa de Probabilidade em superfície	30 dias
	Mapa de Tempo Mínimo em superfície	30 dias
200 m <sup>3</sup>	Mapa de Probabilidade em superfície	30 dias
	Mapa de Tempo Mínimo em superfície	30 dias
<b>Blowout</b> (270.000 m <sup>3</sup> )	Mapa de Probabilidade em superfície	60 dias
	Mapa de Probabilidade na costa	60 dias
	Mapa de Tempo Mínimo em superfície	60 dias
	Mapa de Tempo Mínimo na costa	60 dias
	Mapa de Massa Máxima na Costa	60 dias

Figura 110: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilístico.

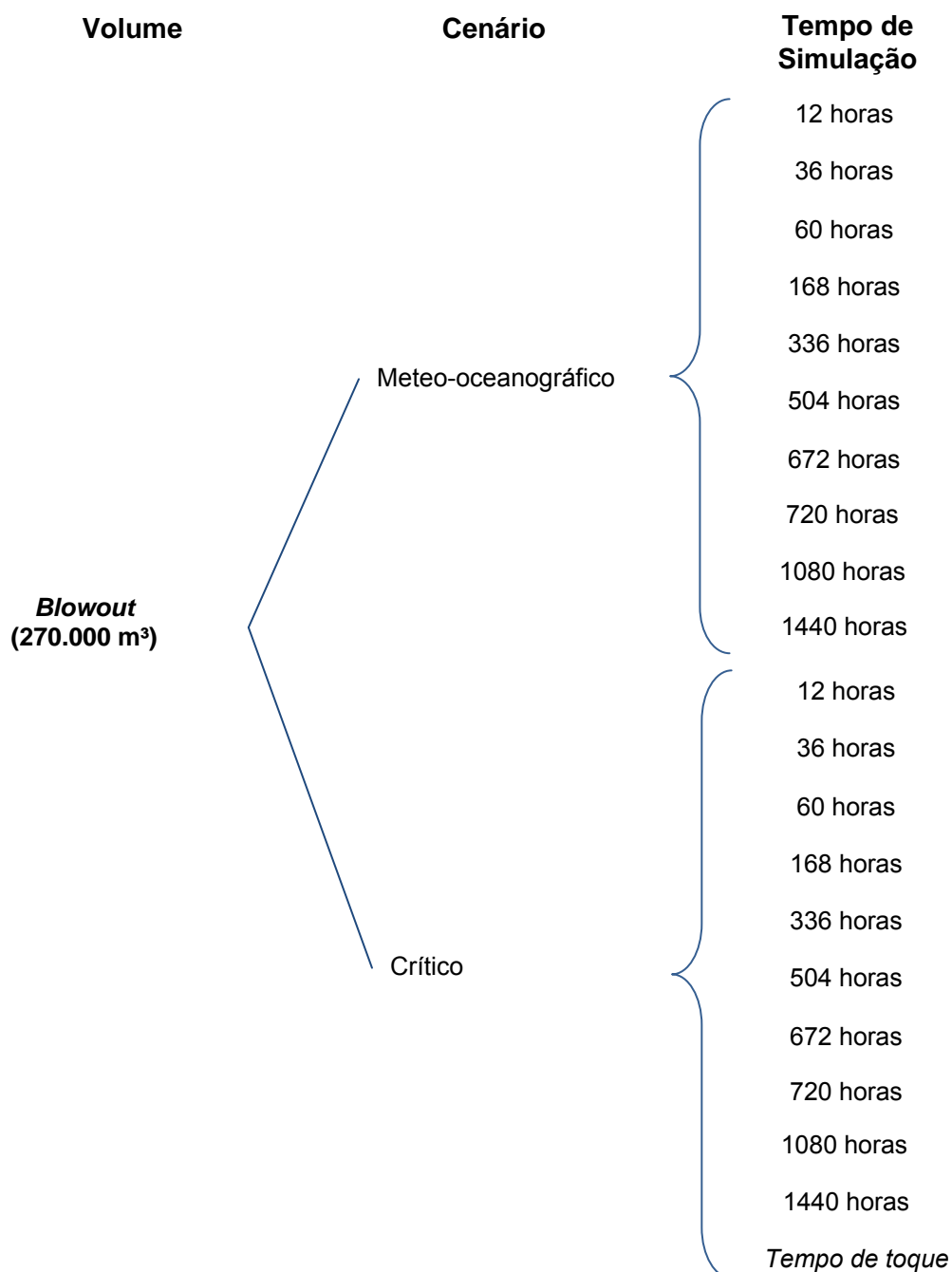


Figura 111: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos.

### 4.3.1. Resultados Probabilísticos

#### 4.3.1.1. Vazamento de 8 m<sup>3</sup>

##### 4.3.1.1.1. Verão

Os mapas de probabilidade de presença de óleo e de tempo mínimo de chegada em superfície, para o vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão, são apresentados na Figura 112 e na Figura 113, respectivamente.

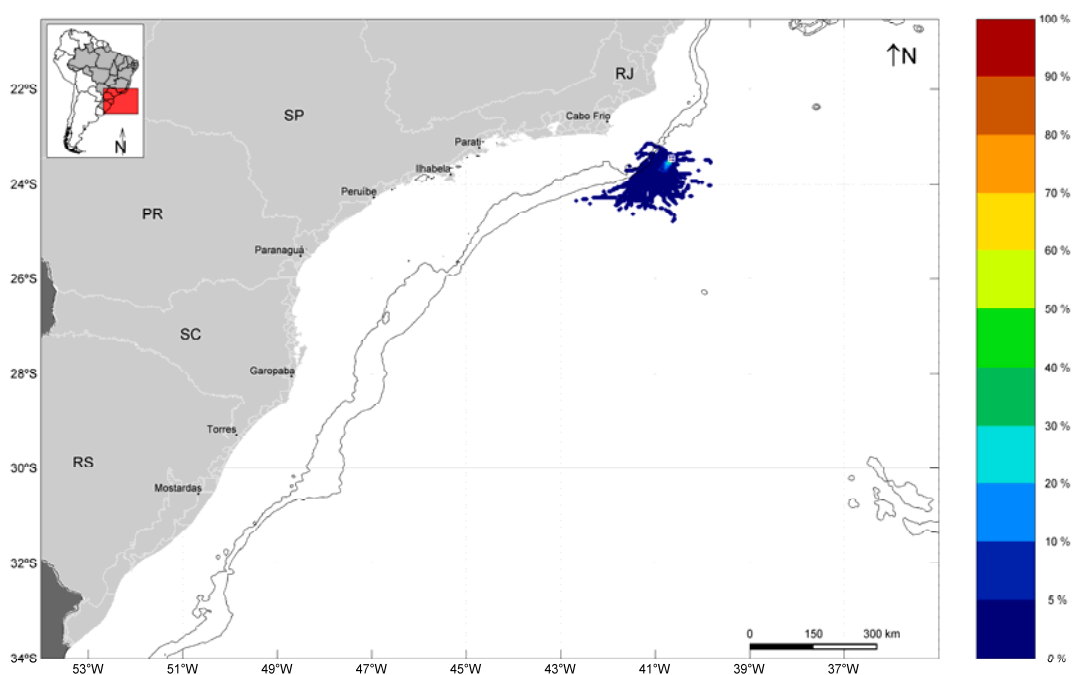


Figura 112: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias).

A deriva do óleo ocorreu preferencialmente para sudoeste do local de vazamento devido à influência da Corrente do Brasil e dos ventos de primeiro quadrante, predominantes no período de verão. A área de probabilidade de presença de óleo em superfície se restringiu até, aproximadamente, 230 km do ponto de vazamento, sem que houvesse probabilidade de toque na costa.



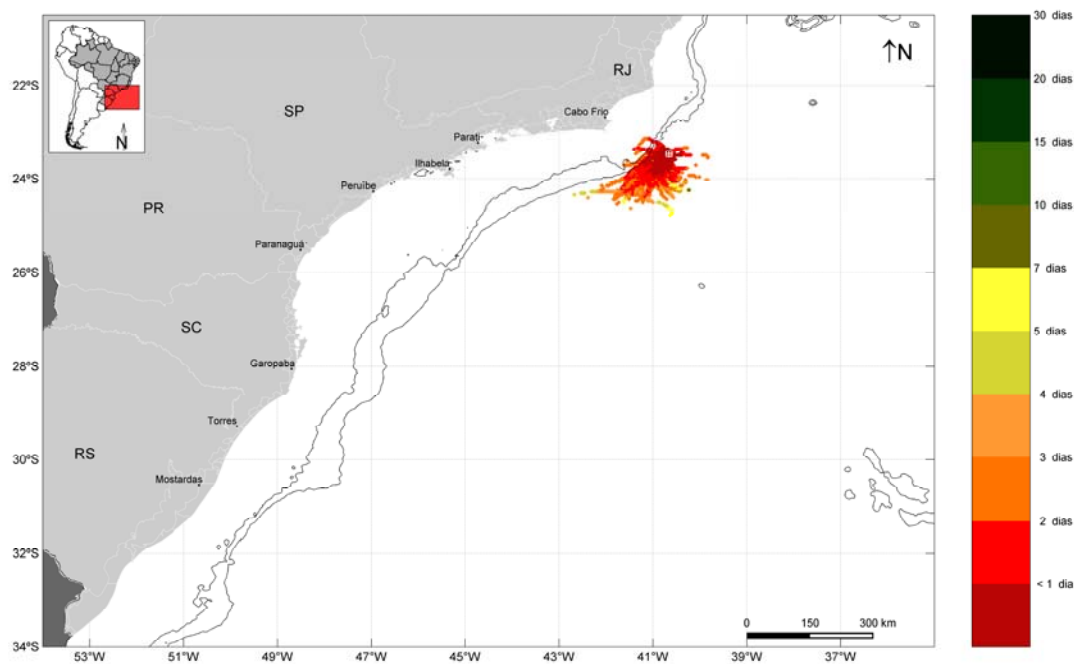


Figura 113: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de  $8\text{ m}^3$  no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias).

Observa-se que as regiões mais distantes com probabilidade de presença de óleo podem ser alcançadas em até 10 dias após o início do vazamento.

#### 4.3.1.1.2. Inverno

Os mapas de probabilidade de presença de óleo e de tempo mínimo de chegada em superfície, para o vazamento de  $8\text{ m}^3$  no período de inverno, encontram-se na Figura 114 e na Figura 115, respectivamente.

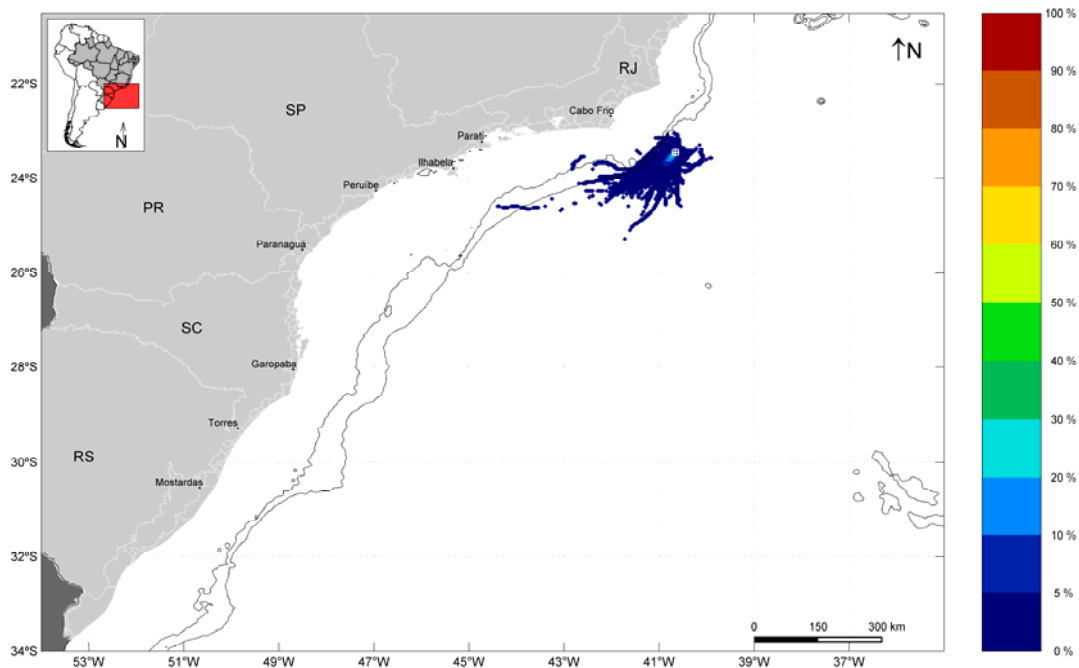


Figura 114: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias).

A deriva do óleo neste cenário ocorreu também preferencialmente para o sudoeste do local de vazamento, se estendendo até aproximadamente 400 km do local de vazamento. Assim como no cenário anterior, não houve probabilidade de toque na costa.

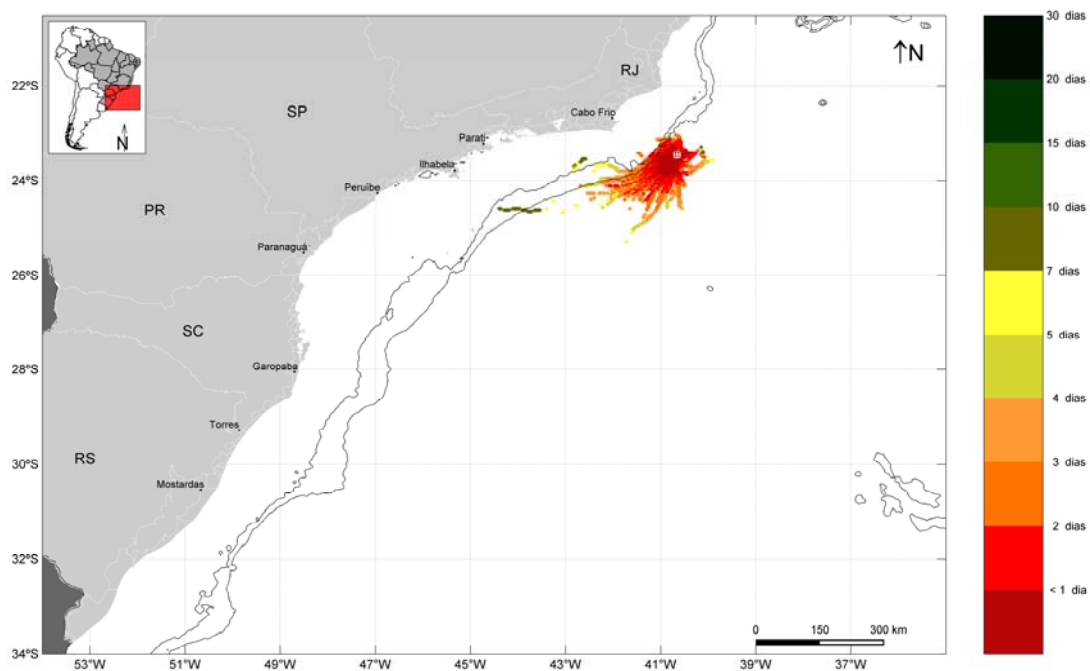


Figura 115: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de  $8 \text{ m}^3$  no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias).

Observa-se que as regiões mais distantes com probabilidade de presença de óleo podem ser alcançadas em até 10 dias após o início do vazamento.

### 4.3.1.2. Vazamento de 200 m<sup>3</sup>

#### 4.3.1.2.1. Verão

A seguir, são apresentados os mapas de probabilidade de presença de óleo e de tempo mínimo de chegada em superfície para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>) no período de verão (Figura 116 e Figura 117, respectivamente).

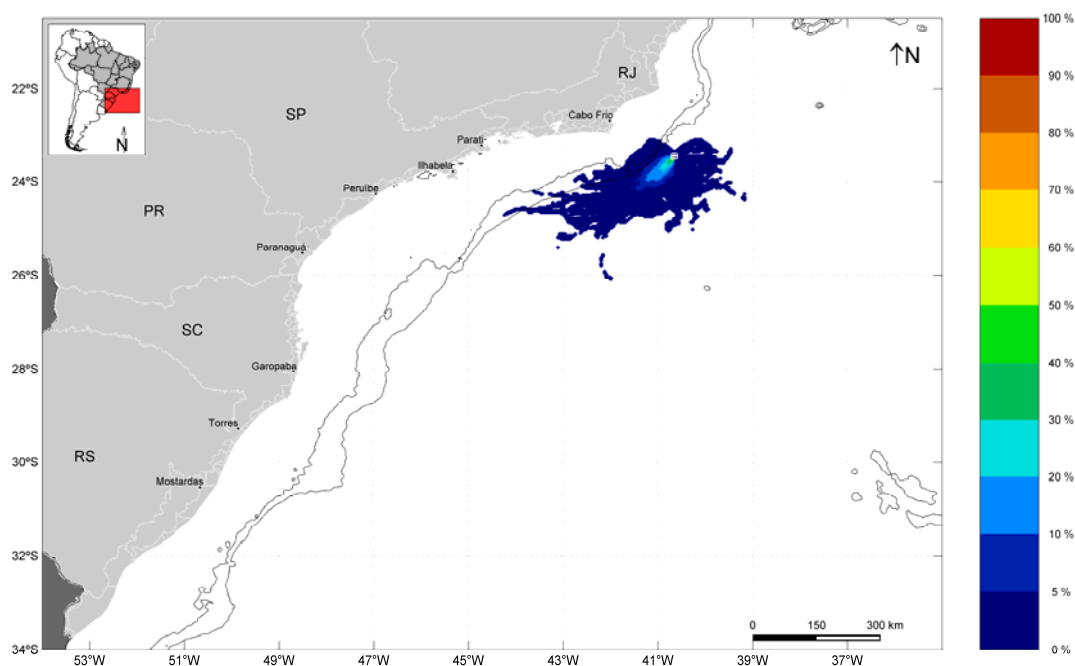


Figura 116: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias).

Como ocorrido na simulação de 8 m<sup>3</sup>, neste cenário a deriva do óleo foi para sudoeste do local de vazamento devido à influência da Corrente do Brasil e dos ventos de primeiro quadrante. A área de probabilidade de presença de óleo em superfície se estendeu desde aproximadamente 23°S, até a latitude de 26°S, sem que houvesse aproximação na costa.

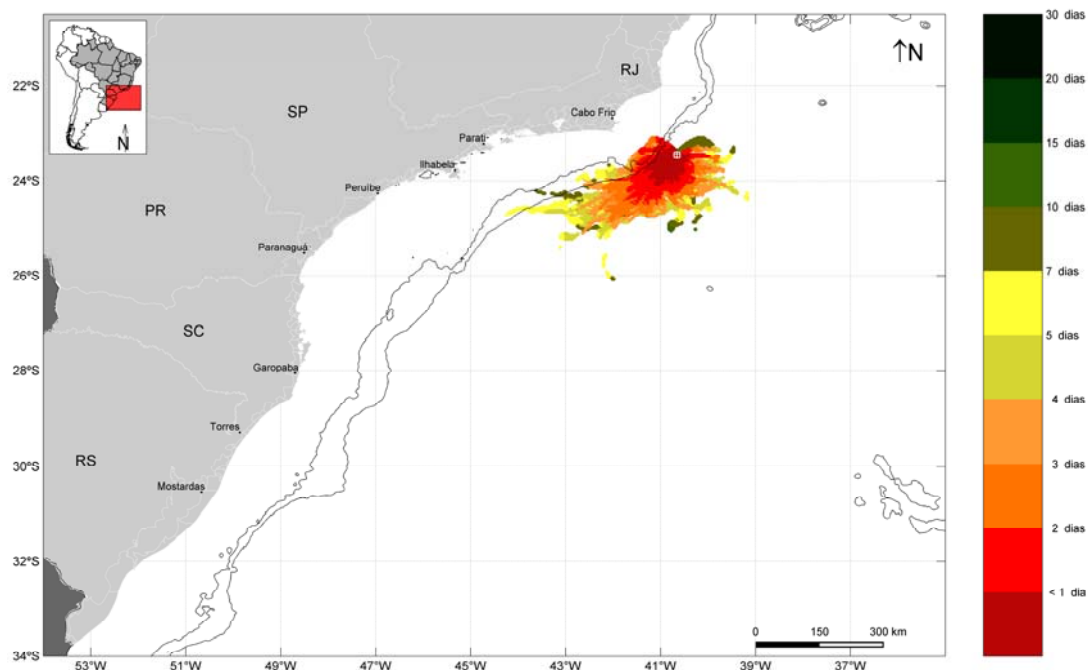


Figura 117: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias).

Pode-se observar que as áreas mais distantes com probabilidade de presença de óleo em superfície foram alcançadas em até 15 dias.

#### 4.3.1.2.2. Inverno

Os mapas de probabilidade de presença de óleo e de tempo mínimo de chegada em superfície para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>), no período de inverno, são apresentados na Figura 118 e na Figura 119, respectivamente.

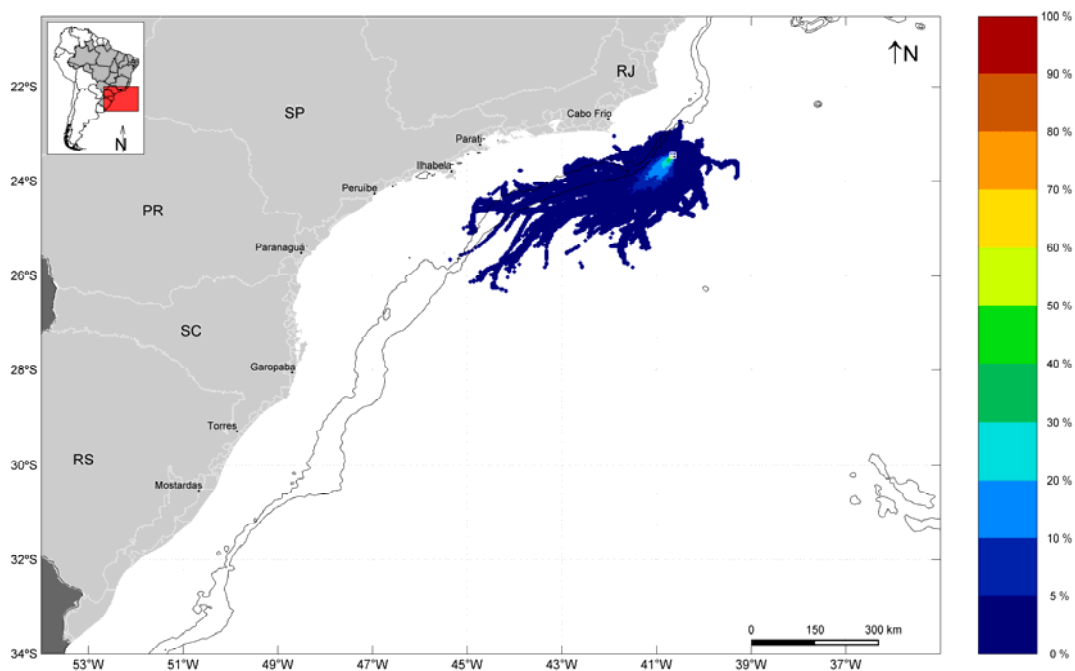


Figura 118: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias).

A deriva do óleo neste cenário foi também preferencialmente para sudoeste do local de vazamento. A área de probabilidade de presença de óleo em superfície se estendeu desde aproximadamente 22,7°S, até a latitude de 26,3°S. Ressalta-se que nesse cenário, apesar de ocorrer a aproximação do óleo na costa do município de Arraial do Cabo-RJ, não houve probabilidade de toque na costa.

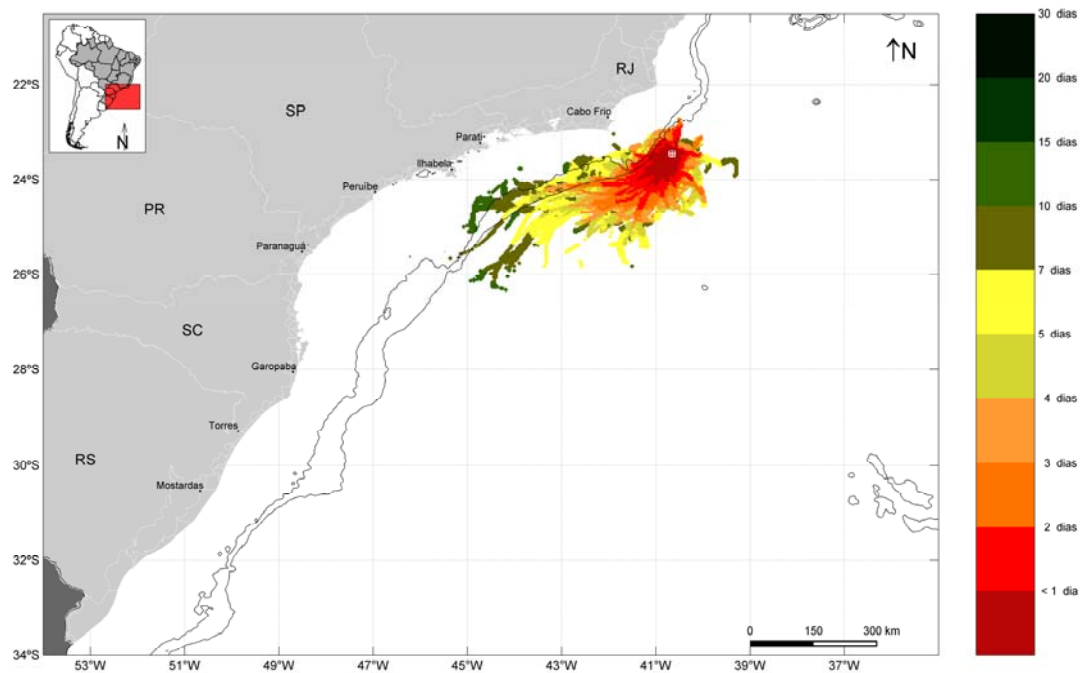


Figura 119: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias).

Observa-se que as regiões mais distantes com probabilidade de presença de óleo podem ser alcançadas em até 15 dias após o início do vazamento.

### 4.3.1.3. Vazamento de Blowout

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações probabilísticas de *blowout* (270.000 m<sup>3</sup>). Para esses cenários foi considerado um vazamento contínuo durante 30 (trinta) dias. O tempo simulado abrange os 30 dias de vazamento e mais 30 dias após o término do mesmo, totalizando 60 dias de simulação.

#### 4.3.1.3.1. Verão

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície e na costa para um evento de *blowout* (270.000 m<sup>3</sup>), em período de verão, 60 dias após o início do vazamento, encontram-se na Figura 120 e Figura 121, respectivamente. Os mapas de tempo mínimo de chegada encontram-se na Figura 122 e Figura 123.

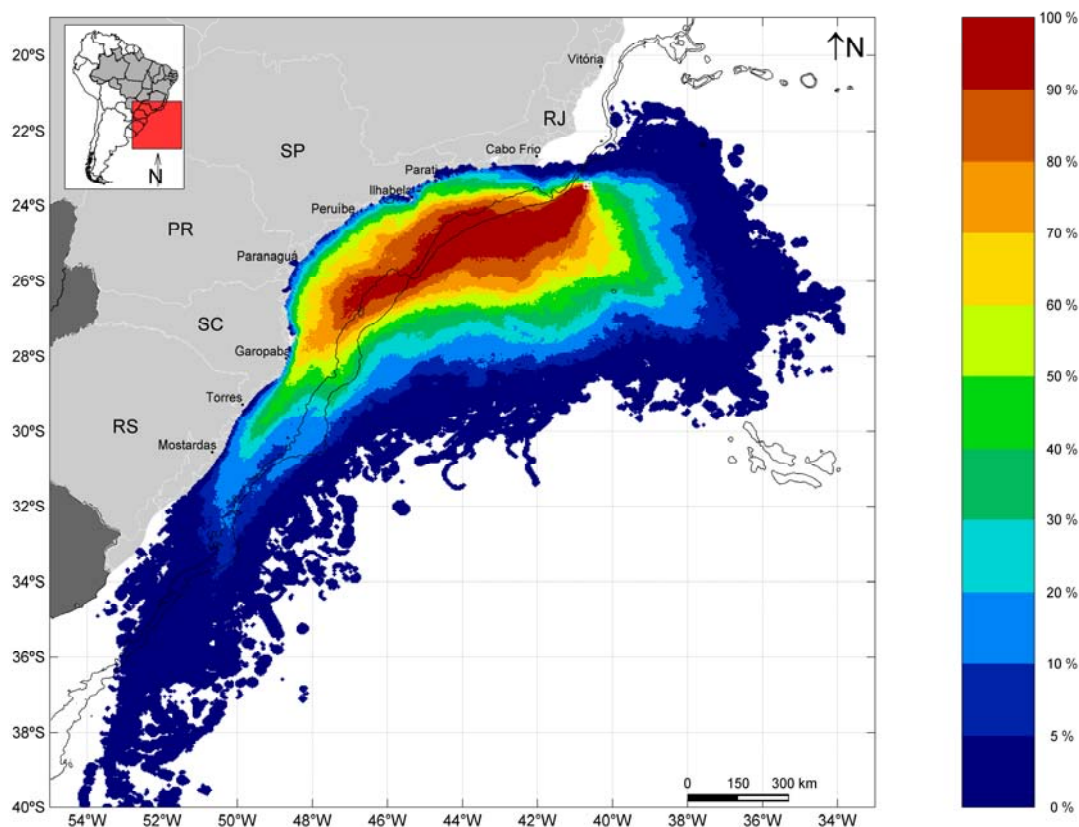


Figura 120: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 270.000 m<sup>3</sup> (*blowout*) no período de verão. Simulação de 1.440 horas (60 dias).



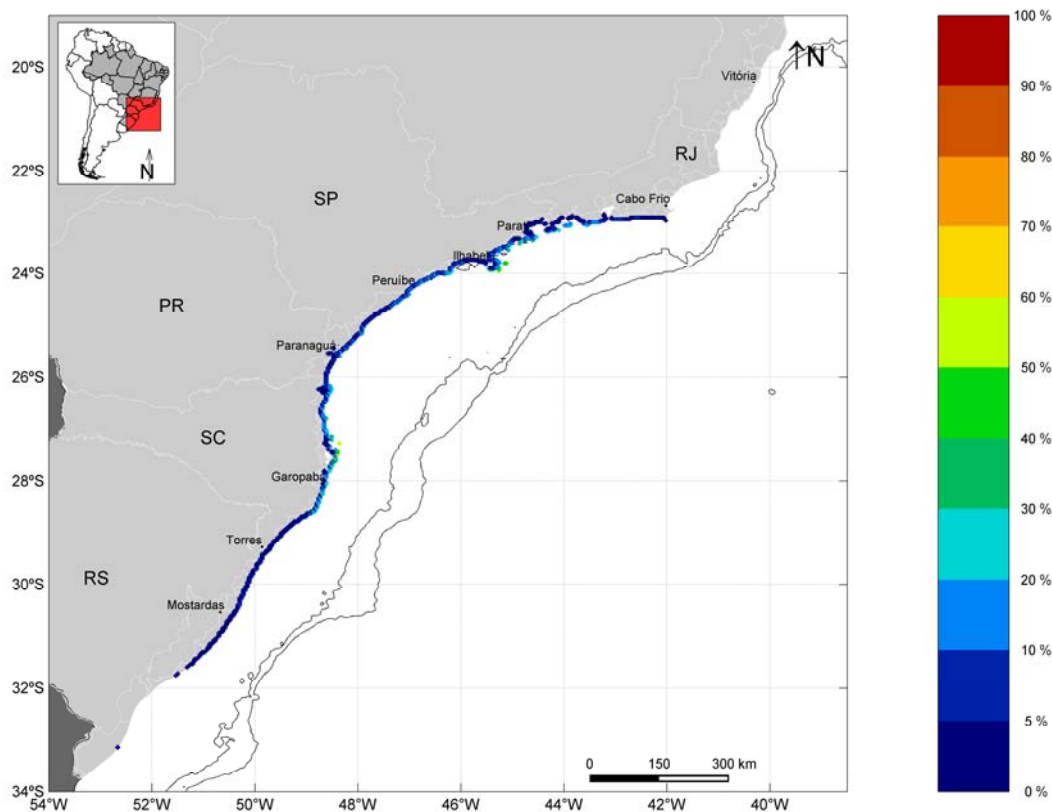


Figura 121: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de 270.000 m<sup>3</sup> (*blowout*) no período de verão. Simulação de 1.440 horas (60 dias).

Como ocorrido nas simulações anteriores, neste período de verão a deriva do óleo foi, preferencialmente, para sudoeste do local de vazamento devido à influência da Corrente do Brasil e dos ventos do primeiro quadrante típicos deste cenário. A área de probabilidade de presença de óleo em superfície se estendeu desde aproximadamente 21,2° S, até o limite sul, 40° S. Em aproximadamente 34° S, nota-se uma tendência de deriva do óleo para leste. Este movimento para leste, provavelmente está associado a períodos nos quais a Confluência Brasil-Malvinas encontra-se presente nessa latitude.

Observa-se pela Figura 121 que a probabilidade de presença do óleo na costa, abrangeu cinco estados, do Rio de Janeiro ao Rio Grande do Sul, nas classes de 0 a 60%. Ressalta-se que os estados de São Paulo e Santa Catarina apresentaram as maiores probabilidades de óleo na costa. As cidades com as maiores probabilidades de toque de óleo foram Florianópolis-SC, com 50,9% e Ilhabela-SP, 54,4%.

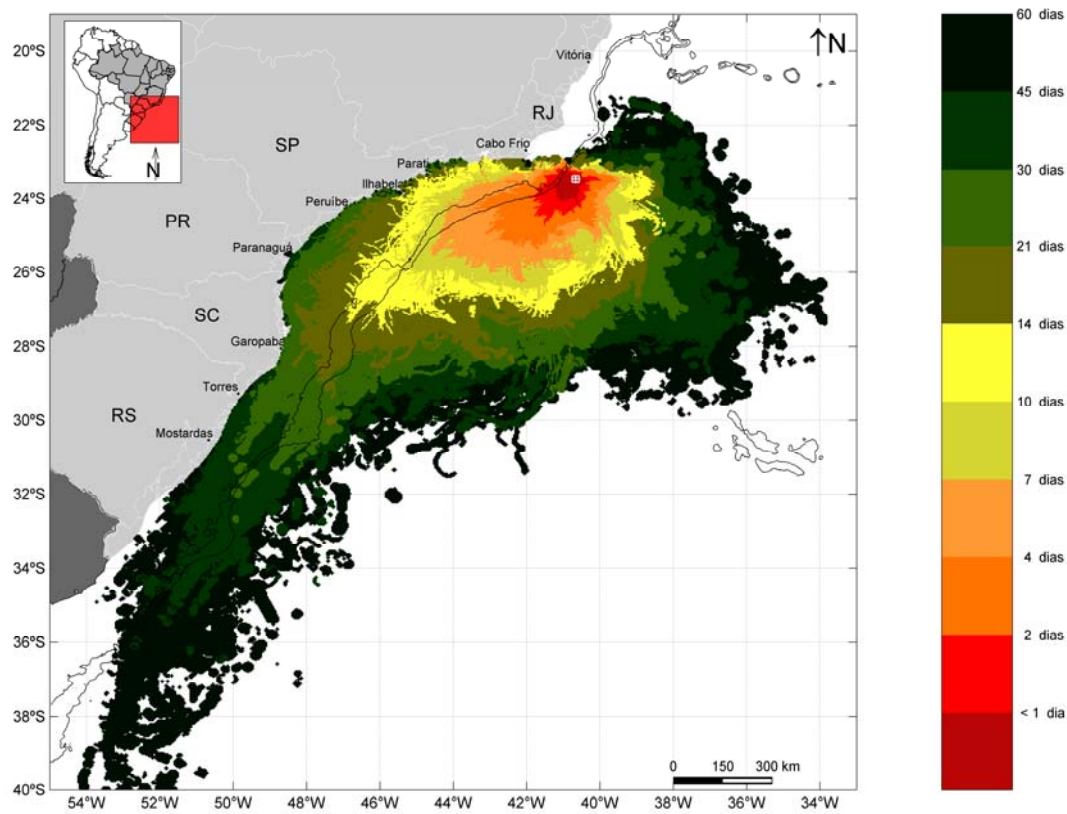


Figura 122: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de 270.000 m<sup>3</sup> (*blowout*) no período de verão. Simulação de 1.440 horas (60 dias).

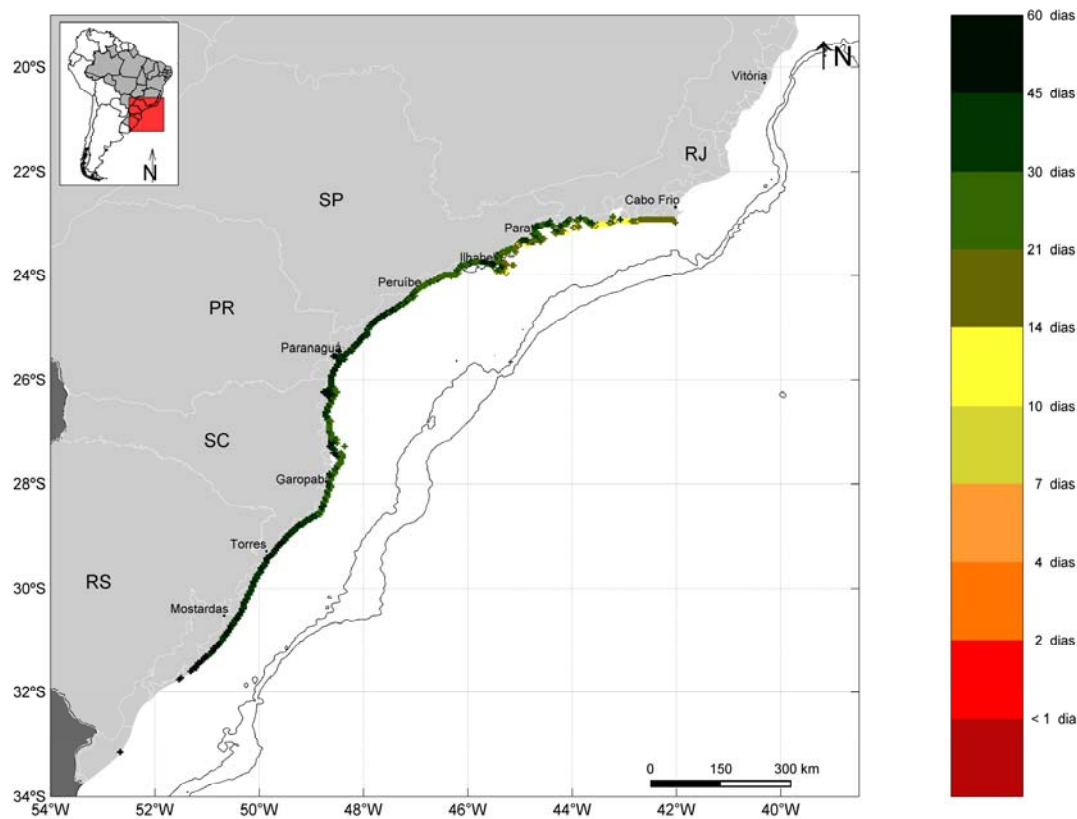


Figura 123: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para um vazamento de 270.000 m<sup>3</sup> (blowout) no período de verão. Simulação de 1.440 horas (60 dias).

O tempo mínimo de chegada de óleo à costa variou entre 7 e 60 dias, com os estados do Rio de Janeiro e de São Paulo sendo atingidos mais rapidamente pelo óleo. O local com menor tempo de chegada de óleo na costa foi o Rio de Janeiro-RJ, em 9,23 dias (~222 horas) (Tabela 35). O estado de São Paulo pode ser atingido com um tempo mínimo de 11,77 dias (~282 horas) em Ilhabela. Os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul somente foram atingidos após 20 dias (480 horas) de simulação.

A seguir, a Figura 124 apresenta a massa máxima de óleo na costa para as simulações no período de verão.

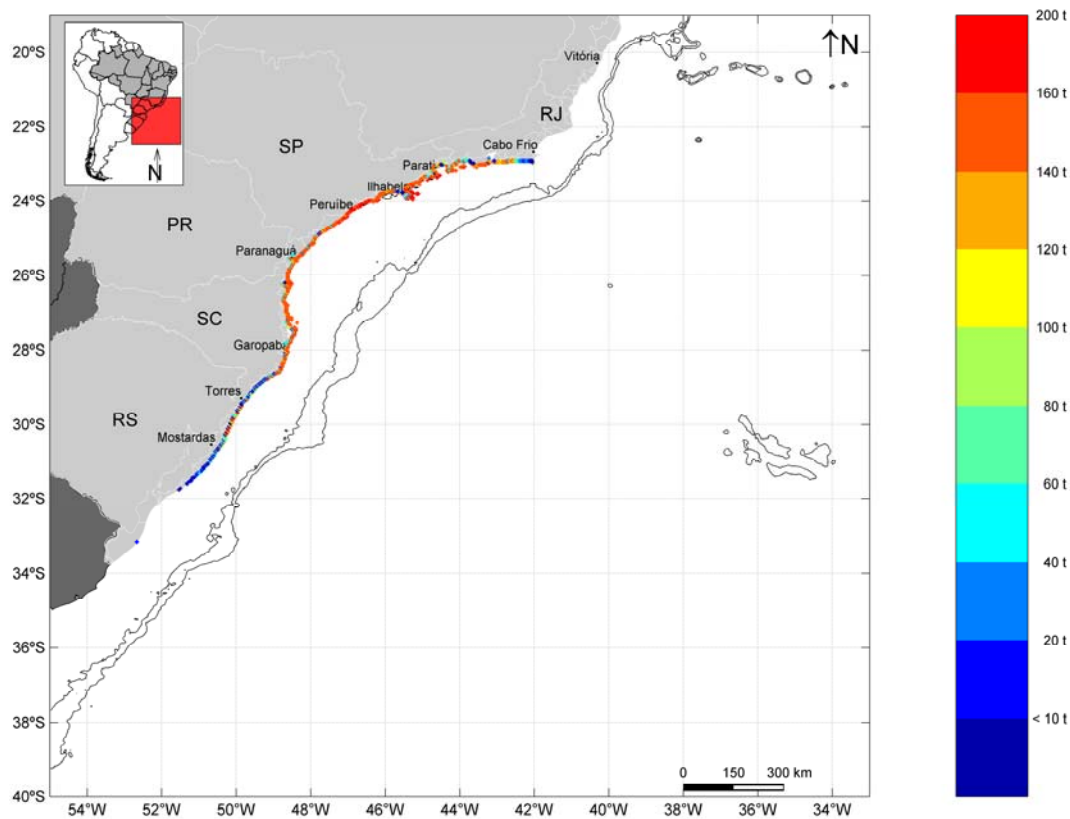


Figura 124: Massa máxima de óleo na costa após as simulações de 60 dias no cenário de verão.

Ao observar a Figura 124 e a, nota-se que a região compreendida desde a cidade de Saquarema-RJ até Mostardas-RS apresenta valores de massa de óleo acumulada superiores a 100 toneladas. O local com o maior acúmulo de óleo na costa foi Ilhabela-SP, com aproximadamente 177 toneladas (Tabela 35).

#### 4.3.1.3.2. Inverno

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície e na costa para um evento de *blowout* (270.000 m<sup>3</sup>), em período de inverno 60 dias após o início do vazamento, encontram-se na Figura 125 e Figura 126. Os mapas de tempo mínimo de chegada em superfície e na costa encontram-se na Figura 127 e Figura 128.

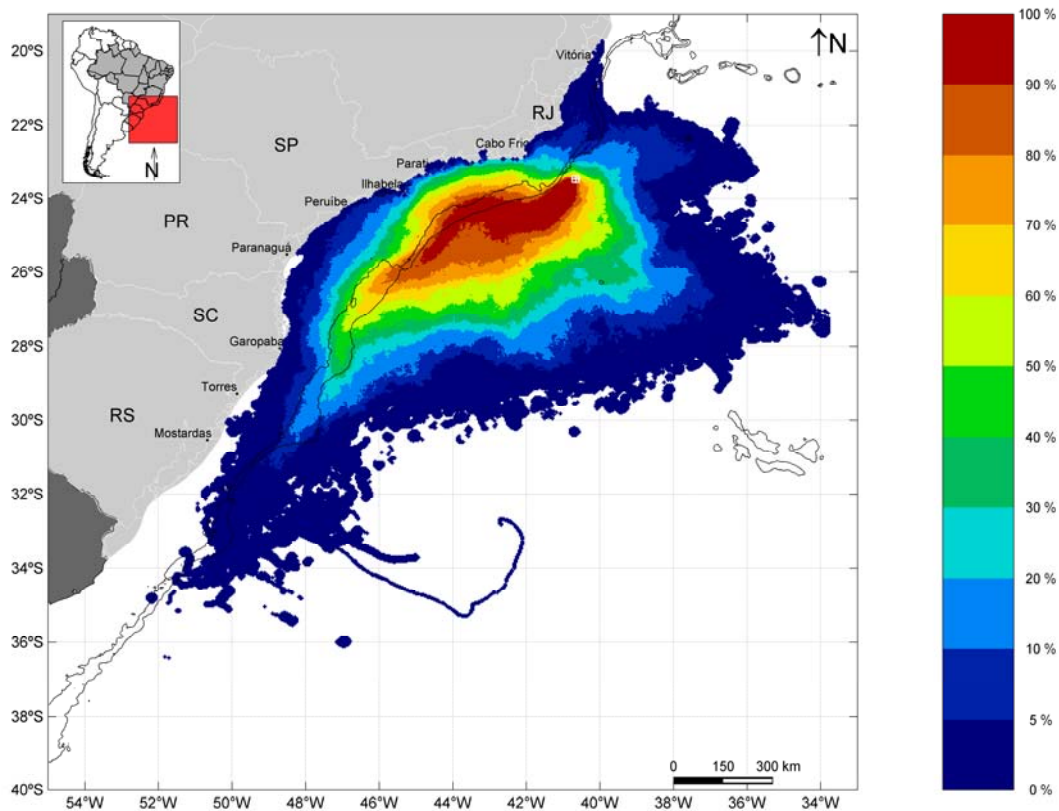


Figura 125: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 270.000 m<sup>3</sup> (*blowout*) no período de inverno. Simulação de 1.440 horas (60 dias).

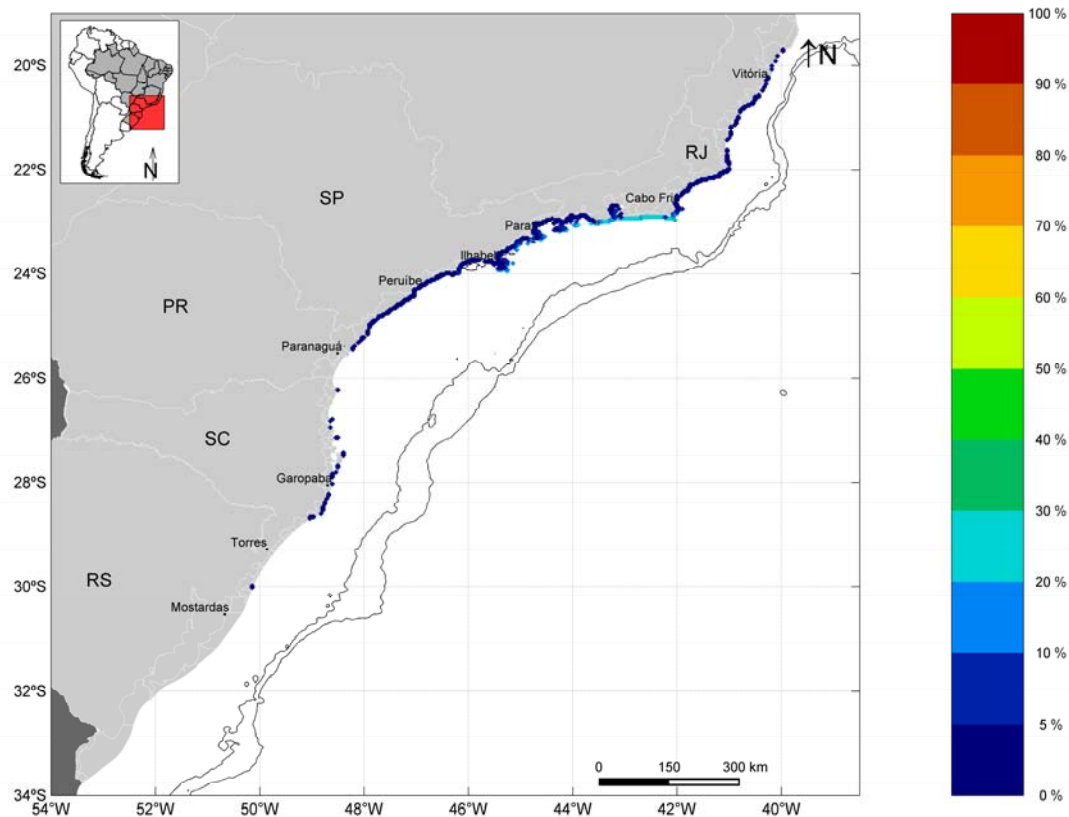


Figura 126: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de 270.000 m<sup>3</sup> (blowout) no período de inverno. Simulação de 1.440 horas (60 dias).

A deriva do óleo ocorreu preferencialmente para o sudoeste do local de vazamento devido à influência da Corrente do Brasil e dos ventos do primeiro quadrante. Contudo, como ocorrido nas simulações anteriores em período de inverno, observa-se a ocorrência de probabilidade de presença mais ao norte, devido aos ventos mais frequentes de quadrante sul neste cenário. A área de probabilidade de presença de óleo em superfície se estendeu desde aproximadamente 19,7° S, até a latitude de 36,4° S.

Observa-se que a probabilidade de presença de óleo na costa abrangeu municípios de seis estados, do Rio Grande do Sul ao Espírito Santo, entre as classes de 0 a 40%. O estado do Rio de Janeiro apresentou as maiores probabilidades de presença de óleo na costa. Os locais com maior probabilidade foram Arraial do Cabo-RJ e Rio de Janeiro-RJ, cerca de 30% (Tabela 35).

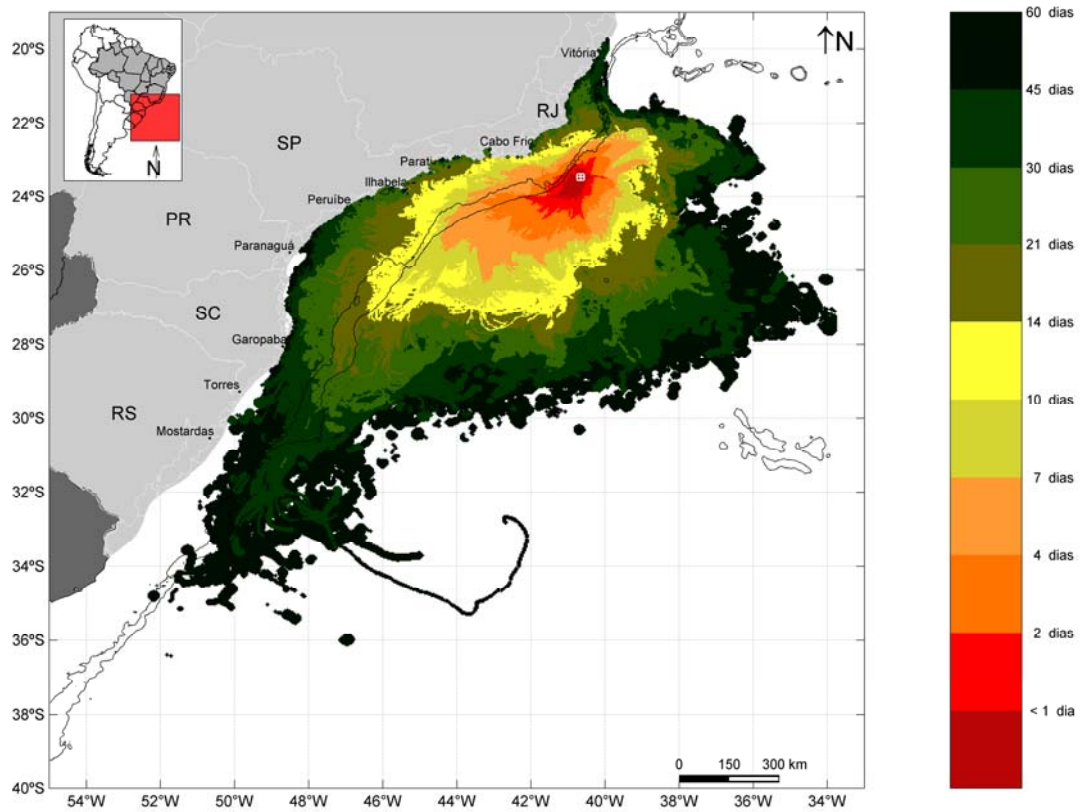


Figura 127: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de 270.000 m<sup>3</sup> (*blowout*) no período de inverno. Simulação de 1.440 horas (60 dias).

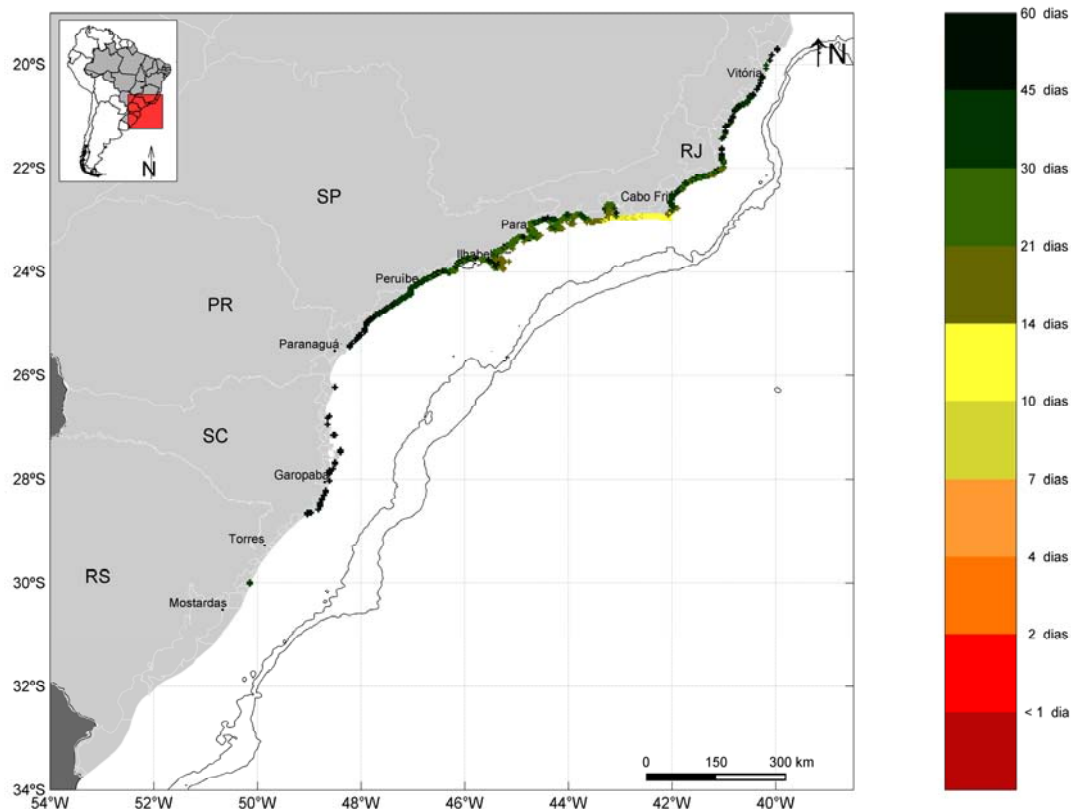


Figura 128: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa, para um vazamento de 270.000 m<sup>3</sup> (blowout) no período de inverno. Simulação de 1.440 horas (60 dias).

É observado que as classes de tempo mínimo de chegada do óleo à costa, variam de 7 a 60 dias, com os menores tempos sendo registrados no estado do Rio de Janeiro. O município mais rapidamente atingido pelo óleo na costa foi Maricá-RJ, em 8,56 dias (~206 horas), enquanto Ilhabela é o município no estado de São Paulo com o menor tempo mínimo de chegada de óleo, 14,56 dias (~349 horas). Os estados do Espírito Santo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul foram alcançados após 30 dias (720 horas) após o início do vazamento (Tabela 35).

A seguir, a Figura 129 apresenta a massa máxima de óleo na costa para as simulações no período de inverno.



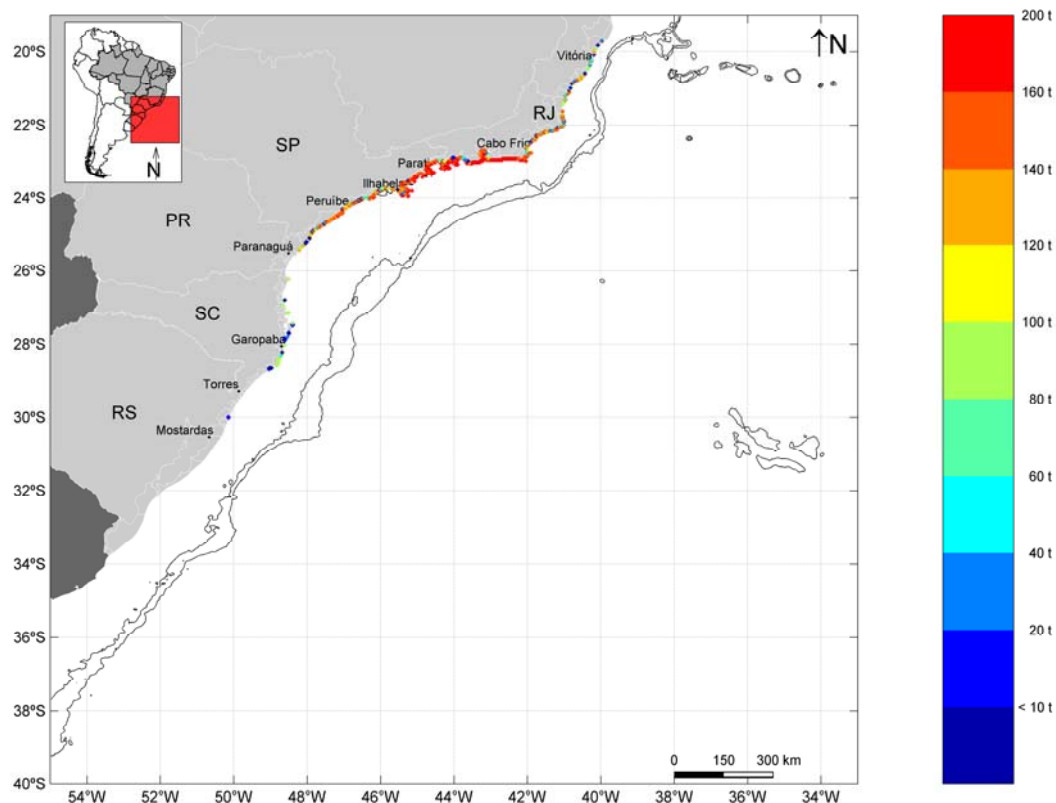


Figura 129: Massa máxima de óleo na costa após as simulações de 60 dias no cenário de inverno.

Neste cenário, devido aos ventos mais frequentes do quadrante sul, a região com maior massa acumulada apresenta-se deslocada para norte, em relação ao cenário de verão. O estado do Rio de Janeiro concentra os valores mais altos de massa máxima observados, 160 – 200 toneladas, sendo o município do Rio de Janeiro com o maior acúmulo na costa, aproximadamente 190 toneladas.

A seguir, na Tabela 35, são apresentados os valores de massa máxima na costa, probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em cada município com possibilidade de ser atingido pelo óleo em um derrame de 270.000 m<sup>3</sup>.

Tabela 35: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento derrame de grande volume (270.000 m<sup>3</sup>), nos cenários de verão e inverno.

UF	MUNICÍPIOS	Massa Máxima (t)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (dias)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
ES	Aracruz	-	140,79	-	0,25	-	38,17
	Fundão	-	129,10	-	0,25	-	38,17
	Serra	-	44,88	-	0,25	-	38,85
	Vitória	-	140,65	-	0,74	-	39,88
	Vila Velha	-	95,21	-	0,25	-	51,63
	Guarapari	-	140,86	-	2,23	-	31,00
	Anchieta	-	140,97	-	1,99	-	30,58
	Piúma	-	140,69	-	1,24	-	39,33
	Itapemirim	-	94,53	-	1,24	-	35,98
	Marataízes	-	140,74	-	1,74	-	29,29
	Presidente Kennedy	-	140,58	-	0,74	-	35,08
RJ	São Francisco de Itabapoana	-	140,57	-	0,74	-	28,90
	São João da Barra	-	140,89	-	2,23	-	28,25
	Campos dos Goytacazes	-	152,71	-	3,97	-	19,31
	Quissamã	-	156,92	-	4,22	-	20,04
	Carapebus	-	149,04	-	2,48	-	20,21
	Macaé	-	144,70	-	4,71	-	17,94
	Rio das Ostras	-	140,71	-	3,23	-	34,63
	Casimiro de Abreu	-	140,67	-	1,74	-	35,90
	Cabo Frio	11,93	184,06	1,59	20,84	16,92	12,52
	Armação dos Búzios	-	156,12	-	7,94	-	15,92
	Arraial do Cabo	88,94	188,22	1,59	30,52	14,52	11,35
	Araruama	39,21	186,51	2,65	22,33	14,52	12,81
	Saquarema	140,36	186,95	5,31	24,32	14,52	9,31
	Maricá	140,39	182,85	7,16	28,54	10,83	8,56
	Niterói	140,39	182,85	7,16	25,31	10,83	8,71
	São Gonçalo	-	83,57	-	0,25	-	40,85
	Magé	-	140,62	-	1,99	-	21,92
	Duque de Caxias	-	154,35	-	4,22	-	18,52
	Rio de Janeiro	163,98	190,05	23,34	30,27	9,23	13,15
	Itaguaí	143,79	172,55	7,16	6,95	20,23	19,90
Mangaratiba	140,71	174,37	2,92	6,95	23,31	20,17	
Angra dos Reis (Ilha Grande)	163,20	180,89	29,18	21,09	13,58	18,75	
Angra dos Reis	140,39	169,99	2,12	5,46	21,06	21,23	
Paraty	174,47	176,22	38,73	25,56	14,54	19,13	

Os municípios são apresentados na orientação norte-sul.

Tabela 5: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento derrame de grande volume (270.000 m<sup>3</sup>), nos cenários de verão e inverno (continuação).

UF	MUNICÍPIOS	Massa Máxima (t)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (dias)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
SP	Ubatuba	169,70	177,52	34,75	16,38	13,81	19,63
	Caraguatatuba	167,22	161,16	18,83	6,95	15,81	19,04
	Ilhabela	176,85	174,31	54,38	22,83	11,77	14,56
	São Sebastião	144,64	145,00	10,88	4,47	15,81	19,04
	Bertioga	154,52	150,34	16,45	5,21	23,73	26,10
	Guarujá	162,75	165,29	27,32	6,20	15,98	26,17
	Santos	159,14	145,81	16,45	4,47	23,48	29,60
	São Vicente	165,41	140,60	14,06	1,99	22,88	24,75
	Praia Grande	165,44	148,46	17,51	3,47	22,88	24,75
	Mongaguá	165,56	150,83	15,38	3,23	22,75	27,83
	Itanhaém	171,06	156,94	15,38	3,72	23,83	30,92
	Peruíbe	171,06	156,68	17,77	3,97	23,83	30,81
	Iguape	164,18	160,50	19,10	4,47	25,40	30,81
	Ilha Comprida	160,82	150,02	12,47	2,73	25,58	38,31
	Cananéia	153,28	140,77	14,85	0,99	34,13	45,42
PR	Guaraqueçaba	149,64	130,80	15,65	0,74	29,73	51,40
	Paranaguá	144,52	-	13,00	-	31,67	-
	Pontal do Paraná	156,17	-	13,00	-	31,67	-
	Matinhos	156,17	-	7,96	-	34,13	-
	Guaratuba	144,23	-	7,69	-	35,81	-
SC	Itapoá	155,39	-	7,96	-	31,85	-
	São Francisco do Sul	166,21	87,06	27,06	0,25	25,94	50,63
	Balneário Barra do Sul	152,36	-	13,00	-	26,69	-
	Araquari	155,57	-	12,73	-	26,69	-
	Barra Velha	155,57	-	15,12	-	28,44	-
	Piçarras	153,96	-	18,30	-	28,27	-
	Penha	153,97	91,04	30,24	0,25	26,52	49,81
	Navegantes	149,38	91,04	14,06	0,25	25,54	49,81
	Itajaí	149,81	90,33	14,06	0,25	25,54	50,04
	Balneário Camboriú	149,81	90,33	22,81	0,25	27,73	50,04
	Itapema	155,68	-	18,57	-	28,29	-
	Porto Belo	153,61	88,97	39,79	0,50	28,33	52,38
	Bombinhas	154,03	88,97	39,79	0,50	25,90	52,38
	Tijucas	140,73	-	3,18	-	36,50	-
	Governador Celso Ramos	141,28	-	10,34	-	32,21	-
	Florianópolis	165,26	87,82	50,93	0,74	22,40	49,67
	Palhoça	140,71	11,47	19,36	0,50	24,65	54,33
Paulo Lopes	140,71	11,47	19,36	0,50	24,65	54,33	
Garopaba	140,88	88,24	29,97	0,50	24,65	49,46	

Os municípios são apresentados na orientação norte-sul.

Tabela 5: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento derrame de grande volume (270.000 m<sup>3</sup>), nos cenários de verão e inverno (continuação).

UF	MUNICÍPIOS	Massa Máxima (t)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (dias)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
SC	Imbituba	144,30	130,77	33,42	0,74	25,38	46,33
	Laguna	144,81	91,56	28,12	0,50	25,71	45,60
	Jaguaruna	144,03	13,36	28,12	0,25	27,79	50,73
	Içara	140,55	-	4,24	-	34,85	-
	Araranguá	113,99	-	4,51	-	32,75	-
	Balneário Arroio do Silva	113,99	-	4,77	-	32,75	-
	Balneário Gaivota	84,70	-	2,12	-	44,35	-
	Passo de Torres	140,68	-	2,39	-	43,06	-
RS	Torres	140,68	-	2,65	-	42,29	-
	Arroio do Sal	140,56	-	9,55	-	33,23	-
	Terra de Areia	83,21	-	4,51	-	35,63	-
	Capão da Canoa	140,69	-	9,81	-	35,63	-
	Xangri-lá	140,79	-	6,63	-	40,77	-
	Osório	140,54	-	8,75	-	37,65	-
	Imbé	140,54	13,74	8,75	0,25	37,65	43,83
	Tramandaí	140,67	16,83	5,84	0,25	38,44	43,83
	Cidreira	140,71	-	8,22	-	36,75	-
	Balneário Pinhal	140,63	-	5,04	-	37,00	-
	Palmares do Sul	140,63	-	7,96	-	37,00	-
	Mostardas	140,71	-	4,51	-	36,65	-
	Tavares	44,57	-	1,33	-	44,27	-
	São José do Norte	18,79	-	1,06	-	48,73	-
Santa Vitória do Palmar	10,21	-	0,27	-	58,52	-	

Os municípios são apresentados na orientação norte-sul.

### 4.3.2. Resultados Determinísticos

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas foi identificado o cenário crítico para ocorrência de um vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>. O tempo de chegada de óleo na costa no cenário de verão foi de 9,23 dias, enquanto no inverno foi de 8,56 dias (Tabela 35). Dessa forma, como o inverno apresentou um tempo menor, será apresentada a trajetória crítica ocorrida somente neste período.

Também são apresentadas duas trajetórias que representaram a deriva do óleo em condições meteo-oceanográficas mais frequentes da região, nos períodos sazonais de verão e inverno.

Para os casos de condições meteo-oceanográficas mais frequentes, foi identificado um domínio de correntes com direção S-SW no regime hidrodinâmico da região nas duas condições sazonais, isto se deve à presença da Corrente do Brasil. O regime de ventos, em ambos os períodos, é caracterizado pela maior frequência de ventos do primeiro quadrante. Entretanto, no período de inverno, existe a maior ocorrência de ventos de sul.

Com o intuito de representar da melhor forma as duas condições sazonais citadas anteriormente, foi conduzida uma investigação no vento, de forma a se obter o período de 60 dias que tivesse os ventos característicos de cada condição ambiental (Figura 130). Este período é determinado após a varredura da série de dados, em janelas de 60 dias. Assim, extrai-se o período de 60 dias consecutivos, com maior percentual de ventos característicos de cada condição sazonal.

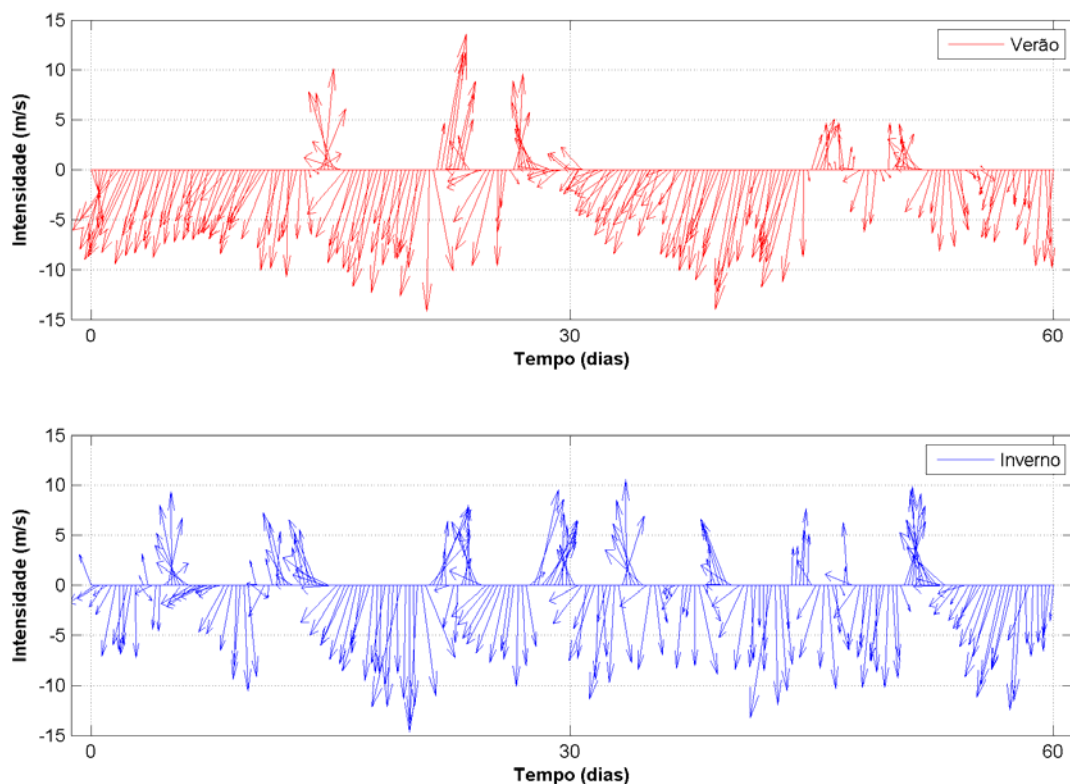


Figura 130: Vento utilizado nas simulações de condições meteo-oceanográficas.

#### 4.3.2.1. Condição Crítica

No item a seguir será apresentada a trajetória crítica no período de inverno para um vazamento de *blowout* (270.000 m<sup>3</sup>) contínuo por 30 dias, simulação de 60 dias.

##### 4.3.2.1.1. Inverno

A deriva do óleo em condição crítica no período de inverno será apresentada da Figura 131 à Figura 141.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

12h

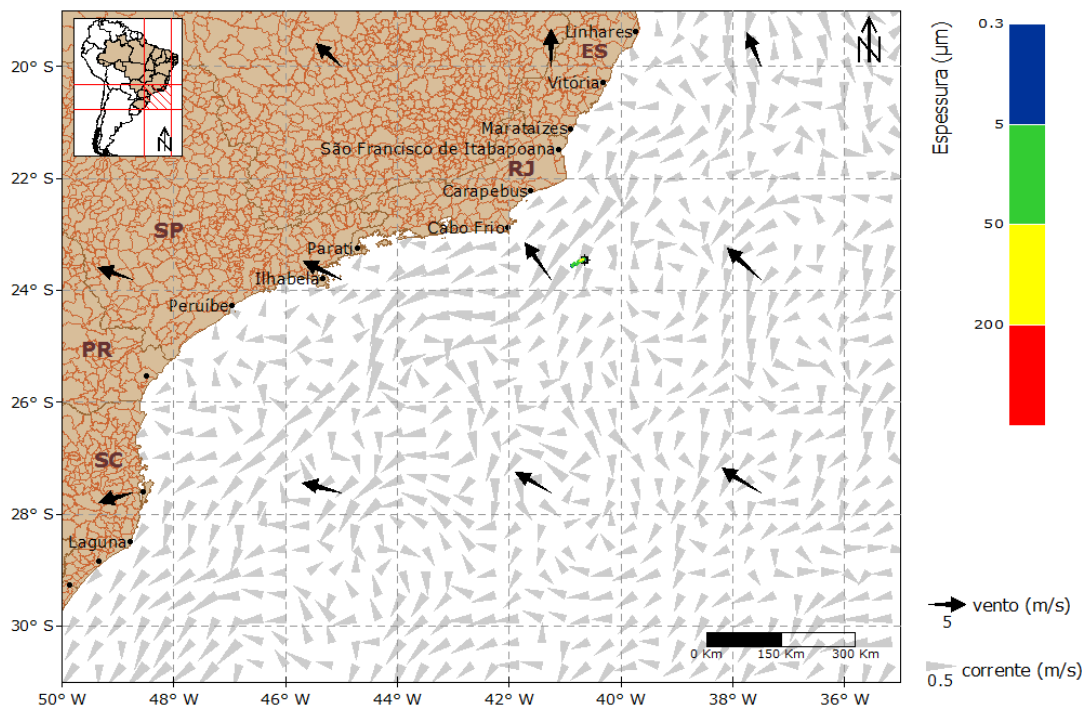


Figura 131: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

36h

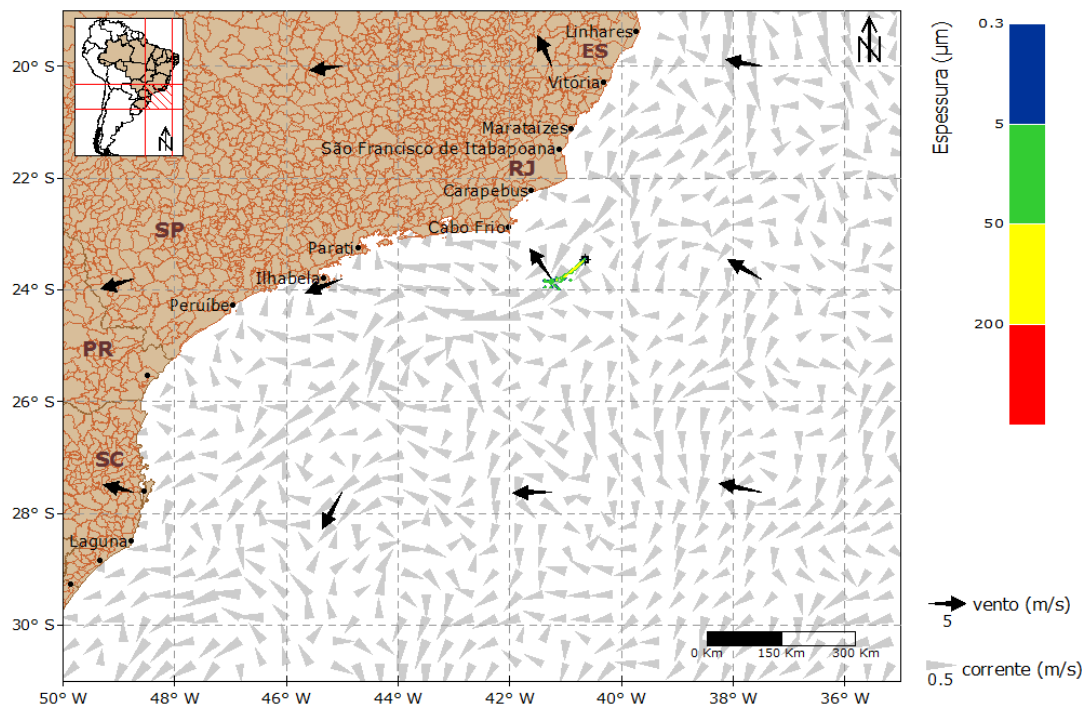


Figura 132: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.



**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**

**Modo Determinístico**

Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

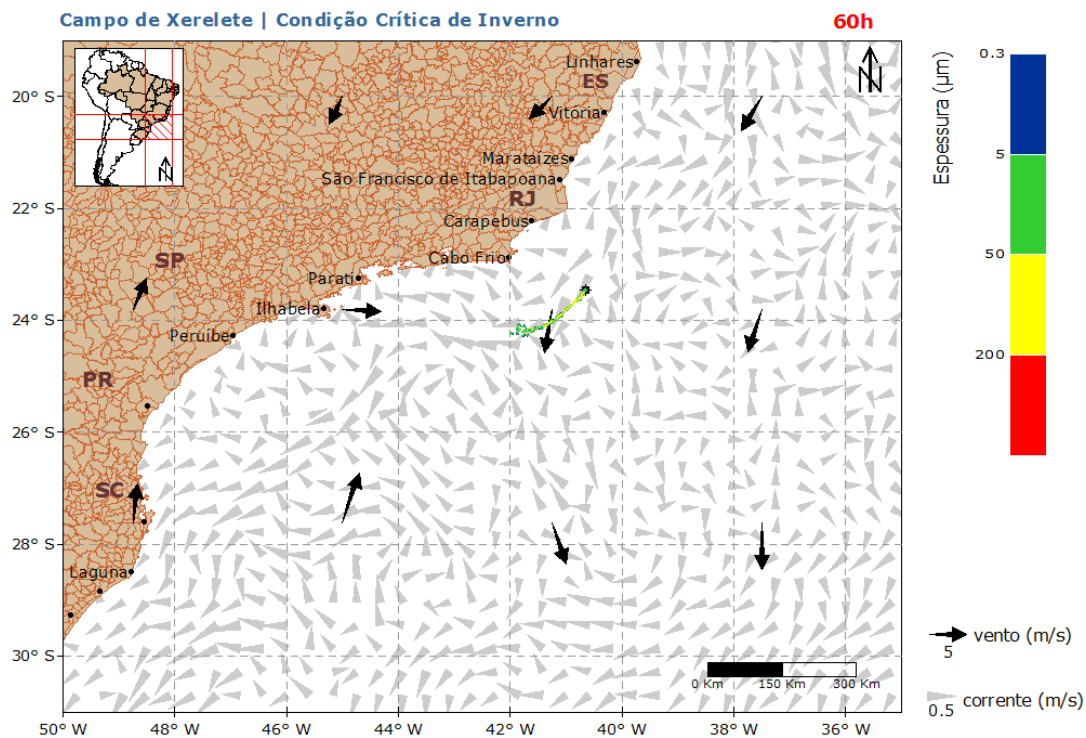


Figura 133: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

168h

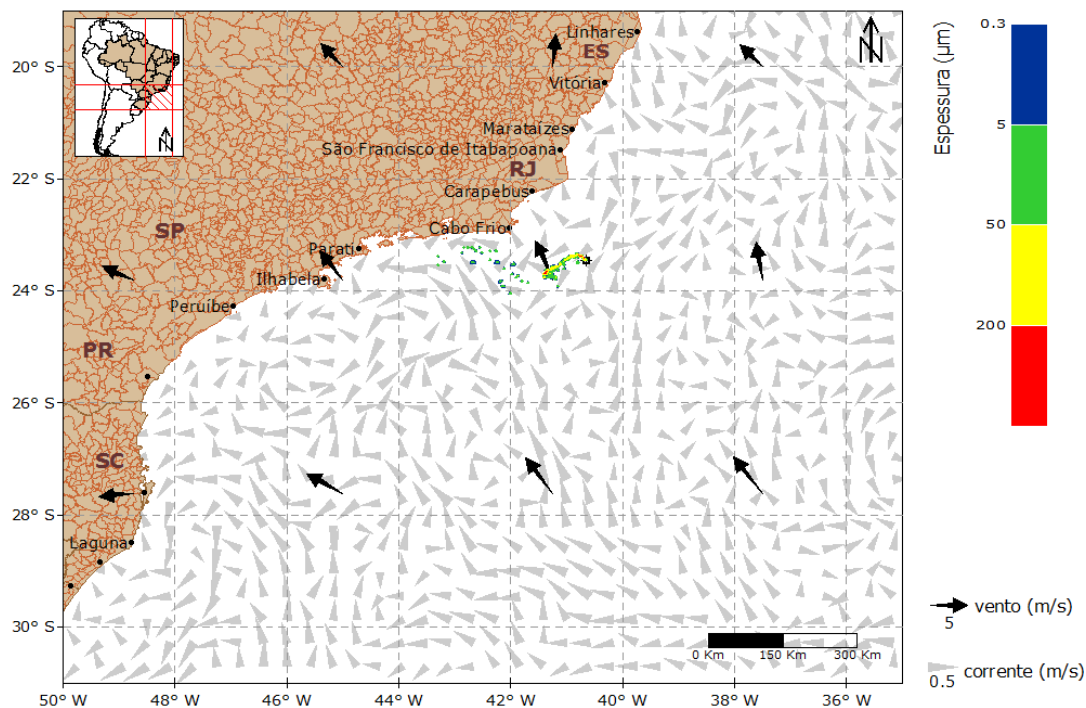


Figura 134: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

206h

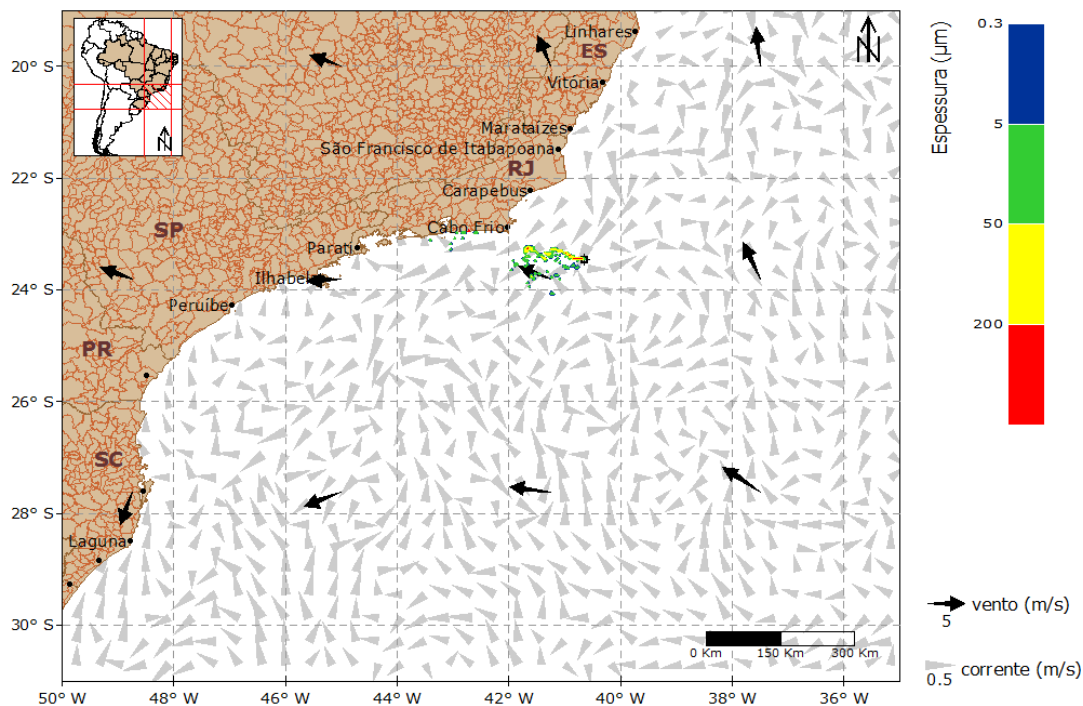


Figura 135: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 206 horas (tempo mínimo de toque) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

336h

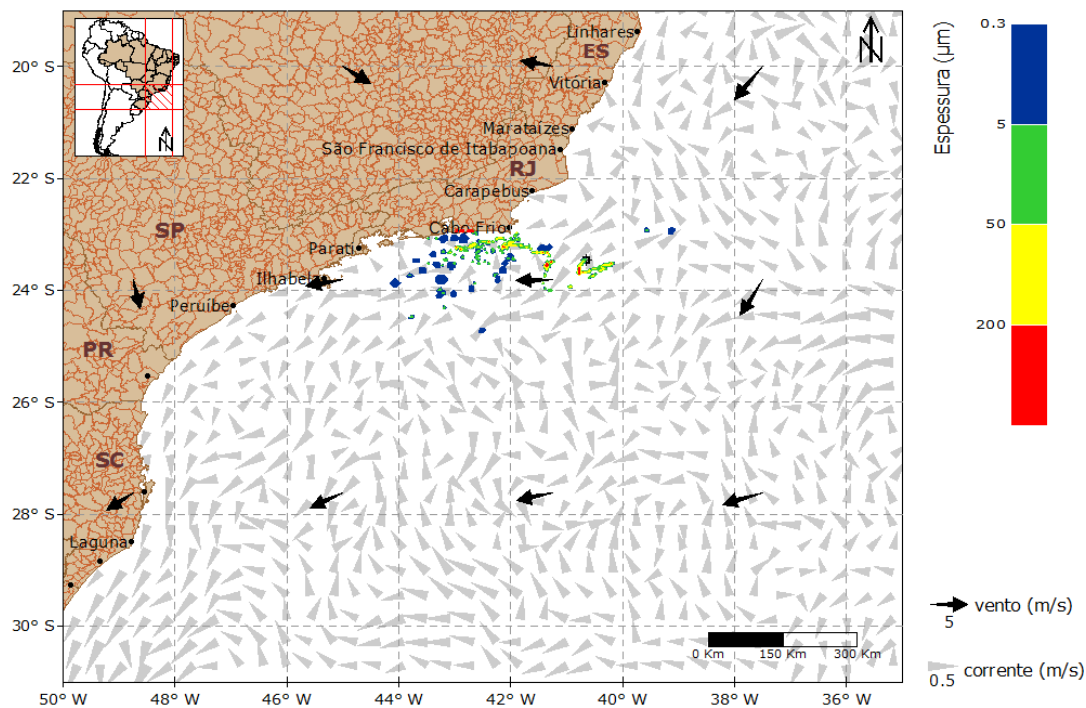


Figura 136: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**

**Modo Determinístico**

Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

504h

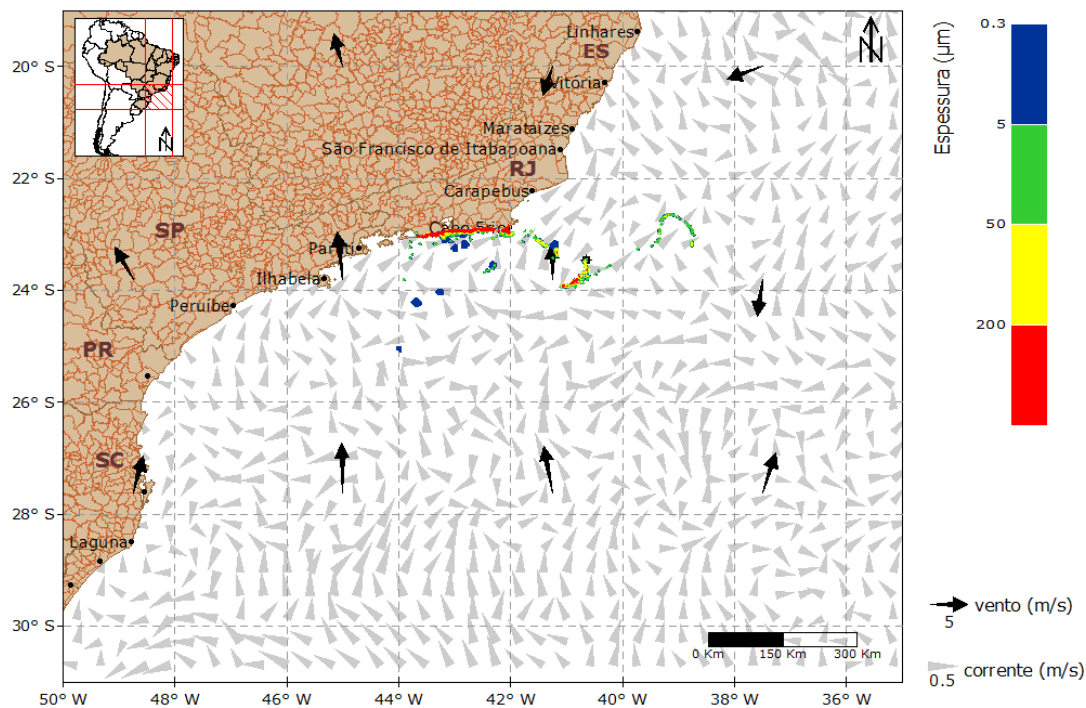


Figura 137: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**

**Modo Determinístico**

Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

672h

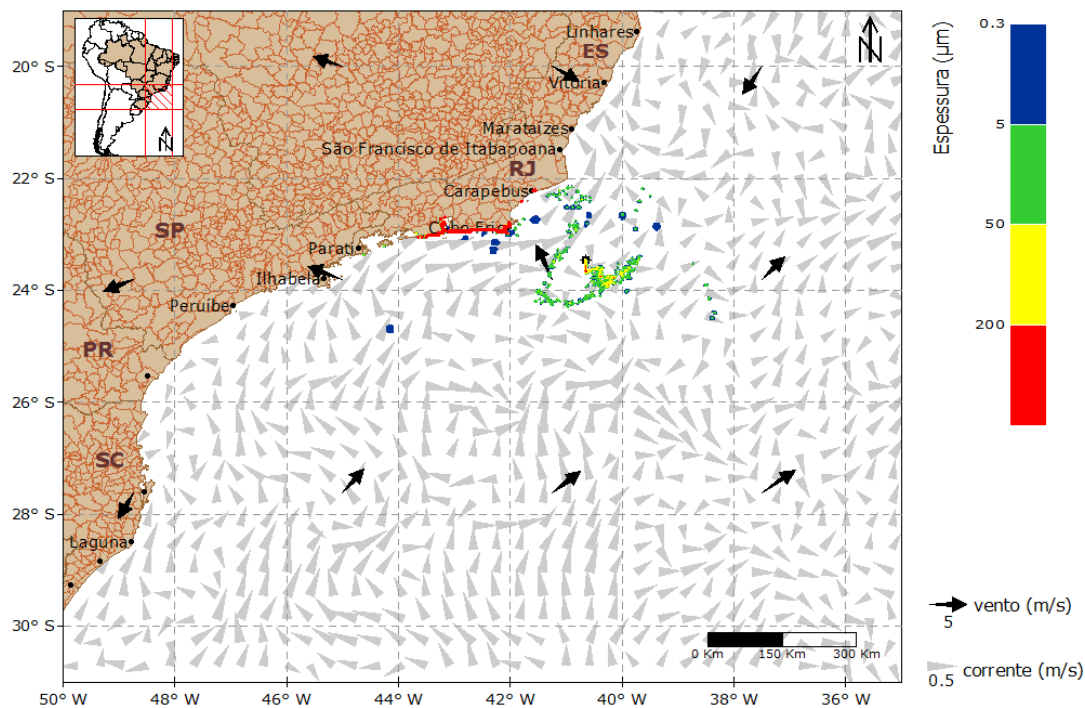


Figura 138: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

720h

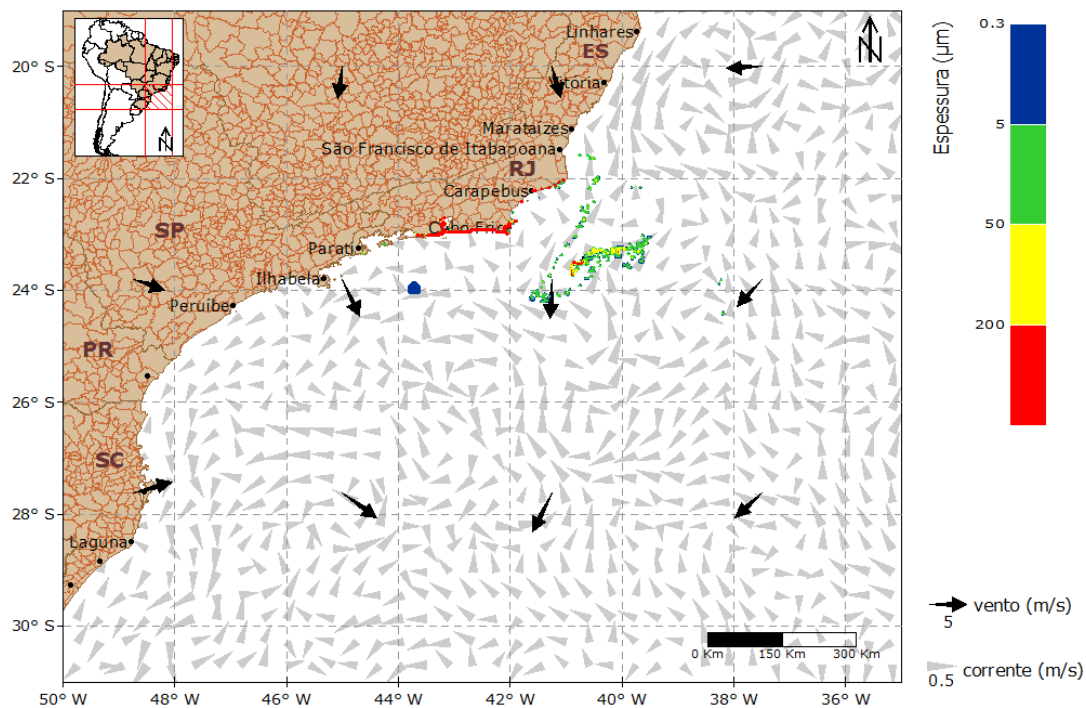


Figura 139: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

1080h

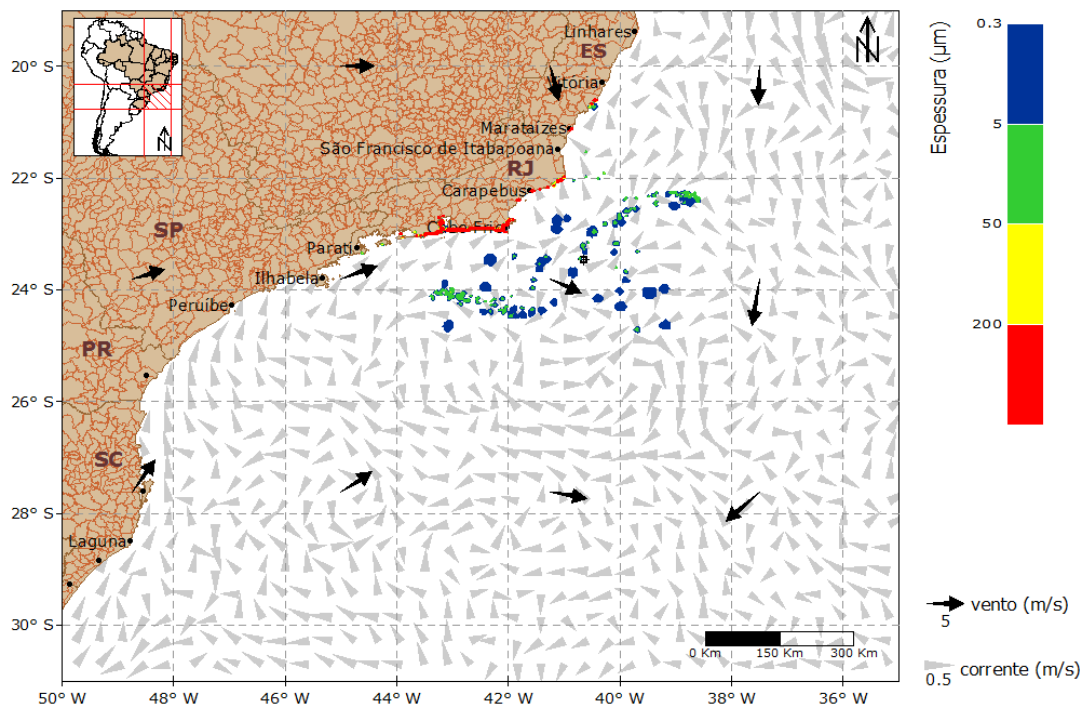


Figura 140: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.



## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Determinístico

Campo de Xerelete | Condição Crítica de Inverno

1440h

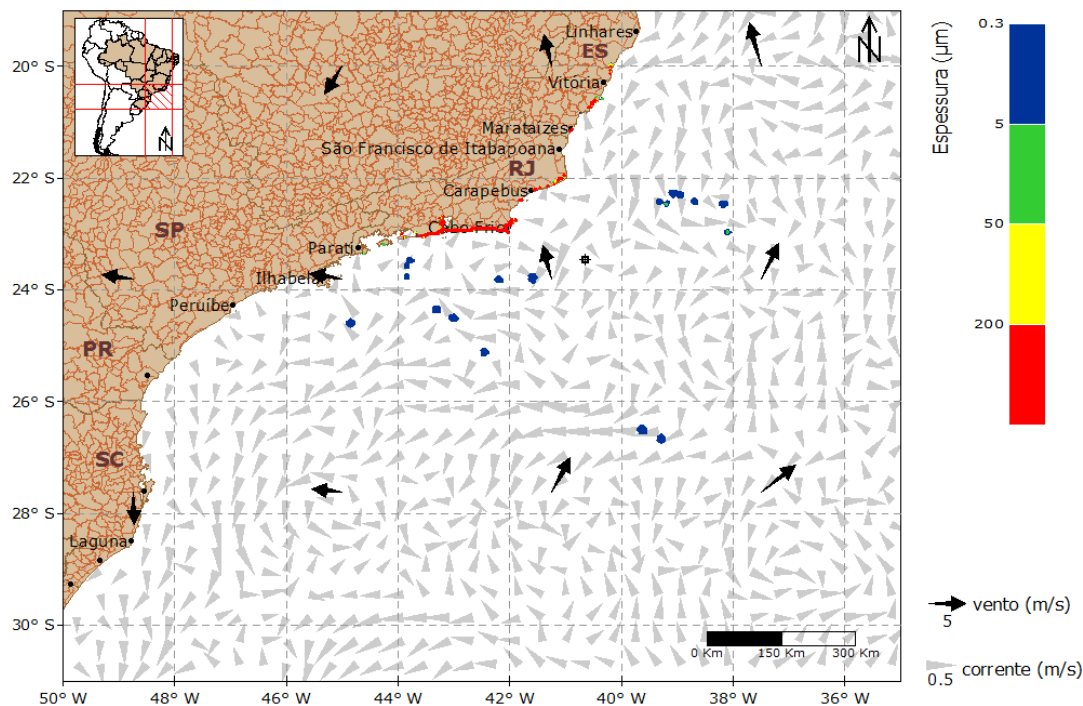


Figura 141: Resultado da simulação determinística em condição crítica, cenário de inverno, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

A deriva do óleo ocorreu inicialmente rumo a sudoeste do ponto de vazamento. Após 60 horas, houve alteração do sentido da corrente, fluindo em direção à costa. Em 206 horas ocorreu o toque do óleo no município de Maricá-RJ. A partir deste momento, a deriva do óleo variou entre noroeste e nordeste, abrangendo grande parte da costa do estado do Rio de Janeiro. Ao final da simulação, 1440 horas, havia óleo acumulado desde o município de Aracruz-ES até a cidade de Paraty-RJ.

No gráfico (Figura 142), a seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo durante a simulação.

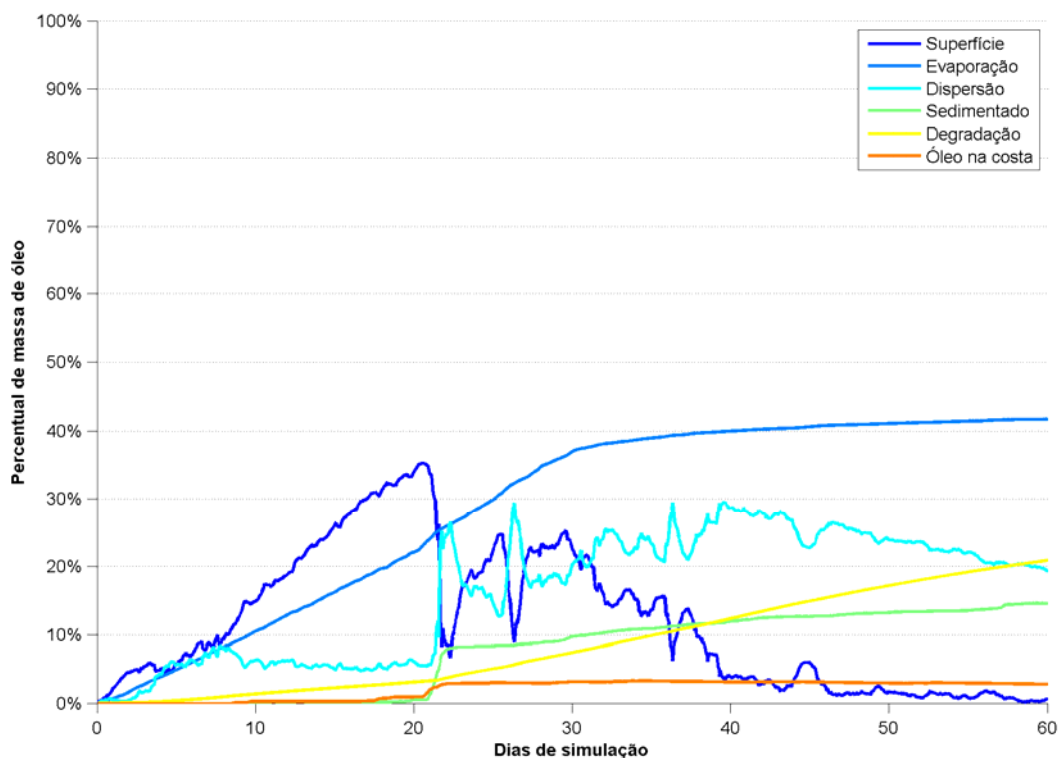


Figura 142: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica no período de inverno. Volume de 270.000 m<sup>3</sup>.

Observa-se que a evaporação foi o processo mais atuante na retirada de massa da superfície da água, responsável por 41,7% da massa, seguido pela degradação, 20,9%. A sedimentação foi responsável por 14,6% do óleo e 19,3% do óleo se encontrava na coluna d'água. Ao final da simulação, quantidade de óleo em superfície não foi de 0,7% e o óleo acumulado na costa representou 2,8% da massa total.

### 4.3.2.2. Condições Meteo-Oceanográficas Frequentes

Nos itens a seguir serão apresentadas duas trajetórias em condições meteo-oceanográficas frequentes, sendo uma no período de verão e outra no inverno, para um vazamento de *blowout* (270.000 m<sup>3</sup>) contínuo por 30 dias, simulação de 60 dias.

#### 4.3.2.2.1. Verão

A deriva do óleo em condições meteo-oceanográficas frequentes de verão será apresentada da Figura 143 à Figura 152.

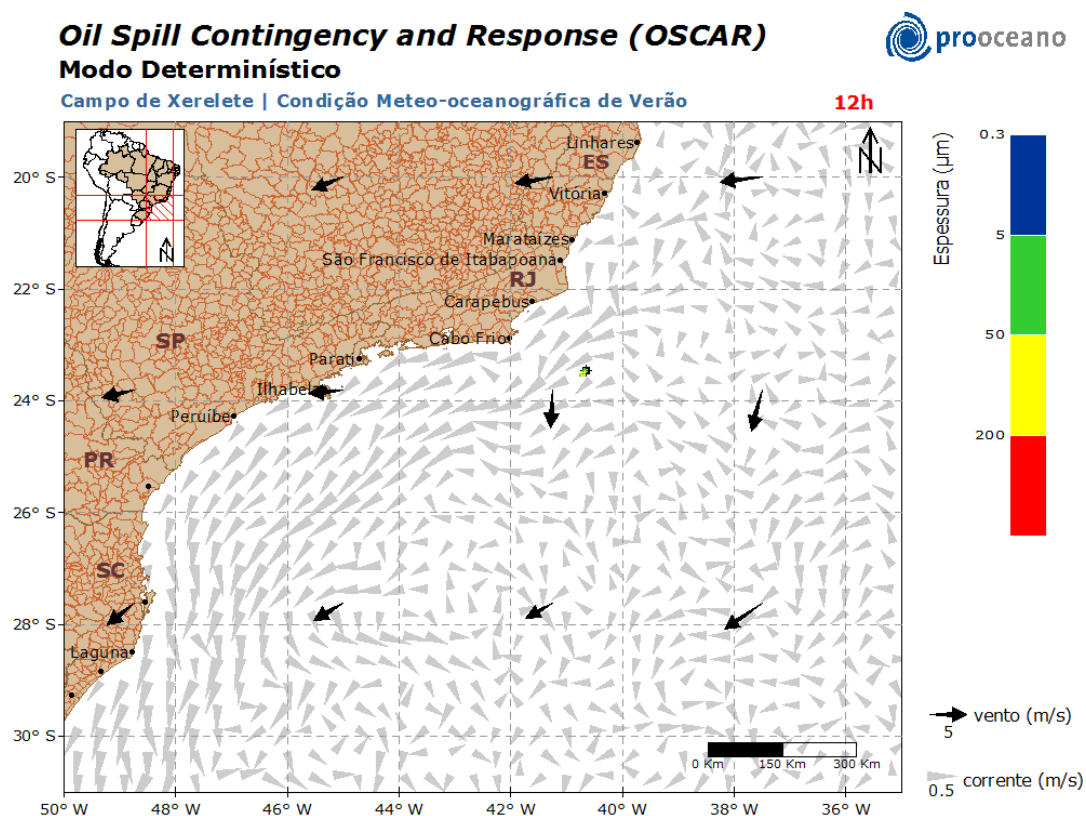


Figura 143: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Verão

36h

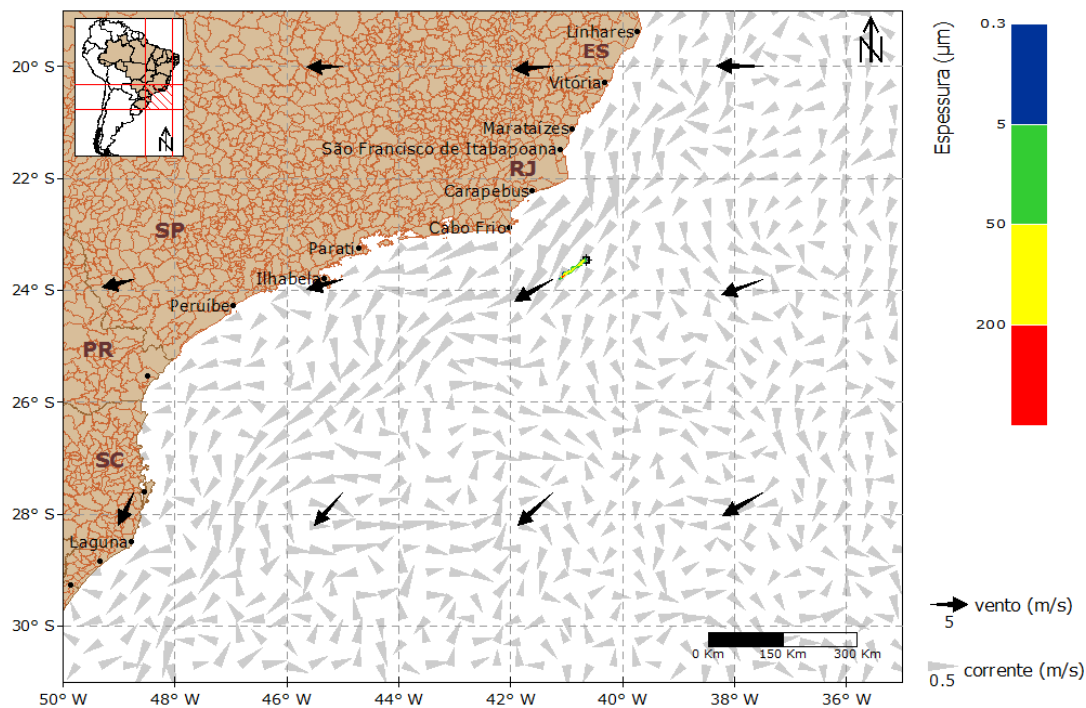


Figura 144: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Verão

60h

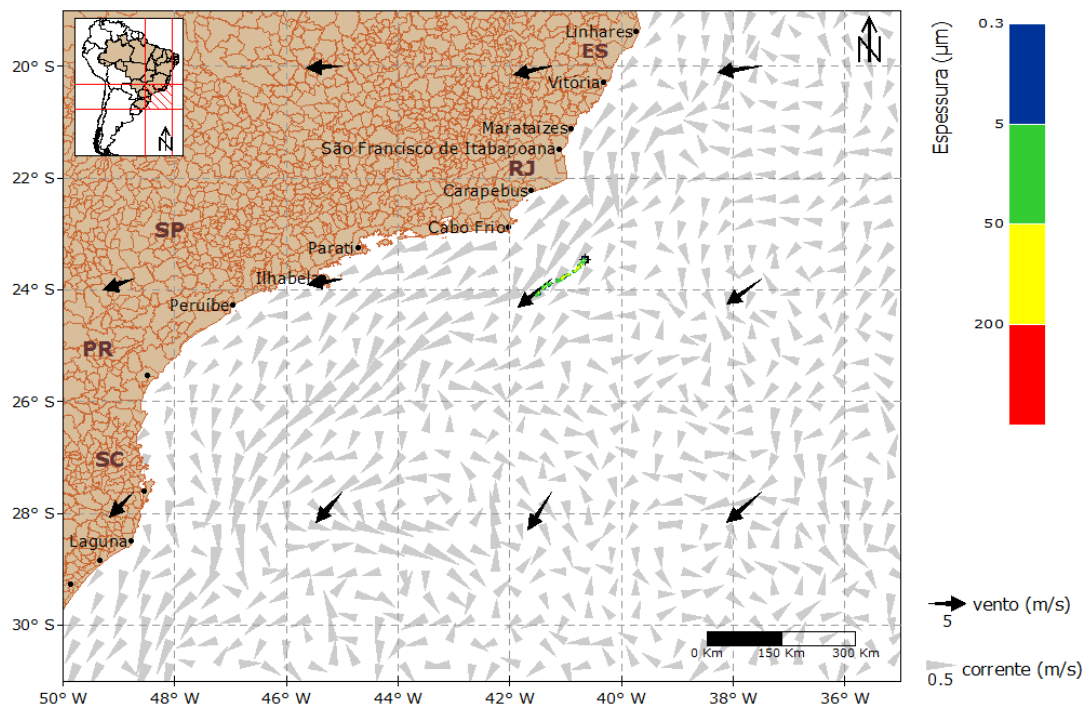


Figura 145: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Verão

168h

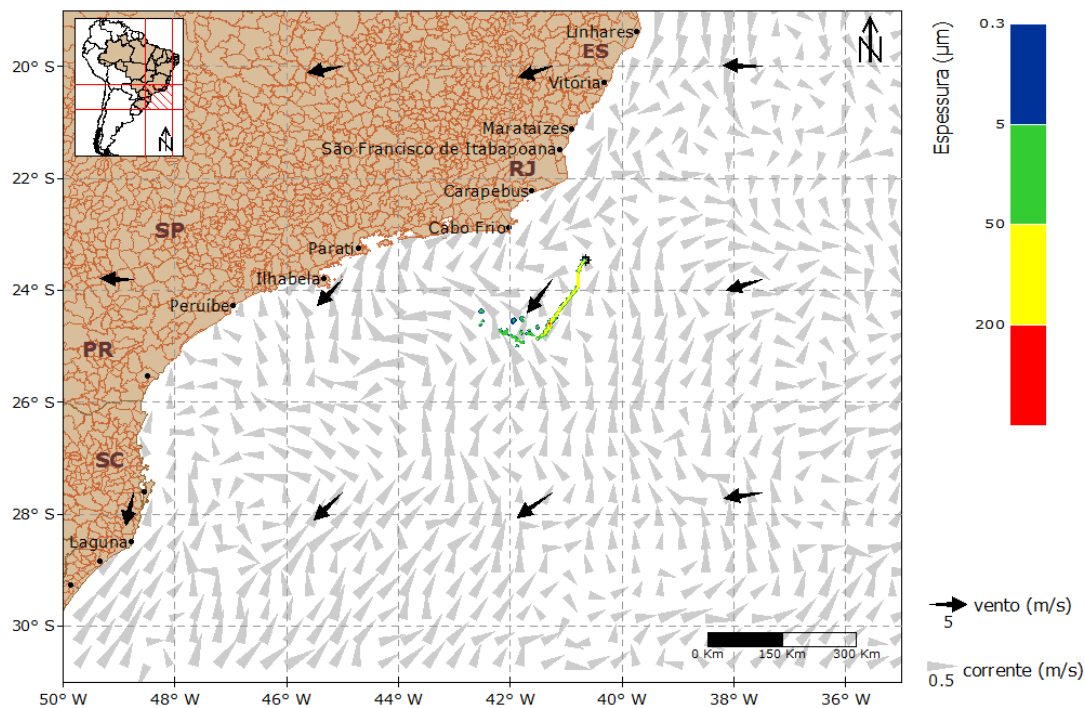


Figura 146: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Verão

336h

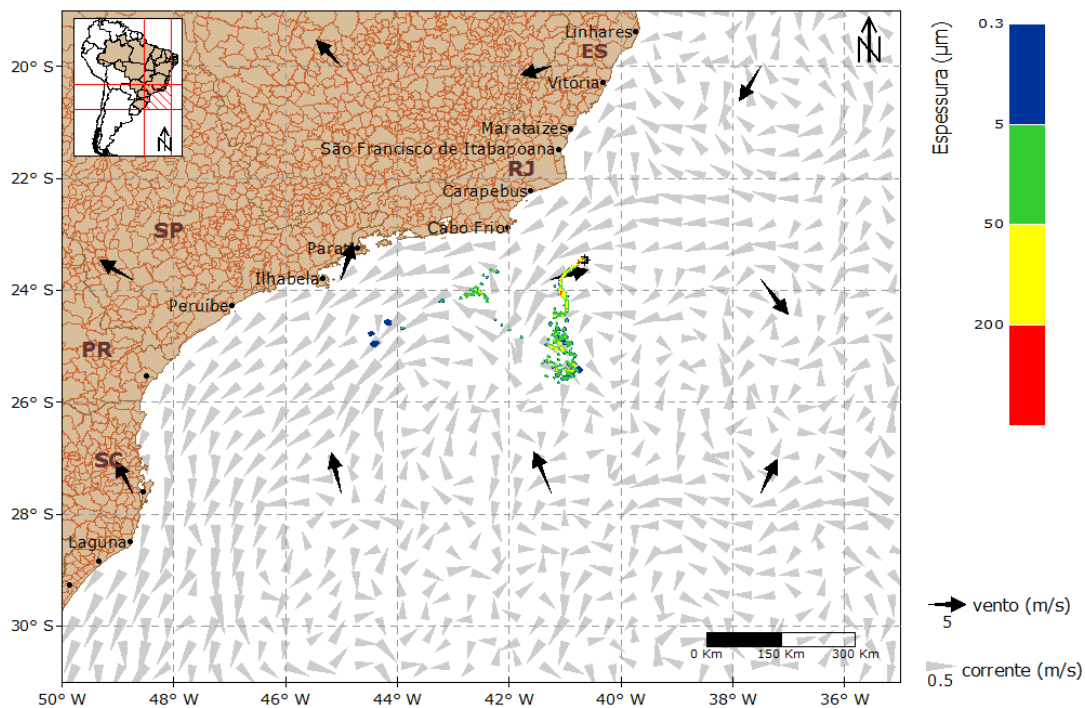


Figura 147: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Verão

504h

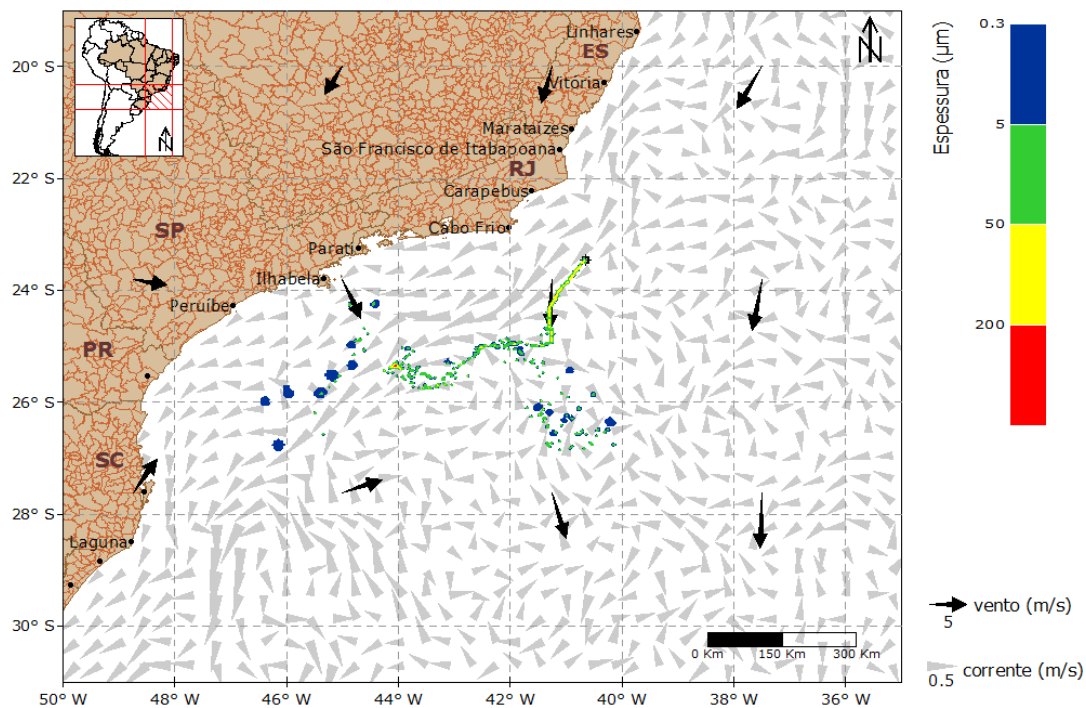


Figura 148: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.



**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Verão

672h

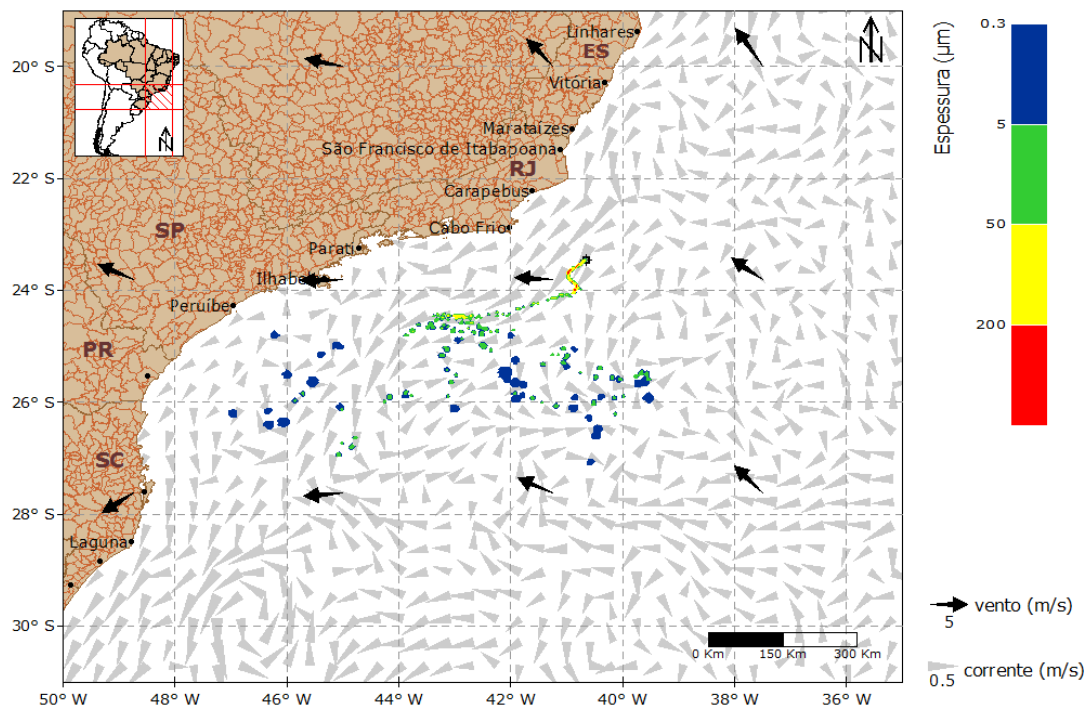


Figura 149: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Verão

720h

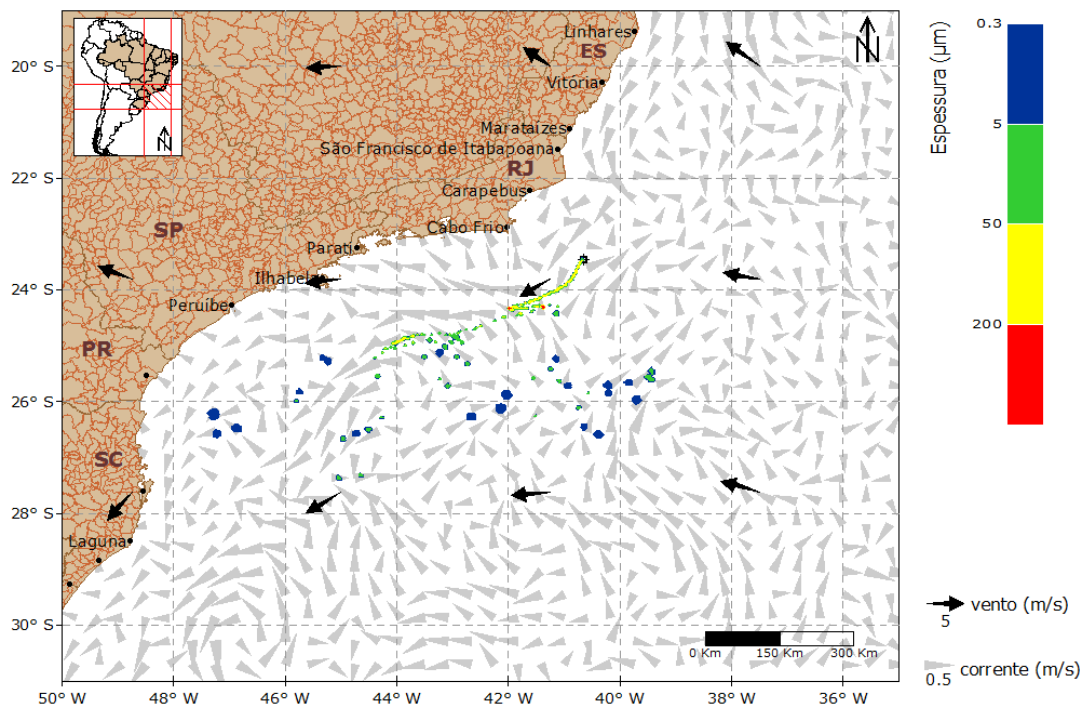


Figura 150: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Verão

1080h

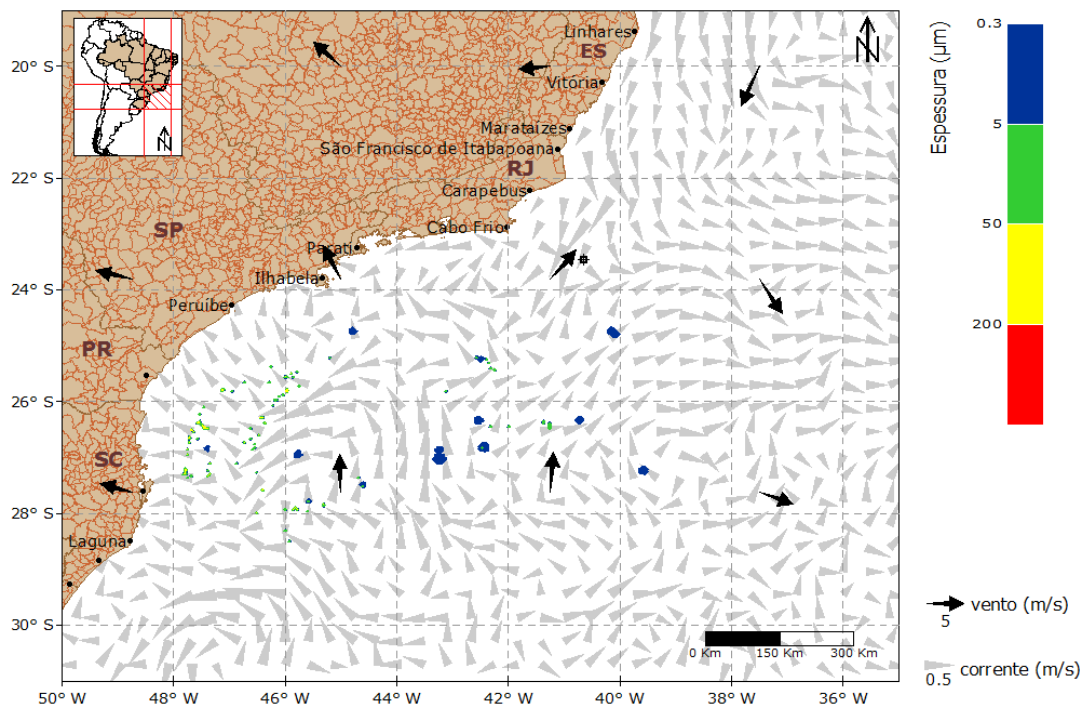


Figura 151: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Determinístico

Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Verão

1440h

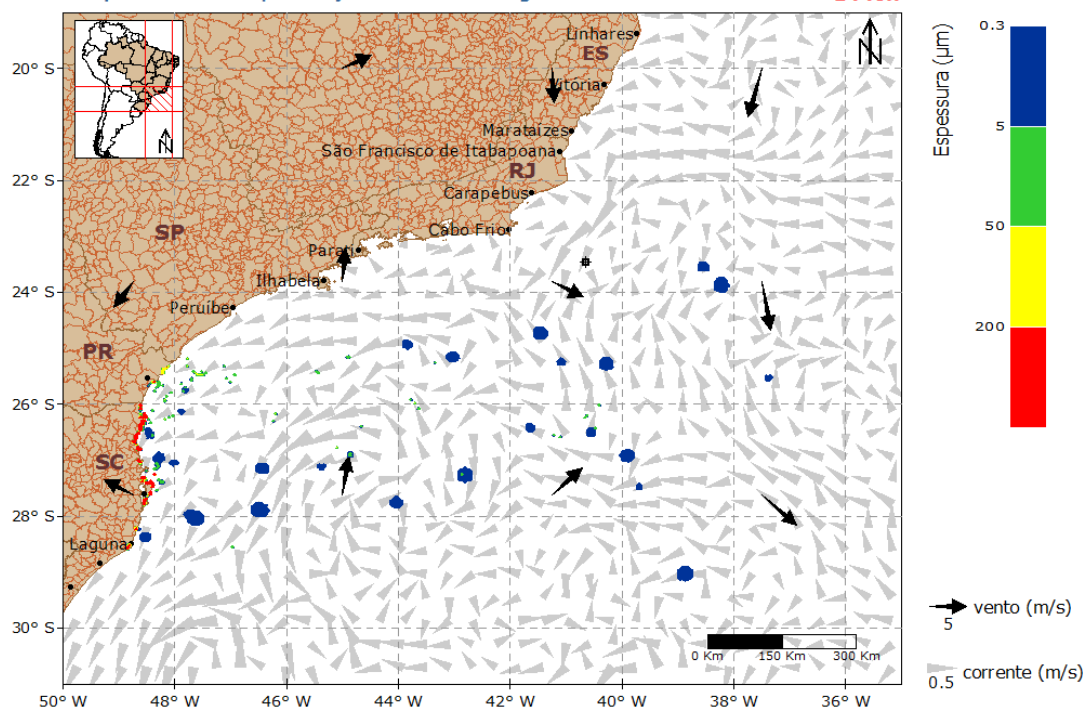


Figura 152: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

Inicialmente até 168 horas, o óleo derivou a sudoeste do ponto de vazamento sob a influência conjunta da Corrente do Brasil e dos ventos de primeiro quadrante. Com a evolução da simulação, a maior parte do óleo permaneceu derivando para sudoeste, sendo observada a presença de óleo na costa após 50 dias (1.200 horas) de simulação. As localidades com presença de óleo acumulado se estendeu de Guaraqueçaba-PR até Laguna-SC.

No gráfico (Figura 153), a seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo durante a simulação.

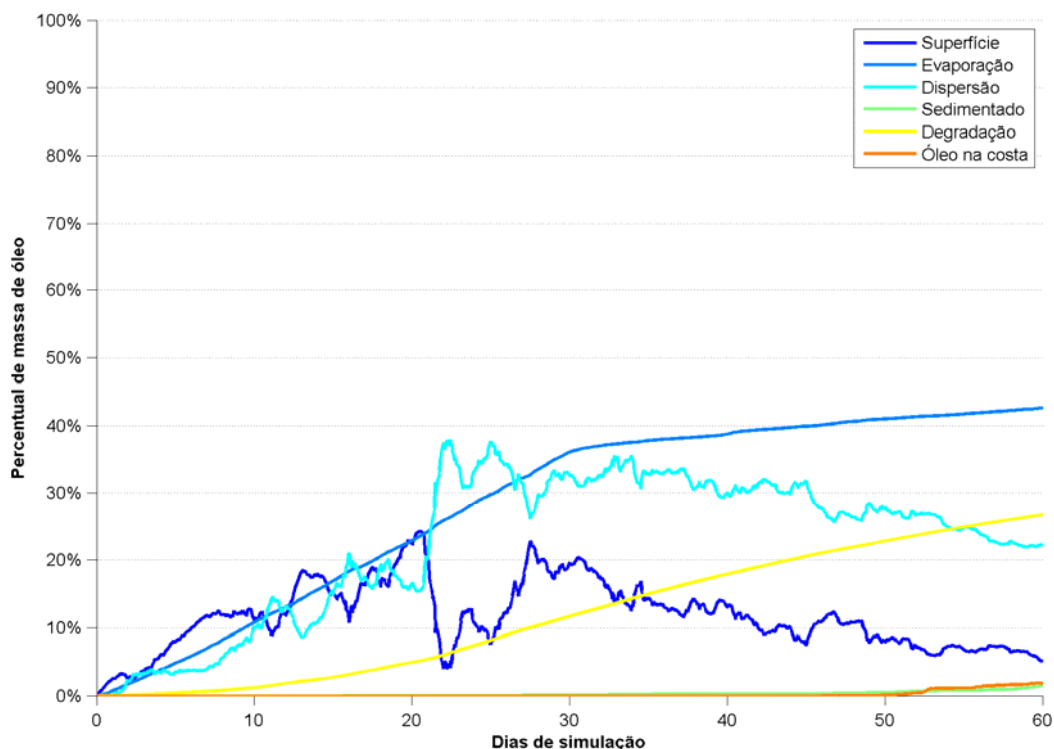


Figura 153: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteorológicas frequentes, no período de verão. Volume de 270.000 m<sup>3</sup>.

A retirada de massa de óleo por evaporação foi o processo mais efetivo ao longo da simulação removendo, aproximadamente, 42,6% da massa, enquanto a degradação representou 26,7% da perda de massa. A dispersão, isto é, o óleo que vai para a coluna d'água, retirou da superfície da água 22,2% ao final da simulação, enquanto o óleo sedimentado foi somente 1,5%. A massa de óleo acumulado na costa foi de 1,9% e houve 5,1% de óleo na superfície da água ao final da simulação.

#### 4.3.2.2.2. Inverno

A deriva do óleo em condições meteo-oceanográficas frequentes de inverno será apresentada da Figura 154 à Figura 163.

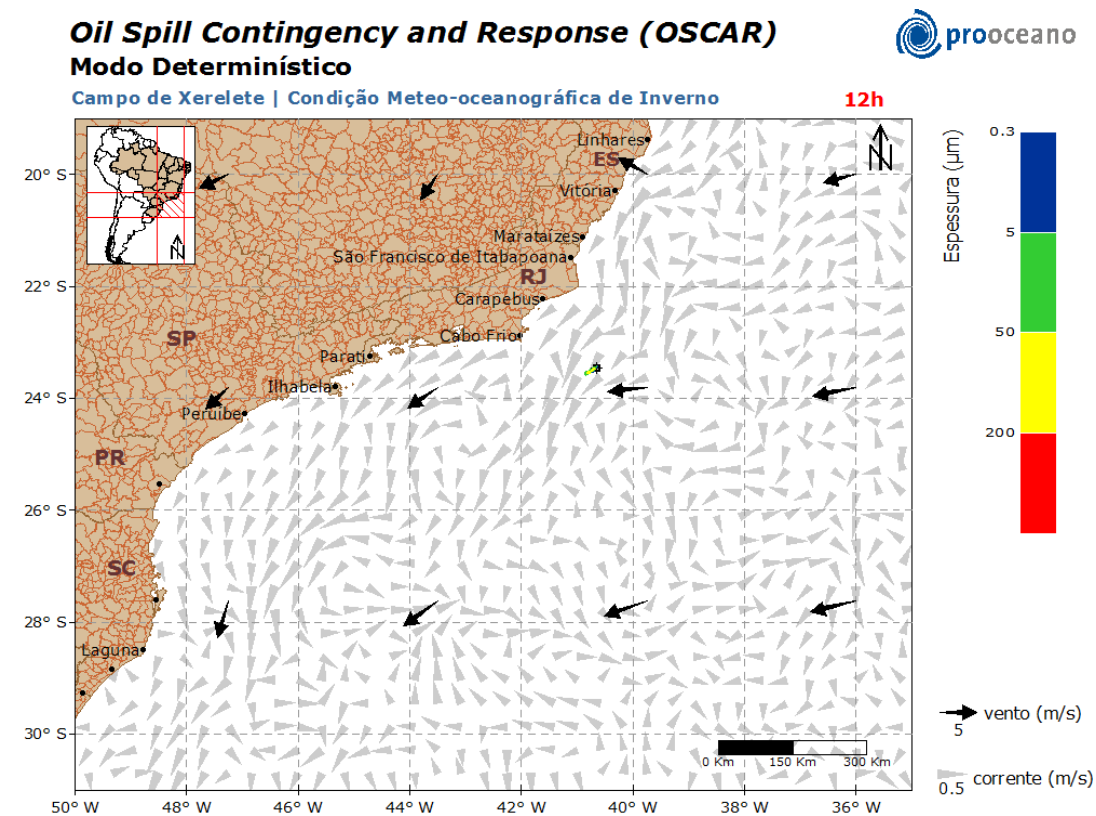


Figura 154: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Inverno

36h

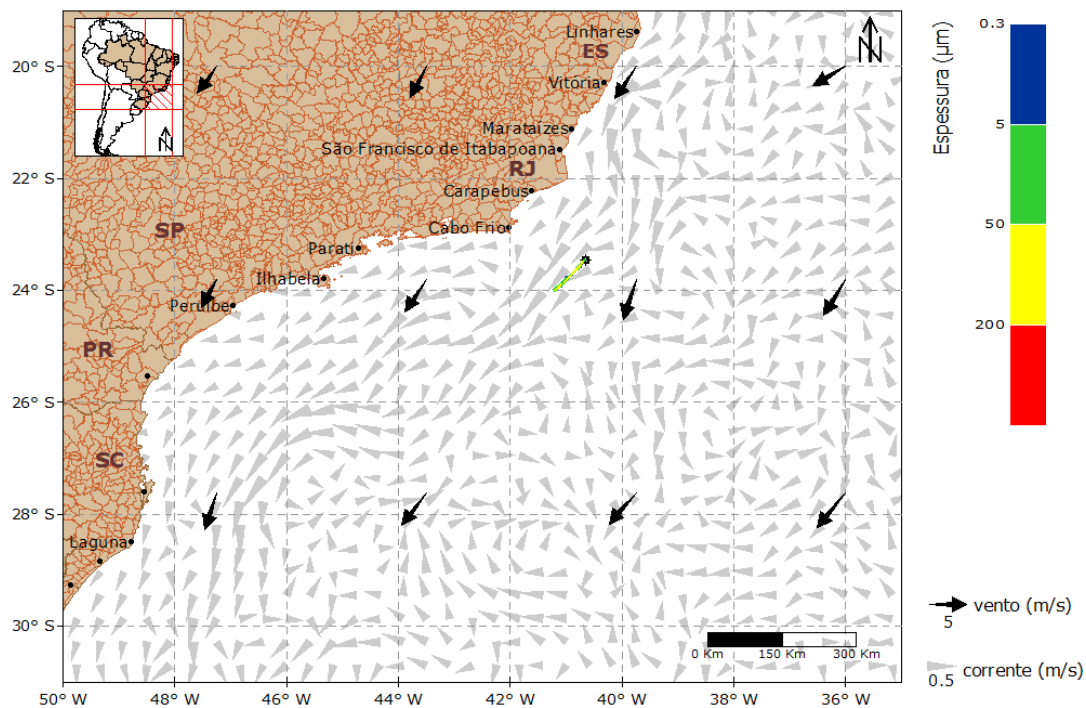


Figura 155: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Inverno

60h

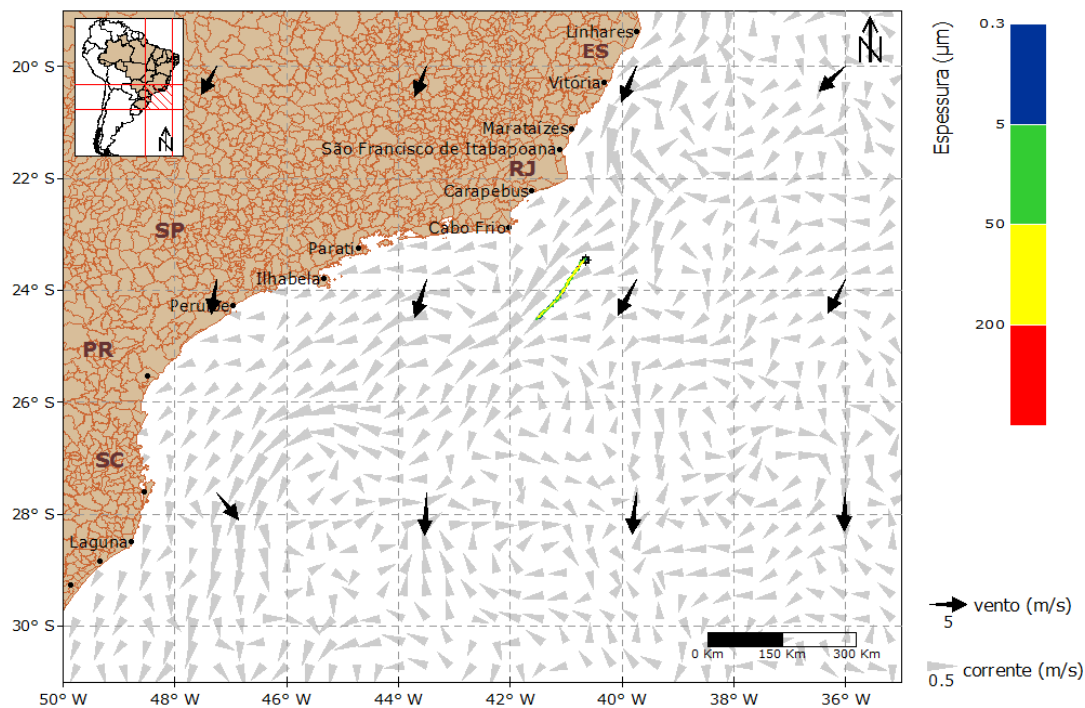


Figura 156: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.



**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Inverno

168h

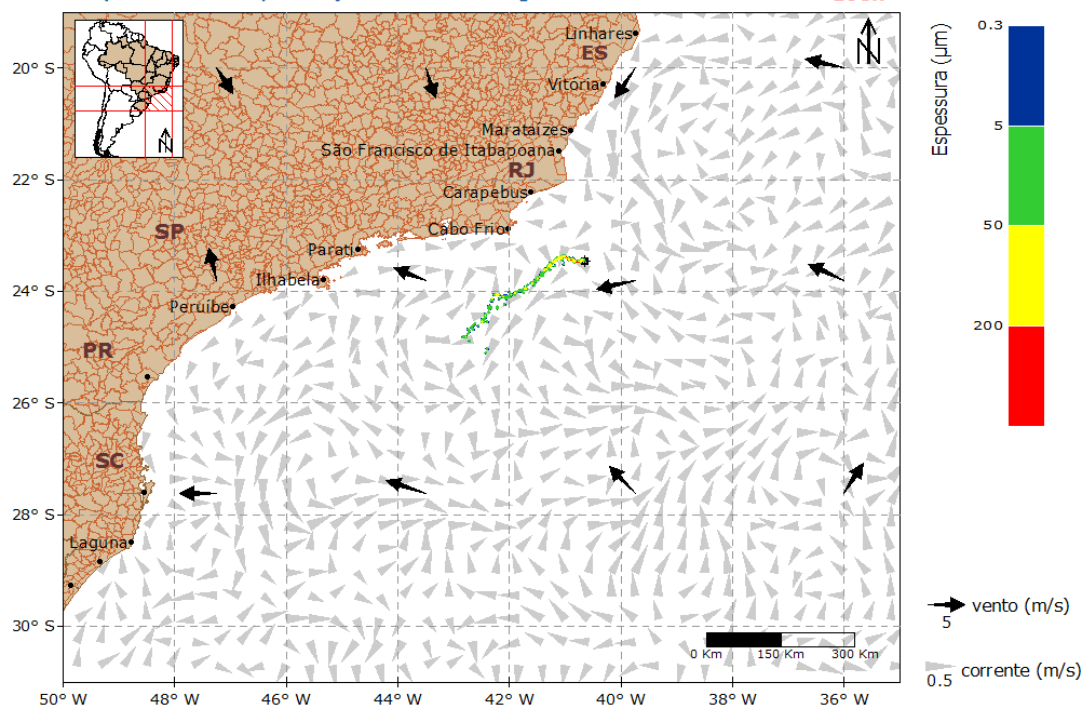


Figura 157: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Inverno

336h

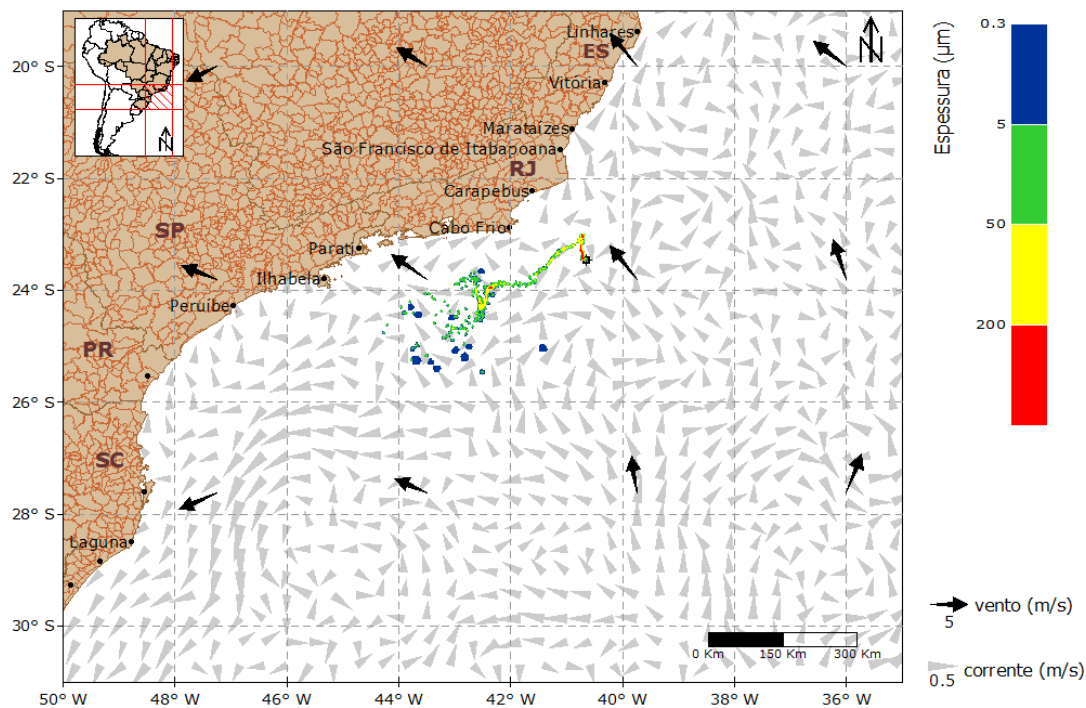


Figura 158: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Inverno

504h

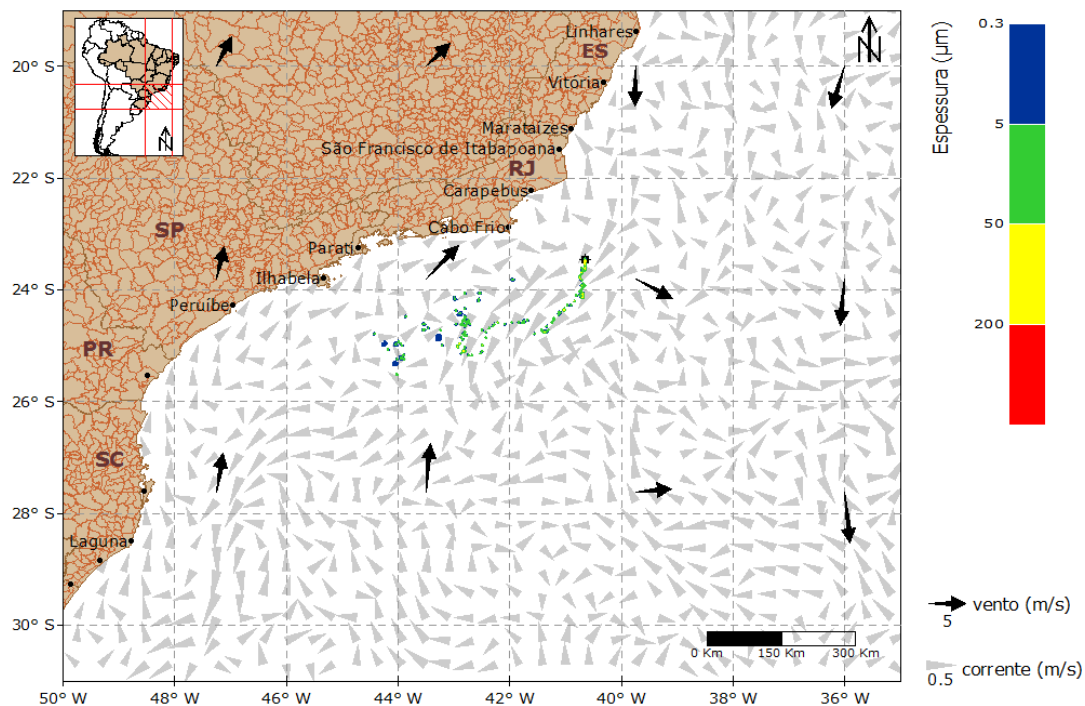


Figura 159: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Inverno

672h

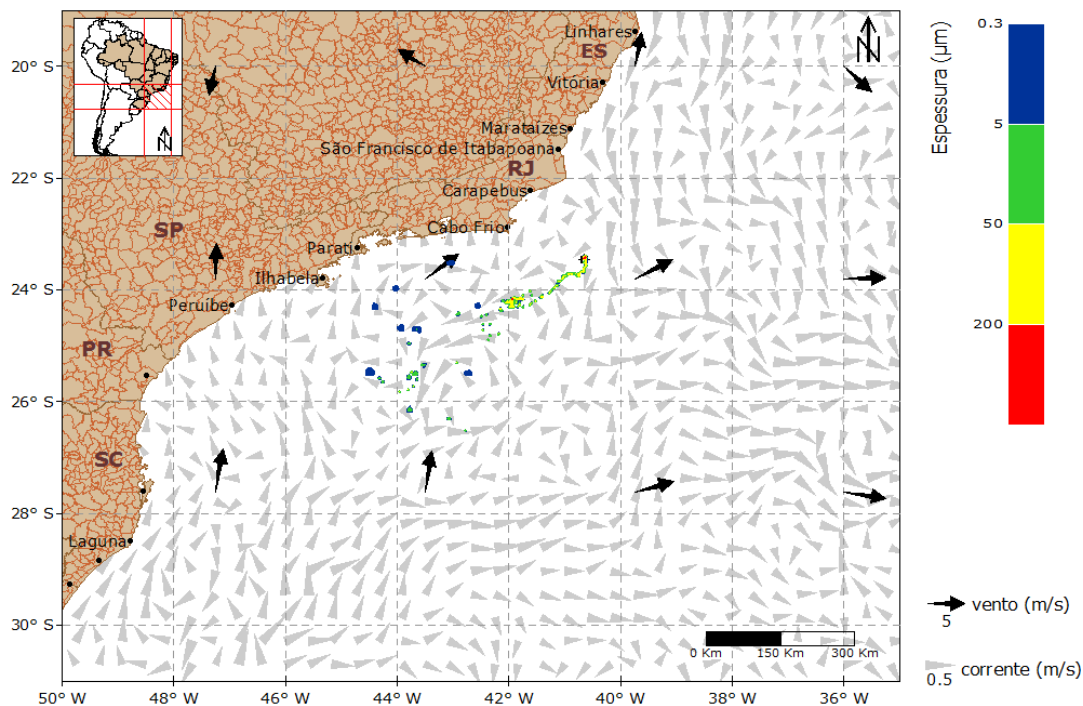


Figura 160: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Inverno

720h

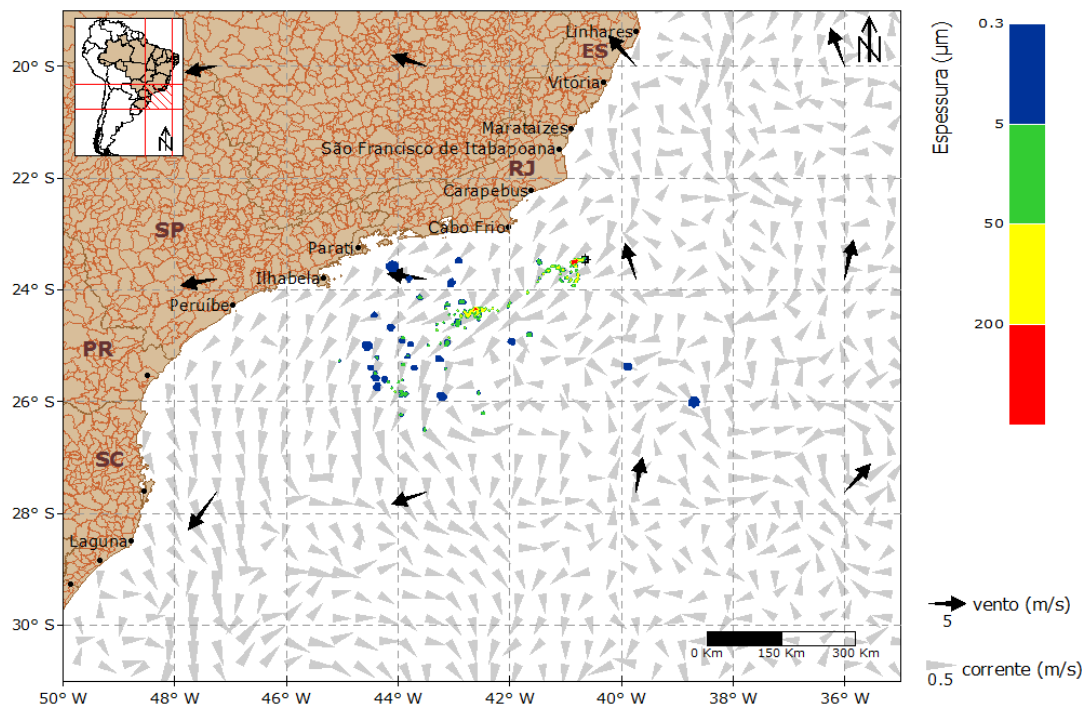


Figura 161: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**

**Modo Determinístico**

Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Inverno

1080h

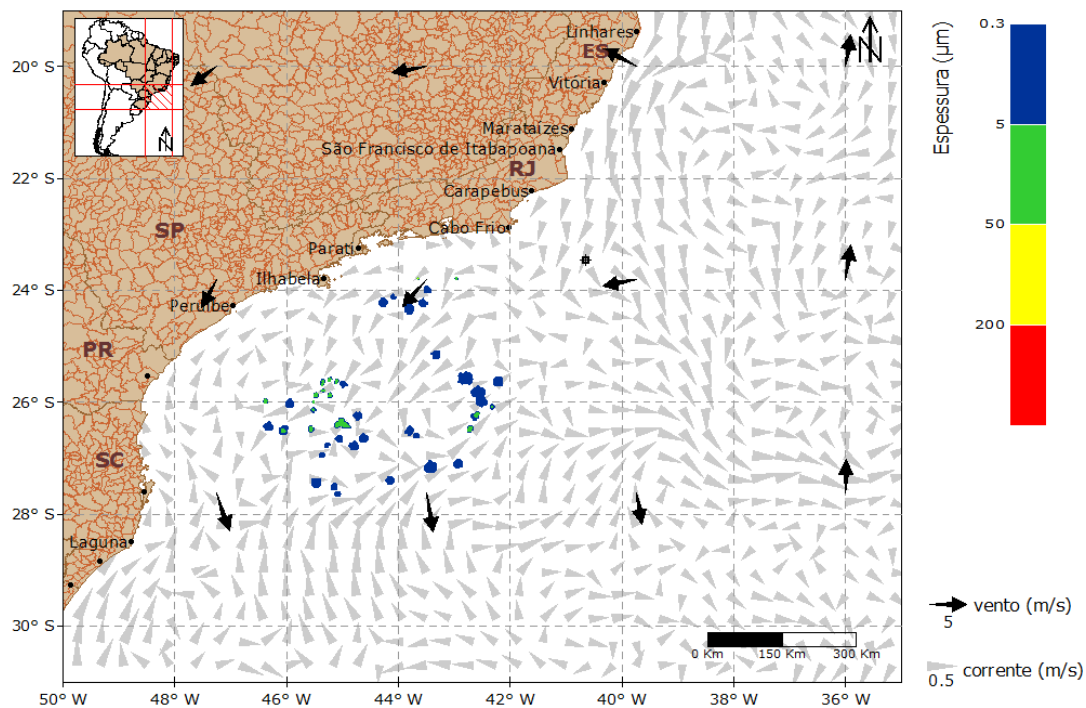


Figura 162: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Determinístico**



Campo de Xerelete | Condição Meteo-oceanográfica de Inverno

1440h

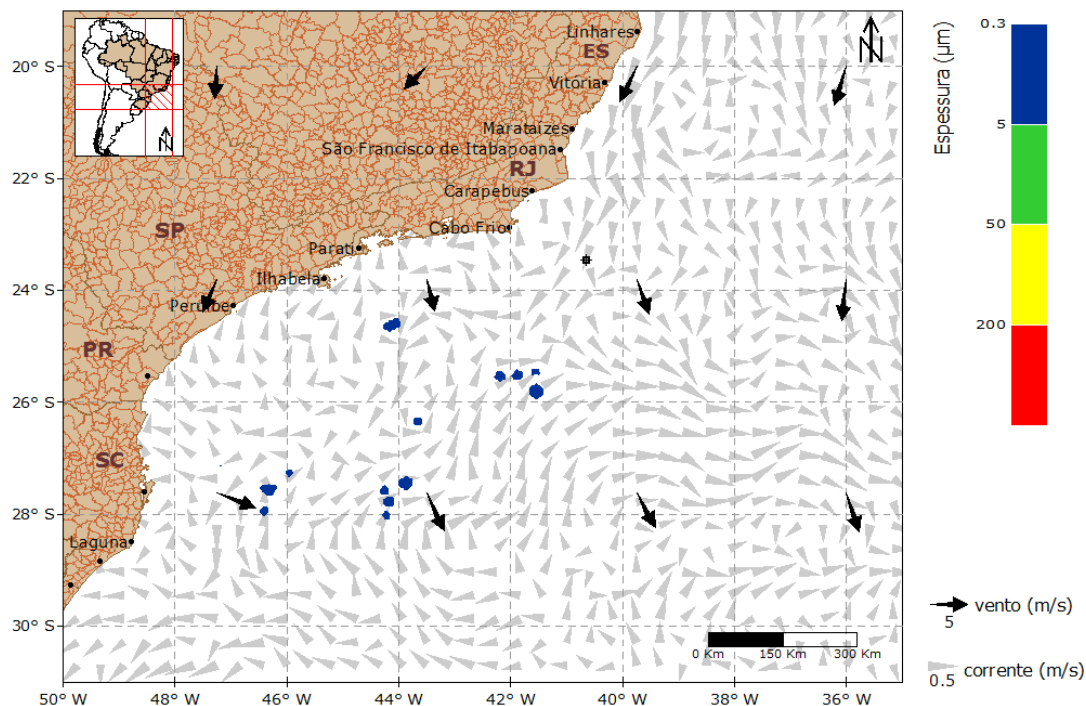


Figura 163: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 270.000 m<sup>3</sup>.

Como no verão, inicialmente o óleo derivou para sudoeste do ponto de vazamento e, posteriormente, se aproximou da costa sob a influência de ventos de componente meridional sul presentes nesse período. Com a evolução da simulação, o óleo permaneceu derivando para sudoeste principalmente sob a influência da Corrente do Brasil, entretanto sem ocorrer toque na costa. Ao final, em 1440 horas, a mancha de óleo se encontrava dividida em várias partes, entre 26° S e 28° S.

No gráfico (Figura 164), a seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo durante a simulação.

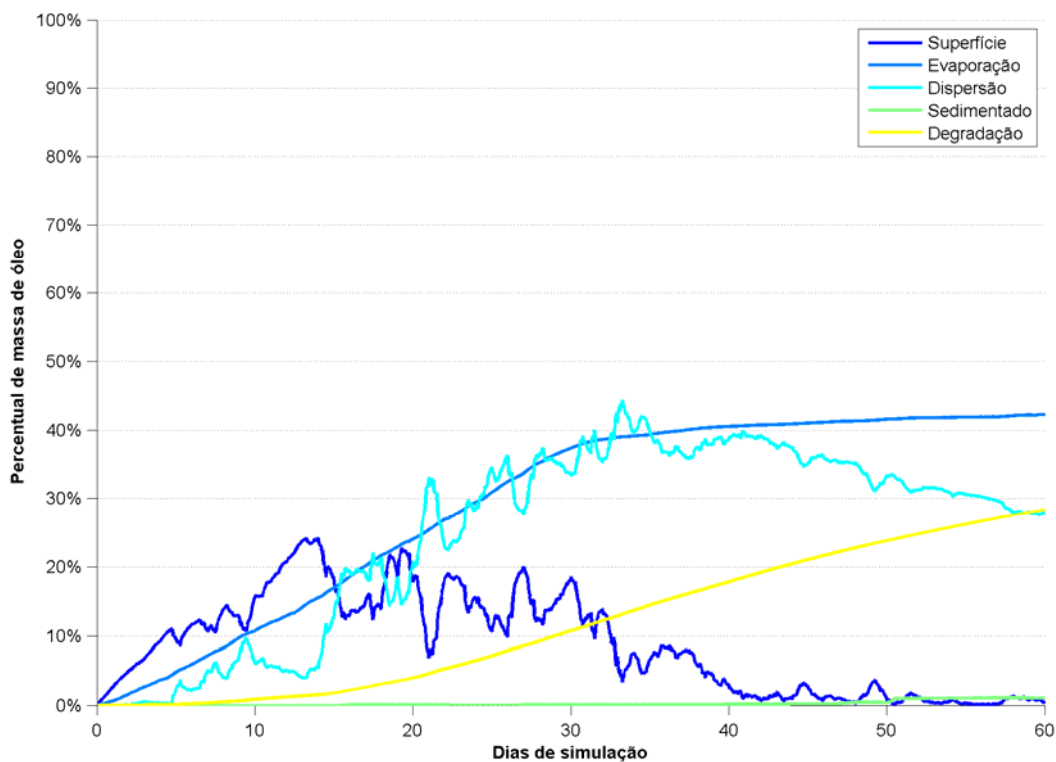


Figura 164: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de inverno. Volume de 270.000 m<sup>3</sup>.

Observa-se que a evaporação foi o processo mais atuante na retirada de massa da superfície da água, responsável por 42,3% da massa, seguido pela degradação, 28,4%. O óleo sedimentado representou 1% da retirada de óleo da superfície. Ao final da simulação, somente 0,5% na estava na superfície da água. O restante, isto é, 27,8% do total de óleo se encontrava na coluna d'água.



### 4.3.3. Resumo dos Resultados

De forma a auxiliar a análise dos resultados da modelagem de dispersão de óleo para o Campo de Xerelete, a seguir, na Tabela 36, são apresentados os principais resultados para o volume de *blowout* (270.000 m<sup>3</sup>).

Tabela 36: Resumo dos principais resultados obtidos na modelagem da dispersão de óleo no mar.  
Campo de Xerelete.

Resultados		VERÃO	Local (Município)	INVERNO	Local (Município)
Probabilístico	Maior Probabilidade de Presença de Óleo (%)	54,38	Ilhabela-SP	30,52	Arraial do Cabo-RJ
	Menor Tempo Mínimo de Chegada de Óleo (dias)	9,23	Rio de Janeiro-RJ	8,56	Maricá-RJ
	Maior Massa Máxima de Óleo na costa (t)	176,85	Ilhabela-SP	190,05	Rio de Janeiro-RJ
Determinístico	Massa de Óleo Acumulado na Costa (t) - Condição Meteo-oceanográfica frequente	~ 4.500	Guaraqueçaba-PR a Laguna-SC	-	-
	Massa de Óleo Acumulado na Costa (t) - Condição Crítica	-	-	~ 6.633	Aracruz-ES a Paraty-RJ

## 4.4. Conclusão

As simulações probabilísticas mostraram comportamentos semelhantes, devido, principalmente, às características ambientais serem pouco distintas. Entretanto, nas simulações probabilísticas de verão, a deriva do óleo se estendeu mais ao sudoeste, enquanto no inverno houve áreas mais a norte do ponto de vazamento devido à incidência de ventos sul nesta condição sazonal.

Somente no volume de *blowout* (270.000 m<sup>3</sup>), em ambas as condições sazonais, houve probabilidade do óleo atingir a costa. As localidades na costa que podem ser atingidas pelo óleo se estendem de São Vitória do Palmar (RS) até Aracruz (ES), abrangendo ao todo seis (6) estados. De uma forma geral, os estados de São Paulo e Santa Catarina apresentaram maior probabilidade de presença de óleo na costa no cenário de verão, enquanto no cenário de inverno foram os estados do Rio de Janeiro e São Paulo.

A maior probabilidade de toque na costa no cenário de verão foi de 54,38%, enquanto no inverno o maior valor foi de 30,52%. No município de Ilhabela (SP) foi registrado o maior valor de massa de óleo na costa, no período de verão. Para o período de inverno, o município do Rio de Janeiro-RJ apresentou maior massa acumulada, aproximadamente 190 toneladas. Com relação ao tempo mínimo de chegada de óleo na costa, os cenários apresentou a diferença de 16 horas no menor valor. No verão o menor valor foi de 9,23 dias (~222 horas) após o vazamento, enquanto no inverno, foi de 8,56 dias (~206 horas).

Com base nos resultados do modo probabilístico, foi definido o cenário crítico para a ocorrência de um vazamento de *blowout* para ambas as locações. O critério escolhido para definição do cenário foi o tempo mínimo de chegada do óleo na costa.

Na trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes de verão, o toque de óleo na costa ocorreu após 50 dias de simulação. Na trajetória de inverno em condições meteo-oceanográficas frequentes o óleo não houve presença de óleo na costa.

Os resultados obtidos em relação ao intemperismo do óleo usado mostraram que a evaporação foi o processo mais efetivo na retirada de massa de óleo, variando entre 41,7 e 42,6%. A degradação e a sedimentação também representaram processos importantes na retirada de óleo da superfície. O percentual de óleo na coluna d'água oscilou entre 19,3% e 27,8%, enquanto o óleo na superfície não ultrapassou 5,1% ao final das simulações.

## 4.5. Bibliografia

- CAMPOS, R. M. Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados a ciclones extratropicais no Atlântico Sul, RJ. 2009. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ.
- DELVIGNE G.A.L.; SWEENEY C.E.. Natural dispersion of Oil. Oil & Chemical Pollution 4 (1988) 281-310.
- ELLIOTT A.J. A probabilistic description of the wind over Liverpool Bay with application to oil spill simulations Estuarine, Coastal and Shelf Science 61 (2004) 569–581.
- ELPN/IBAMA. Informação Técnica nº 023/2002. Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar.
- GUO, W. J.; WANG, Y. X.; XIE, M. X.; CUI, Y. J. Modeling oil spill trajectory in coastal waters based on fractional Brownian motion. Marine Pollution Bulletin, v. 58, p. 1339-1346, 2009.
- HOULT, D. P. Oil spreading on the sea. Annual Review of Fluid Mechanics, p. 341-367, 1972.
- JOHANSEN, Ø. 2000. DeepBlow – A Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts. Spill Science & Technology Bulletin. Vol. 6, No. 2: 103 – 111.
- KALNAY, E, M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, M. CHELLIAH, W. EBISUZAK, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K.C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, A. LEETMAA, R. REYNOLDS, R. JENNE, D. JOSEPH, 1996: "The NCEP /NCAR 40-Year Reanalysis Project", Bulletin of the American Meteorological Society, 437-470.
- KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.; HNILO, J.J.; FIORINO, M. & POTTER, G.L., 2002. "The NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)". Bulletin of the American Meteorological Society, 1631-1643.
- KISTLER, R.; KALNAY, E; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; KANAMITSU, M.; KOUSKY, V.; DOOL, H.; JENNE, R. & FIORINO, 2001. "The NCEP-NCAR 50 Year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation." Bulletin of the American Meteorological Society, 82, 247-267.
- MACKAY, D., I. BUIST, R. MASCARENHAS & S. PATERSON. 1980. Oil Spill Processes and Models. Environmental Protection Service. Canada. Report EE-8.
- OSPAR COMISSION. 2010. North Sea Manual on Maritime Oil Pollution Offences. ISBN 978-1-906840-45-7. Publication Number: 405/2009. 87 pp.

- REED, M. 2001. Technical Description and Verification Tests of OSCAR 2000, a Multi-Component 3-Dimensional Oil Spill Contingency And Response Model. SINTEF Report. 52p.
- REED, M., AAMO, O. M., DOWNING, K..1996. Calibration and Testing of IKU's Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Model System. Proceedings of the 1996 Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, pp.689-726.
- REED, M.; DALING, P.; LEWIS, A.; DITLEVSEN, M. K.; BRØRS, B.; CLARK, J.; AURAND, D. 2004. Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters. Environmental Modelling & Software, v. 19, p. 681-690.
- REED, M.; JOHANSEN, Ø.; BRANDVIK, P. J.; DALING, P.; LEWIS, A.; FIOCCO, R.; MACKAY, D.; PRENTKI, R. 1999. Oil Spill Modelling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. Spill Science and Technology Bulletin, 5 (1): pp 3-16.
- REED, M.; TURNER, C.; ODULO, A. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 1, Issue 2, pp 143-15, 1994.
- SEBASTIÃO, P.; SOARES, C. G. 1995. Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. Spill Science and Technology Bulletin, 2 (2): pp 121-131.
- SMITH, W. H. F.; SANDWELL, D. T. 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. Science, v. 277, p. 1957-1962.
- WANG, S.D.; SHEN, Y. M; ZHENG, Y. H. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. Ocean Engineering, v.32, p. 1556-1571, 2005.