



RELATÓRIO TÉCNICO [REV. 02]
MODELAGEM DE TRANSPORTE DE ÓLEO
(FPSO) Blocos BM-C-39-40-41-42-43

Preparado para:
OGX

Preparado por:
Anna Paula Fagundes
Jéssica dos Santos de Carvalho
Leandro Calil
Leonardo Marques da Cruz

Revisado por:
Júlio Augusto de Castro Pellegrini

29 de Junho de 2010

PROOCEANO

AV. RIO BRANCO, 311 / 1224 CENTRO
CEP 20.0040-009 RIO DE JANEIRO RJ
TEL | FAX +55 21 2532-5666
WWW.PROOCEANO.COM.BR

RELATÓRIO TÉCNICO [REV.02]

MODELAGEM DE TRANSPORTE DE ÓLEO (FPSO)
Blocos BM-C-39-40-41-42-43

Preparado para:
OGX

Preparado por:
Anna Paula Fagundes
Jéssica de Carvalho
Leandro Calil
Leonardo Marques da Cruz

Revisado por:
Júlio Augusto de Castro Pellegrini

29 de Junho de 2010

ÍNDICE:

Lista de Figuras.....	4
Lista de Tabelas	7
I... INTRODUÇÃO.....	8
II. . METODOLOGIA.....	8
II.1. Modelagem Hidrodinâmica.....	8
II.1.1. Descrição do Modelo	9
II.1.2. Equações Governantes	12
II.1.3. Características da Simulação	15
II.2. Modelo de transporte e dispersão de poluentes.....	25
II.2.1. Modo Determinístico	26
II.2.2. Modo Probabilístico	33
III. CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO	36
IV. FORÇANTES.....	37
IV.1. Variabilidade Ambiental.....	42
V... RESULTADOS	44
V.1.1. Modo Probabilístico	45
V.1.2. Modo Determinístico	67
V.2. Balanços de Massa (ou Processos do Intemperismo).....	88
VI. CONCLUSÃO	92
VII. BIBLIOGRAFIA.....	93

Lista de Figuras

Figura 1: Localização dos blocos (BM-C-39-40-41-42-43) e o local do vazamento (FPSO).....	8
Figura 2: 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	10
Figura 3: Seção meridional do hycom na longitude de 25oW, 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	10
Figura 4: Trajetórias dos derivadores i12 e i13, lançados no Projeto MoncoCorcovado (mondocorcovado.prooceano.com.br).	11
Figura 5: Espectro da velocidade de corrente.	12
Figura 6: Resultado das simulações do HYCOM para a área de interesse, no dia 1º de janeiro (verão) de 2007.	16
Figura 7: Resultado das simulações do HYCOM para a área de interesse, no dia 1º de julho (inverno) de 2007. Destaque em vermelho para a região da confluência Brasil-Malvinas.	17
Figura 8: Trajetórias dos derivadores do Projeto MONDO e simuladas com a utilização dos resultados do HYCOM para o mesmo período. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008.	19
Figura 9: Mapa de Probabilidade de presença dos derivadores lançados no Projeto MONDO. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008.	20
Figura 10: Mapa de Probabilidade de presença dos derivadores virtuais, simulados com os resultados do HYCOM. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008.	21
Figura 11: Mapas de Probabilidade de presença de derivadores. MONDO (contornos) e HYCOM (sombreado).	22
Figura 12: Campo de correntes obtido do AVISO (vermelho) e do HYCOM (azul), para o dia 10 de outubro de 2007.	23
Figura 13: Campo de correntes obtido do AVISO (vermelho) e do HYCOM (azul), para o dia 4 de novembro de 2007.....	24
Figura 14: Limite norte da isoterma de 20° C.....	25
Figura 15: Representação esquemática da separação sazonal dos dados para a modelagem probabilística.	34
Figura 16: Representação esquemática da combinação dos dados de vento e corrente para a simulação probabilística.	34
Figura 17: Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença de constituinte no STROLL	36
Figura 18: Rosa dos ventos nos meses de janeiro a junho na região dos Blocos BM-C-39 a 43.....	40
Figura 19: Rosa dos ventos nos meses de julho a dezembro na região dos Blocos BM-C-39 a 43.....	41
Figura 20: Séries temporais das componentes “u” e “v”, do vento, para a região dos blocos BM-C-39 a 43, com o número de zeros ascendentes presentes nas séries.	43
Figura 21: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 8 m ³ , no cenário de verão.	46
Figura 22: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 8 m ³ , no cenário de verão.	47

Figura 23: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 8 m ³ , no cenário de inverno.	48
Figura 24: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 8 m ³ , no cenário de inverno.	49
Figura 25: Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo, para vazamento de 200 m ³ , no cenário de verão.	50
Figura 26: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m ³ , no cenário de verão.	51
Figura 27: Volume máximo de óleo na costa no cenário de verão, vazamento de 200m ³	52
Figura 28: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m ³ , no cenário de inverno.	53
Figura 29: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m ³ , no cenário de inverno.	54
Figura 30: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento instantâneo de pior caso, no cenário de verão.	57
Figura 31: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para um vazamento instantâneo de pior caso, no cenário de verão.	58
Figura 32: Volume máximo de óleo na costa no cenário de verão, vazamento de pior caso.	59
Figura 33: Histogramas de tempo de chegada de óleo na costa no cenário de verão. A escala a direita é de probabilidade.	60
Figura 34: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento instantâneo de pior caso, no cenário de inverno.	61
Figura 35: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.	62
Figura 36: Volume máximo de óleo na costa no cenário de inverno, vazamento de pior caso.	63
Figura 37: Histogramas de tempo de chegada de óleo na costa no cenário de inverno. A escala à direita é de probabilidade.	64
Figura 38: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.	67
Figura 39: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.	68
Figura 40: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.	68
Figura 41: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 127 horas de simulação.	69
Figura 42: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação.	69
Figura 43: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação.	70
Figura 44: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação.	70
Figura 45: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 732 horas de simulação.	71
Figura 46: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória crítica no cenário de verão. .	71

Figura 47: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 12 horas de simulação.	72
Figura 48: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 36 horas de simulação.	73
Figura 49: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 60 horas de simulação.	74
Figura 50: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 1 semana (7 dias) de simulação.	75
Figura 51: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 2 semanas (14 dias) de simulação.	76
Figura 52: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 3 semanas (21 dias) de simulação.	77
Figura 53: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 4 semanas (28 dias) de simulação.	78
Figura 54: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 732 horas.	79
Figura 55: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.	80
Figura 56: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.	81
Figura 57: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.	82
Figura 58: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 1 semana (7 dias) de simulação.	83
Figura 59: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação.	84
Figura 60: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação.	85
Figura 61: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação.	86
Figura 62: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 732 horas de simulação.	87
Figura 63: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória de condições meteo-oceanográficas freqüentes, no cenário de inverno.	88
Figura 64: Evolução Temporal do Balanço de Massa ao longo da Simulação.	88
Figura 65: Balanço de Massa, após 12 horas de simulação.	89
Figura 66: Balanço de Massa, após 24 horas de simulação.	90
Figura 67: Balanço de Massa, após 48 horas de simulação.	90
Figura 68: Balanço de Massa, após 96 horas de simulação.	91
Figura 69: Balanço de Massa, após 732 horas de simulação.	91

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características do óleo utilizadas na simulação.	37
Tabela 2: Local do Vazamento.	37
Tabela 3: Ordem de apresentação dos resultados.	45
Tabela 4: Volume máximo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de 200 m ³ nos cenários de verão e inverno.	55
Tabela 5: Volume máximo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento de pior caso, nos cenários de verão e inverno.	65

I. INTRODUÇÃO

O estudo descreve os resultados obtidos na modelagem numérica do transporte de óleo no mar para um ponto de vazamento localizado na posição prevista para o FPSO OSX1, Bacia de Campos, costa sudeste do litoral brasileiro (Figura 1).

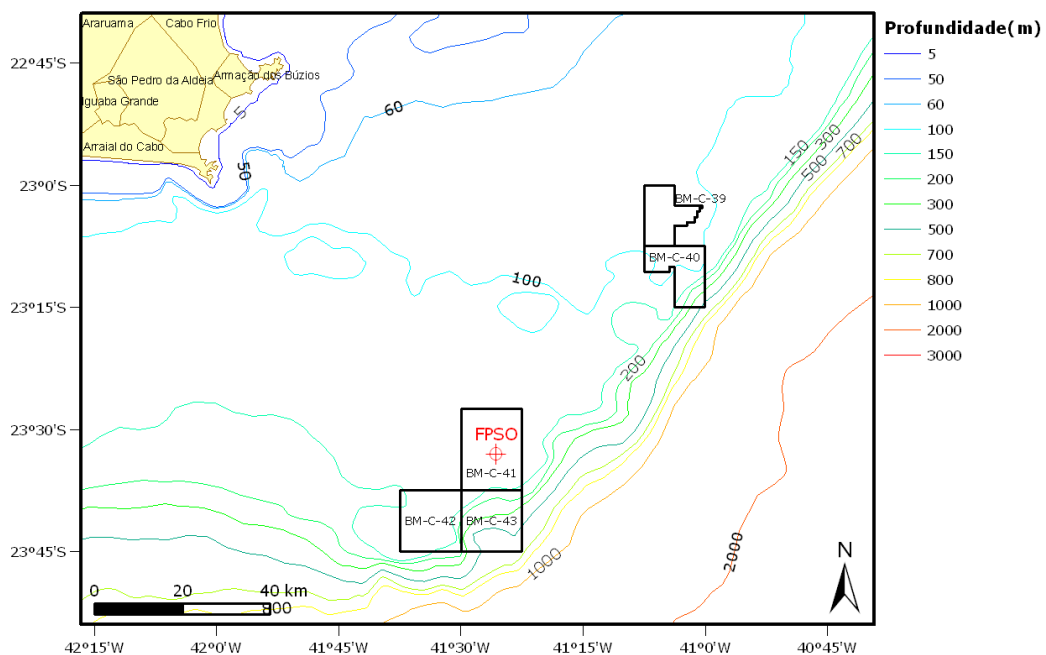


Figura 1: Localização dos blocos (BM-C-39-40-41-42-43) e o local do vazamento (FPSO).

Para contextualizar a questão, a metodologia aplicada para a realização das simulações, os modelos numéricos e os dados físicos usados serão também descritos.

II. METODOLOGIA

II.1. Modelagem Hidrodinâmica

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 iniciais e de contorno, 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.

Esse capítulo apresenta a descrição da simulação hidrodinâmica realizada com o modelo HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model), utilizada como forçante no modelo de transporte de óleo.

II.1.1. Descrição do Modelo

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 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). Desta forma, o HYCOM é basicamente um modelo em camadas isopicnais, 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 2 e Figura 3 ilustram a estrutura híbrida do modelo.

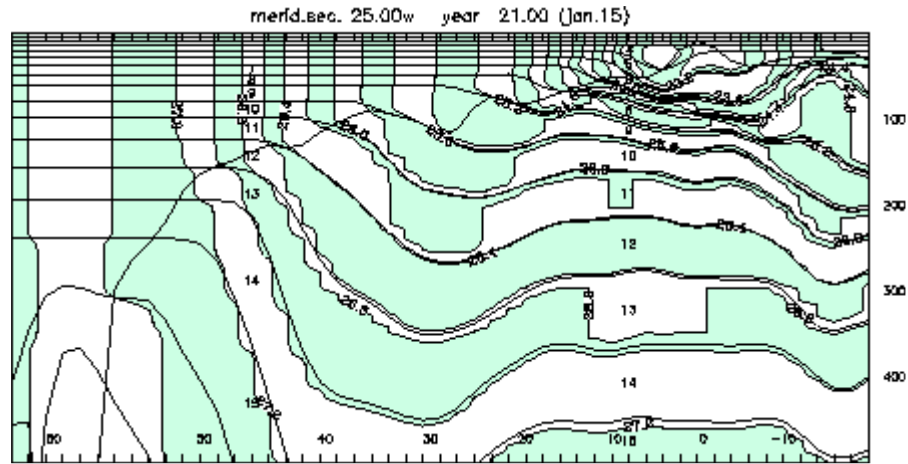


Figura 2: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html>

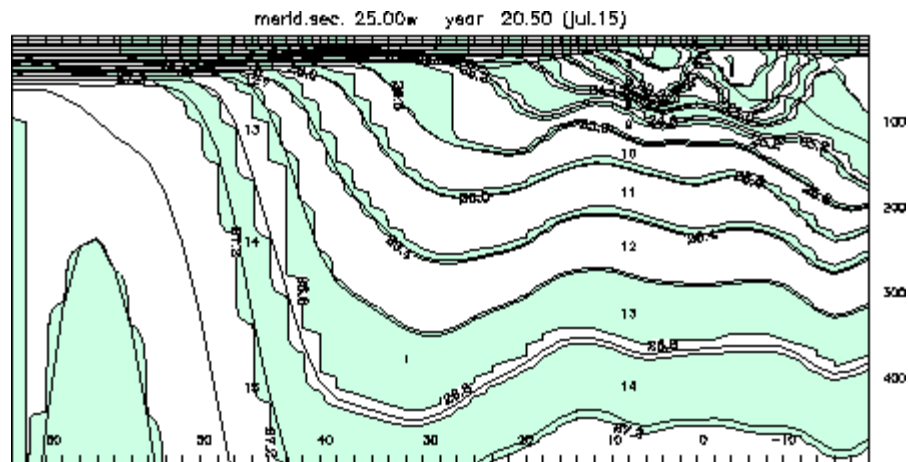


Figura 3: Seção meridional do hycom na longitude de 25oW, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html>

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 4. Ao realizar o espectro de energia das velocidades (utilizando apenas a parte das trajetórias onde os derivadores já encontram-se sobre a plataforma - Figura 5), 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 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.



Figura 4: Trajetórias dos derivadores i12 e i13, lançados no Projeto MoncoCorcovado (mondocorcovado.prooceano.com.br).

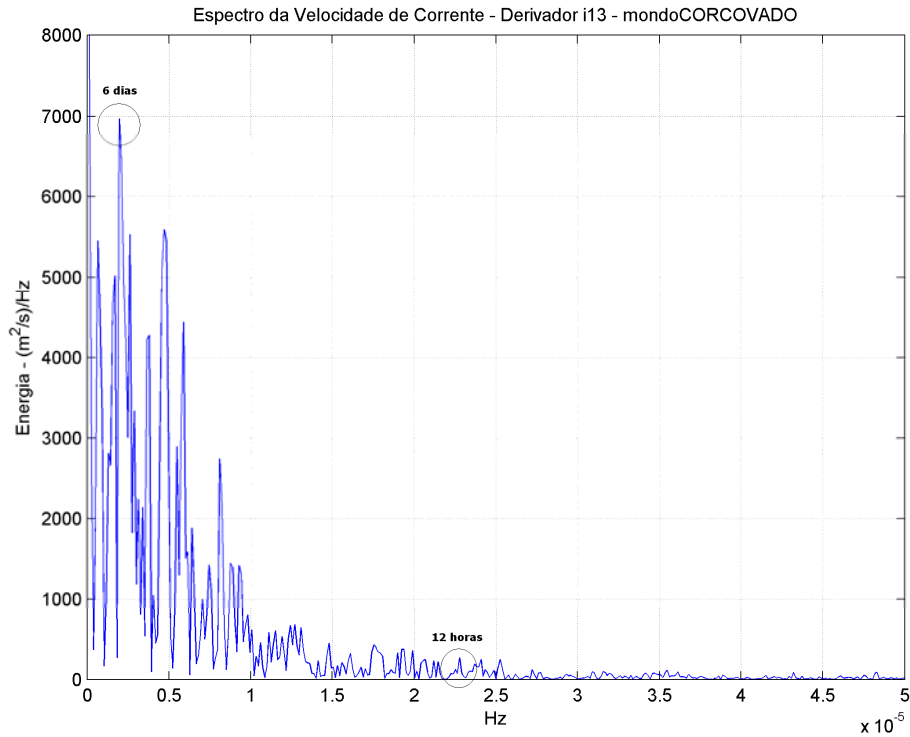


Figura 5: Espectro da velocidade de corrente.

II.1.2. 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):

$$\frac{\Delta v}{\Delta t_s} + \nabla_s \frac{v^2}{2} + (\zeta + f)k \times v + \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) \frac{\partial v}{\partial p} + \nabla_s M - p \nabla_s \alpha \quad (\text{II.1-1})$$

$$= -g \frac{\partial \tau}{\partial p} + \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)^{-1} \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s v \right) \quad (\text{II.1-2})$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right) + \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) = 0 \quad (\text{II.1-3})$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) = \nabla_s \cdot \left(v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s \theta \right) + H_\theta \quad (\text{II.1-4})$$

Onde $v=(u, v)$ é o vetor velocidade horizontal, P é a pressão, θ representa as variáveis termodinâmicas, α é o volume específico potencial, ζ é a vorticidade relativa, M é o potencial de Montgomery, f é o parâmetro de Coriolis, k é o vetor vertical unitário, ν é o coeficiente variável de viscosidade/difusividade, τ é o vetor de estresse de cisalhamento induzido pelo vento ou pelo fundo e H_θ representa o somatório dos termos fonte diabáticos, incluindo a mistura diapical, que atua em θ . 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):

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \Delta p + \nabla_s \cdot (v \Delta p) + \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{inf} - \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{sup} = 0 \quad (\text{II.1-5})$$

A 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):

$$\frac{g}{\Delta p} (\tau_{sup} - \tau_{inf}) \quad (II.1-6)$$

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

$$(\Delta p)^{-1} \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s v) \quad (II.1-7)$$

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:

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \theta \Delta p + \nabla_s \cdot (v \theta \Delta p) + \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{inf} - \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{sup} = \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s \theta) + H_\theta \quad (II.1-8)$$

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 α^{-1} , e
- Uma equação descrevendo o fluxo vertical de massa sobre uma superfície S:
 $\dot{s} \partial p / \partial s$

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

II.1.3. 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 *first guess* 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 e novembro de 2008, e os dados são armazenados no NAVOCEANO (Naval Oceanography Office). Atualmente, um ano de dados diários desta simulação está disponível nos servidores do HYCOM Consortium estabelecido no COAPS (Center For Ocean Atmospheric Studies), Universidade do Estado da Flórida. Os dados resultantes desta simulação estão disponíveis via OPeNDAP no endereço: http://hycom.coaps.fsu.edu/thredds/dodsC/glb_analysis.html. Esses arquivos contém a saída diagnóstica nos níveis de profundidade do Levitus para várias variáveis, incluindo: correntes, temperatura e salinidade (HYCOM, 2008).

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 54° e 36°W, e as latitudes 34° e 20°S, com um total de 44.738 pontos, simulados para o ano de 2007. Exemplos de resultados das simulações do HYCOM são apresentados na Figura 6 e Figura 7.

Na Figura 6 são observados os resultados das simulações do HYCOM para a área de interesse, no dia 1° de janeiro (verão) de 2007. Na imagem, pode-se observar a Corrente do Brasil, e a formação de vórtices entre as latitudes de 24° e 28° S. Na Figura 7, os resultados das simulações do HYCOM são do dia 1° de julho (inverno) de 2007, e nota-se características diferentes da Corrente do Brasil em relação ao dia 1° de Janeiro, e o deslocamento pra norte da confluência Brasil-Malvinas.

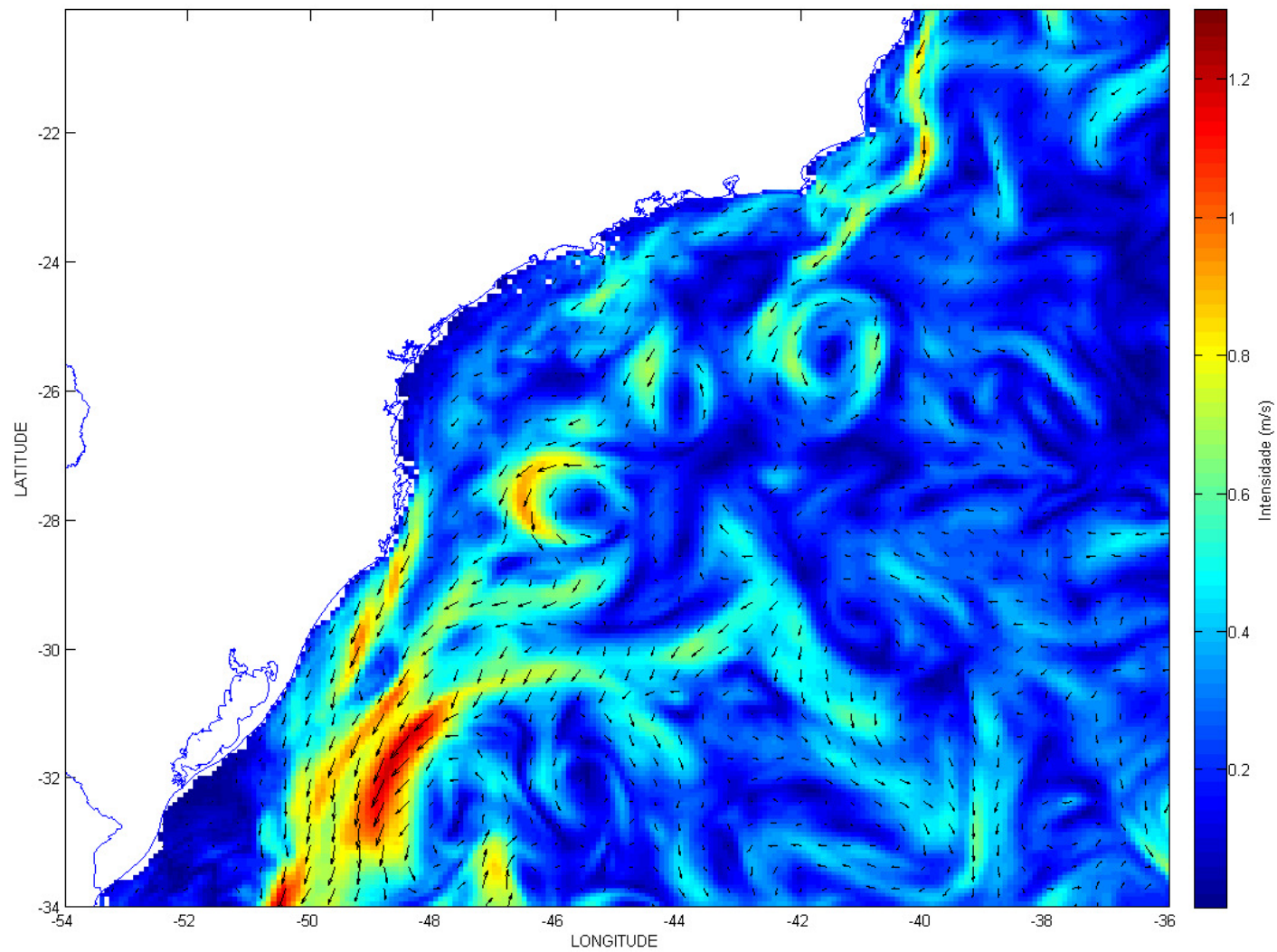


Figura 6: Resultado das simulações do HYCOM para a área de interesse, no dia 1º de janeiro (verão) de 2007.

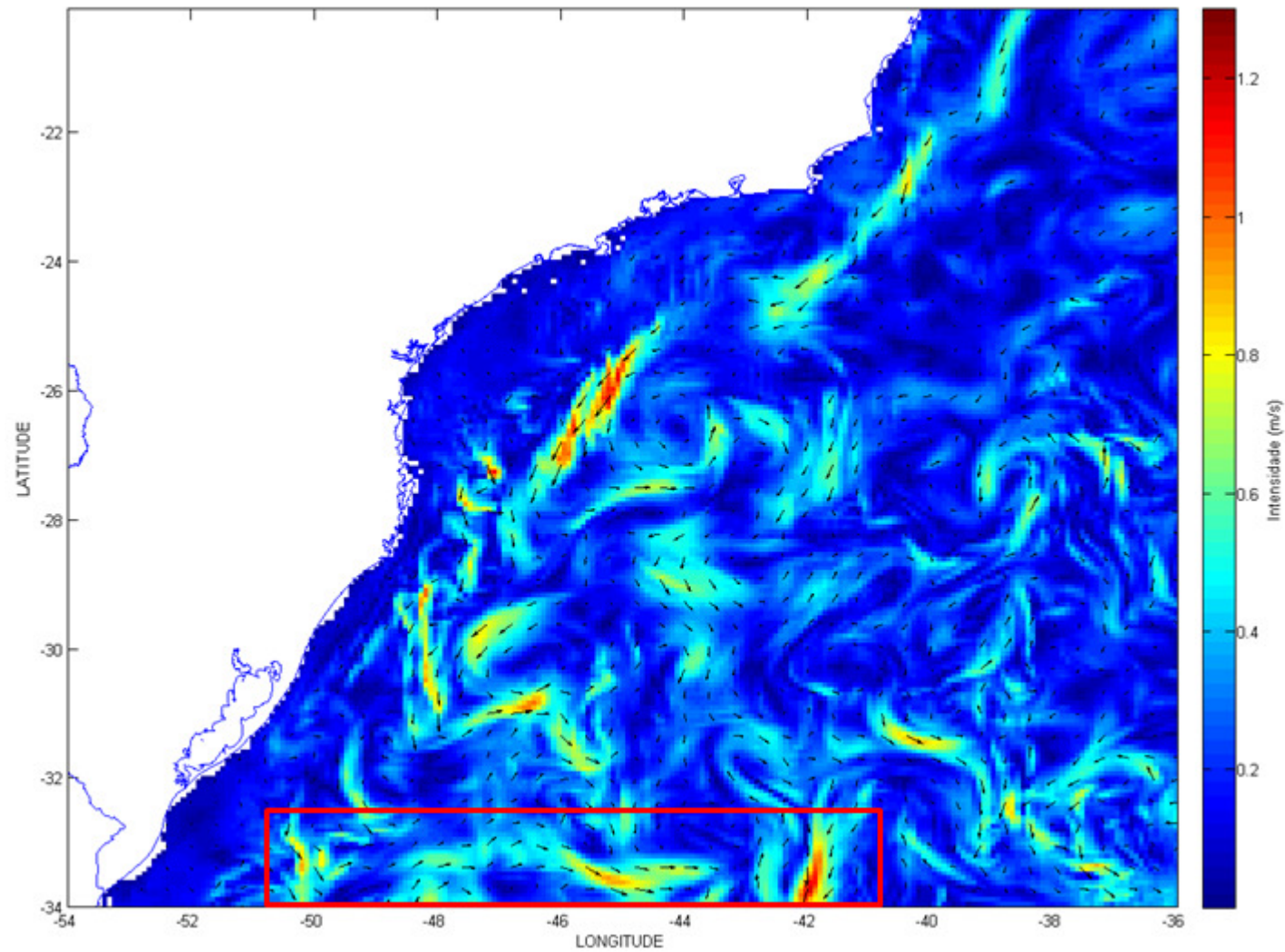


Figura 7: Resultado das simulações do HYCOM para a área de interesse, no dia 1º de julho (inverno) de 2007. Destaque em vermelho para a região da confluência Brasil-Malvinas.

II.1.3.1. 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.

Para responder a esta segunda questão a PROOCEANO simulou, utilizando os dados do HYCOM, os lançamentos dos derivadores do Projeto MONDO. Foram calculadas as trajetórias de 40 derivadores virtuais, com datas e intervalo de lançamento idênticos ao do MONDO. 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 do Mondo e os numéricos, simulados com uso do HYCOM. Além disso, complementando a avaliação com observações sinóticas obtidas por satélites, foram feitas comparações com dados de corrente obtidos por altimetria (dados do Programa AVISO) e também com dados de temperatura da superfície do mar (TSM) do Programa OSTIA. Na Figura 8 são apresentadas as trajetórias obtidas na simulação e as trajetórias medidas no MONDO.

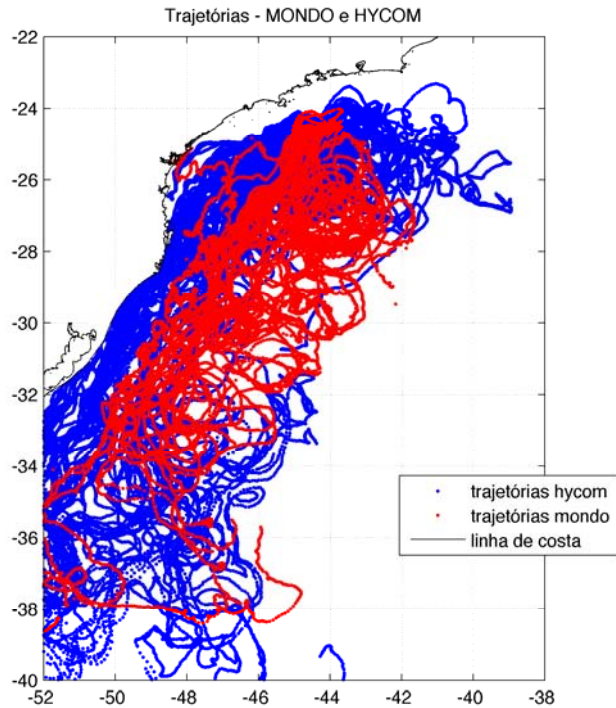


Figura 8: Trajetórias dos derivadores do Projeto MONDO e simuladas com a utilização dos resultados do HYCOM para o mesmo período. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008.

Observa-se que os conjuntos de trajetórias possuem padrão semelhante, em termos de área de presença, tanto em latitude, quanto em longitude, sendo que as trajetórias obtidas com os dados do HYCOM possuem maior tendência de atingir a costa. 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. Outra avaliação é realizada através da comparação das probabilidades de presença dos derivadores em cada região, apresentadas nas Figura 9 e Figura 10. Nota-se que o padrão preferencial da deriva é rumo sudoeste nos dois mapas, no entanto, o mapa elaborado com os resultados do HYCOM apresenta maiores probabilidades de presença em regiões mais próximas à costa.

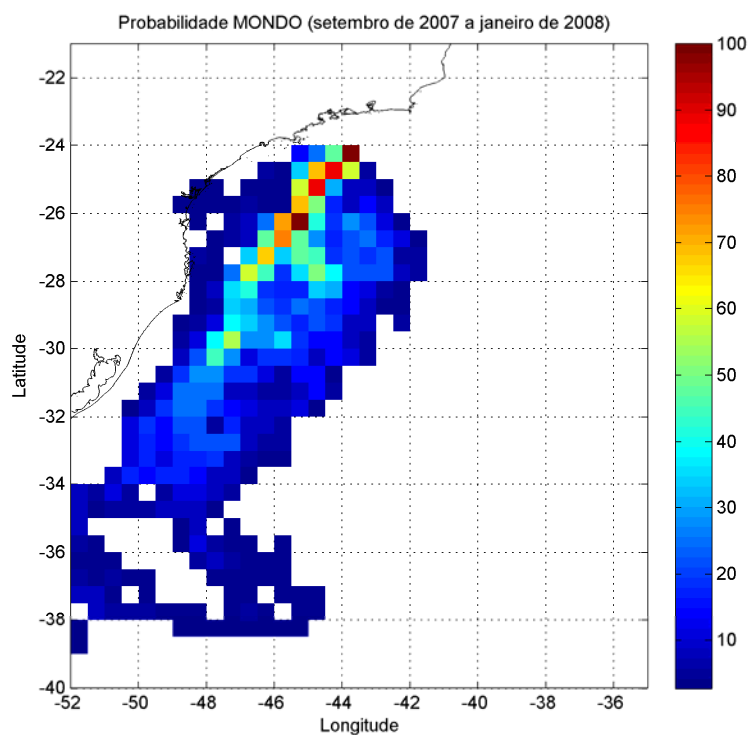


Figura 9: Mapa de Probabilidade de presença dos derivadores lançados no Projeto MONDO. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008.

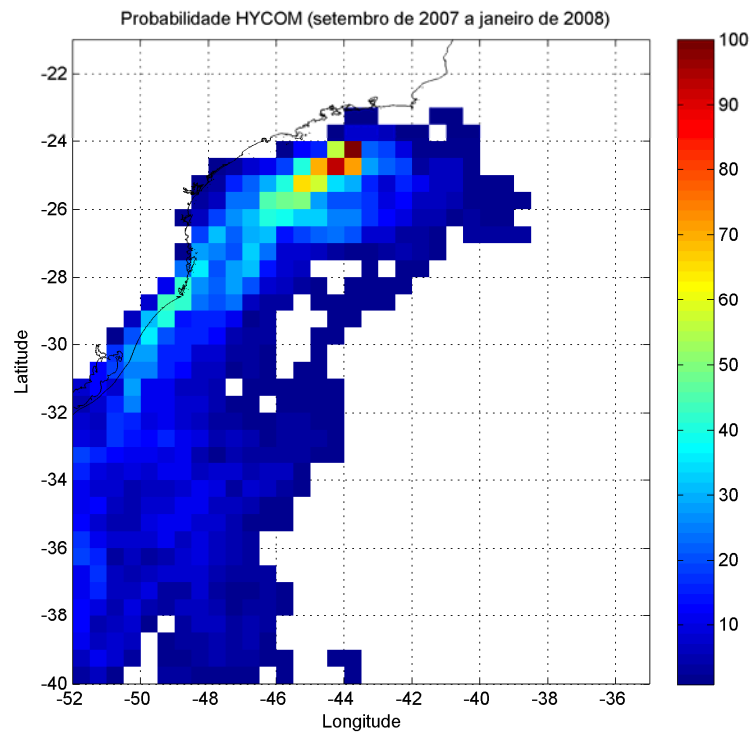


Figura 10: Mapa de Probabilidade de presença dos derivadores virtuais, simulados com os resultados do HYCOM. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008.

Na Figura 11 é apresentada a sobreposição dos dois mapas probabilísticos.

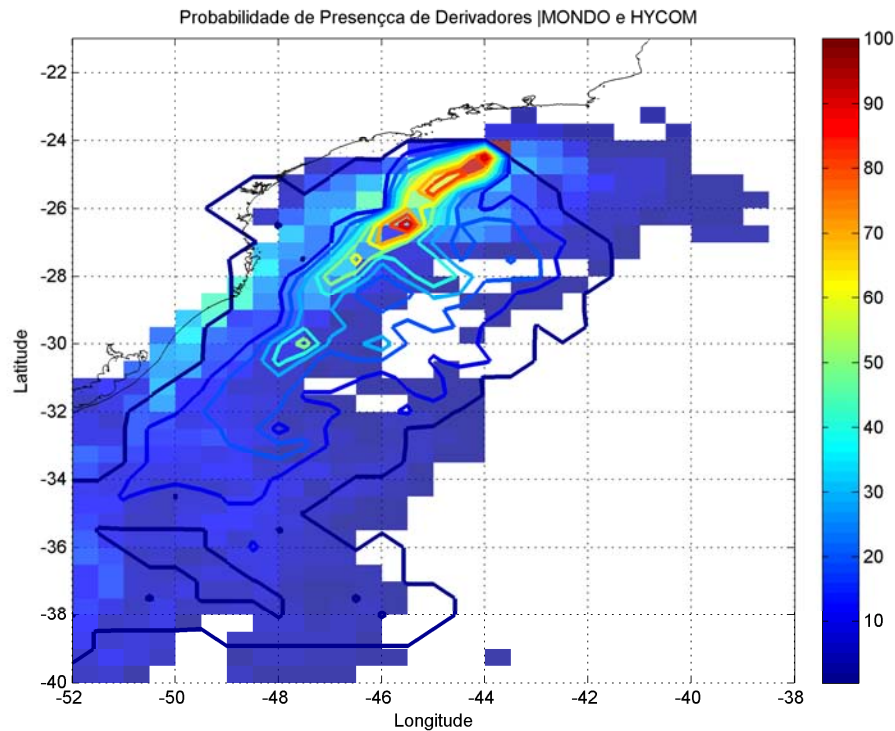


Figura 11: Mapas de Probabilidade de presença de derivadores. MONDO (contornos) e HYCOM (sombreado).

Complementando a avaliação, foram analisados instantâneos dos campos de correntes do HYCOM e dos dados do AVISO. O Programa AVISO (www.aviso.oceanobs.com) fornece dados altimétricos desde 1992 para uso geral. Um dos produtos fornecidos é o campo de correntes geostróficas, estimado a partir da anomalia do nível do mar obtida por altimetria. Essas correntes são bons estimadores da circulação de baixa frequência, incluindo as correntes como a Corrente do Brasil e os vórtices e meandros associados. O objetivo dessa comparação HYCOM x AVISO é avaliar se as feições citadas estariam bem representadas nos dados do HYCOM. A *Figura 12* e a *Figura 13* mostram duas comparações em datas distintas. Nota-se que o fluxo da Corrente do Brasil possui grande semelhança tanto na posição, quanto na intensidade nos dois campos. Os vórtices de mesoescala também estão representados em ambos, embora existam algumas diferenças de posicionamento entre eles. As diferenças existentes entre os dois campos são esperadas, uma vez que o HYCOM resolve toda a física da circulação oceânica, enquanto o AVISO só possui a componente geostrófica. Porém, os campos guardam semelhanças importantes nas principais feições oceânicas.

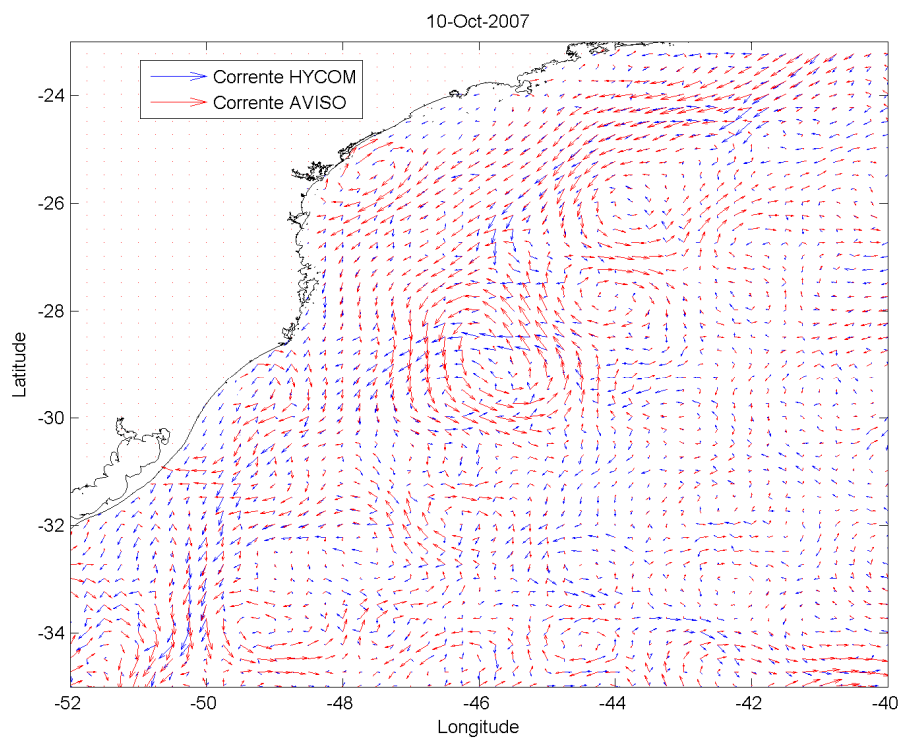


Figura 12: Campo de correntes obtido do AVISO (vermelho) e do HYCOM (azul), para o dia 10 de outubro de 2007.

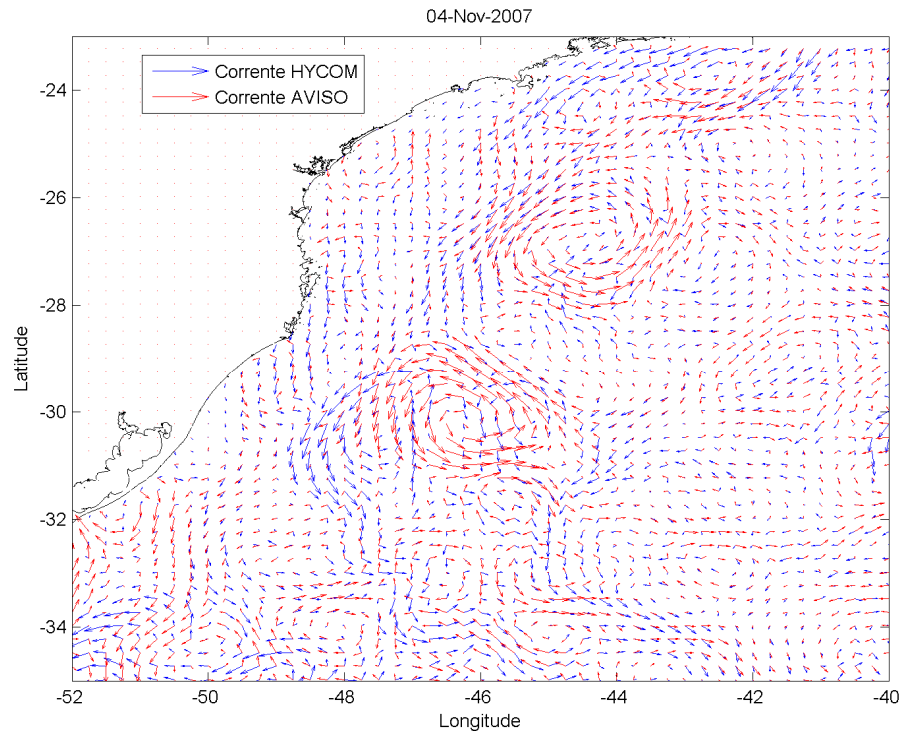


Figura 13: Campo de correntes obtido do AVISO (vermelho) e do HYCOM (azul), para o dia 4 de novembro de 2007.

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 e Robinson (2003). 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. A influência direta dessa corrente pode ser observada na Figura 4, que mostra a deriva de uma bóia do projeto MondoCorcovado, que ao chegar na região costeira rumo de Florianópolis até a costa do Rio de Janeiro, seguindo o fluxo da CCB. Souza e Robinson (2003) 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. Para avaliar se o HYCOM era capaz de reproduzir de maneira satisfatória esse fluxo, foi realizada a determinação da posição da CCB (isoterma de 20° C) calculada pelo modelo e comparada com os resultados de Souza e Robinson (2003) e dados de TSM do Programa Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis - OSTIA (http://ghrsst-pp.metoffice.com/pages/latest_analysis/ostia.html). A Figura 14 mostra os resultados obtidos.

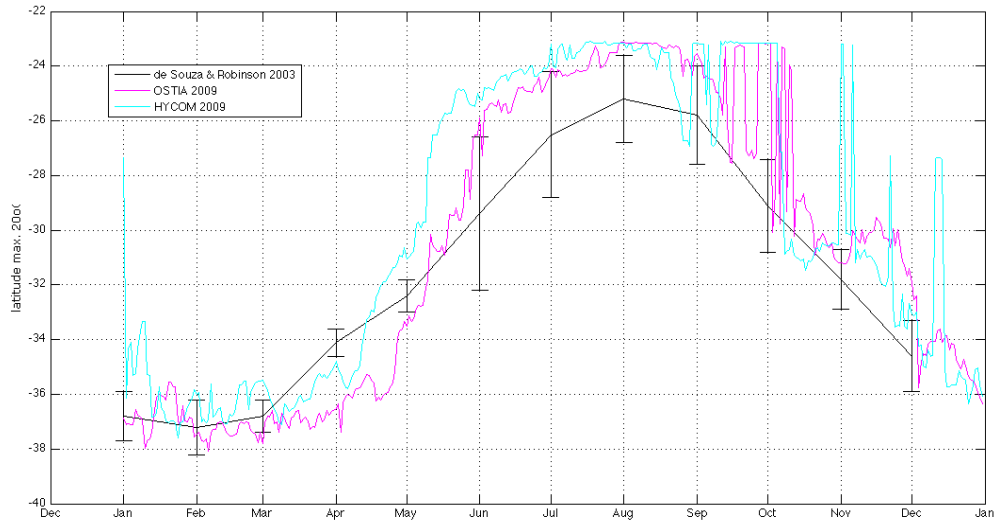


Figura 14: Limite norte da isoterma de 20° C.

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. Como observado na resposta anterior, a corrente de maré não é significativa nessa região, portanto a ausência da maré astronômica nas condições de contorno do modelo não compromete sua utilização para os fins desse tipo de estudo.

II.2. Modelo de transporte e dispersão de poluentes.

As simulações numéricas apresentadas nesse estudo foram feitas com o STROLL, modelo desenvolvido pela PROOCEANO para estudos de transporte de contaminantes no mar. O STROLL é um modelo lagrangeano capaz de simular o transporte advectivo-turbulento em até 3 dimensões além dos processos de intemperismo e a perda de massa de diversos tipos de contaminantes.

O STROLL possui dois modos de operação: determinístico e probabilístico.

A modelagem determinística consiste em estudar o comportamento do contaminante em um determinado cenário ambiental, apresentando instantâneos deste comportamento em tempos definidos pelo usuário.

Cabe à simulação probabilística, averiguar o comportamento do contaminante sob a influência de uma extensa combinação de cenários ambientais e determinar a probabilidade de presença e o tempo mínimo de chegada do mesmo em cada região do domínio do modelo.

Uma breve descrição destes modos, bem como dos processos de intemperismo será apresentada a seguir.

II.2.1. Modo Determinístico

A emissão de óleo no mar é representada pela inserção de um número de elementos n_e a cada intervalo de tempo Δt na região fonte. Considerando uma vazão Q m³/s, o volume inicialmente associado a cada elemento será:

$$q_{e,t=0} = \frac{Q\Delta t}{n_e} \quad (\text{II.2-1})$$

O transporte advectivo de cada elemento é dado através do cálculo de sua posição p_e a cada passo de tempo. Com isso, a posição do elemento e no instante t é dada por:

$$p_{e,t+1} = p_{e,t} + \Delta t \frac{dp_e}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{d^2 p_e}{dt^2} \quad (\text{II.2-2})$$

Onde:

$$\frac{dp_{i,e}}{dt} = \bar{u}_i \quad \text{é a velocidade e} \quad (\text{II.2-3})$$

$$\frac{d^2 p_{i,e}}{dt^2} = \frac{d\bar{u}_i}{dt} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \quad \text{a aceleração} \quad (\text{II.2-4})$$

Para $i = 1, 2$. A velocidade \bar{u}_i (u e v) é obtida através de interpolação bi-linear no espaço e linear no tempo, dos dados fornecidos pelo modelo hidrodinâmico e pelo campo de vento, cuja contribuição, nesse caso, é de 1,5% de sua intensidade.

A aceleração é obtida através da derivação no tempo dos valores de velocidade interpolados. Os valores de velocidade utilizados são fornecidos por um modelo hidrodinâmico externo.

A difusão turbulenta do material é simulada através de modelos de passos aleatórios (*random walk models*), cuja idéia central consiste em adicionar um desvio de velocidade aleatório \vec{u}'_i às velocidades advectivas (Csanady, 1972).

II.2.1.1. Intemperismo

O STROLL simula os principais processos de intemperismo que ocorrem no óleo quando este é derramado no mar: espalhamento, evaporação, emulsificação e dispersão, e as consequentes mudanças nas propriedades físicas, como a densidade e a viscosidade.

II.2.1.2. Viscosidade e Densidade do Contaminante

A variação temporal da densidade do óleo ($\rho_o(t)$) é calculada de forma indireta, em função do conteúdo de água (Wc) presente na mistura e da fração de óleo evaporada ($frac_{evap}$), que são calculadas a cada passo de tempo do modelo, segundo a formulação apresentada à seguir:

$$\rho_o(t) = Wc * \rho_{\acute{a}gua} + (1 - Wc) \rho_0 \left[1 - c_1 (T - T_{\acute{a}gua}) (1 - c_2 frac_{evap}) \right] \quad (II.2-5)$$

onde ρ_o é a densidade do óleo, ρ_0 é a densidade inicial do óleo, $\rho_{\acute{a}gua}$ a densidade da água, T e $T_{\acute{a}gua}$ a temperatura do óleo e da água, respectivamente, $frac_{evap}$ a fração de óleo evaporada, e c_1 e c_2 são constantes empíricas e podem variar em função do tipo de óleo. No entanto, segundo Lehr (2002), valores razoáveis são de $0,008K^{-1}$ e $0,18$, respectivamente.

A viscosidade do constituinte μ varia ao longo de sua trajetória, sendo parametrizada por Mackay *et al.* (1983) *apud* Lehr *et al.* (2002).

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp \left[\left(C_{evap} frac_{evap} \right) + \frac{C_{emul1} Wc}{1 - C_{emul2}} + C_{temp} \left(\frac{T_{\acute{a}gua} - T}{T_{\acute{a}gua} T} \right) \right] \quad (II.2-6)$$

onde μ_0 é a viscosidade inicial do constituinte, C_{evap} é a constante de evaporação e igual a 5000 K (NOAA, 2000), C_{temp} uma constante empírica adimensional que depende do tipo de óleo, podendo variar entre 1 e 10, segundo Mackay *et al.* (1980) é utilizado o valor de 5. Para as constantes adimensionais C_{emul1} e C_{emul2} , NOAA(2000) sugere valores de 2,5 e 0,65, respectivamente.

II.2.1.3. Espalhamento

Admitindo que a fase inicial do espalhamento (gravitacional-inercial) de uma mancha de óleo é muito curta, o STROLL parte da fase gravitacional-viscosa para calcular o espalhamento, assumindo que quando a espessura da mancha decresce até um determinado valor, o espalhamento termina. Assim o raio R_0 da área inicial é calculado por:

$$R_0 = \frac{K_2^2}{K_1} \left(\frac{V_0^5 g \Delta}{\mu_{\text{água}}} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (\text{II.2-7})$$

onde K_1 e K_2 , recomendado por Flores *et al* (1999) *apud* Soto (2004), são iguais a 0,57 e 0,725, respectivamente, V_0 o volume inicial do óleo derramado, $\mu_{\text{água}}$ a viscosidade da água e Δ a diferença relativa de densidade da água e do óleo:

$$\Delta = \frac{\rho_{\text{água}} - \rho_{\text{óleo}}}{\rho_{\text{óleo}}} \quad (\text{II.2-8})$$

II.2.1.4. Evaporação

O STROLL utiliza o modelo de evaporação proposto por Jones (1997), o qual se baseia na relação de Mackay & Matsugu (1973), porém considerando o óleo como sendo uma mistura de componentes. Essa abordagem é também conhecida com modelo de Pseudo-Componentes, onde a taxa de evaporação pode ser obtida por:

$$\frac{dV_j}{dt} = \frac{K_j A \bar{V}_j \chi_j P_j}{R T} \quad (\text{II.2-9})$$

onde j varia de acordo com o número de pseudo-componentes, nesse caso, cinco. K_j é o coeficiente de transferência de massa do pseudo-componente; A é a área da mancha; \bar{V}_j é o volume molar do pseudo-componente; χ_j é a fração molar do componente; P_j é a pressão de vapor do pseudo-componente; R é a constante universal dos gases e T é a temperatura.

A fração molar de cada pseudo-componente muda com o tempo e é constituída pela razão entre o número de moles do pseudo-componente, que é obtido dividindo-se o seu volume por seu volume molar, e a soma do número de moles total da mistura.

O coeficiente de transferência de massa do pseudo-componente é calculado por:

$$K_j = 0,0048 \cdot U^{\frac{1}{9}} \cdot Z^{-\frac{1}{9}} \cdot Sc_j^{-\frac{2}{3}} \quad (\text{II.2-10})$$

Onde U é a velocidade do vento; Z é o comprimento da mancha na direção do vento; e Sc é o número de Schmidt, sendo utilizado o mesmo valor para todos os pseudo-componentes e, segundo NOAA (2000), igual a 2,7.

Tais valores variam ao longo da simulação, sendo recalculados internamente, para cada pseudo-componente e a cada passo de tempo, no modelo.

O volume molar de cada pseudo-componente é obtido através de uma correlação de dados de pontos de ebulição e volumes molares de uma série de alcanos com números de carbonos variando entre 3 e 20 (C3 e C20), expressa por:

$$\bar{V}_j = 7 \times 10^{-5} - (2,102 \times 10^{-7} BP_j) + [1 \times 10^{-9} (BP_j)^2] \quad (\text{II.2-11})$$

Onde BP_j é o ponto de ebulição de cada componente, calculado internamente no modelo, segundo NOAA (2000), por:

$$BP_j = T_0 + \frac{dT}{df} \frac{(j - 1/2)}{5} \quad (\text{II.2-12})$$

Sendo que:

$$\frac{dT}{df} = 1356,7 - 247,36 \cdot \ln(API) \quad (\text{II.2-13})$$

$$T_0 = 457,16 - 3,3447 \cdot API \quad (\text{II.2-14})$$

A pressão de vapor de cada pseudo-componente na temperatura ambiente é obtida através de seus pontos de ebulição, utilizando-se a Equação de Antoine, segundo Lyman et al. (1990) *apud* Jones (1997):

$$\ln \frac{P_j}{P^0} = \frac{\Delta S_j \cdot (BP_j - C)^2}{R \cdot BP_j} \cdot \left[\frac{1}{BP_j - C} - \frac{1}{T - C} \right] \quad (\text{II.2-15})$$

onde P^0 é a pressão atmosférica; $\Delta S_i = 8,75 + 1,987 \log(BP_i)$, é a variação na entropia do componente oriunda da vaporização e $C = (0,19 \cdot BP_i) - 18$ é uma constante determinada a partir do ponto de ebulição do pseudo-componente.

O coeficiente de transferência de massa é calculado segundo Mackay & Matsugu (1973):

$$K_i = 0,0048 \cdot U^{7/9} \cdot Z^{-1/9} \cdot Sc_j^{-2/3} \quad (\text{II.2-16})$$

onde U é a velocidade do vento; Z é o comprimento da mancha na direção do vento; e Sc_j é o número de Schmidt do pseudo-componente.

O número de Schmidt expressa a razão entre a viscosidade cinemática do ar com a difusividade molecular do pseudo-componente.

Para obter-se a difusividade molecular do pseudo-componente usa-se a seguinte aproximação, segundo (Thibodeaux, 1979 apud Jones, 1997):

$$D_j = D_{\text{água}} \sqrt{\frac{MW_{\text{água}}}{MW_j}} \quad (\text{II.2-17})$$

onde $D_{\text{água}}$ é a difusividade molecular da água; e $MW_{\text{água}}$ é o peso molecular da água.

O peso molecular de cada pseudo-componente é calculado através de uma correlação também obtida de uma série de alcanos C3 a C20:

$$MW_j = 0,04132 - \left(1,985 \cdot 10^{-4} \cdot BP_j \right) + \left[9,494 \cdot 10^{-7} \cdot (BP_j)^2 \right] \quad (\text{II.2-18})$$

Reescrevendo a equação em termos de volume e volume molar, as taxas de evaporação de cada pseudo-componente pode ser obtida por:

$$\frac{dV_j}{dt} = - \frac{A \cdot K_j \cdot P_j \cdot V_j}{R \cdot T \cdot \sum_{k=1}^{nc} \frac{V_j}{V_k}} \quad (\text{II.2-19})$$

II.2.1.5. Emulsificação

A incorporação de água no óleo é descrita no modelo por uma equação proposta por Mackay *et al* (1980):

$$\frac{dfrac_{wv}}{dt} = K_w (1 + W)^2 \left(1 - \frac{frac_{wv}}{frac_{wv}^{final}} \right) \quad (\text{II.2-20})$$

em que $frac_{wv}$ é a fração volumétrica de água incorporada na emulsão, $frac_{wv}^{final}$ é a fração final de água incorporada e K_w uma constante empírica e igual a $1,6 \times 10^{-6}$.

II.2.1.6. Dispersão

A formulação utilizada para o cálculo do entranhamento no STROLL é baseada no modelo desenvolvido por Delvigne & Sweeney (1988) a partir de estudos sobre o entranhamento ou dispersão superficial e subsuperficial de óleo, realizados em laboratório.

Nesse modelo, a taxa de entranhamento por unidade de área é expressa por:

$$Q(d_0) = C_0 \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot S_{cov} \cdot F_{wc} \cdot d_0^{0,7} \cdot \Delta d \quad (\text{II.2-21})$$

onde $Q(d_0)$ é a taxa de entranhamento por unidade de área no intervalo Δd de diâmetros de gotículas de óleo em torno de d_0 $\left(d_0 - \frac{1}{2} \Delta d \text{ a } d_0 + \frac{1}{2} \Delta d \right)$; d_0 é o diâmetro da gotícula de óleo; C_0 é uma constante de dispersão, relacionada a viscosidade do óleo; D_{ba} é a energia de dissipação por ondas; S_{cov} é o fator de cobertura da superfície do mar por óleo ($0 \leq S_{cov} \leq 1$), sendo $S_{cov} = 1$ para manchas contínuas; F_{wc} é a fração da superfície do mar suscetível a quebra de ondas (encapelamento) por unidade de tempo.

A energia de dissipação por ondas por unidade de área é calculada por:

$$D_{ba} = 0,0034 \cdot \rho_w \cdot g \left[\frac{HS}{\sqrt{2}} \right]^2 \quad (\text{II.2-22})$$

onde HS é a altura significativa de ondas, podendo ser calculada por: $HS = \frac{0,243 \cdot U^2}{g}$,

sendo U a velocidade do vento; ρ_w é a densidade da água; e g a aceleração da gravidade.

Para estimar a fração da superfície do mar suscetível ao encapelamento, o modelo utiliza a formulação proposta por Monahan (1971), Ding & Farmer (1994) *apud* Lehr & Simecek-Beatty (2000) e Lehr & Simecek-Beatty (2000), sendo:

$$\begin{aligned}
 F_{wc} &= \frac{0,025 \cdot (U - 3)}{T_M} \rightarrow 0 \leq U \leq 4; \\
 F_{wc} &= \frac{0,01 \cdot U + 0,01}{T_M} \rightarrow U > 4,
 \end{aligned}
 \tag{II.2-23}$$

onde T_M é a constante de tempo de Monahan (1971), sendo $T_M = 3,85$ para água do mar.

Segundo Lehr & Simecek-Beatty (2000), variações nos diâmetros das gotículas de óleo acarretam em diferentes flutuabilidades para as mesmas, causando estratificação na concentração de óleo na coluna de água. Ainda segundo esses autores, a partir 50 a 100 μ de diâmetro, as partículas apresentam flutuabilidade neutra, sendo o movimento dominado pela dispersão horizontal e vertical sobre os efeitos de flutuabilidade.

O intervalo de diâmetro das gotículas de óleo utilizado no STROLL, assim como o modelo ADIOS2 (Lehr, 2002) varia entre $d_{\min} = 0\mu$ a $d_{\max} = 70\mu$.

A constante de dispersão C_0 , segundo Delvigne & Hulsen (1994) pode ser obtida através da seguinte relação:

$$\begin{aligned}
 C_0 &= 1827 \ v^{0,0658} \rightarrow v < 125 \text{ cSt}; \\
 C_0 &= 1827 \ v^{1,1951} \rightarrow v > 125 \text{ cSt};
 \end{aligned}
 \tag{II.2-24}$$

onde ν é a viscosidade do óleo.

Integrando a taxa de entranhamento por unidade de área no intervalo Δd de diâmetros de gotículas de óleo ($Q(d_0)$) no intervalo de gotículas d_{\min} a d_{\max} , obtêm-se:

$$Q = \frac{d_{\max}}{1,7} \cdot C_0 \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot F_{wc} \cdot S_{cov}
 \tag{II.2-25}$$

sendo Q a taxa de entranhamento total, por unidade de área.

Para estimar a penetração máxima do óleo na coluna de água o modelo utiliza a equação proposta por Delvigne & Sweeney (1988):

$$Z_i = (1,5 \pm 0,35) \cdot H_b
 \tag{II.2-26}$$

onde H_b é a altura de quebra da onda.

II.2.1.7. Cálculo da Espessura

A espessura do óleo associada a cada elemento é dada por:

$$esp_e(x, y, t) = \frac{q_e}{2\pi[\sigma(t)]^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - p_{x,e}(t)}{\sigma(t)} \right)^2 + \left(\frac{y - p_{y,e}(t)}{\sigma(t)} \right)^2 \right] \right\} \quad (\text{II.2-27})$$

onde q_e é o volume de cada elemento, x e y as coordenadas do ponto de grade, $p_{x,e}$ e $p_{y,e}$ a posição do centro de massa de cada elemento e $\sigma_i^2(t)$ é a variância da distribuição, relacionado à turbulência local através da equação:

$$D = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2(t)}{dt} \quad (\text{II.2-28})$$

sendo D a difusividade turbulenta isotrópica horizontalmente, parametrizada à partir do escoamento, obtido do modelo hidrodinâmico, segundo a formulação de Smagorinsky:

$$D = C \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{II.2-29})$$

onde Δx e Δy são os intervalos de discretização da grade e C é a constante de Smagorinsky, cujos valores para o oceano variam da ordem de 0,1 a 0,2 (Oey *et al.*, 1985a e b).

A espessura resultante de todo o descarte é então obtida através da soma da contribuição de cada elemento:

$$ESP(x, y, t) = \sum_{e=1}^{n_e} esp_e(x, y, t) \quad (\text{II.2-30})$$

II.2.2. Modo Probabilístico

Na abordagem probabilística utilizada são realizadas diversas simulações determinísticas, considerando-se todos os processos citados nos itens anteriores, em diferentes cenários meteo-oceanográficos. Este módulo do STROLL tem por objetivo verificar a probabilidade de presença do constituinte na região estudada, bem como o tempo de chegada, a fim de determinar um cenário crítico para o descarte de contaminantes na região.

De acordo com os cenários meteo-oceanográficos locais, as séries temporais de vento e corrente são repartidas em 4 séries sazonais – correntes-verão, correntes-inverno, ventos-verão, ventos-inverno – conforme apresentado no esquema da Figura 15.

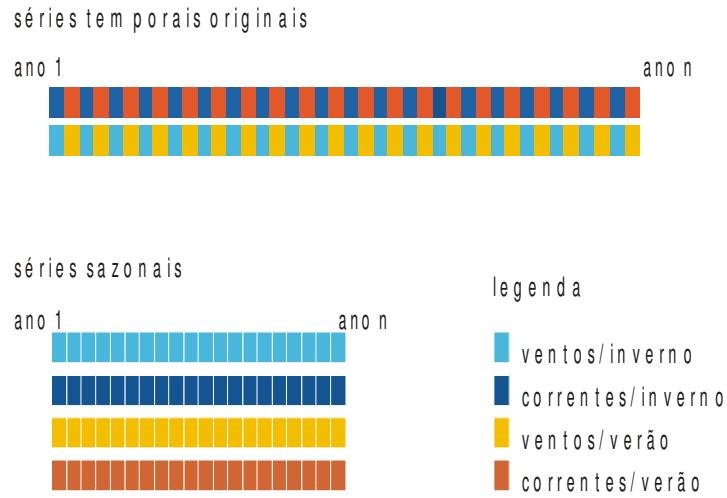


Figura 15: Representação esquemática da separação sazonal dos dados para a modelagem probabilística.

As séries de vento e corrente são então combinadas em diversos arranjos de forma a contemplar de forma ideal os possíveis cenários ambientais (Figura 16).

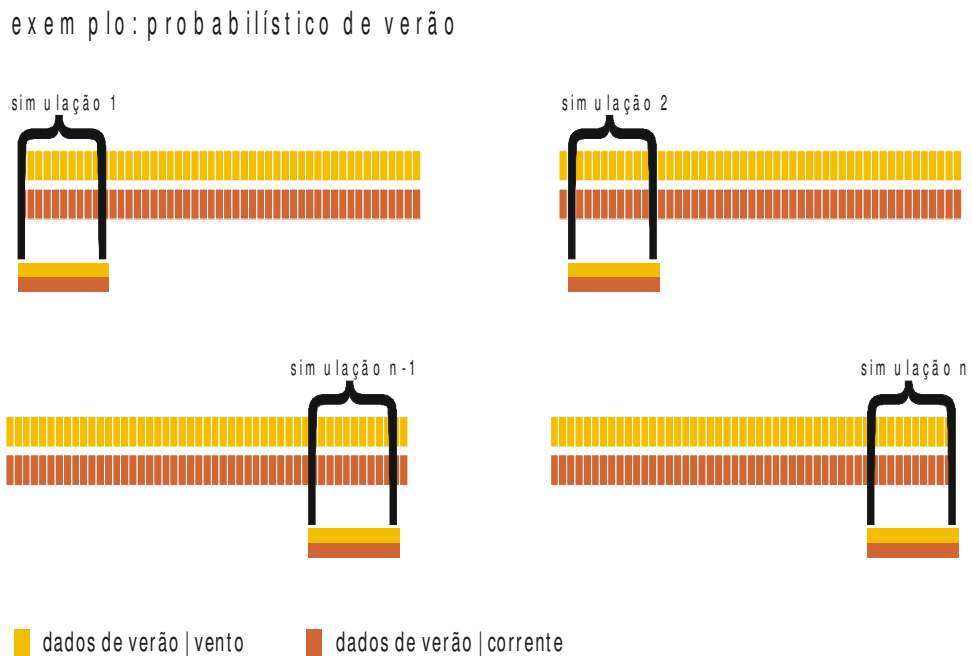


Figura 16: Representação esquemática da combinação dos dados de vento e corrente para a simulação probabilística.

Cada combinação de vento e corrente irá determinar um comportamento para o vazamento. O modelo identifica, em cada combinação, os pontos de grade onde a espessura da mancha do constituinte esteve acima do limiar determinado (Figura 17 , b e c):

$$I(x, y) = 1 \quad \text{se } ESP(x, y, t) \geq \text{lim}$$
$$I(x, y) = 0 \quad \text{se } ESP(x, y, t) < \text{lim}$$

A probabilidade de presença do poluente será dada pela normalização do número de vezes em que a mancha esteve acima do limiar em cada ponto de grade pelo número de combinações n_{com} realizadas (Figura 17 d):

$$P(x, y) = \sum_{i_{sim}=1}^{n_{com}} \left(\frac{I(x, y)}{n_{com}} \right) \quad (\text{II.2-31})$$

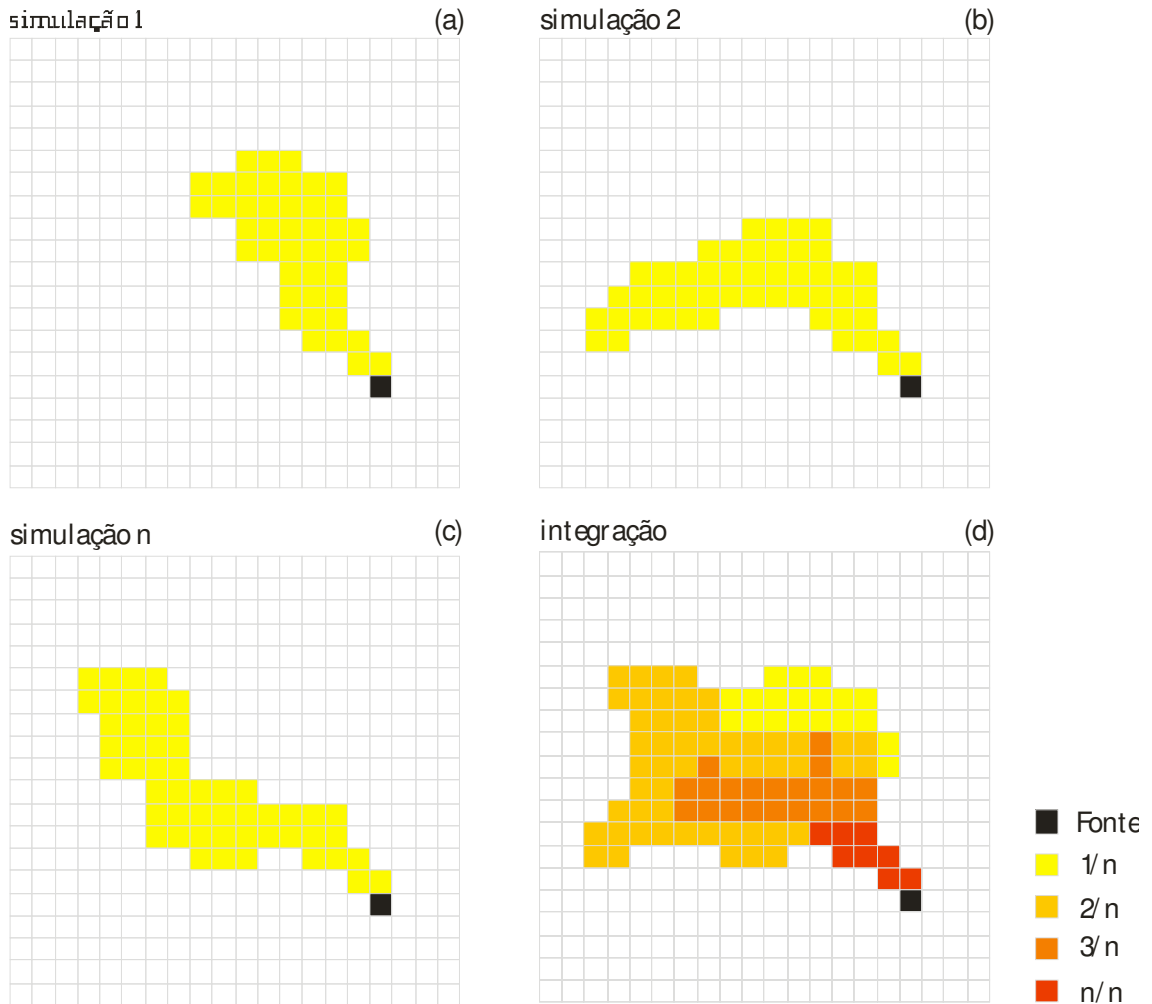


Figura 17: Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença de constituinte no STROLL.

Além da probabilidade de presença do constituinte, o módulo probabilístico do STROLL fornece também os tempos de chegada da mancha em cada ponto de grade do domínio, em cada simulação.

III. CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas considerando um evento de afundamento de FPSO com vazamento instantâneo por 12 horas, em 2 (dois) cenários sazonais, verão e inverno. Após a disponibilização de todo óleo na água, o comportamento de sua deriva foi acompanhado por 30 dias. Portanto, ao final das simulações, foram totalizadas 732 horas.

Além das simulações do afundamento de FPSO, na qual é considerado o volume de 167.487,8 m³, foram ainda realizadas simulações para vazamentos instantâneos de pequeno e médio volume, 8 m³ e 200 m³, respectivamente. Nesses casos as simulações duraram 30 dias.

Em todas as simulações considerou-se como critério de existência de óleo espessuras maiores ou iguais ao limiar de 3×10^{-7} metros (limiar de detecção) (ELPN/IBAMA, 2002) e o critério de parada utilizado nas simulações está de acordo com a Nota Técnica N° 02/2009/CGPEG/DILIC.

A seguir, na Tabela 1 serão apresentadas as características do óleo utilizado para cada local de vazamento, assim como a localização dos mesmos (Tabela 2) .

Tabela 1: Características do óleo utilizadas na simulação.

Parâmetro	Valor	Unidade	Temperatura
FPSO			
API	18		
Viscosidade	13,63	cp	37,5°C

FONTE: OGX

Tabela 2: Local do Vazamento.

Coordenadas Geográficas	
FPSO OSX1	
Latitude	23° 33' 33,104"S
Longitude	41° 26' 31,562"O

FONTE: OGX

A seguir serão apresentadas as forçantes utilizadas durante a simulação probabilística.

IV. 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 (13 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. Conseqüentemente, 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 à mudanças no modelo de assimilação (Kanamitsu *et al.*, 2002).

Deve ser ressaltado que a R-2, embora tenha passado por melhorias significativas, representa 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 as simulações conduzidas nesse estudo foram tratados 30 anos de dados (1979 a 2008) da R-2, com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia). A resolução espacial na área em questão é de aproximadamente 1.8°. 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, elaboradas para o período analisado, na região dos Blocos BM-C-39 a 43 (Figura 18 e Figura 19).

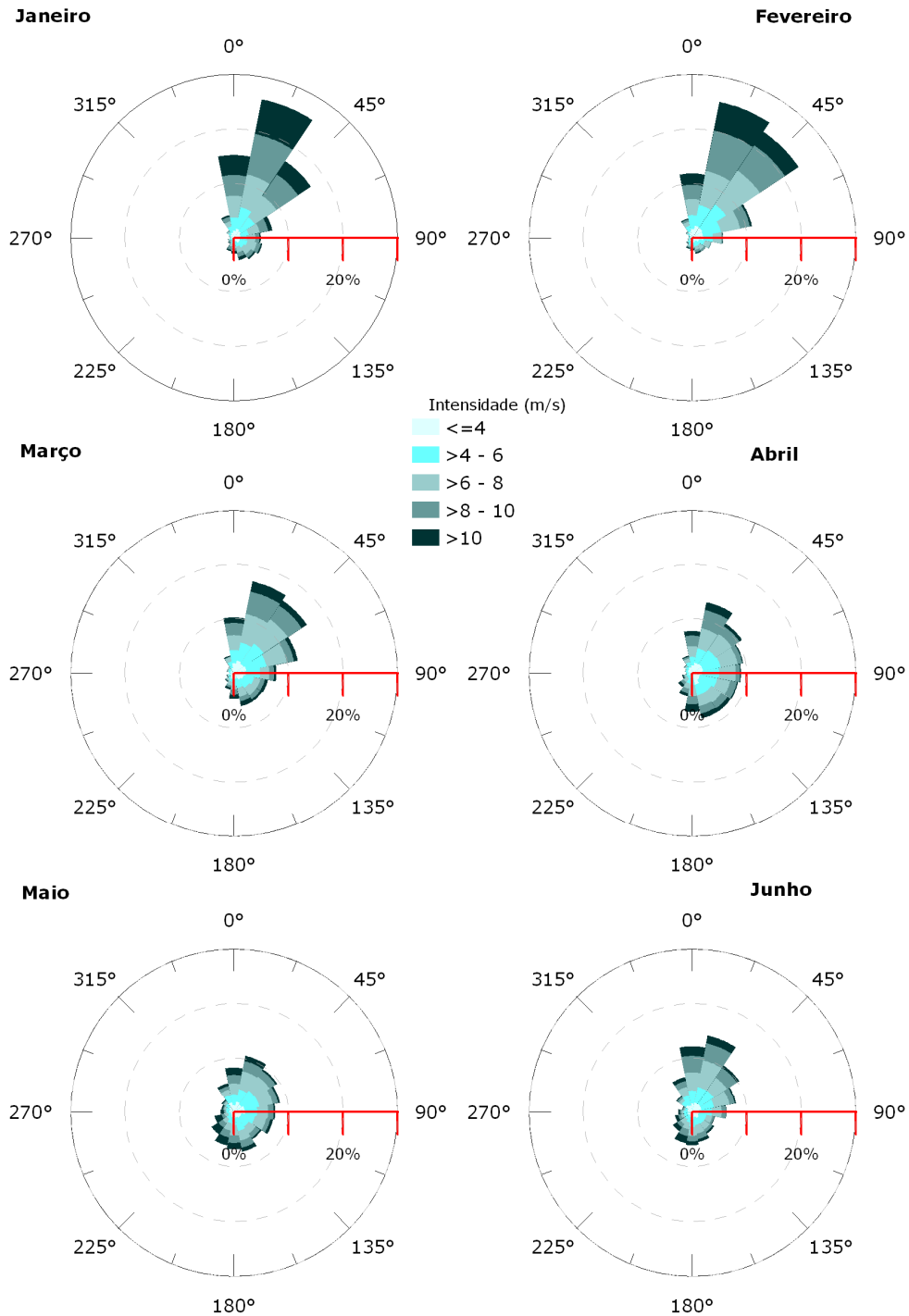


Figura 18: Rosa dos ventos nos meses de janeiro a junho na região dos Blocos BM-C-39 a 43.

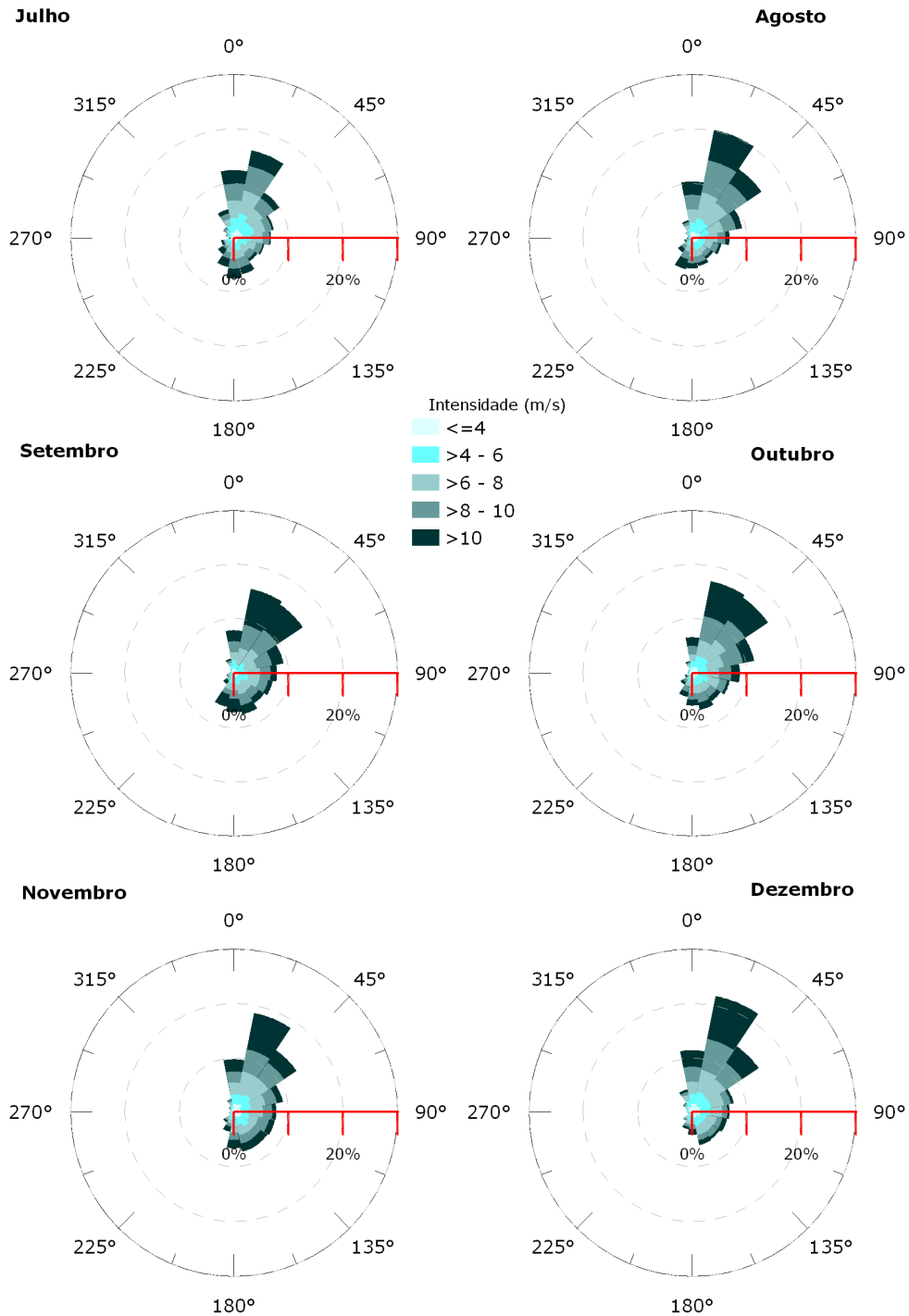


Figura 19: Rosa dos ventos nos meses de julho a dezembro na região dos Blocos BM-C-39 a 43.

A análise desses dados possibilitou a caracterização de dois períodos, com condições de verão e inverno. O primeiro indo de setembro a fevereiro, caracterizado por condições típicas de verão, onde existe a predominância dos ventos no quadrante N-NE de frequência e intensidade mais elevadas. E o segundo, de março a agosto, caracterizado por condições típicas de inverno, com ventos de leste e nordeste menos intensos e ventos de sudoeste e sudeste mais frequentes.

Nesse estudo foi utilizado como forçante hidrodinâmica os resultados do modelo global disponibilizado pelo HYCOM *consortium*, descrito anteriormente no item II.1. Foi utilizada uma série temporal de 1 ano de dados (2007), dividida em dois períodos de 6 meses, característicos para cada situação sazonal.

A principal dificuldade em se obter séries extensas (da ordem de anos) de modelos numéricos oceânicos é a necessidade de se realizar assimilação de dados para que os resultados não divirjam e fujam da "realidade". Essa técnica ainda não é completamente dominada no Brasil e resultados de modelos devem ser utilizados com cautela, visto que não existe uma avaliação criteriosa desses dados especificamente para a Bacia Oceânica do Brasil. Portanto, no caso de utilização de dados de modelos globais, uma avaliação deve ser realizada caso a caso, para saber se os resultados daquela modelagem de óleo específica está sendo bem representada. Isto pode ser feito, por exemplo, utilizando-se dados de derivadores.

Em regiões onde não existam dados disponíveis e adequados para a avaliação, é de opinião da Prooceano que a utilização de base de dados avaliadas criteriosamente, mesmo que tenham apenas um ano de extensão, são preferíveis à utilizar bases mais extensas, mas que não se sabe a representatividade dos resultados.

IV.1. Variabilidade Ambiental

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). Essa análise consiste na identificação dos momentos ao longo de toda série onde as componentes do vento trocam de sinal (de negativo para positivo). Os resultados podem ser observados na Figura 20.

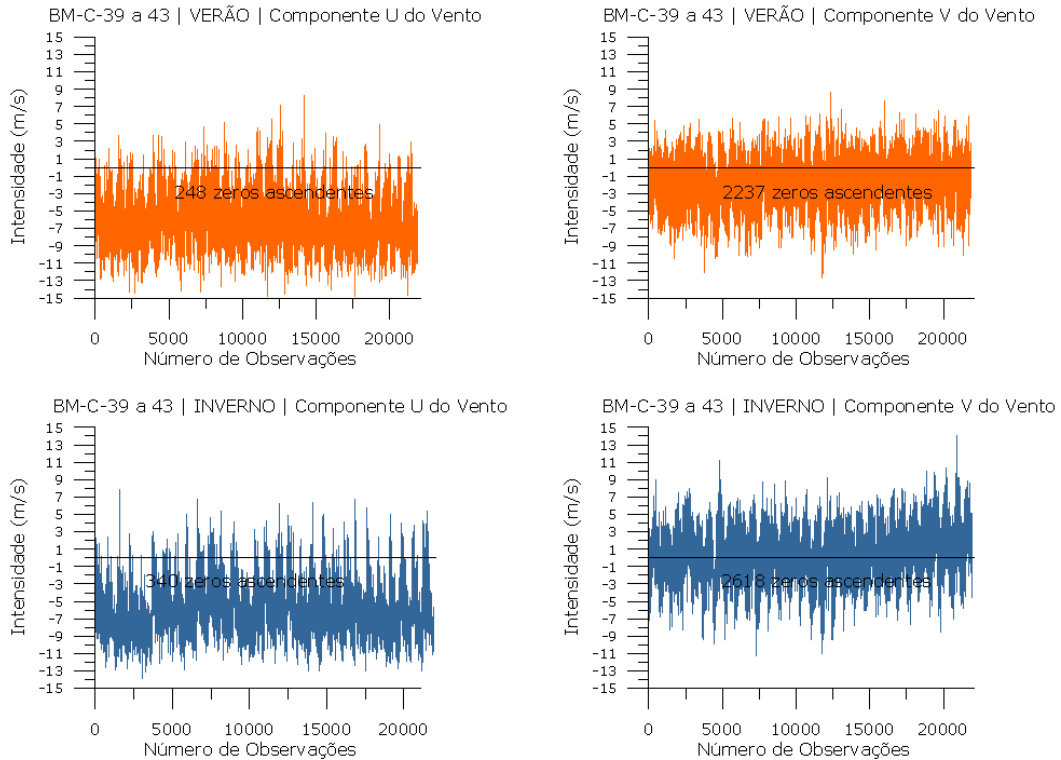


Figura 20: Séries temporais das componentes "u" e "v", do vento, para a região dos blocos BM-C-39 a 43, com o número de zeros ascendentes presentes nas séries.

Observa-se que a no período de verão, o número de zeros ascendentes ficou próximo a 250, para a componente zonal (u) e, próximo a 2.300 para a meridional (v). No período de inverno, o número de zeros ascendentes para componente zonal (u) subiu para próximo de 350 e, da componente meridional (v), para próximo de 2600. Considerando que os dados correspondem a um período de 30 anos (aproximadamente 15 anos para cada cenário 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 2,09 dias no período de inverno e de 2,45 dias no período de verão.

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 2618 e 2237, para os períodos de inverno e verão, respectivamente. Portanto serão utilizadas 2500 simulações nos dois cenários sazonais.

V. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os mapas de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada para as simulações de vazamentos de 8, 200 e 167.487,8 m³, para os cenários de verão e inverno.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas 2.500 diferentes simulações para cada cenário (verão e inverno) nos diferentes volumes de vazamento 8, 200 e 167.487,8 m³, totalizando 15.000 possíveis cenários ambientais de vazamento.

Os cenários críticos, para serem simulados no modo determinístico, serão definidos através da análise dos resultados sazonais do volume de pior caso, sendo escolhida a situação onde o óleo atinja a costa no menor tempo após o início do vazamento.

Também serão apresentadas duas trajetórias que representarão a deriva do óleo nas condições meteo-oceanográficas mais frequentes da região, nos cenários sazonais de verão e inverno. Nesta condição, em ambos os cenários sazonais, foram identificados um domínio no regime hidrodinâmico de correntes com direção S-SW devido à presença da Corrente do Brasil. No regime de ventos, embora a incidência de sistemas frontais seja maior no período de inverno, foi identificada uma dominância de ventos de NE ao longo de todo o ano. Tendo sido escolhido para o período de inverno o trecho da série com a maior incidência de ventos do quadrante sul-oeste.

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

A Tabela 3, a seguir, resume a forma como os resultados serão apresentados.

Tabela 3: Ordem de apresentação dos resultados.

Modo Probabilístico
<i>Vazamentos instantâneos (8 e 200 m³)*</i>
Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo
Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo
Tabela comparativa de probabilidade e tempo mínimo, entre os cenários
<i>Vazamento de pior caso instantâneo (167.487,8 m³)*</i>
Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo
Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo
Volume Máximo de Óleo na Costa
Histogramas de Tempo de Chegada de Óleo Próximo à Costa
Tabela comparativa de probabilidade, tempo e volume de óleo, entre os cenários
Modo Determinístico
Crítico
Condições Meteo-oceanográficas freqüentes*
Evolução Temporal de Volume de Óleo Acumulado na Costa
Intemperismo

* cenário de verão e inverno.

V.1.1. Modo Probabilístico

V.1.1.1. Vazamento de 8m³

V.1.1.1.1. Verão

O mapa de probabilidade de presença de óleo para o vazamento de 8 m³, no cenário de verão, é apresentado na Figura 21, enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 22.

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

FPSO | simulação 720 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Verão

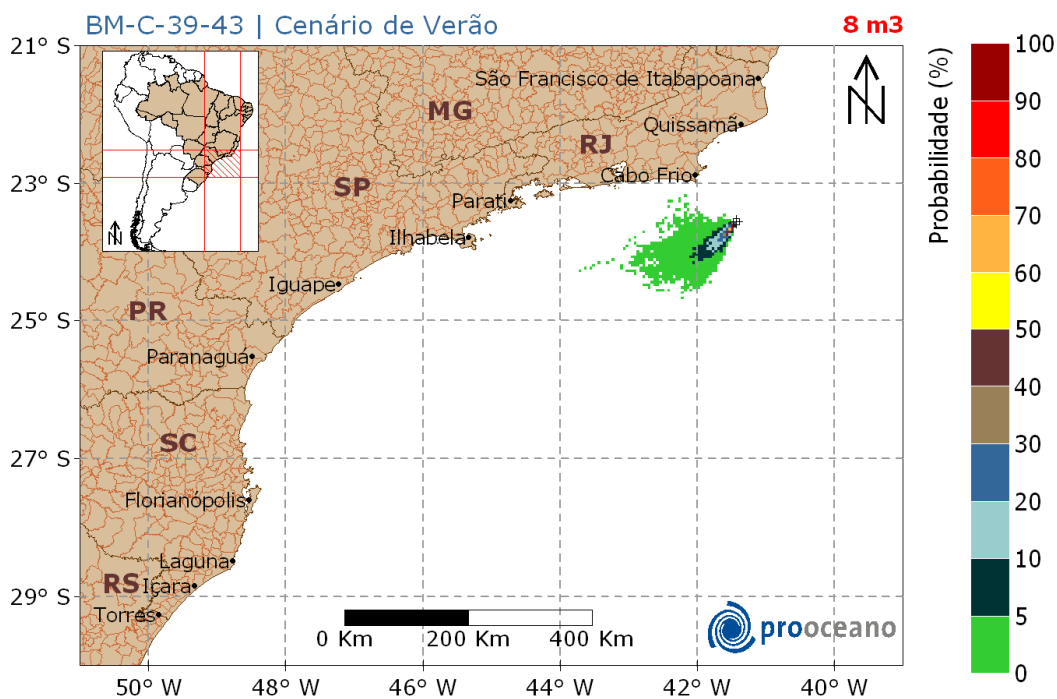


Figura 21: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 8 m³, no cenário de verão.

Neste cenário a deriva do óleo ocorreu para sudoeste do local do vazamento, não havendo probabilidade do óleo atingir a costa.

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

FPSO | simulação 720 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Verão

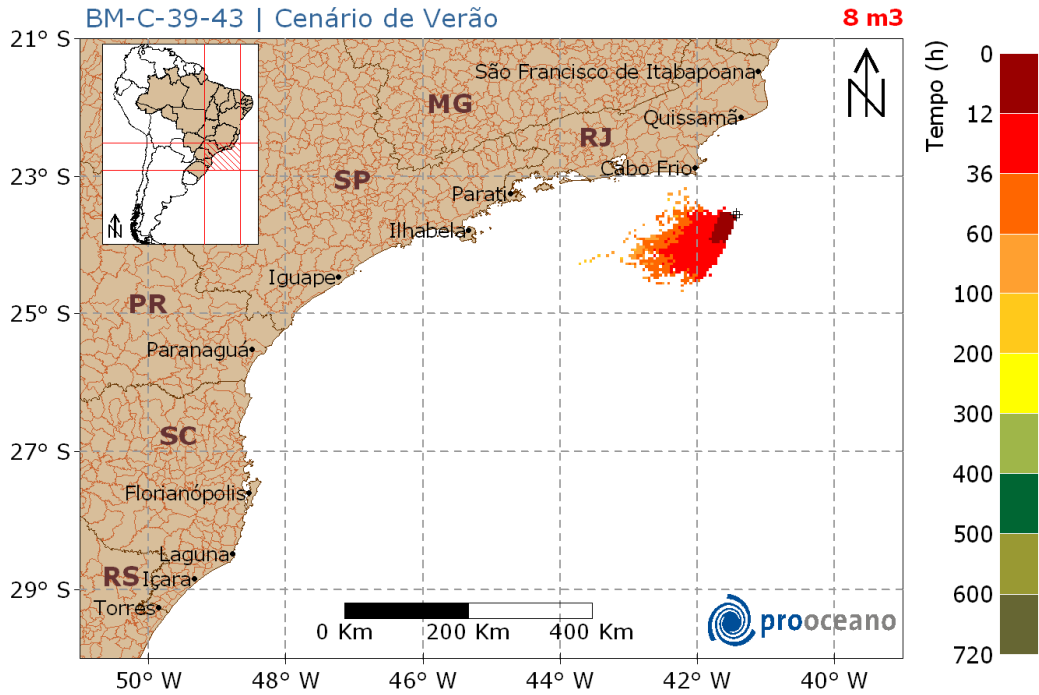


Figura 22: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 8 m³, no cenário de verão.

A maior parte da área com probabilidade de presença de óleo foi atingida com o tempo mínimo de 36-60 horas após o início do vazamento.

V.1.1.1.2. Inverno

O mapa de probabilidade de presença de óleo para o vazamento de 8 m³, no cenário de inverno, encontra-se na Figura 23 enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 24.

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

FPSO | simulação 720 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Inverno

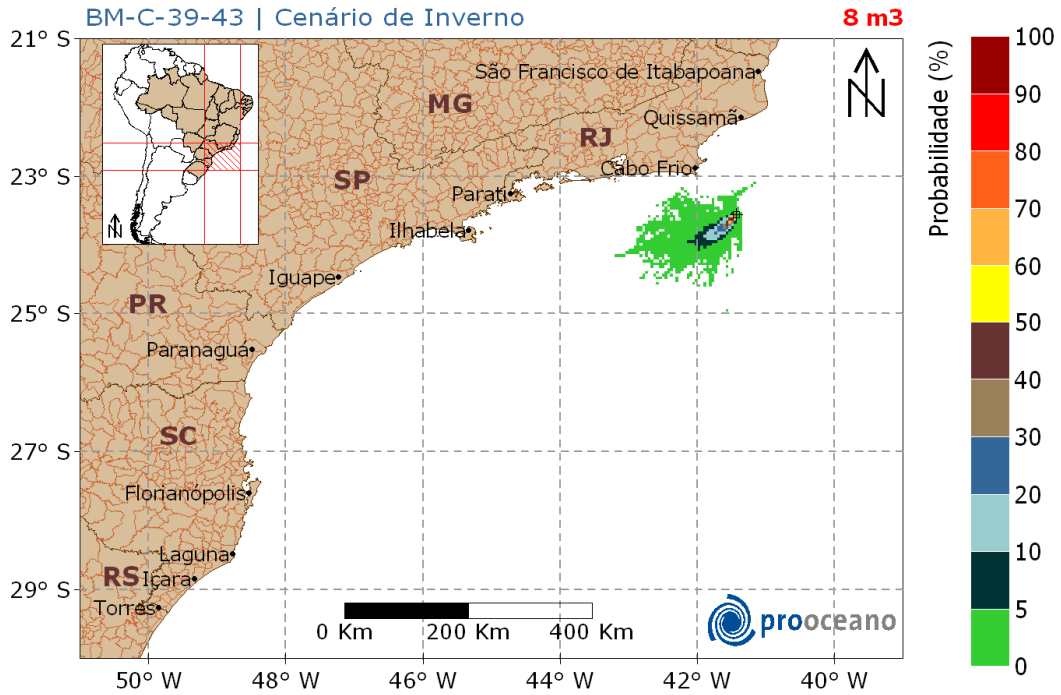


Figura 23: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 8 m³, no cenário de inverno.

Neste cenário a deriva do óleo também foi preferencial para sudoeste do local do vazamento, porém também foram registradas derivas rumo a noroeste.

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

FPSO | simulação 720 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Inverno

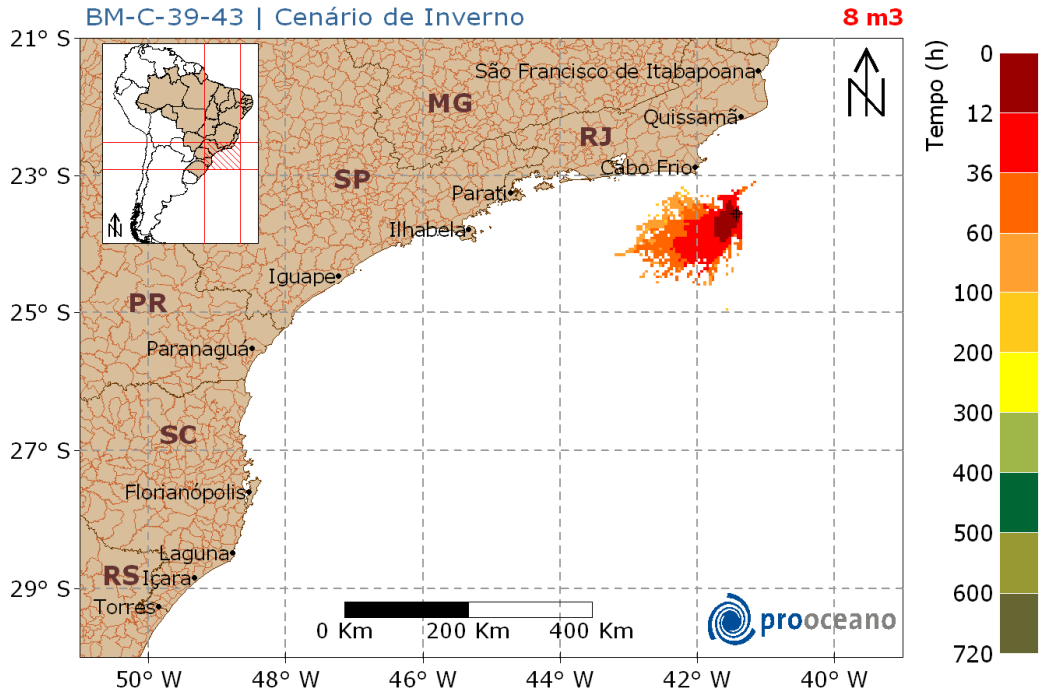


Figura 24: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 8 m³, no cenário de inverno.

A maior parte da área com probabilidade de presença de óleo foi atingida no tempo mínimo de 36-60 horas.

V.1.1.2. Vazamento de 200m³

V.1.1.2.1. Verão

O mapa de probabilidade de presença de óleo para o vazamento de médio porte (200 m³), no cenário de verão, encontra-se na Figura 25 enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 26.

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

FPSO | simulação 720 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Verão

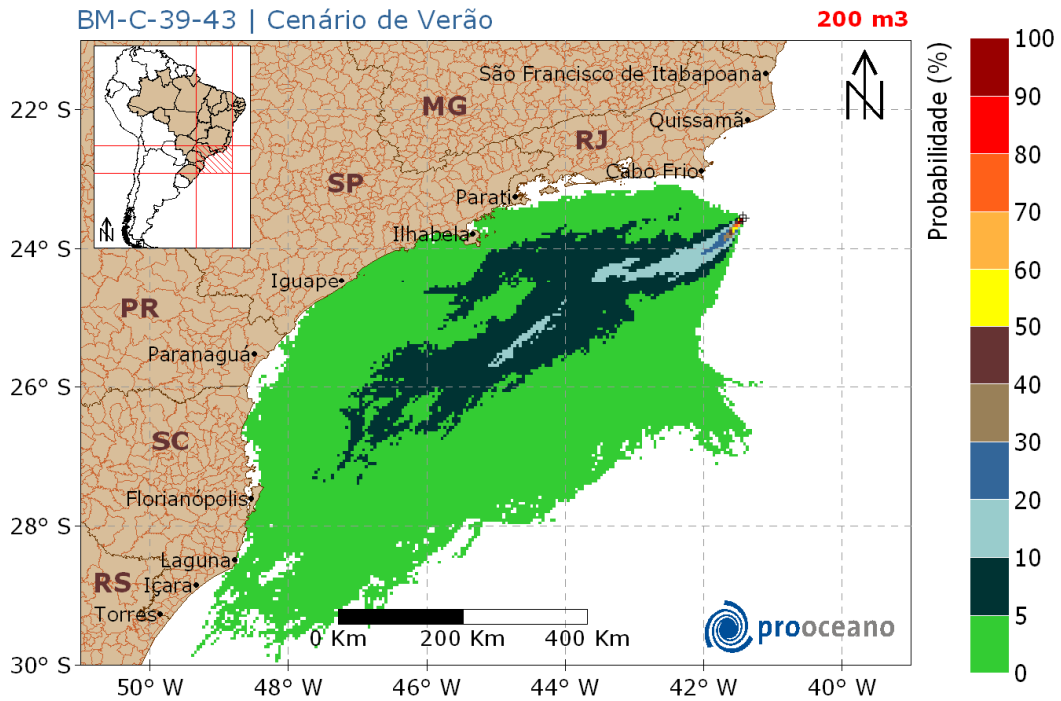


Figura 25: Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo, para vazamento de 200 m³, no cenário de verão.

Podemos observar no mapa de probabilidade de Presença de Óleo, que a deriva do óleo foi para sudoeste do local do vazamento e que a probabilidade da costa ser atingida foi de no máximo 2%. A região que pode ser atingida estendeu-se, de forma geral, de Parati - RJ a Jaguaruna - SC (Tabela 4).

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

FPSO | simulação 720 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Verão

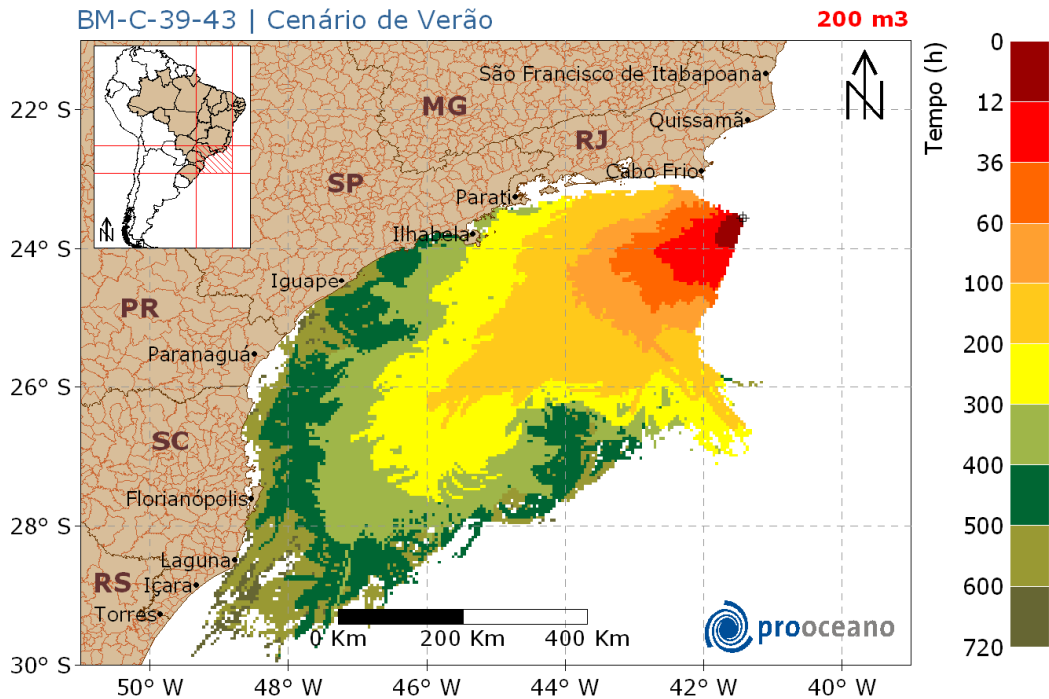


Figura 26: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m³, no cenário de verão.

Observa-se na Figura 26, que o tempo mínimo da chegada do óleo na costa foi de 300 horas, no município de Ilhabela, estado de São Paulo. Os estados do Rio de Janeiro, Paraná e Santa Catarina podem ser atingidos no tempo mínimo de 422h, 556h e 547h, respectivamente (Tabela 4).

Para obtenção do volume máximo de óleo na costa, os elementos de grade que representam a mesma são monitorados ao longo de toda a simulação. São armazenadas as informações de volumes máximos de óleo que atingem 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 volumes máximos de óleo presentes nos elementos de grade mais próximos a cada município costeiro.

A seguir serão apresentados os valores máximos de óleo na costa para o cenário de verão.

STROLL - modo probabilístico

Volume Máximo de Óleo na Costa

FPSO | simulação 720 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Vértice 1 | Cenário de Verão

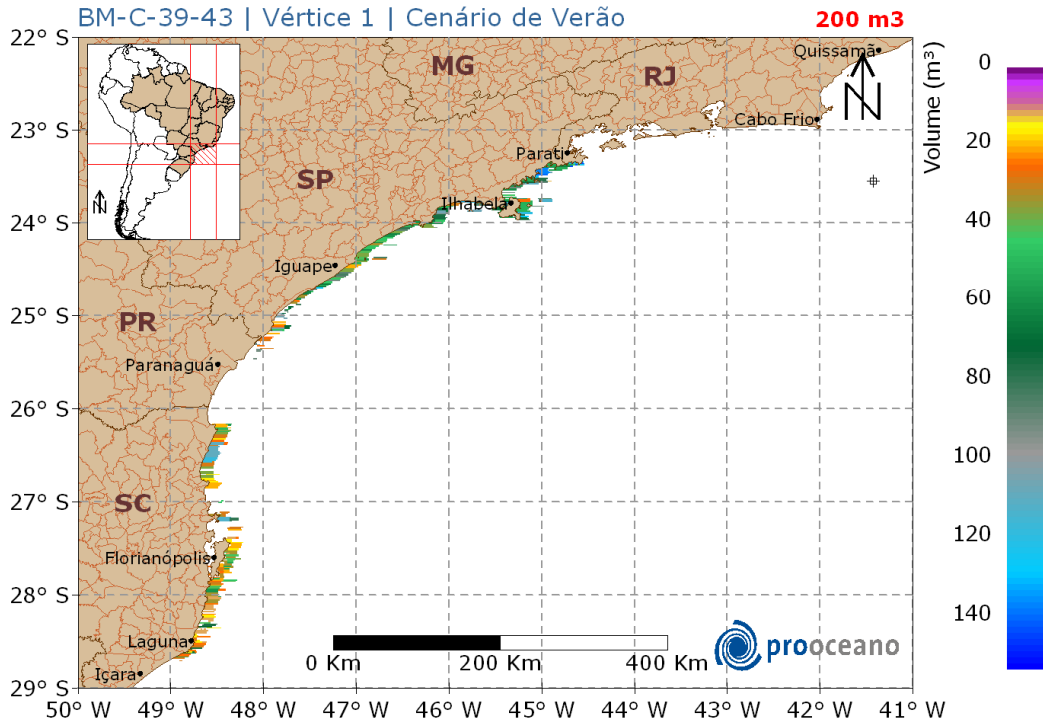


Figura 27: Volume máximo de óleo na costa no cenário de verão, vazamento de 200m³.

O maior valor de volume máximo de óleo na costa foi registrado em Parati - RJ (146,15 m³) (Tabela 4).

V.1.1.2.2. Inverno

O mapa de probabilidade de presença de óleo para o vazamento de 200 m³ no cenário de inverno, encontra-se na Figura 28 enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 29.

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

FPSO | simulação 720 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Inverno

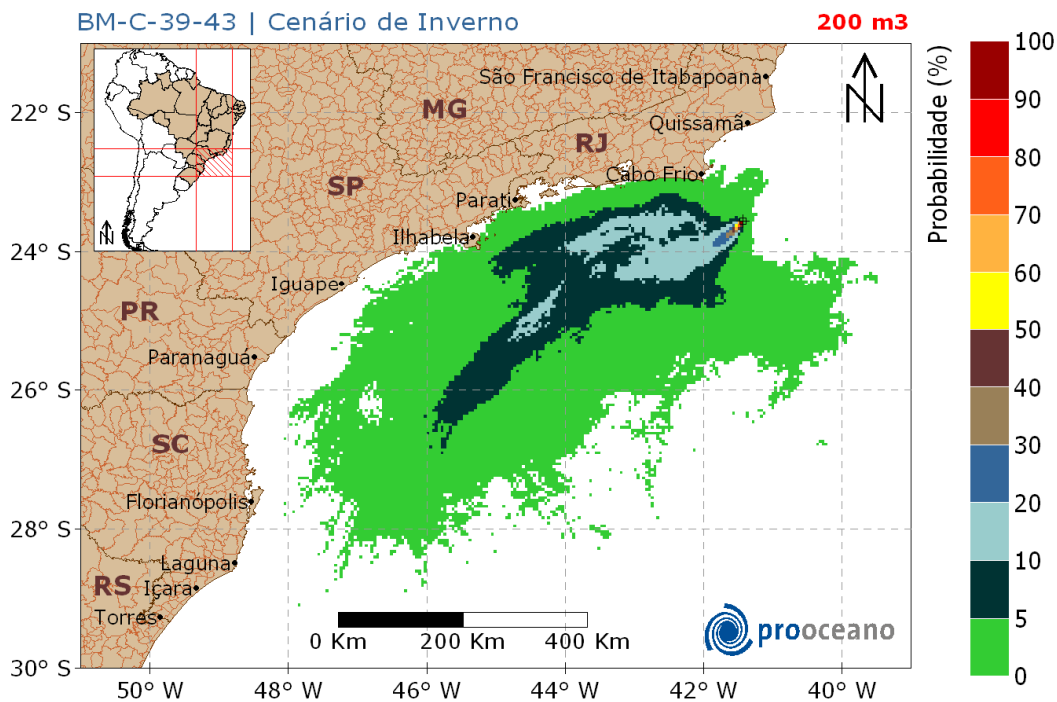


Figura 28: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m³, no cenário de inverno.

Nesse cenário, a deriva do óleo ocorreu rumo a sudoeste e noroeste do local do vazamento, a região que pode apresentar óleo na costa estendeu-se de Cabo Frio – RJ a São Sebastião – SP, de forma geral (Tabela 4).

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

FPSO | simulação 720 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Inverno

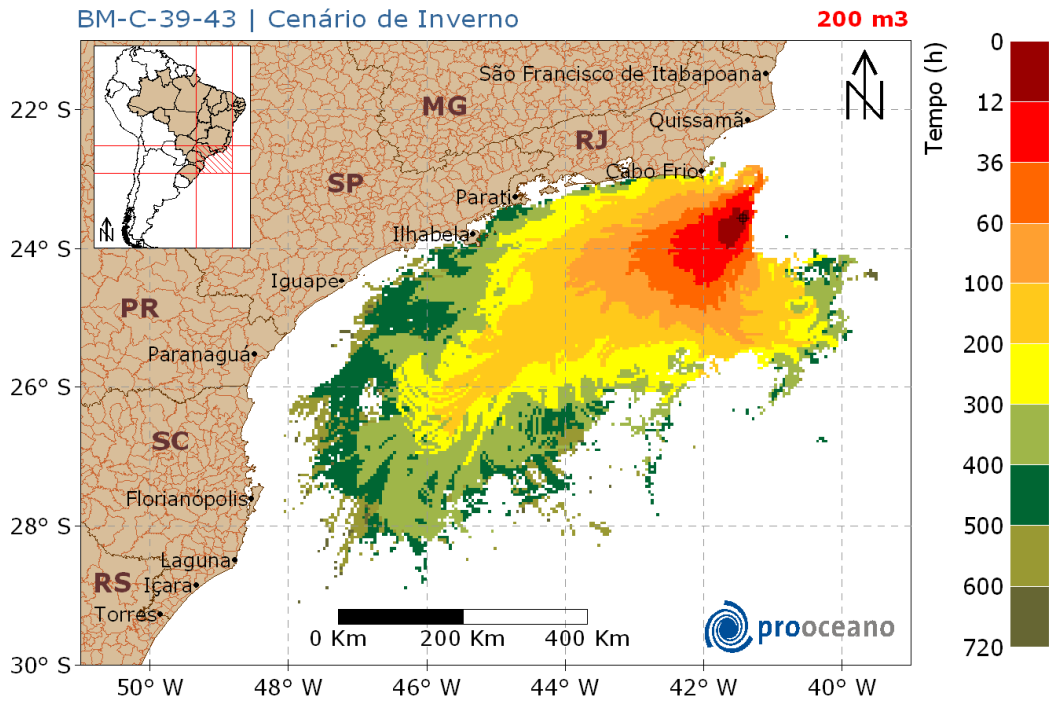


Figura 29: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m³, no cenário de inverno.

Neste cenário, o tempo mínimo de toque na costa foi menor, 249 horas, em Arraial do Cabo e Araruama, estado do Rio de Janeiro. O estado de São Paulo pode ser atingido com o tempo mínimo de 540 horas de simulação.

A seguir, na Tabela 4, serão apresentados os volumes máximos, valores de probabilidade e tempo mínimo de chegada de óleo de cada município com possibilidade de ser atingido pelo óleo em um derrame de médio volume (200 m³).

Tabela 4: Volume máximo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de 200 m³ nos cenários de verão e inverno.

MUNICÍPIOS	Volume Máximo (m ³)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo de Toque (h)		
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	
RJ	Cabo Frio	-	153,65	-	0,80	-	300
	Armação dos Búzios	-	113,78	-	0,50	-	341
	Arraial do Cabo	-	154,52	-	1,20	-	249
	Araruama	-	103,41	-	1,10	-	249
	Saquarema	-	103,41	-	1,10	-	443
	Maricá	-	124,67	-	0,90	-	453
	Niterói	-	118,68	-	0,70	-	512
	Rio de Janeiro	-	143,08	-	1,00	-	545
	Angra dos Reis	-	-	-	-	-	-
	Ilha Grande (Angra dos Reis)	-	-	-	-	-	-
	Parati	146,15	56,35	0,70	0,90	422	499
SP	Ubatuba	141,99	64,59	0,80	1,00	418	612
	Caraguatatuba	92,66	-	0,80	-	432	-
	Ilhabela	130,20	42,51	1,40	1,10	300	540
	São Sebastião	133,51	25,84	0,80	0,50	447	540
	Bertioga	132,81	-	0,80	-	590	-
	Guarujá	107,76	-	2,00	-	527	-
	Santos	59,87	-	1,30	-	527	-
	São Vicente	59,87	-	1,30	-	527	-
	Praia Grande	89,61	-	1,30	-	525	-
	Mongaguá	64,63	-	1,10	-	509	-
	Itanhaém	63,85	-	1,50	-	597	-
	Peruíbe	64,15	-	1,00	-	618	-
	Iguape	93,59	-	1,40	-	624	-
	Ilha Comprida	106,70	-	0,90	-	650	-
	Cananéia	106,70	-	0,70	-	631	-
	PR	Guaraqueçaba	102,30	-	0,60	-	556
Paranaguá		-	-	-	-	-	-
Pontal do Paraná		-	-	-	-	-	-
Matinhos		-	-	-	-	-	-
Guaratuba		-	-	-	-	-	-

Tabela 4: Volume máximo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de 200 m³ nos cenários de verão e inverno. . (continuação).

MUNICÍPIOS	Volume Máximo (m ³)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo de Toque (h)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
Itapoá	-	-	-	-	-	-
São Francisco do Sul	136,72	-	0,90	-	638	-
Balneário Barra do Sul	119,63	-	0,90	-	576	-
Araquari	119,63	-	0,60	-	576	-
Barra Velha	38,49	-	0,60	-	580	-
Piçarras	38,55	-	0,60	-	547	-
Penha	21,67	-	0,70	-	556	-
Navegantes	21,67	-	0,60	-	554	-
Itajaí	-	-	-	-	-	-
Balneário Camboriú	-	-	-	-	-	-
Itapema	34,14	-	0,50	-	564	-
Porto Belo	34,14	-	0,50	-	564	-
Bombinhas	114,86	-	0,60	-	564	-
Tijucas	-	-	-	-	-	-
Governador Celso Ramos	-	-	-	-	-	-
Biguaçu	-	-	-	-	-	-
São José	-	-	-	-	-	-
Florianópolis	55,62	-	1,00	-	600	-
Palhoça	51,69	-	1,00	-	564	-
Paulo Lopes	60,71	-	0,60	-	554	-
Garopaba	60,71	-	0,80	-	625	-
Imbituba	76,99	-	1,00	-	632	-
Laguna	76,78	-	0,90	-	648	-
Jaguaruna	68,20	-	0,90	-	624	-

V.1.1.3. Pior Caso

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações probabilísticas de pior caso, afundamento do FPSO. Para esses cenários foi considerado um vazamento instantâneo durante 12 horas. O tempo simulado abrange as 12h de vazamento e mais 30 dias após o término do mesmo, totalizando 732h de simulação.

V.1.1.3.1. Verão

O mapa de probabilidade e o Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo para um cenário de pior caso com volume vazado de 167.487,8m³, no período de verão, são apresentados na Figura 30 e na Figura 31, respectivamente.

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

FPSO | simulação 732 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Verão

167.487,8 m³

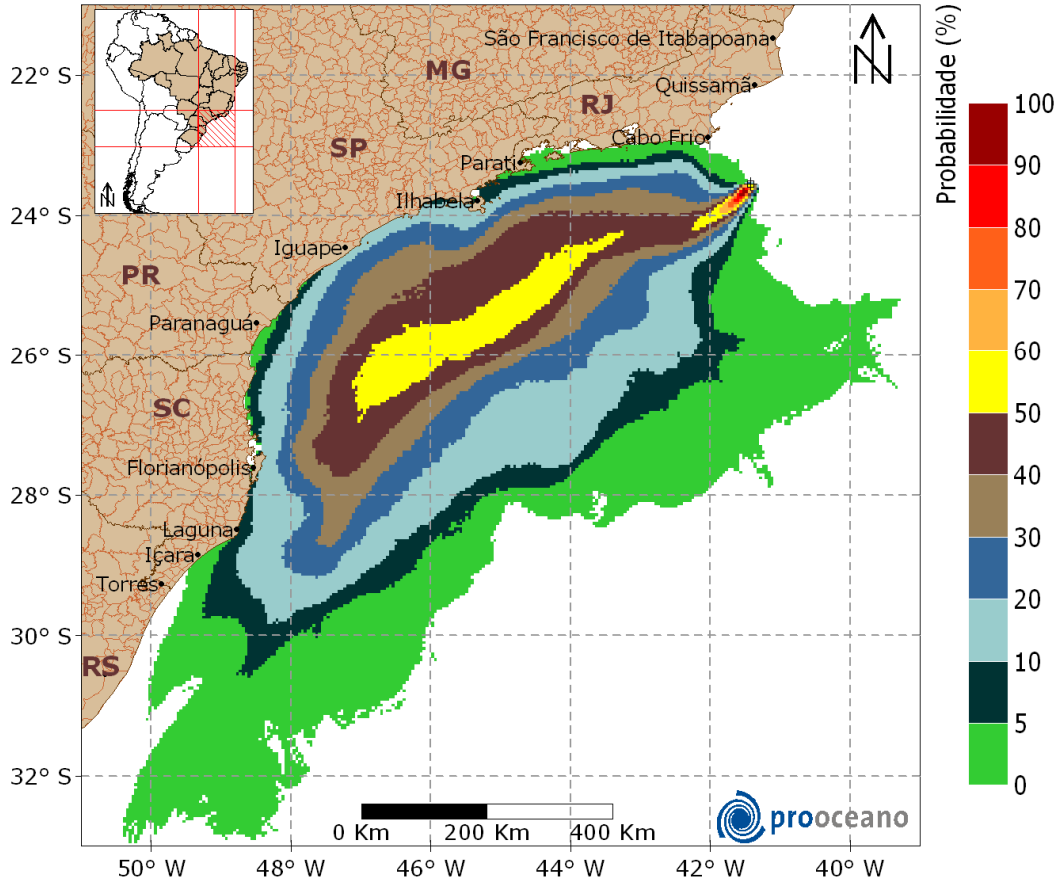


Figura 30: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento instantâneo de pior caso, no cenário de verão.

A deriva do óleo ocorreu preferencialmente para sudoeste do local do vazamento. A maior probabilidade registrada, 17,97%, ocorreu no Guarujá no estado de São Paulo.

A região de costa que pode apresentar óleo estendeu-se de Saquarema – RJ até Balneário Arroio da Silva – SC (Tabela 5).

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

FPSO | simulação 732 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Verão

167.487,8 m³

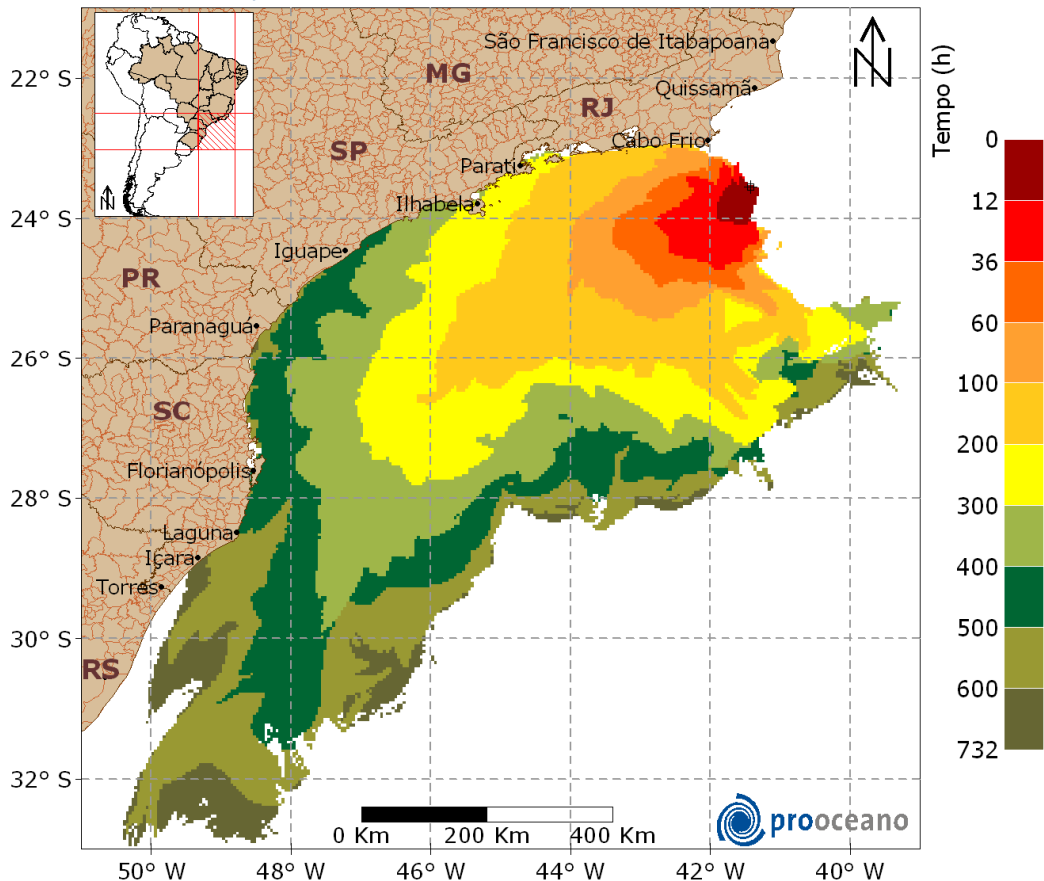


Figura 31: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para um vazamento instantâneo de pior caso, no cenário de verão.

O menor tempo mínimo de toque na costa, nesse cenário, ocorreu em 198 horas, na região de Saquarema, estado do Rio de Janeiro.

Os estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina podem apresentar óleo na costa com o tempo mínimo de 309h, 597h, e 481h respectivamente (Tabela 5).

Para obtenção do volume máximo de óleo na costa, os elementos de grade que representam a mesma são monitorados ao longo de toda a simulação. São armazenadas as informações de volumes máximos de óleo que atingem 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. (Figura 32).

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

A seguir serão apresentados os valores máximos de óleo na costa para o cenário de verão.

STROLL - modo probabilístico

Volume Máximo de Óleo na Costa

FPSO | simulação 732 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Verão

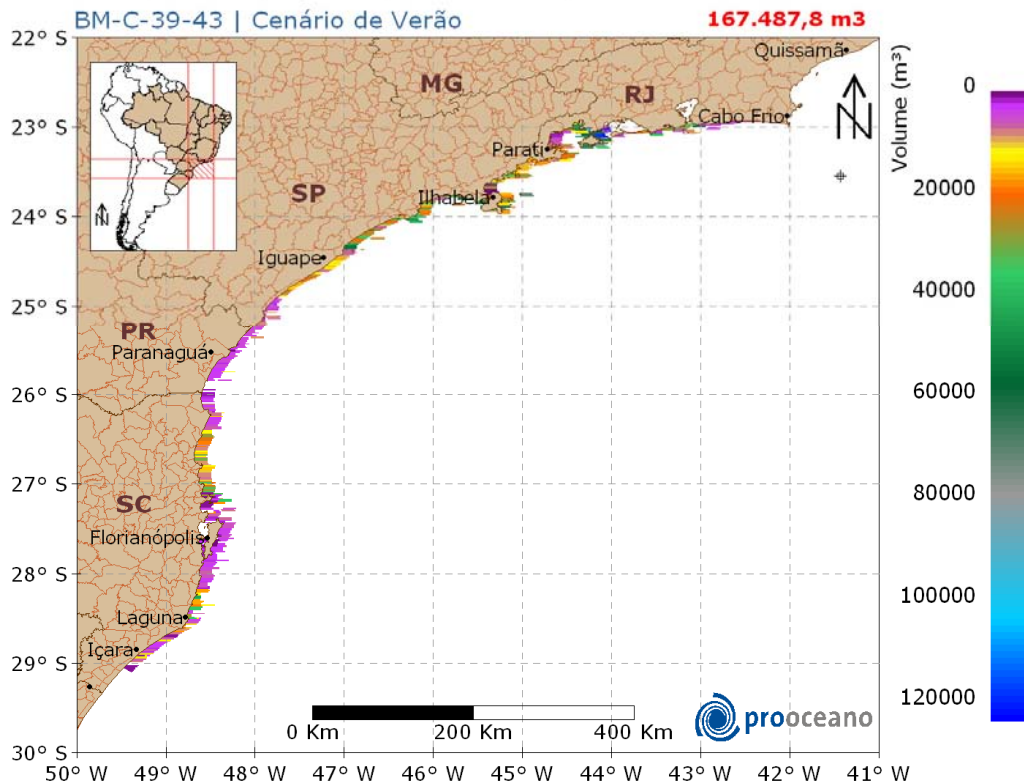


Figura 32: Volume máximo de óleo na costa no cenário de verão, vazamento de pior caso.

Ao analisarmos o volume máximo de óleo que atinge a costa (Figura 32), observamos que os municípios que apresentaram os maiores valores foram o Rio de Janeiro e Angra dos Reis – RJ, 123.071,15 m³ (Tabela 5). Também podemos observar que os menores valores encontram-se na extremidade sul do mapa.

Para uma melhor análise dos tempos de chegada de óleo na costa, foram gerados histogramas com as frequências de ocorrência das classes de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para toda a simulação probabilística (Figura 33). O gráfico de probabilidade de presença de óleo com os histogramas de tempo de chegada facilita a análise conjunta dos resultados.

Os histogramas foram elaborados para cada quadrado de 2 graus de resolução, onde os gráficos estão centrados. No cálculo dessa estatística são levados em consideração todos os tempos de chegada de óleo no interior de cada quadrado supracitado.

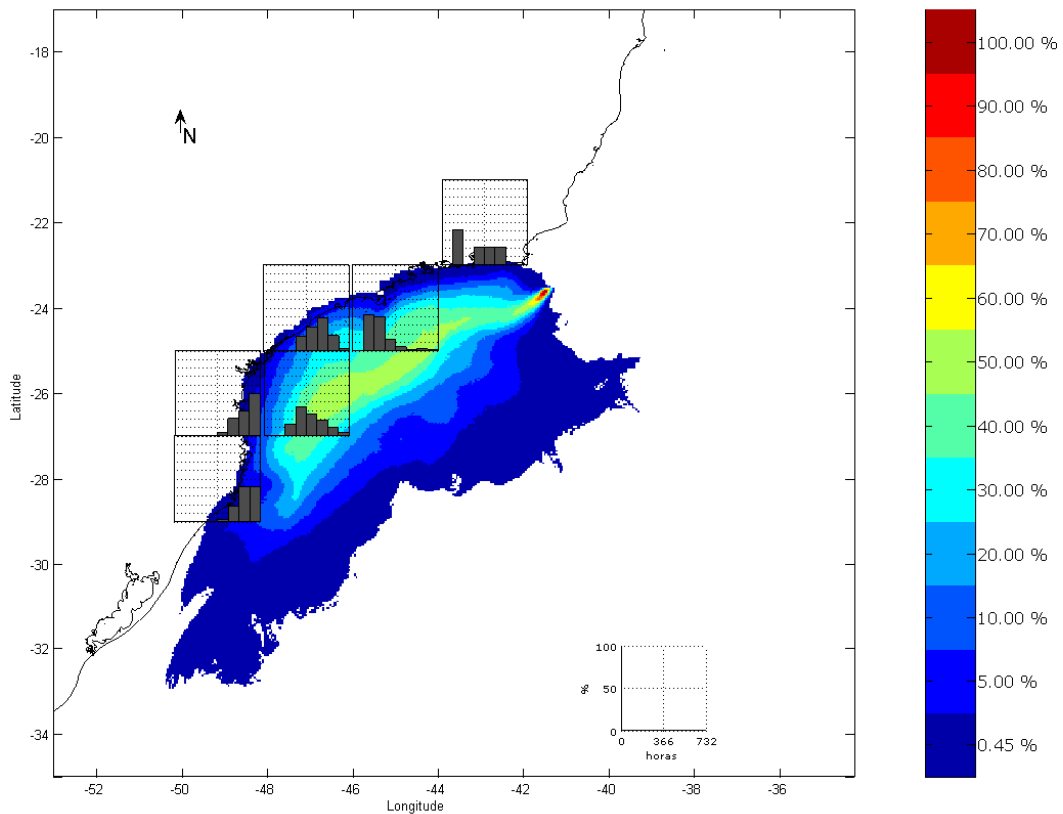


Figura 33: Histogramas de tempo de chegada de óleo na costa no cenário de verão. A escala a direita é de probabilidade.

Os histogramas de tempo de chegada, no cenário de verão, mostraram que nas regiões mais próximas ao local do vazamento, a maior parte dos tempos de chegada ocorreu antes da metade da simulação (0-366h).

V.1.1.3.2. Inverno

A seguir, da Figura 34 à Figura 37, serão apresentados os resultados obtidos no período de inverno, para um cenário de pior caso, volume vazado de 167.487,8 m³.

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

FPSO | simulação 732 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Inverno

167.487,8 m³

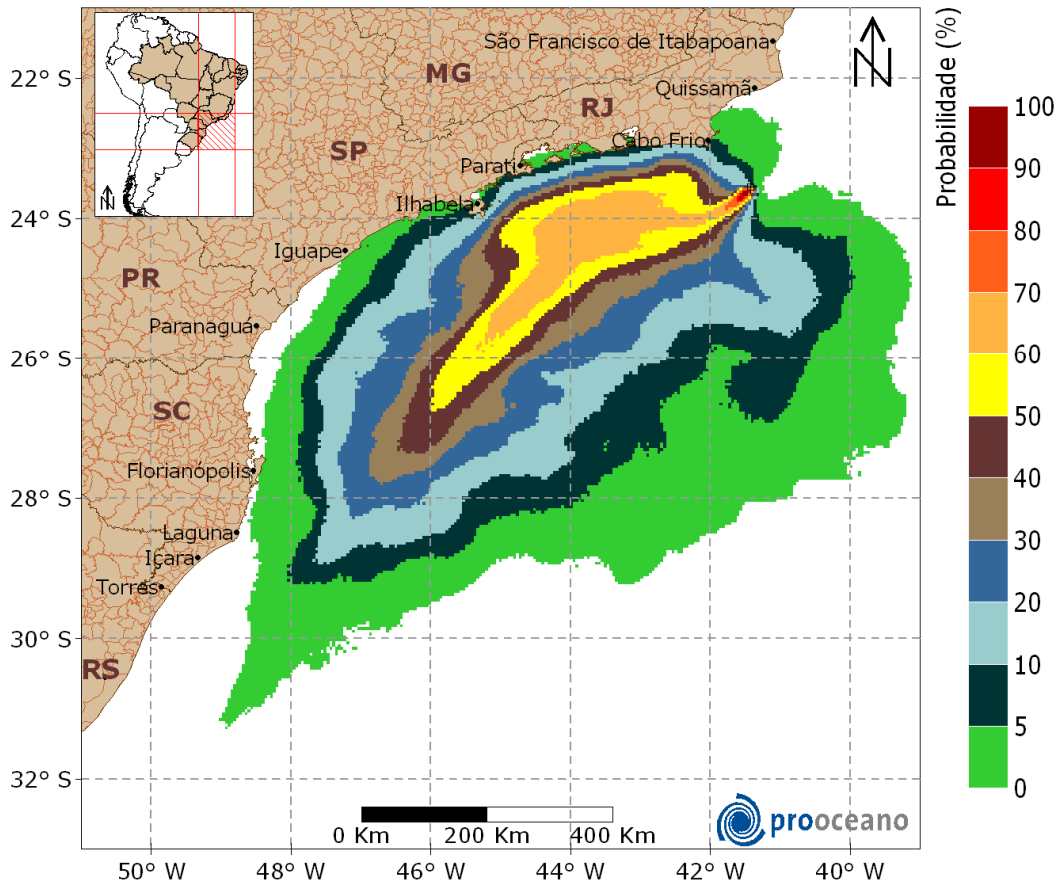


Figura 34: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento instantâneo de pior caso, no cenário de inverno.

Nesse cenário a deriva do óleo também foi preferencial para sudoeste do local do vazamento, no entanto, as derivas rumo a noroeste também foram observadas. A maior probabilidade de presença de óleo registrada foi de Arraial do Cabo até Saquarema, 10,60%.

A região que pode ser atingida pelo óleo estendeu-se de Rio das Ostras – RJ a Iguape – SP, além de Florianópolis - SC (Tabela 5).

STROLL - modo probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

FPSO | simulação 732 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Inverno

167.487,8 m³

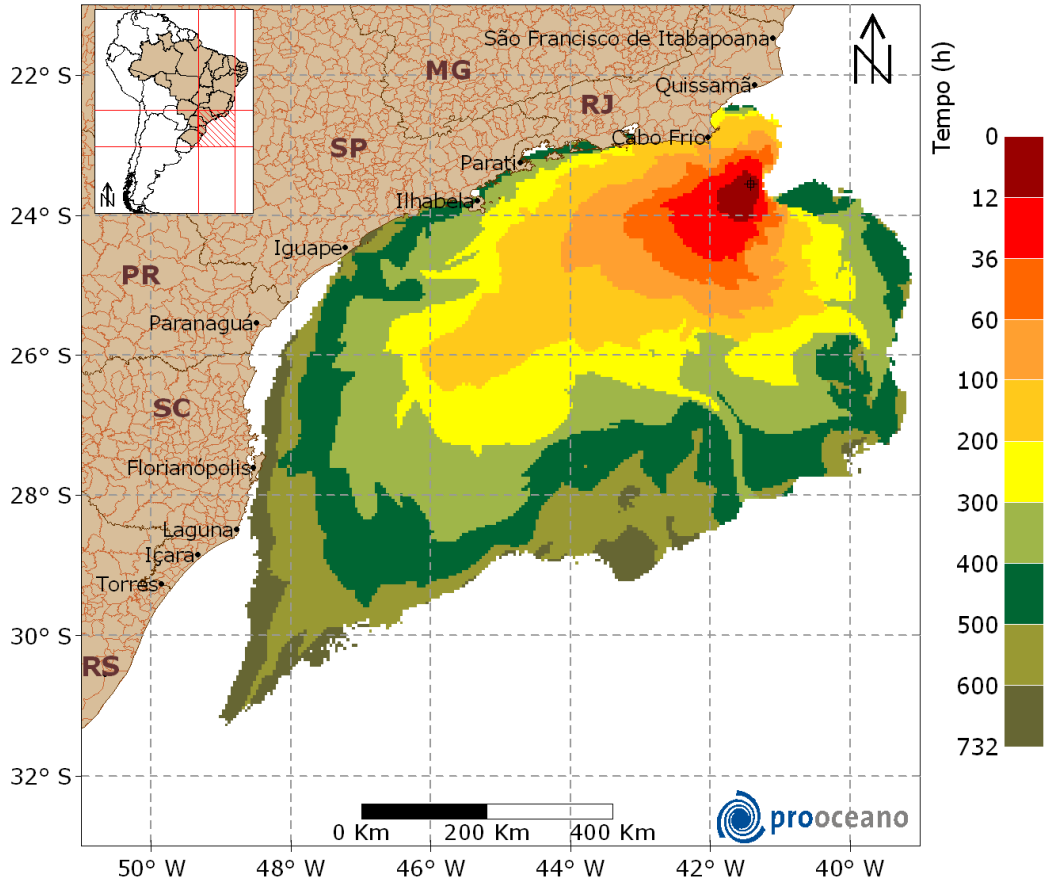


Figura 35: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

No cenário de inverno o tempo mínimo de chegada de óleo foi de 127 horas em Araruama, estado do Rio de Janeiro. Os estados de São Paulo e Santa Catarina podem ser atingidos com o tempo mínimo de 400h e 670h, respectivamente (Tabela 5).

STROLL - modo probabilístico

Volume Máximo de Óleo na Costa

FPSO | simulação 732 h | 2.500 simulações

BM-C-39-43 | Cenário de Inverno

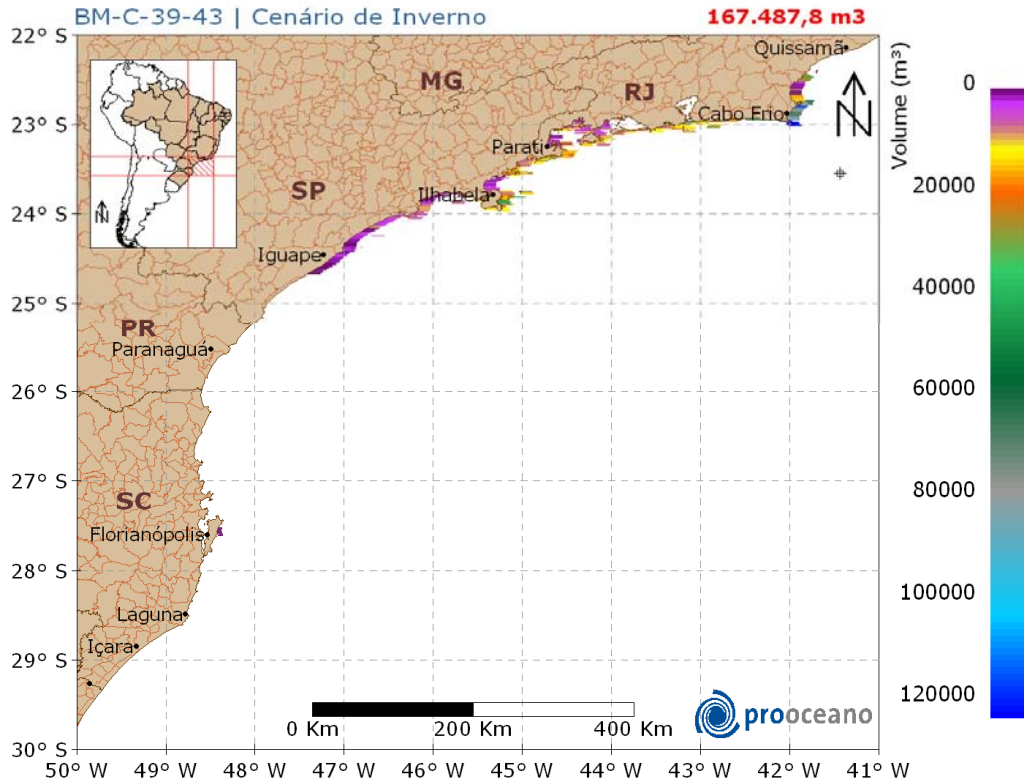


Figura 36: Volume máximo de óleo na costa no cenário de inverno, vazamento de pior caso.

Os maiores volumes máximos de óleo na costa foram registrados no estado do Rio de Janeiro, sendo o máximo registrado em Arraial do Cabo – RJ, 124.952,04m³ (Tabela 5).

Para uma melhor análise dos tempos de chegada de óleo na costa, foram gerados histogramas com as freqüências de ocorrência das classes de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para toda a simulação probabilística (Figura 37).

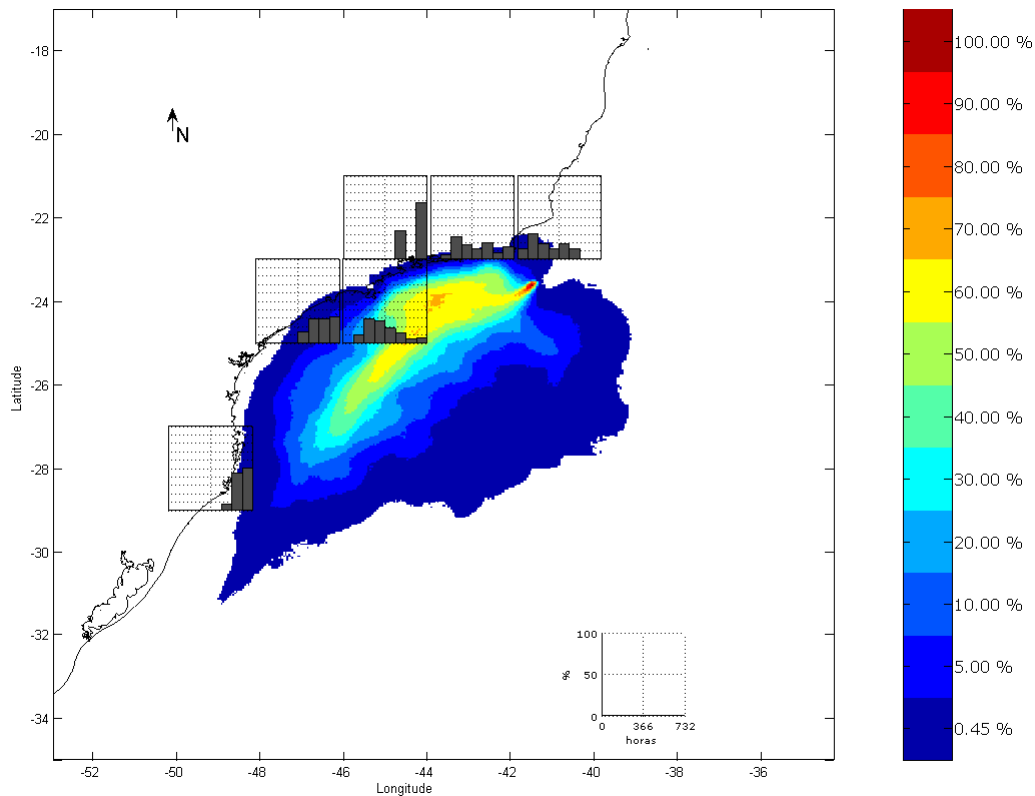


Figura 37: Histogramas de tempo de chegada de óleo na costa no cenário de inverno. A escala à direita é de probabilidade.

No cenário de inverno os tempos de chegada estiveram distribuídos entre as duas metades da simulação, na maior parte das regiões.

A seguir, na Tabela 5, serão apresentados os volumes máximos, valores de probabilidade e tempo mínimo de chegada de óleo de cada município com possibilidade de ser atingido pelo óleo em um derrame de pior caso.

Tabela 5: Volume máximo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento de pior caso, nos cenários de verão e inverno.

	MUNICÍPIOS	Volume Máximo (m ³)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo de Toque (h)		
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	
RJ	Rio das Ostras	-	41895,47	-	0,87	-	295	
	Casimiro de Abreu	-	2318,75	-	0,98	-	295	
	Cabo Frio	-	84876,57	-	7,87	-	179	
	Armação dos Búzios	-	117915,83	-	4,26	-	200	
	Arraial do Cabo	-	124952,04	-	10,60	-	159	
	Araruama	-	27844,42	-	10,60	-	127	
	Saquarema	8333,38	45229,38	1,25	10,60	198	168	
	Maricá	61702,73	22094,06	0,93	9,40	214	181	
	Niterói	61702,73	49786,44	0,73	6,34	229	200	
	São Gonçalo*	61703,00	13693,00	0,93	5,25	199	177	
	Itaboraí*	61703,00	13693,00	0,93	5,25	199	177	
	Guapimirim*	61703,00	13693,00	0,93	5,25	199	177	
	Magé*	61703,00	13693,00	0,93	5,25	199	177	
	Duque de Caxias*	61703,00	13693,00	0,93	5,25	199	177	
	Rio de Janeiro	123071,15	49786,44	1,04	7,76	200	200	
	Angra dos Reis	123071,15	12730,70	0,83	1,42	330	491	
	Itaguaí**	55702,00	11016,00	0,93	5,02	245	317	
	Mangaratiba**	55702,00	11016,00	0,93	5,02	245	317	
	SP	Ilha Grande (Angra dos Reis)	123071,15	15860,27	1,97	6,45	300	400
		Parati	31487,84	25030,33	3,84	7,10	300	400
Ubatuba		32868,27	34501,95	6,54	7,87	333	463	
Caraguatatuba		32500,88	5604,57	6,02	3,06	344	526	
Ilhabela		65340,92	46775,35	13,60	10,49	309	400	
São Sebastião		60809,47	36473,58	10,59	5,03	374	556	
Bertioga		51427,18	6880,33	9,87	1,75	395	570	
Guarujá		54232,99	14423,91	17,97	4,37	398	568	
Santos		23397,05	9952,93	13,50	1,64	397	564	
São Vicente		23397,05	9952,93	13,50	1,64	397	564	
Praia Grande		36349,37	9510,15	15,37	2,40	409	597	
Mongaguá		28321,50	9767,93	14,75	1,75	439	619	
Itanhaém		60192,45	8715,43	13,92	1,20	473	646	
Peruíbe		55149,45	3668,63	14,43	1,09	463	679	
Iguape		25857,66	3766,16	15,37	1,31	488	629	
Ilha Comprida		29386,15	-	8,20	-	600	-	
Cananéia		11433,85	-	8,52	-	581	-	

Legenda: * valores referentes à entrada da Baía de Guanabara.
 ** valores referentes à entrada da Baía de Sepetiba.

Tabela 5: Volume máximo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento de pior caso, nos cenários de verão e inverno (continuação I).

	MUNICÍPIOS	Volume Máximo (m ³)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo de Toque (h)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PR	Guaraqueçaba	10032,88	-	8,00	-	615	-
	Paranaguá	5188,29	-	2,39	-	606	-
	Pontal do Paraná	6072,18	-	2,39	-	597	-
	Matinhos	4815,44	-	1,97	-	667	-
	Guaratuba	3231,84	-	1,25	-	667	-
SC	Itapoá	8441,40	-	3,01	-	558	-
	São Francisco do Sul	28864,71	-	6,65	-	620	-
	Balneário Barra do Sul	28864,71	-	5,19	-	540	-
	Araquari	19874,23	-	3,84	-	541	-
	Barra Velha	31365,25	-	3,84	-	541	-
	Piçarras	31365,25	-	3,63	-	525	-
	Penha	16019,10	-	4,98	-	525	-
	Navegantes	16019,10	-	4,15	-	557	-
	Itajaí	9175,55	-	4,67	-	557	-
	Balneário Camboriú	33751,65	-	5,19	-	536	-
	Itapema	33751,65	-	5,19	-	531	-
	Porto Belo	28038,80	-	4,88	-	531	-
	Bombinhas	28038,80	-	6,44	-	536	-
	Tijucas	5170,14	-	4,88	-	536	-
	Governador Celso Ramos	19041,17	-	9,14	-	524	-
	Biguaçu	502,72	-	1,56	-	539	-
	São José	4718,06	-	6,02	-	481	-
	Florianópolis	7998,92	358,18	14,85	1,64	500	670
	Palhoça	5970,09	-	8,41	-	539	-
	Paulo Lopes	5579,69	-	7,48	-	528	-
	Garopaba	7454,90	-	7,89	-	524	-
	Imbituba	45795,79	-	6,44	-	540	-
	Laguna	37904,02	-	7,17	-	564	-
	Jaguaruna	18681,73	-	4,98	-	568	-
	Içara	7131,25	-	1,14	-	642	-
Araranguá	12363,74	-	0,93	-	647	-	
Balneário Arroio da Silva	9690,70	-	0,93	-	665	-	

V.1.2. Modo Determinístico

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas foi identificado o cenário crítico para ocorrência de um evento de pior caso, afundamento do FPSO, na região dos Blocos BM-C-39-43. O cenário que apresentou o menor tempo mínimo de toque na costa foi o de inverno, 127 horas, de modo que será apresentada uma trajetória crítica ocorrida neste cenário.

Também serão apresentadas duas trajetórias que representarão a deriva do óleo nas condições meteo-oceanográficas mais frequentes da região, nos cenários sazonais de verão e inverno, conforme estabelecido no item V.

Nas figuras serão apresentados os instantâneos com os resultados da simulação da dispersão de óleo realizada para a situação escolhida. São também mostrados os campos de vento e correntes que transportaram o óleo no respectivo cenário.

V.1.2.1. Crítico

V.1.2.1.1. Inverno

Da Figura 38 à Figura 45 é mostrada a trajetória do óleo no cenário de inverno para a situação crítica, onde o óleo atinge a costa mais rapidamente.

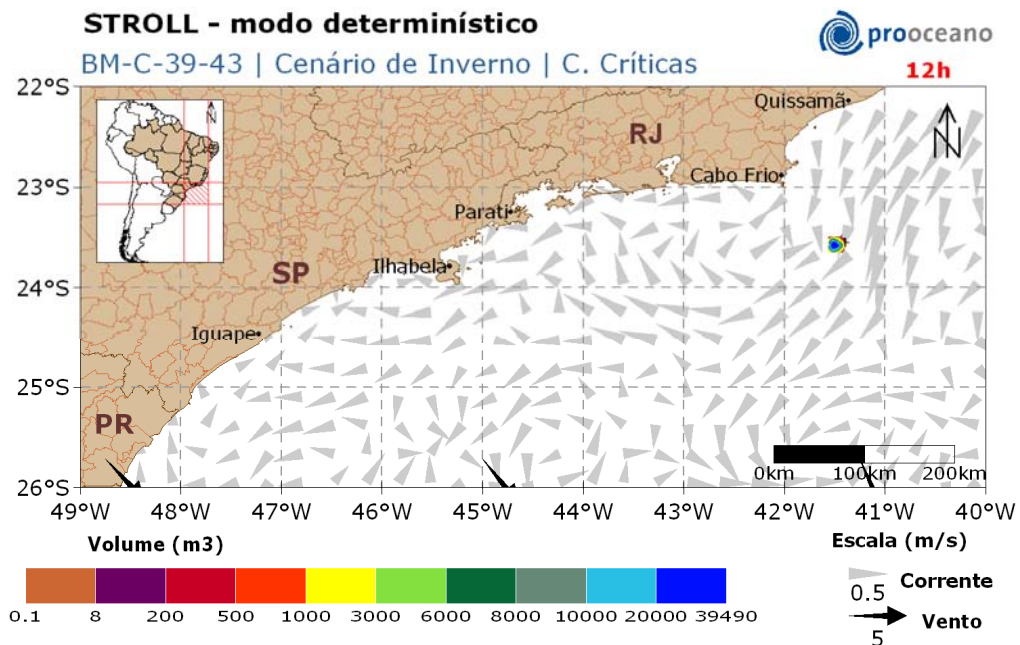


Figura 38: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.

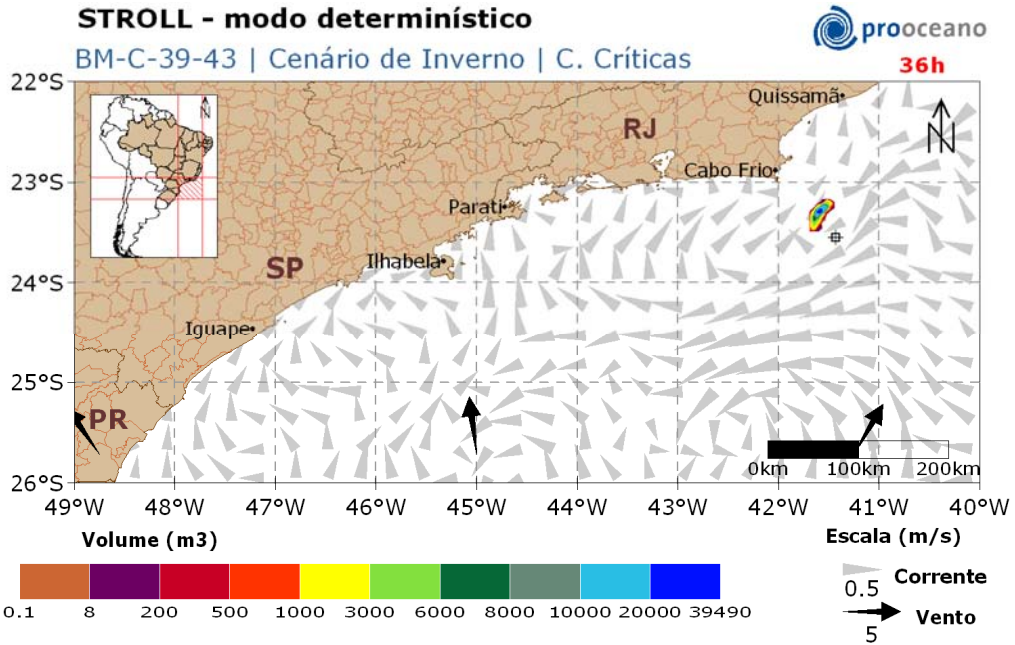


Figura 39: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.

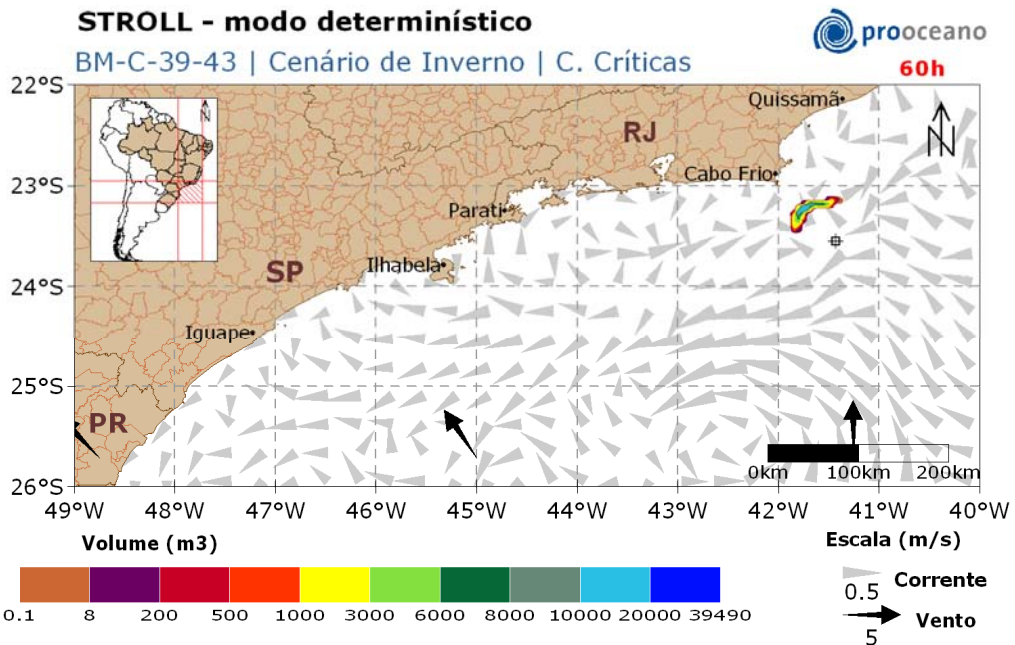


Figura 40: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.

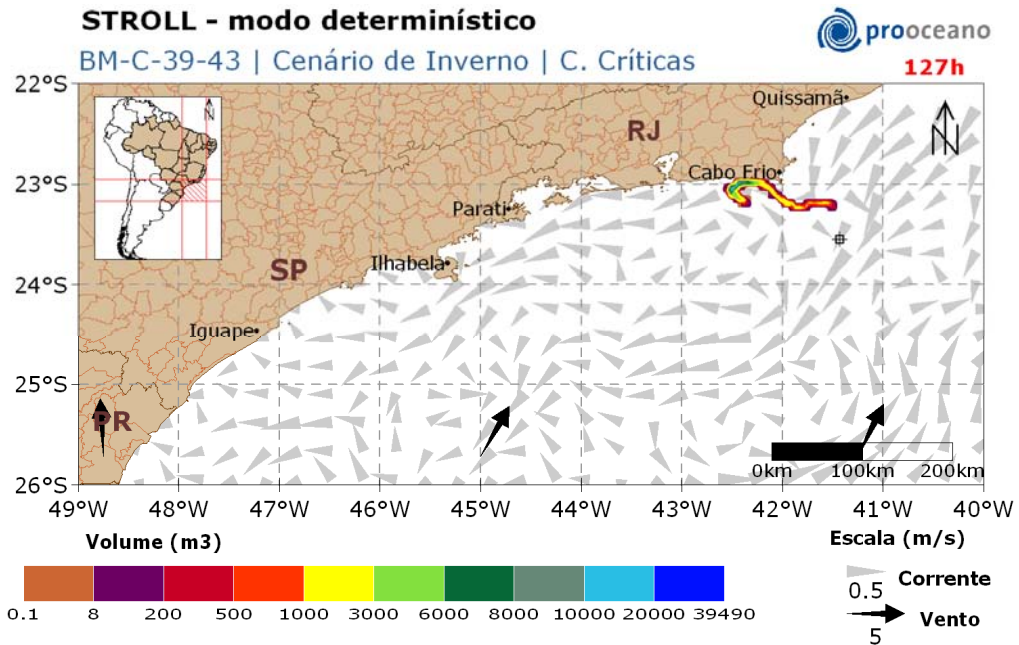


Figura 41: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 127 horas de simulação.

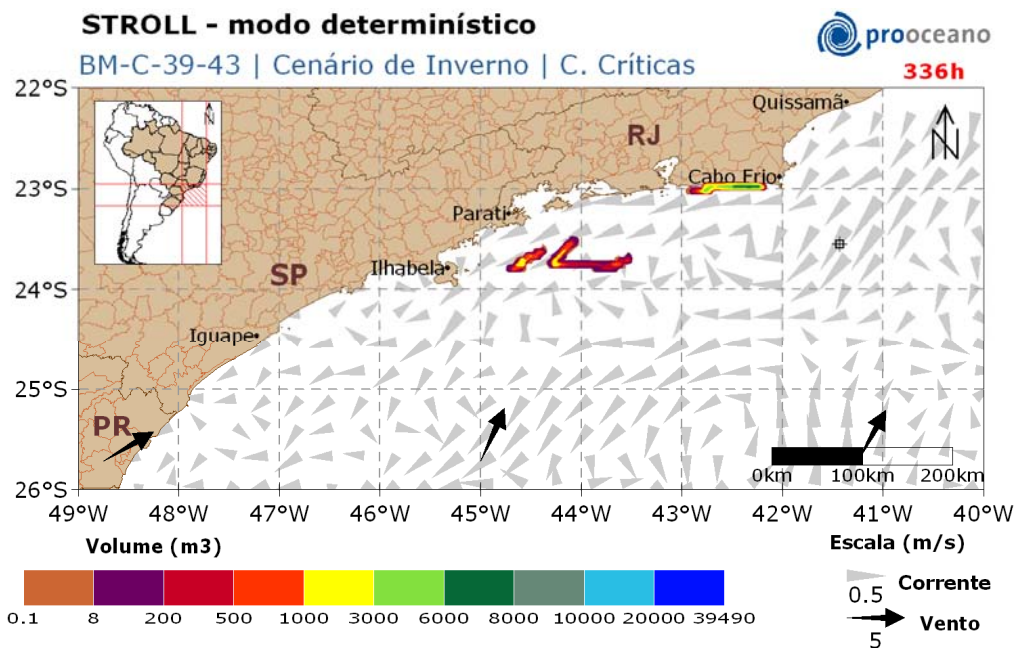


Figura 42: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação.

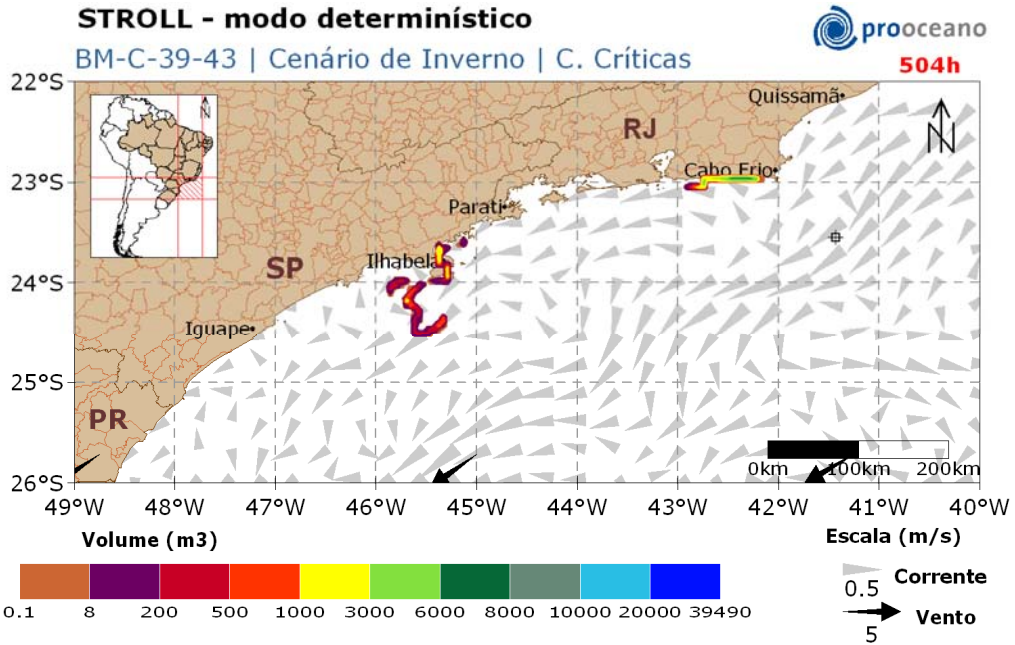


Figura 43: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação.

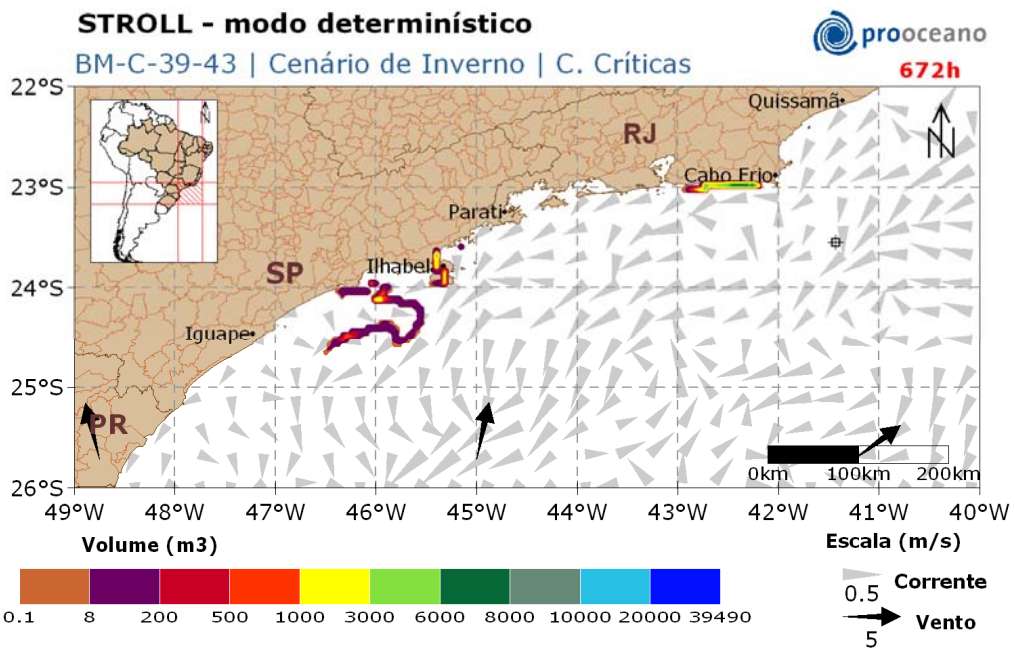


Figura 44: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação.

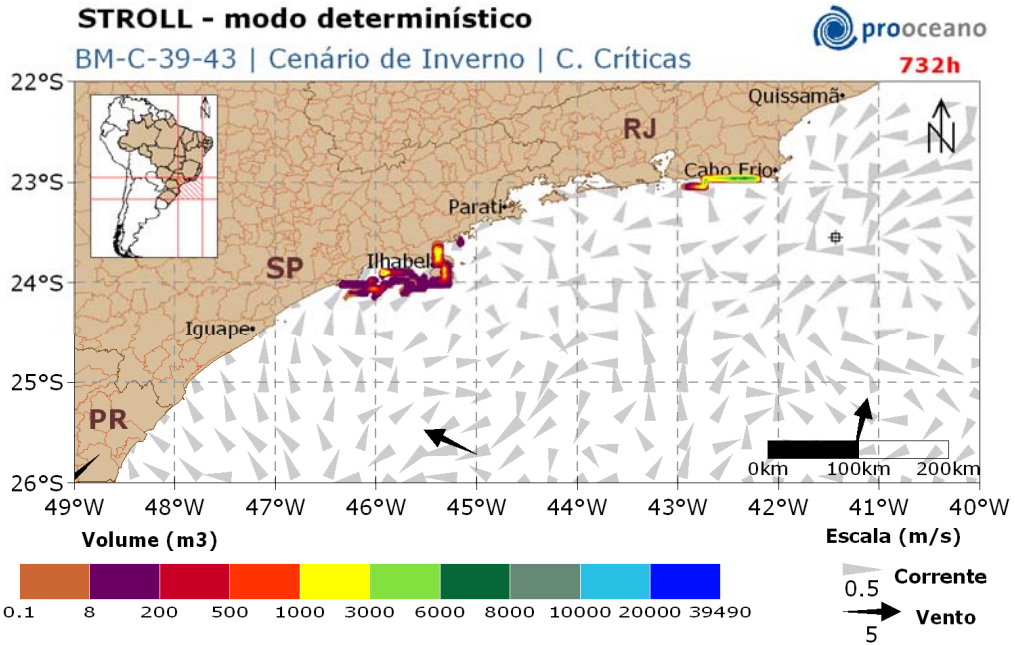


Figura 45: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 732 horas de simulação.

Inicialmente, o óleo derivou rumo noroeste até alcançar a costa do estado do Rio de Janeiro, posteriormente a deriva se deu rumo a sudoeste do local do vazamento. O toque na costa ocorreu em 127 horas, no município de Araruama, estado do Rio de Janeiro. Ao final da simulação, 732 horas, o óleo remanescente encontrava-se em duas regiões, na costa de Arraial do Cabo à Maricá – RJ e de Ubatuba à Praia Grande – SP.

No gráfico (Figura 46), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo da simulação.

Observa-se que, o volume máximo de óleo acumulado na costa, $\sim 108.000 \text{ m}^3$, ocorre ao final da simulação, em 732 horas.

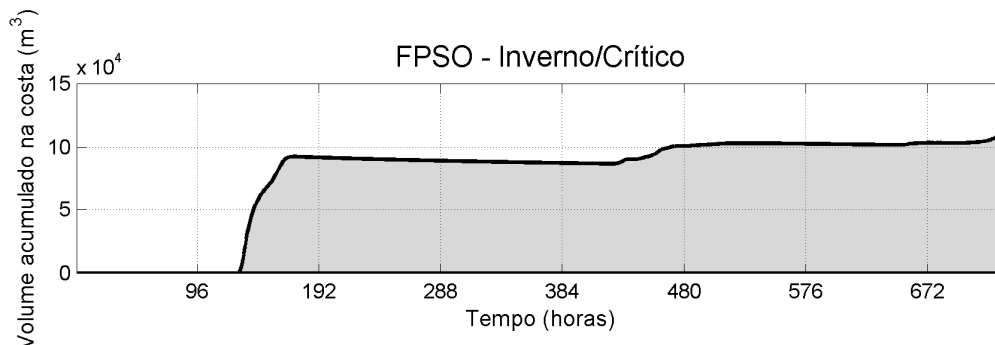


Figura 46: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória crítica no cenário de verão.

V.1.2.2. Condições Meeo-oceanográficas frequentes

V.1.2.2.1. Verão

A seguir, da Figura 47 à Figura 54, é apresentada a trajetória do óleo em condições meeo-oceanográficas frequentes no verão.

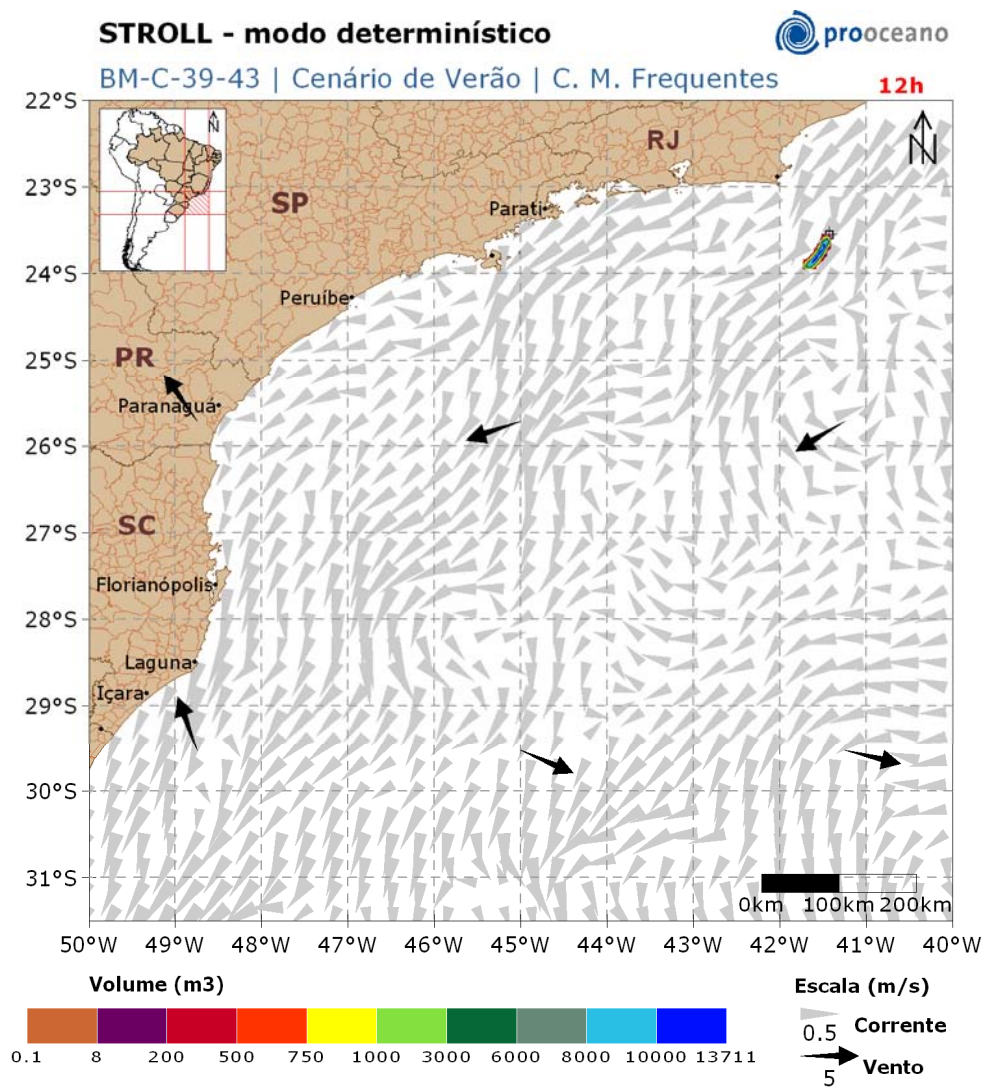


Figura 47: Resultado da simulação determinística de condições meeo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 12 horas de simulação.

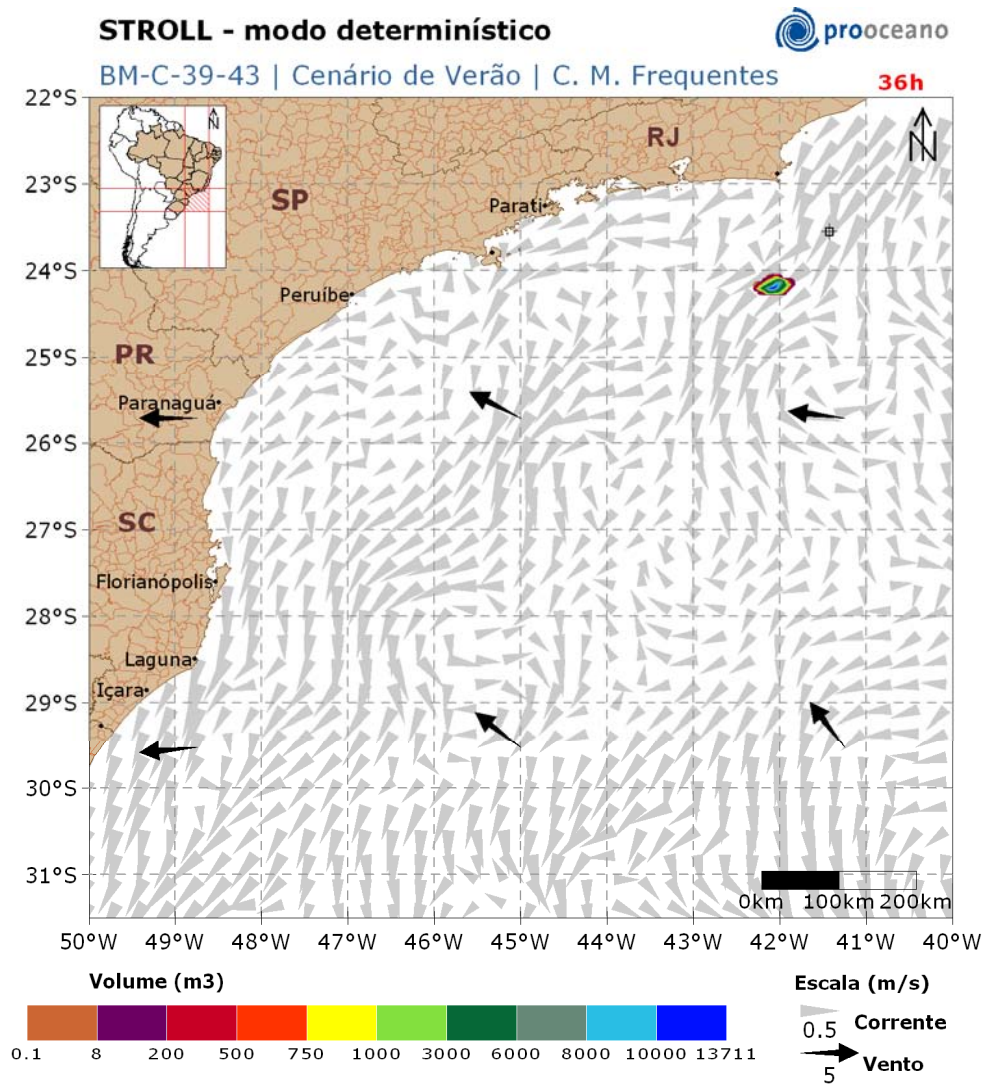


Figura 48: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 36 horas de simulação.

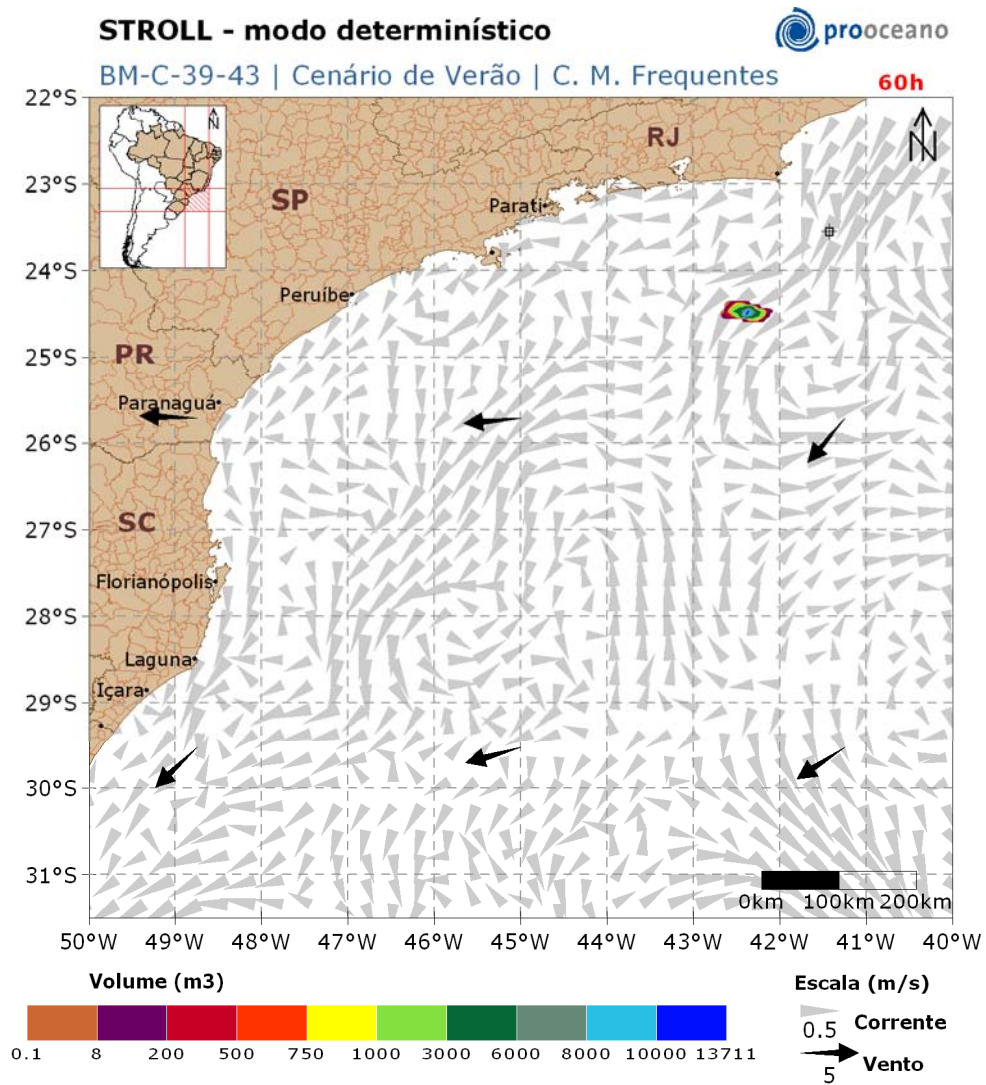


Figura 49: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 60 horas de simulação.

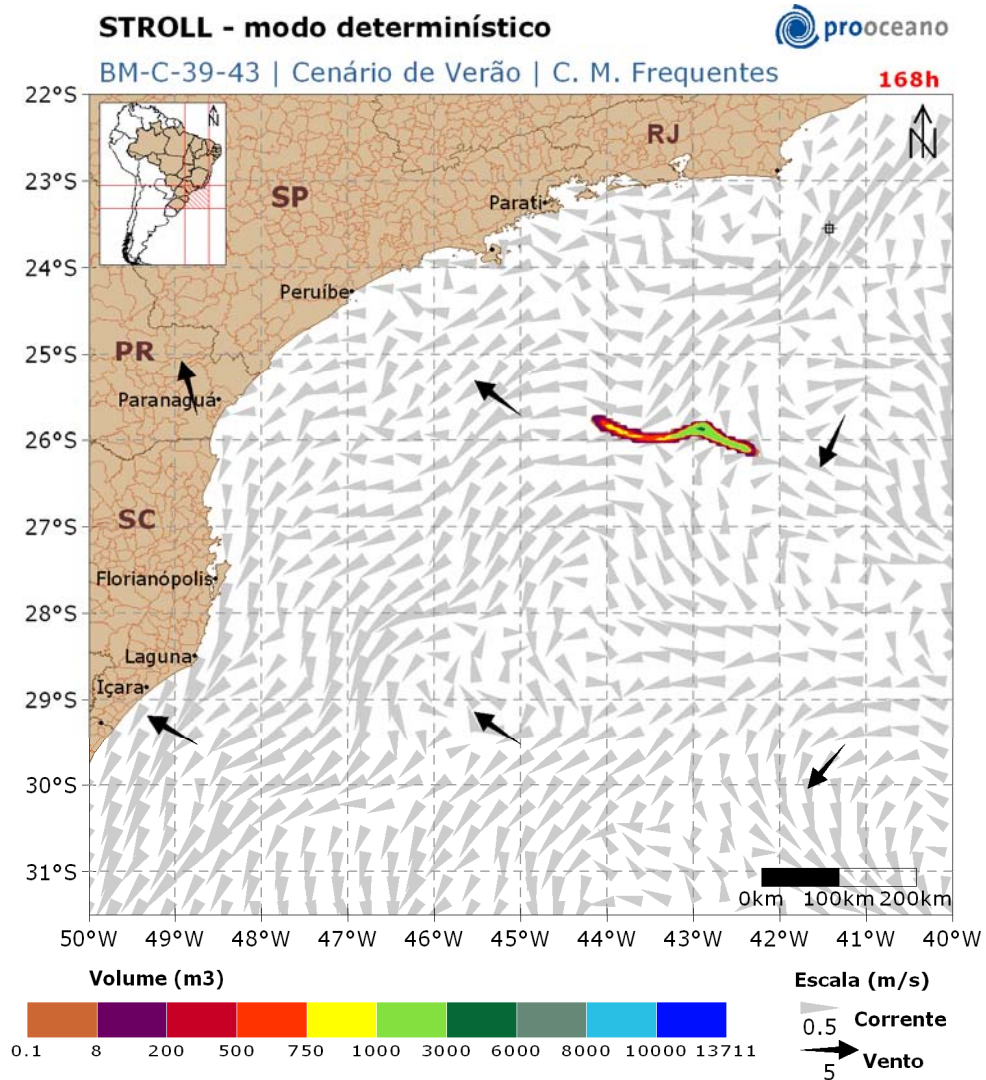


Figura 50: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 1 semana (7 dias) de simulação.

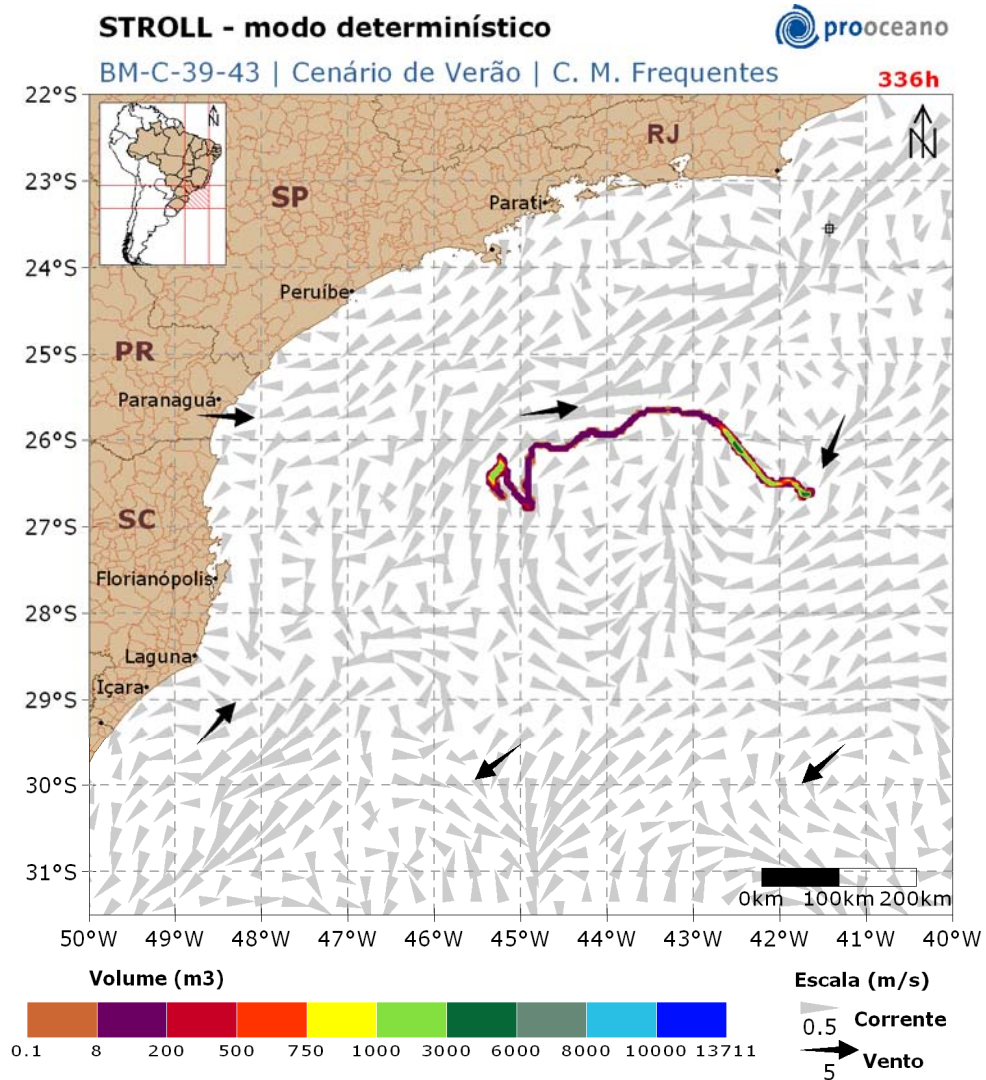


Figura 51: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 2 semanas (14 dias) de simulação.

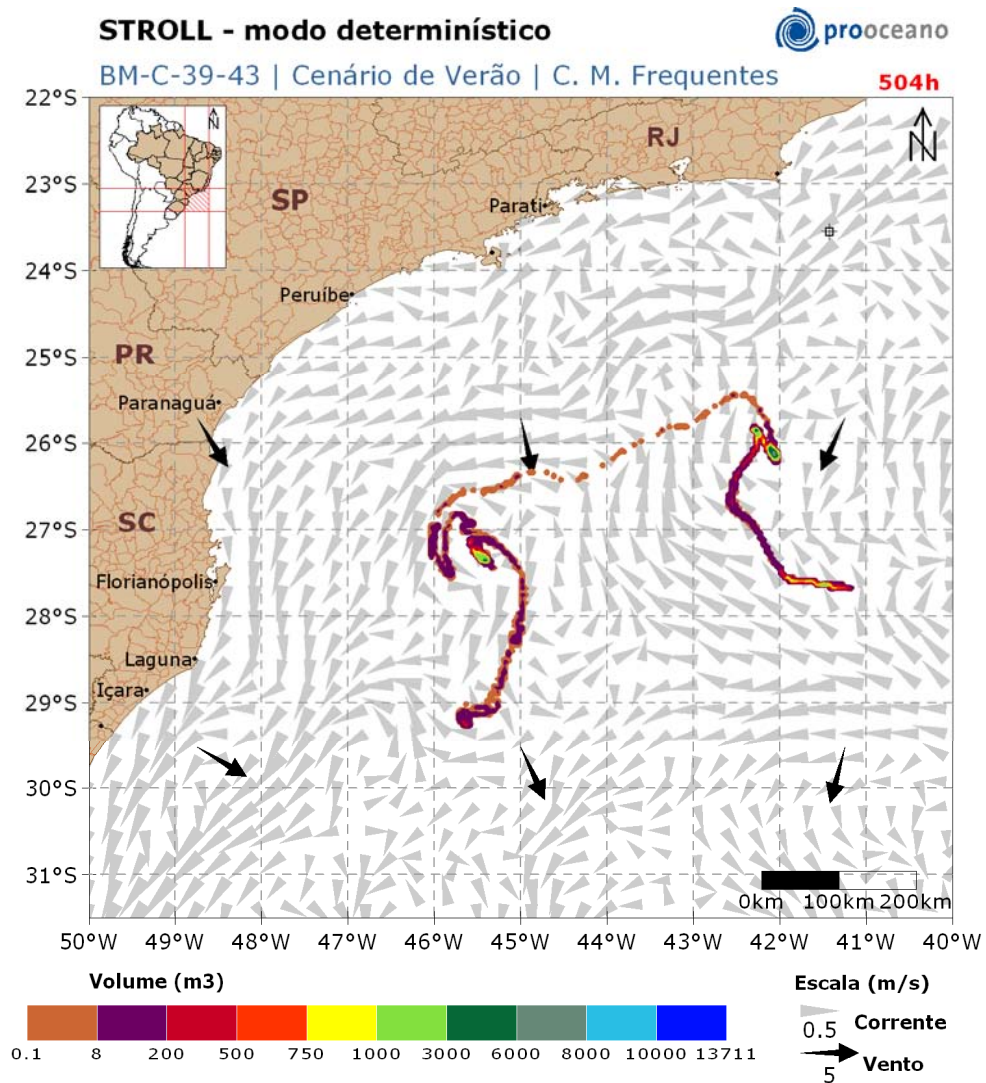


Figura 52: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 3 semanas (21 dias) de simulação.

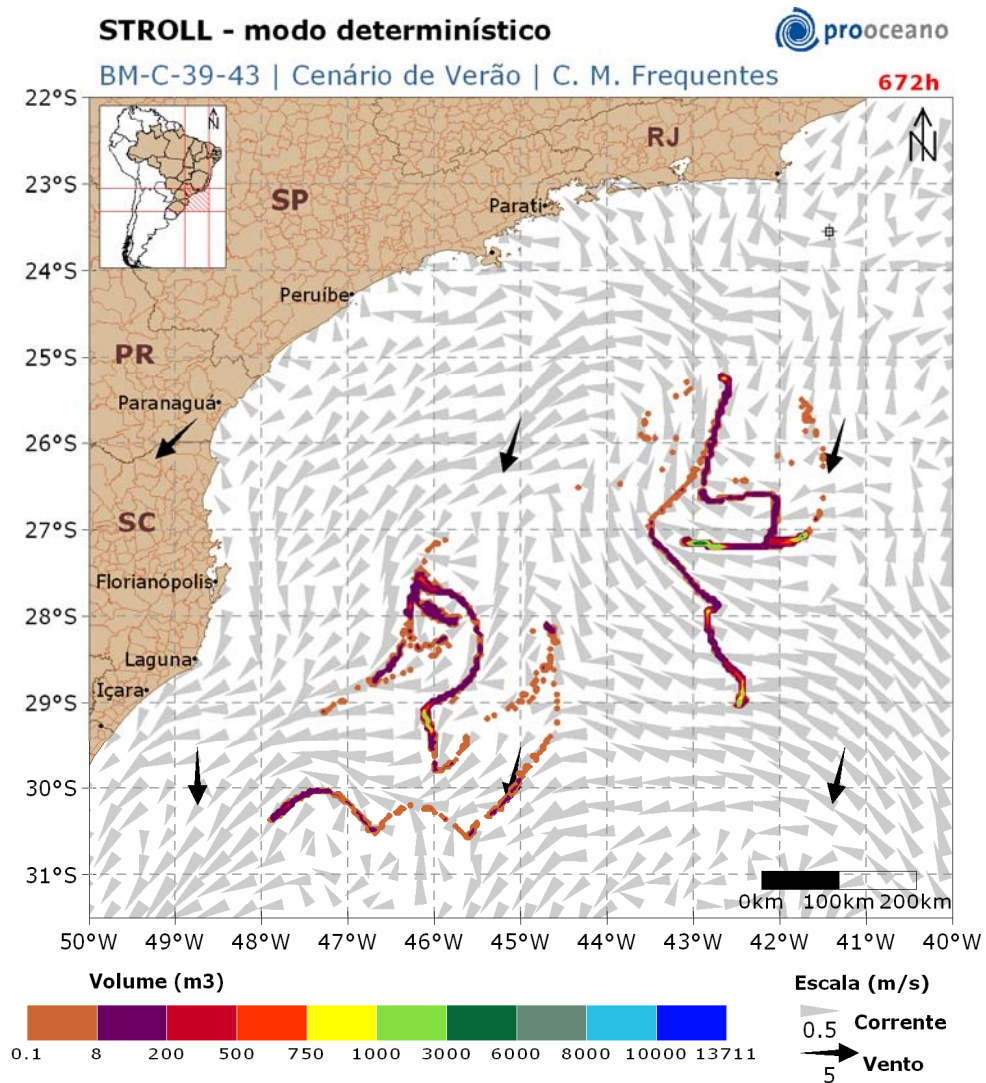


Figura 53: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 4 semanas (28 dias) de simulação.

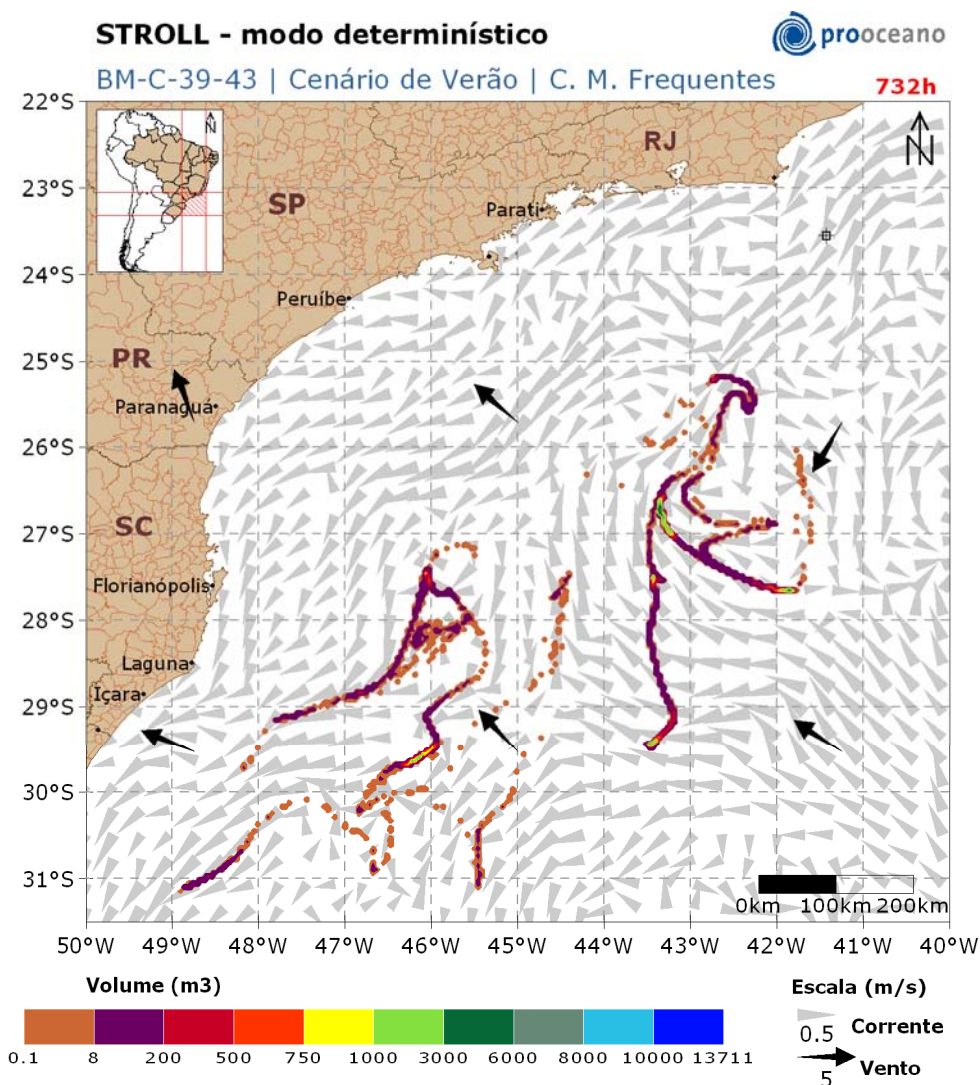


Figura 54: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 732 horas.

A deriva do óleo ocorreu rumo a sudoeste do local do vazamento com ausência de toque na costa durante toda a simulação. Após 732 horas observa-se uma extensa deriva do óleo que pode ser encontrado entre as latitudes de 25°S e 31°S aproximadamente.

V.1.2.2.2. Inverno

A seguir, da Figura 55 à Figura 62, é apresentada a trajetória do óleo em condições meteo-oceanográficas frequentes no inverno.

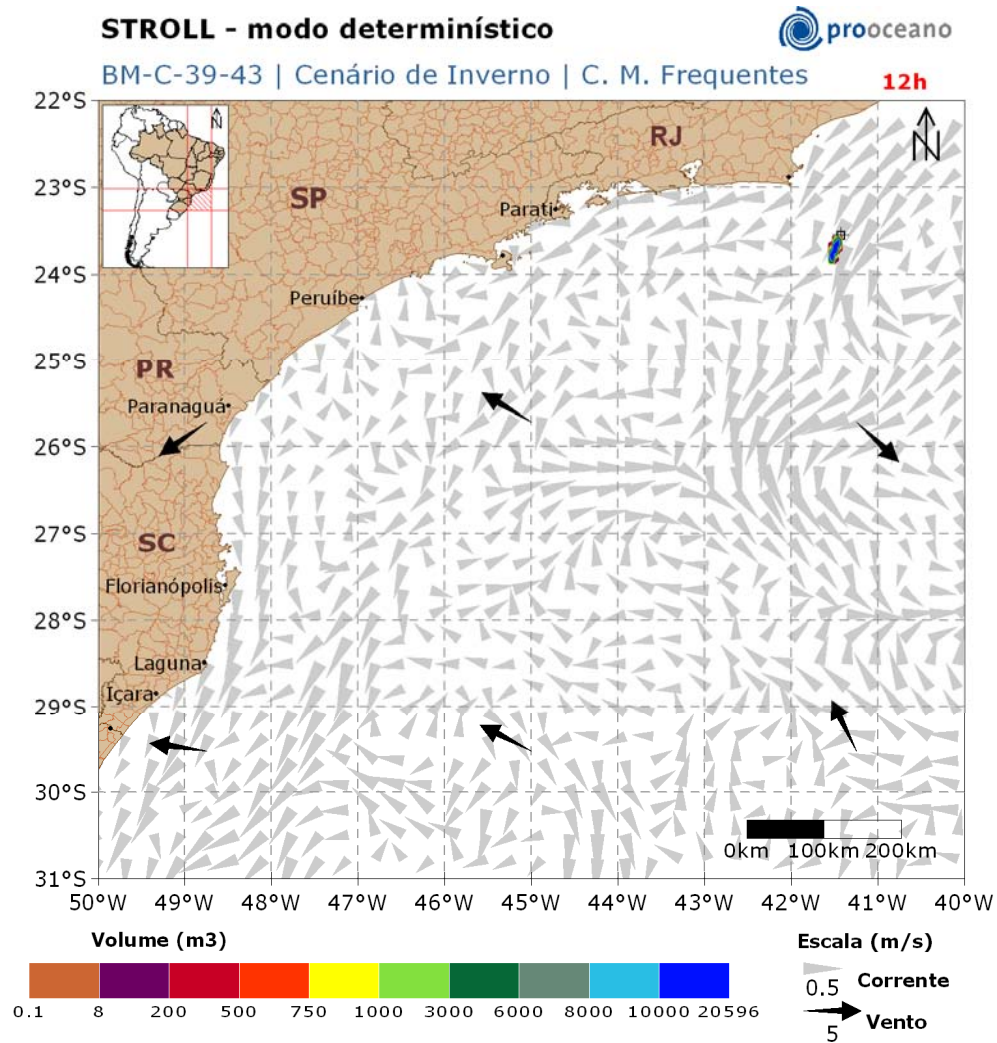


Figura 55: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.

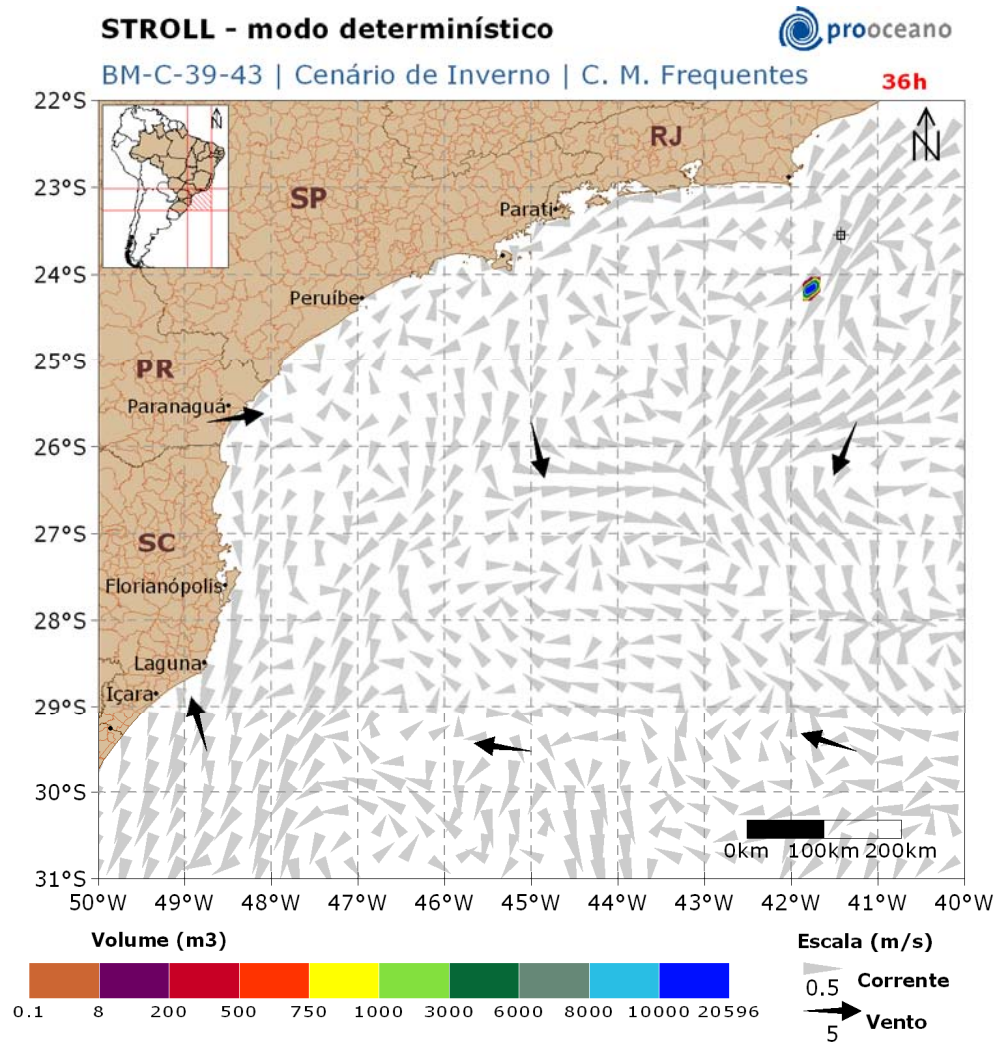


Figura 56: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.

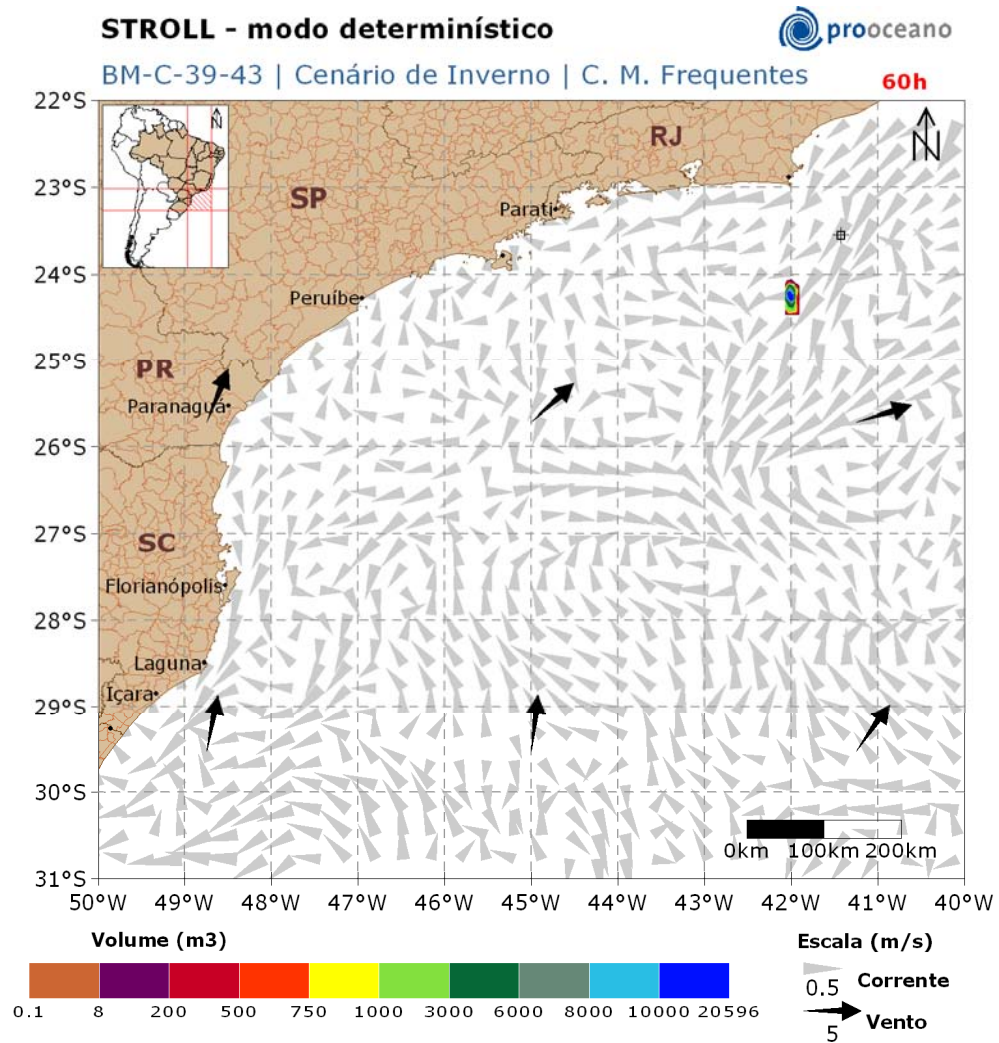


Figura 57: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.

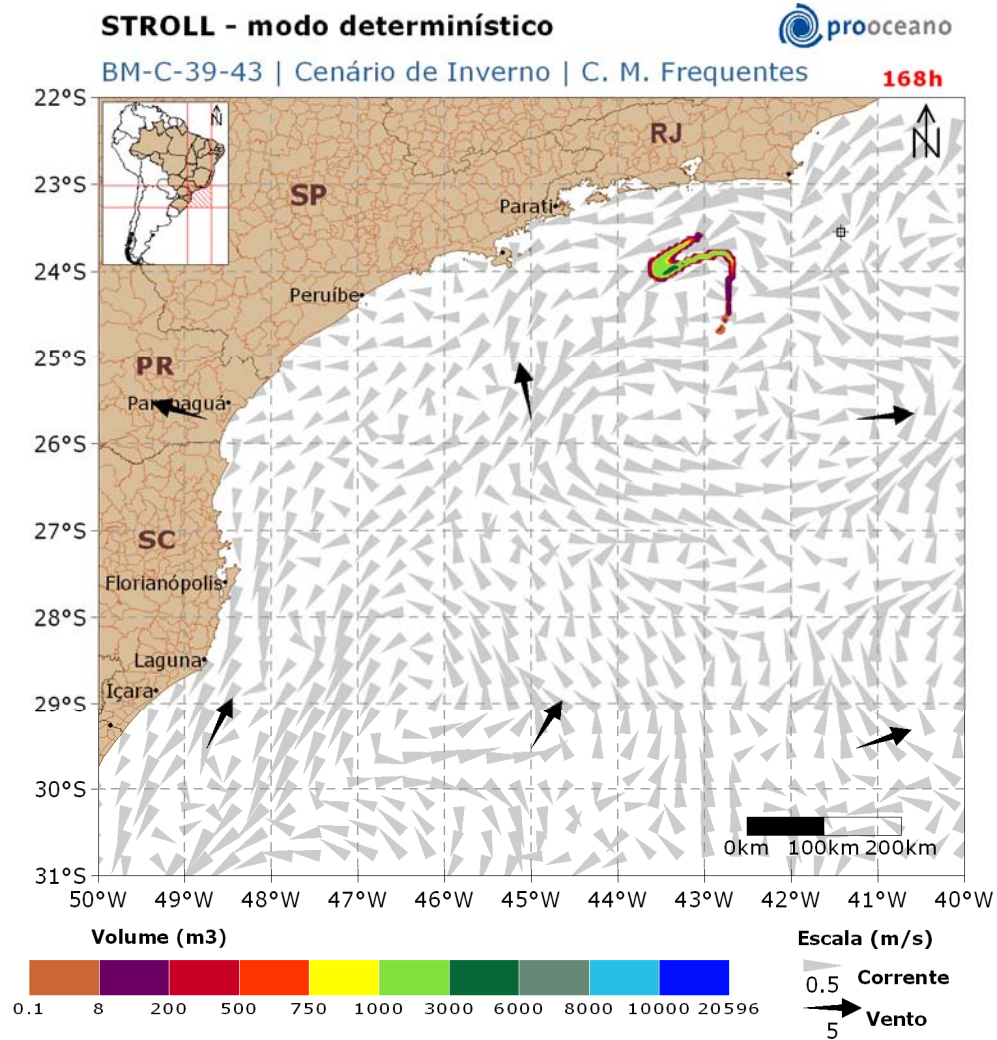


Figura 58: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 1 semana (7 dias) de simulação.

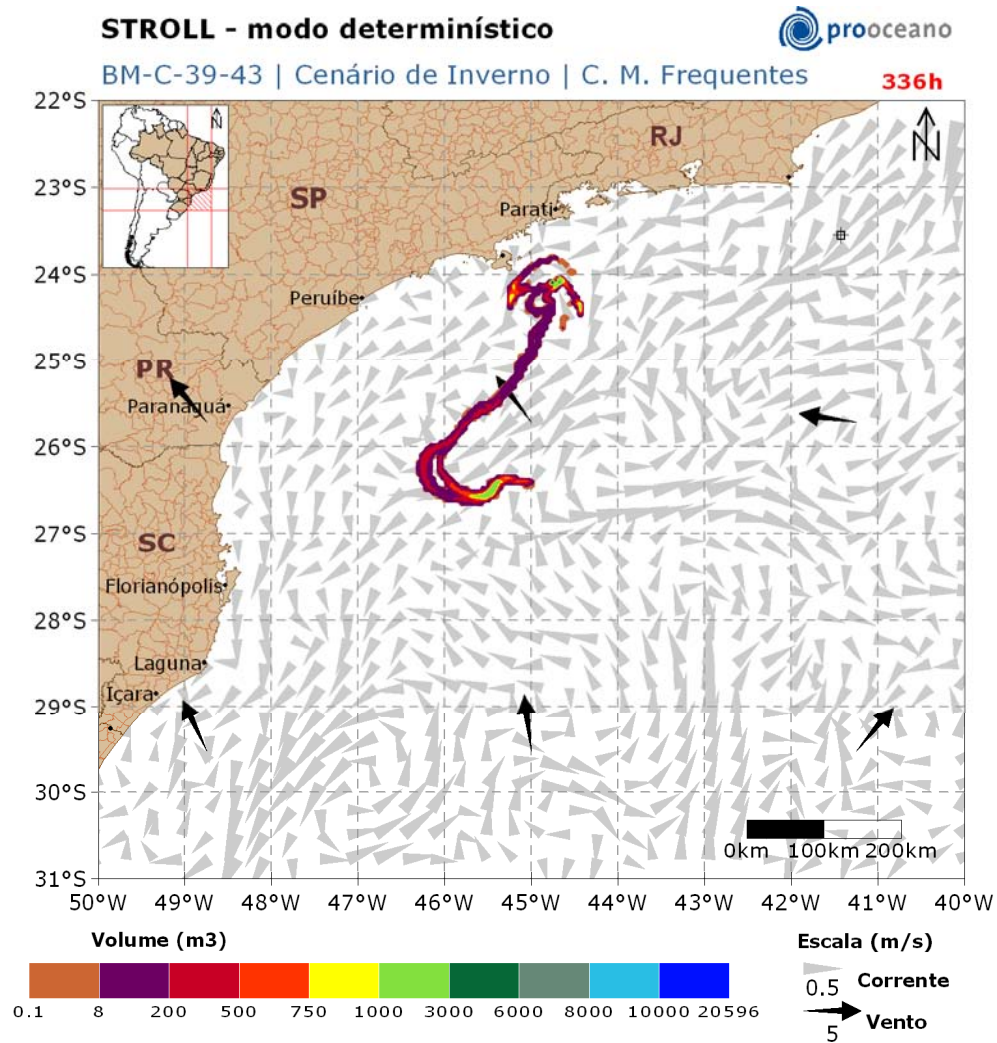


Figura 59: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação.

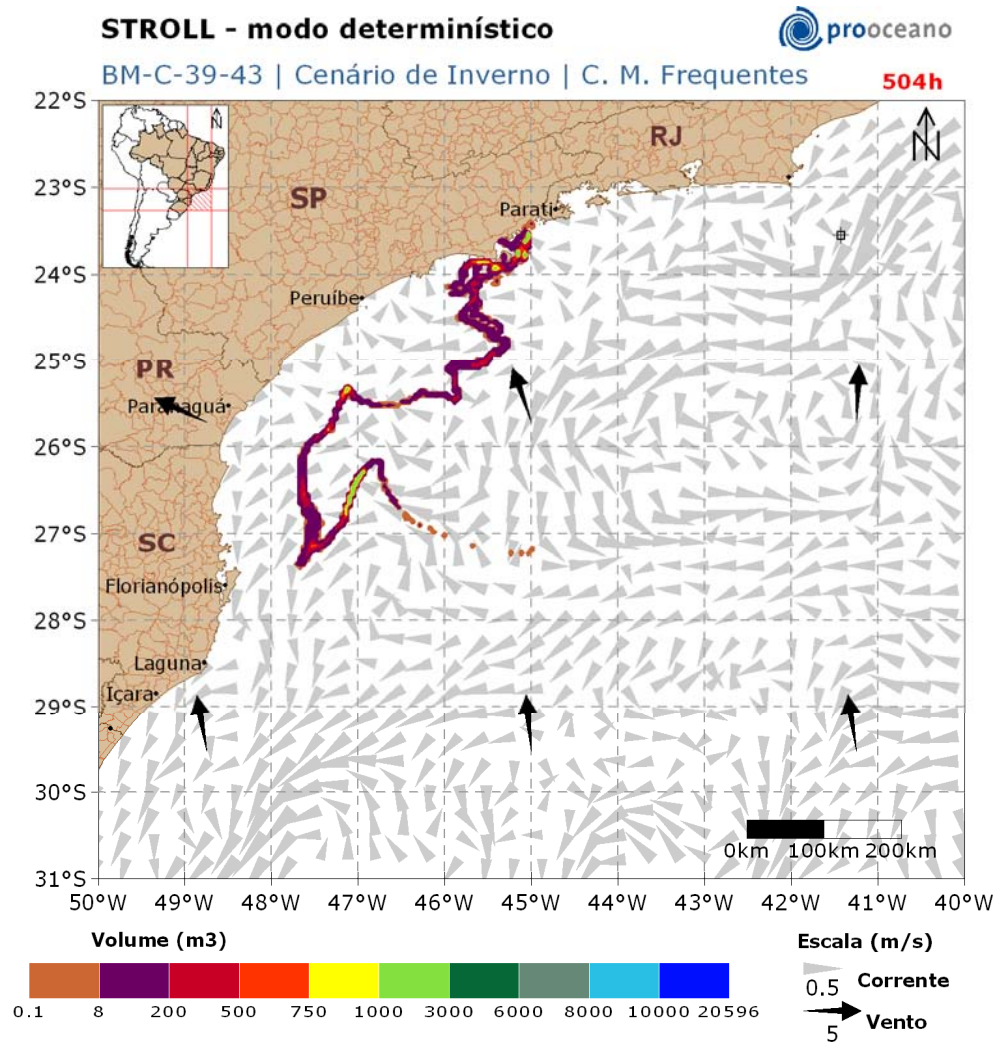


Figura 60: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação.

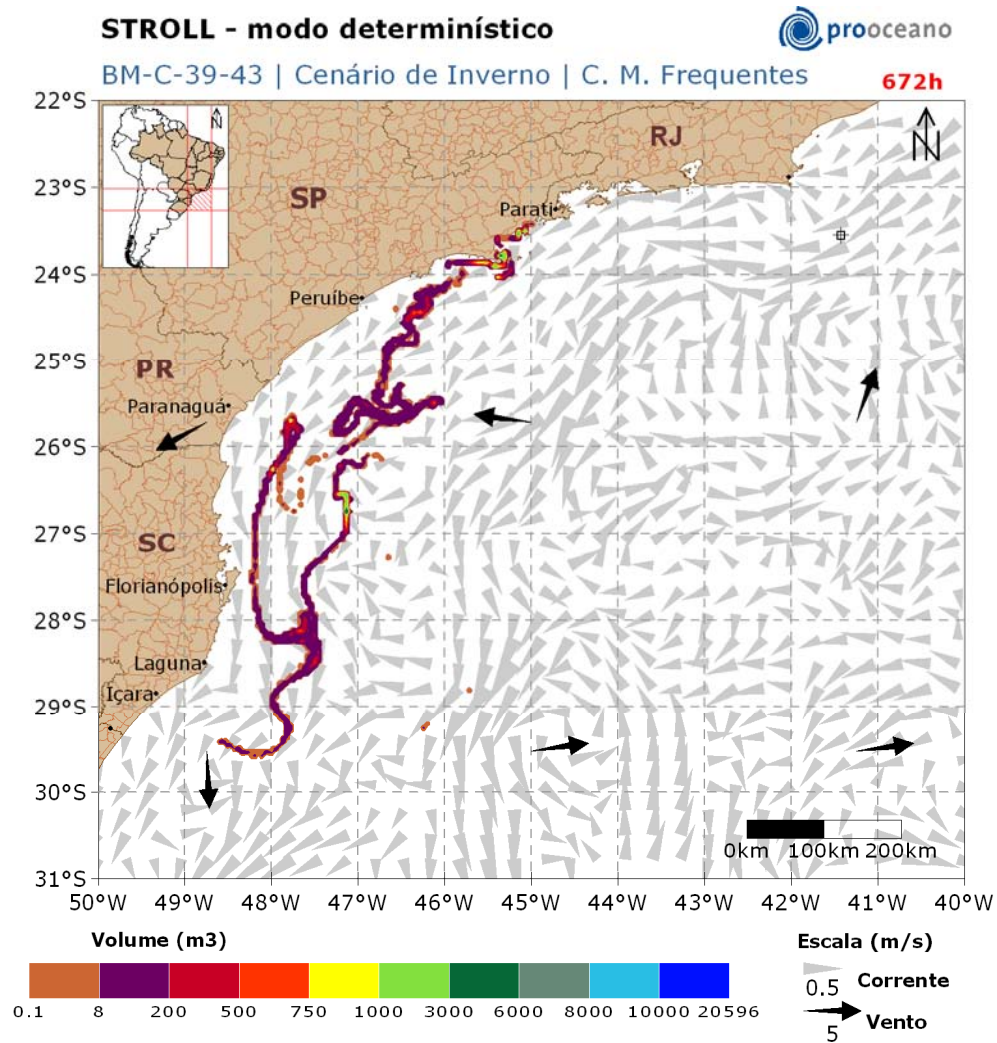


Figura 61: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação.

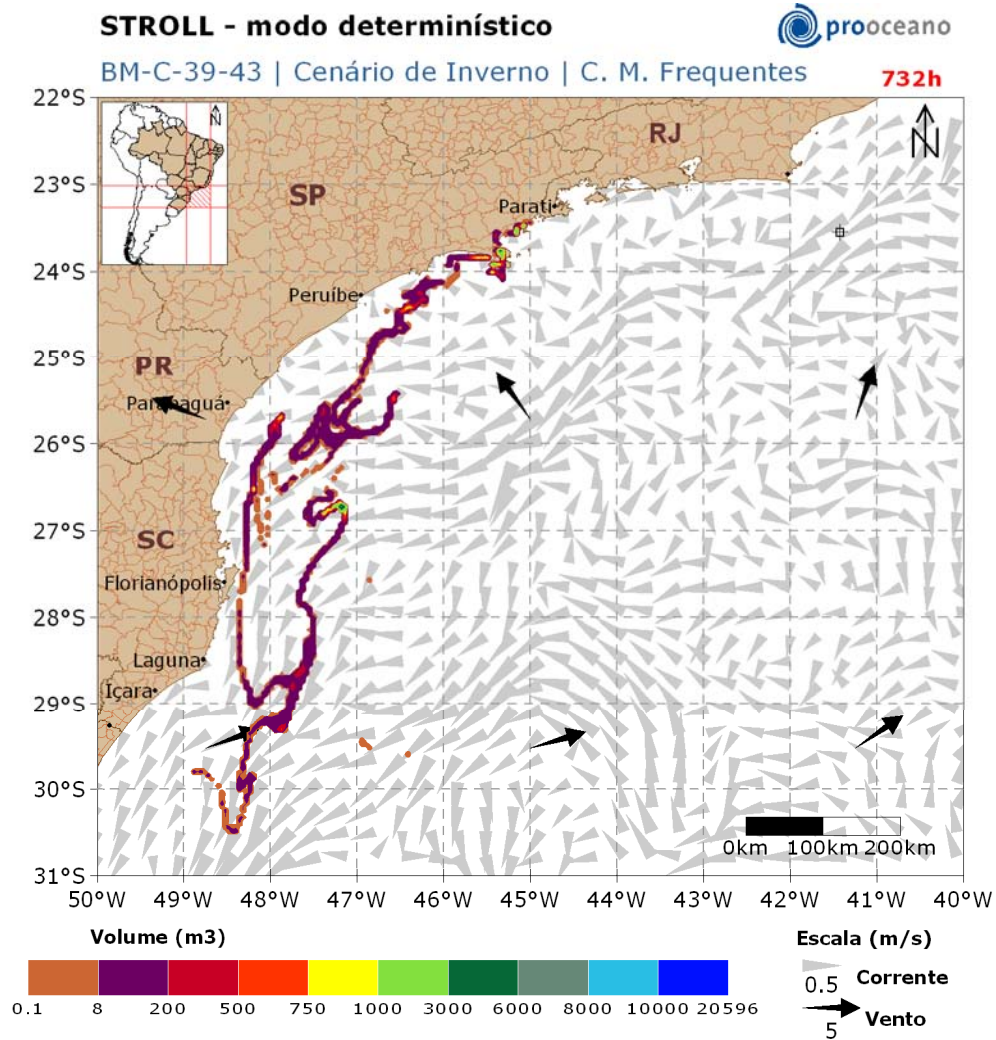


Figura 62: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 732 horas de simulação.

A deriva do óleo ocorreu rumo a sudoeste do local do vazamento. Após 504 horas, o óleo já se encontrava na costa, de Ubatuba à São Sebastião, no estado de São Paulo. Ao final da simulação, 732h, parte do óleo também localizava-se na área oceânica próxima à costa do município de Florianópolis – SC, apresentando ampla distribuição na região de, aproximadamente, 23°S a 31°S.

No gráfico (Figura 63), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo da simulação.

Observa-se que o volume máximo de óleo acumulado na costa, ~34.000 m³, foi alcançado em aproximadamente 690 horas após o início da simulação.

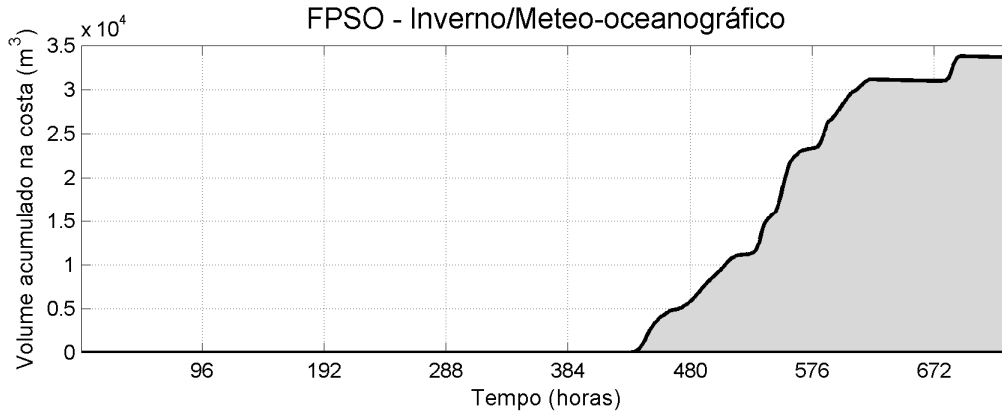


Figura 63: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória de condições meteo-oceanográficas frequentes, no cenário de inverno.

V.2. Balanços de Massa (ou Processos do Intemperismo)

A evolução temporal do balanço de massa para o óleo vazado é apresentada na Figura 64.

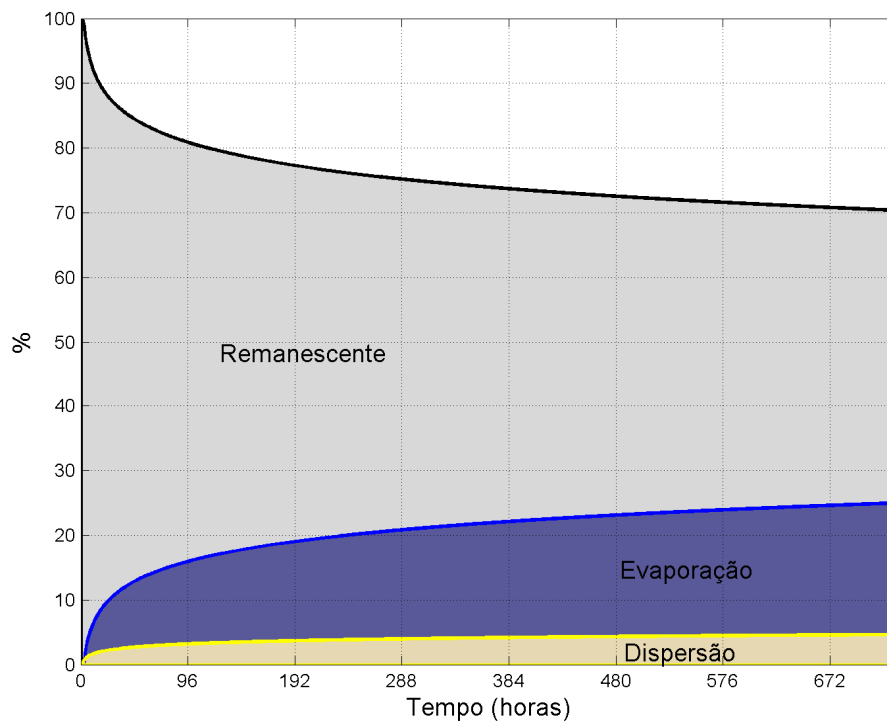


Figura 64: Evolução Temporal do Balanço de Massa ao longo da Simulação.

Ao final da simulação a massa de óleo retirada da superfície da água foi de 30%, sendo que desse valor, o processo de evaporação foi o mais efetivo, alcançando 25% do total. A dispersão consumiu, apenas 5% do óleo.

O balanço de massa ao longo do tempo pode ser observado da Figura 65 à Figura 69.

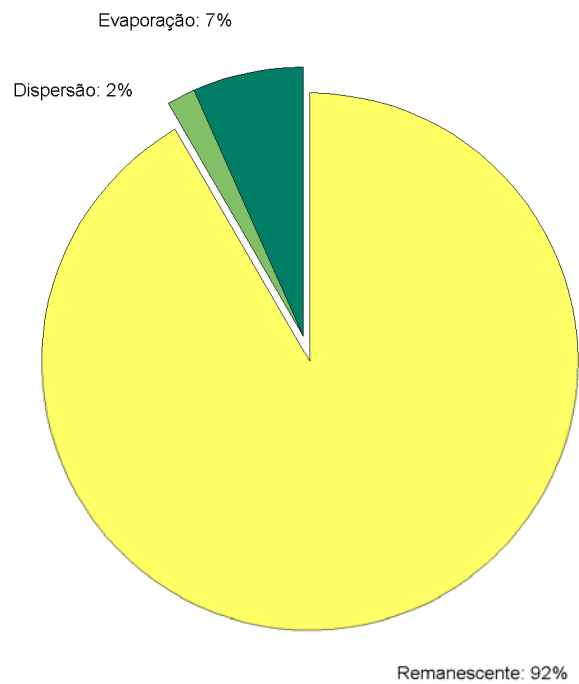


Figura 65: Balanço de Massa, após 12 horas de simulação.

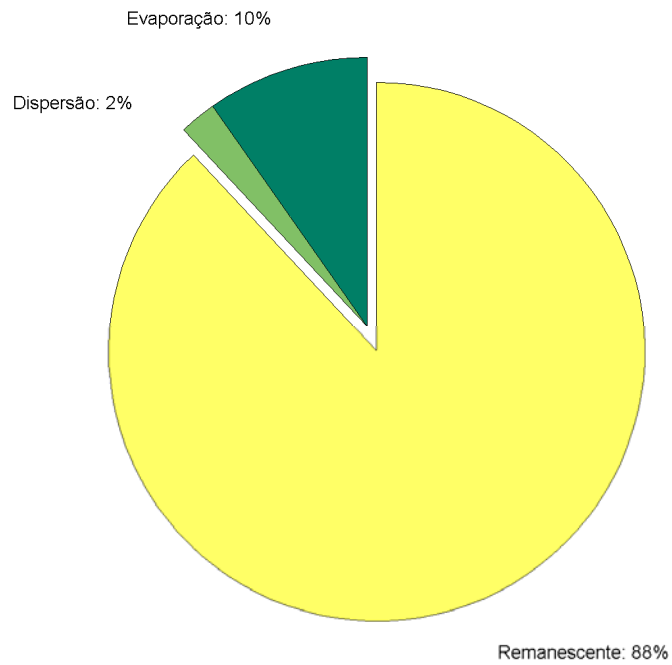


Figura 66: Balanço de Massa, após 24 horas de simulação.

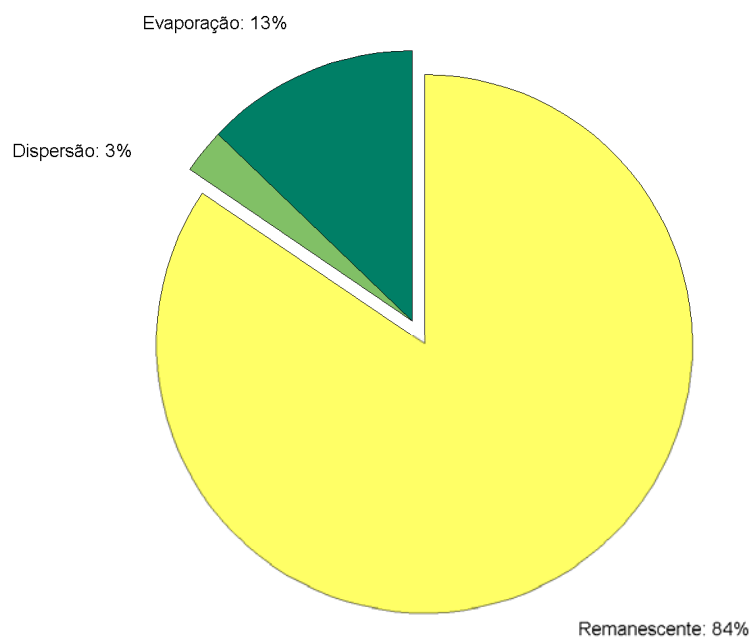


Figura 67: Balanço de Massa, após 48 horas de simulação.

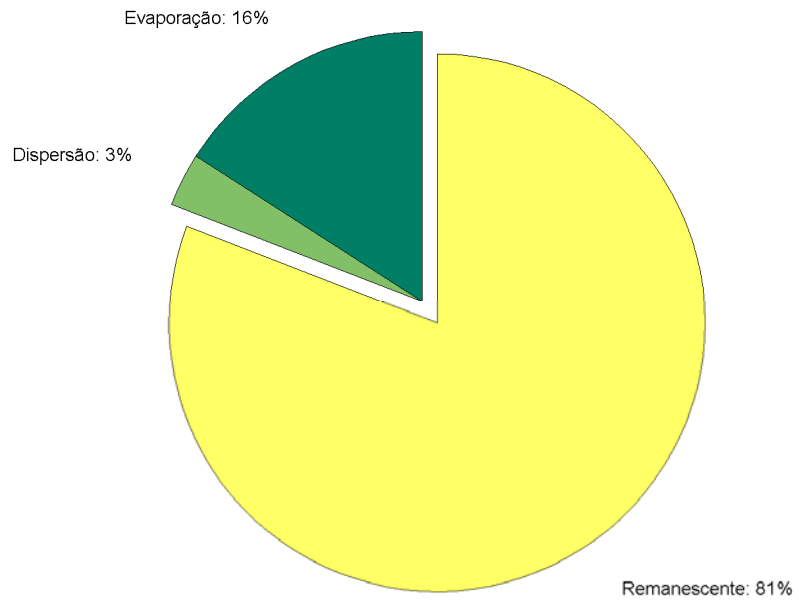


Figura 68: Balanço de Massa, após 96 horas de simulação.

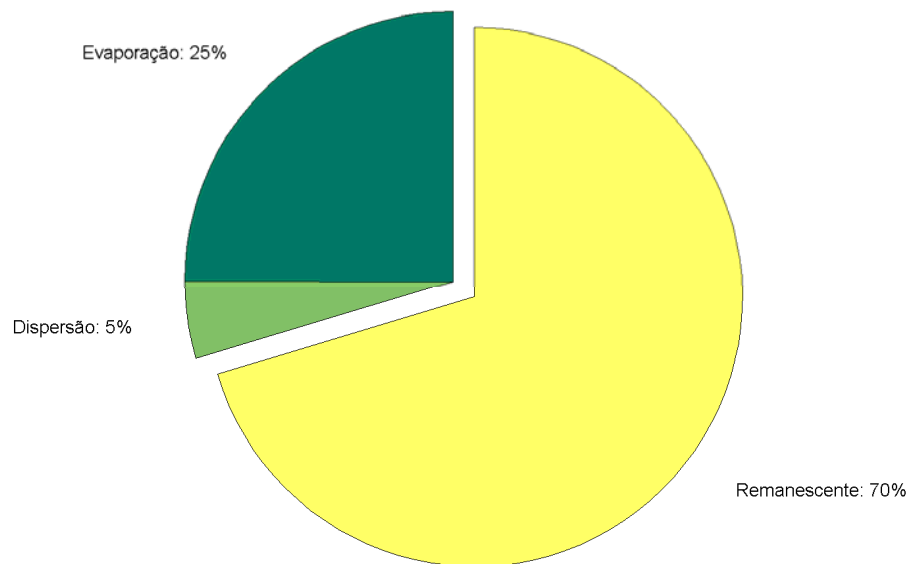


Figura 69: Balanço de Massa, após 732 horas de simulação.

VI. CONCLUSÃO

Em todas as simulações probabilísticas, de pequeno e médio volume, além do pior caso, a deriva preferencial do óleo foi para sudoeste do local do vazamento, sendo que no inverno, derivas rumo a norte também foram observadas, devido, principalmente, a maior ocorrência de sistemas frontais nessa época do ano.

Em quase todos os casos houve probabilidade do óleo atingir a costa, excetuando os vazamentos de pequeno porte (8m^3), em ambos os cenários.

Nos vazamentos de médio (200m^3) porte, a probabilidade de chegada de óleo na costa esteve entre 0,5% e 2,0%, e o menor tempo mínimo registrado foi de 249h no cenário de inverno.

Em relação ao pior caso, o tempo mínimo de chegada na costa ocorreu no cenário de inverno, em 127 horas, e a maior probabilidade de presença no verão, 17,97%.

Considerando todos os volumes vazados e cenários sazonais a área que pode ser atingida pelo óleo estendeu-se de Rio das Ostras, Estado do Rio de Janeiro até o município de Balneário Arroio da Silva, Estado de Santa Catarina.

No modo determinístico a simulação crítica ocorreu no cenário de inverno, onde o toque ocorreu na costa em 127 horas. Nas simulações das duas trajetórias determinísticas em condições meteo-oceanográficas freqüentes, de verão e inverno, houve toque na costa somente no cenário de inverno.

Os resultados obtidos em relação ao intemperismo do óleo mostraram que a massa de óleo retirada da superfície da água foi de 30%, sendo este total a soma dos processos de retirada, integrando a evaporação e a dispersão. A evaporação foi o processo mais efetivo durante toda simulação representando a perda de 25% do volume total.

VII. BIBLIOGRAFIA

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.

CSANADY, G. T., 1972. *Turbulent Diffusion in the Environment*. Geophysics and Astrophysics Monographs, Vol.3, 247 pp., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht: Holland.

DELVIGNE G.A.L. and SWEENEY C.E. Natural dispersion of Oil. *Oil & Chemical Pollution* 4 (1988) 281-310.

DELVIGNE G.A.L., HULSEN L. Simplified laboratory experiments of oil dispersion coefficient- Application of computations of natural oil dispersion. Proc. 17th AAM Oilspill Program Technical Seminar. Vancouver, Canada, 1994.

DING, L.; FARMER, D. M. 1994. Observations of breaking wave statistics. *Journal of Physical Oceanography* 24, 1368-1387.

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.

FLORES, et al. Computer Modeling of Oil Spill Trajectories with a High Accuracy Method. *Spill Science & Technology Bulletin*. v. 5, n.5-6, 1999, p. 323-330.

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.

GABIOUX, MARIELA. 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.

JONES. R. 1997 A simplified Pseudo-component Oil evaporation Model. NOAA, USA in Proceedings of the Twentieth Arctic and Marine Oilspill Program, Technical Seminar, Volume 1, p.43-60. Vancouver, Canada.

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.

LEHR, W.J., SIMECEK-BEATTY, D., 2000. The relation of Langmuir circulation processes to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms. *Spill Science and Technology Bulletin* 6, 247–253.

LEHR, W.J., JONES, R., EVANS, M., SIMECEK-BEATTY, D., OVERSTREET, R., 2002. Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environmental Modelling and Software* 17, 191-199.

LYMAN, J. L.; REEHL, W.F.; ROSENBLATT, D.A. *Handbook of Chemical Property Estimation Methods*. American Chemical Society, Washington D.C., 1990.

MACKAY, D. & R. S. MATSUGU, 1973.: Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. *Can J. Chem. Eng.*, 51. 434-9.

MACKAY, D., I. BUJIST, R. MASCARENHAS & S. PATERSON, 1980.: *Oil Spill Processes and Models*. Environmental Protection Service. Canada. Report EE-8.

MACKAY, D., SHIU, W.Y., HOSSAIN, K., STIVER, W., MCCURDY, D., PETERSON, S., TEBEAU, P. A., 1983. *Development and Calibration of an Oil Spill Behavior Model*, Report No. CG-D-27-83, United States Coast Guard Office of Research and Development, Groton, Conn., USA.

MONAHAN, E., 1971. Oceanic whitecaps. *Journal of Physical Oceanography* 1, 139–144.

NOAA, 2000. *Evaporation Technical Notes in ADIOS 2 (Automated Data Inquiry for oil Spills)*.

OEY, L.-Y., G.L. MELLOR, and R.I. HIRES, 1985a. A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part I: Description of the model and model simulations, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1676-1692.

OEY, L.-Y., G.L. MELLOR, and R.I. HIRES, 1985b. A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part II: Comparison with observation, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1693-1709.

SOTO, Y. J. M. *A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná. 2004.

THIBODEAUX, L.J. *Chemodynamics: Environmental Movement of Chemicals in Air, Water, and Soil*. John Wiley and Sons, New York, 501 p., 1979.

BLECK, R., 2002, "An Oceanic General Circulation Model Framed in Hybrid Isopycnic-Cartesian Coordinates", *Ocean Modelling*, v. 37, pp. 55-88.