



RELATÓRIO TÉCNICO [REV. 00]

**MODELAGEM DE TRANSPORTE DE ÓLEO**

Blocos BM-ES-37-38-39-40-41 - CONDENSADO  
Bacia do Espírito Santo

Preparado para:  
ECOLOGY | PERENCO

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

Revisado por:  
Júlio Augusto de Castro Pellegrini

03 de Setembro de 2009

**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.00]

**MODELAGEM DE TRANSPORTE DE ÓLEO**  
**Blocos BM-ES-37-38-39-40-41 | Óleo Condensado**

Preparado para:  
ECOLOGY | PERENCO

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

Revisado por:  
Júlio Augusto de Castro Pellegrini

03 de Setembro de 2009

**ÍNDICE:**

Lista de Figuras .....	4
Lista de Tabelas .....	8
I..... INTRODUÇÃO .....	9
II..... METODOLOGIA .....	9
II.1.    Modelo de transporte e dispersão de poluentes. ....	9
II.1.1. <i>Modo Determinístico</i> .....	10
II.1.2. <i>Modo Probabilístico</i> .....	17
III... CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO .....	20
IV.... FORÇANTES .....	21
IV.1.    Variabilidade Ambiental .....	26
V..... RESULTADOS .....	27
V.1.    Modo Probabilístico .....	29
V.1.1. <i>Blow-out</i> .....	29
V.2.    Modo Determinístico .....	46
V.3.    Balanços de Massa (ou Processos do Intemperismo) .....	78
VI... CONCLUSÃO .....	83
VII. . BIBLIOGRAFIA .....	84

## Lista de Figuras

Figura 1: Localização dos blocos (BM-ES-37-38-39-40-41), pontos de fronteira e vazamento. Legenda: em preto – limite dos blocos; PF – pontos de fronteira .....	9
Figura 2: Representação esquemática da separação sazonal dos dados para a modelagem probabilística. ....	18
Figura 3: Representação esquemática da combinação dos dados de vento e corrente para a simulação probabilística. ....	18
Figura 4: Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença de constituinte no STROLL.....	20
Figura 5: Rosa dos ventos nos meses de janeiro a junho na região do Bloco BM-ES-37-38-39-40-41..	24
Figura 6: Rosa dos ventos nos meses de julho a dezembro na região do Bloco BM- ES-37-38-39-40-41..	25
Figura 7: Séries temporais das componentes “u” e “v”, do vento, para a região dos blocos BM-ES-37-38-39-40-41, com o número de zeros ascendentes presentes nas séries. ....	27
Figura 8: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão. ....	30
Figura 9: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão. ....	31
Figura 10: Volume máximo de óleo na costa no cenário de verão. ....	32
Figura 11: Histogramas de tempo de chegada de óleo na costa no cenário de verão. A escala a direita é de probabilidade. ....	33
Figura 12: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.....	34
Figura 13: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.....	35
Figura 14: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão. ....	36
Figura 15: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão. ....	37
Figura 16: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno. ....	38
Figura 17: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para vazamento de 30 dias, no cenário de inverno. ....	39
Figura 18: Volume máximo de óleo na costa no cenário de inverno. ....	40
Figura 19: Histogramas de tempo de chegada de óleo na costa no cenário de inverno. A escala à direita é de probabilidade. ....	41
Figura 20: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno. ....	43
Figura 21: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno. ....	44
Figura 22: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno. ....	45

Figura 23: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno. ....	46
Figura 24: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 12 horas de simulação. ....	47
Figura 25: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 36 horas de simulação. ....	48
Figura 26: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 60 horas de simulação. ....	48
Figura 27: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 1 semana (7 dias) de simulação. ....	49
Figura 28: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 192 horas de simulação. ....	49
Figura 29: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 2 semanas (14 dias) de simulação. ....	50
Figura 30: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 3 semanas (21 dias) de simulação. ....	50
Figura 31: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 4 semanas (28 dias) de simulação. ....	51
Figura 32: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 30 dias de simulação. ....	51
Figura 33: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 45 dias de simulação. ....	52
Figura 34: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 60 dias de simulação. ....	52
Figura 35: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória crítica no cenário de verão. .	53
Figura 36: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 12 horas de simulação. ....	54
Figura 37: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 36 horas de simulação. ....	54
Figura 38: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 60 horas de simulação. ....	55
Figura 39: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 102 horas de simulação. ....	55
Figura 40: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 1 semana (7 dias) de simulação. ....	56
Figura 41: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação. ....	56
Figura 42: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação. ....	57
Figura 43: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação. ....	57
Figura 44: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 30 dias de simulação. ....	58
Figura 45: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 45 dias de simulação. ....	58

Figura 46: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 60 dias de simulação. ....	59
Figura 47: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória crítica no cenário de inverno. ....	60
Figura 48: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 12 horas de simulação. ....	61
Figura 49: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 36 horas de simulação. ....	61
Figura 50: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 60 horas de simulação. ....	62
Figura 51: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 1 semana (7 dias) de simulação. ....	63
Figura 52: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 2 semanas (14 dias) de simulação. ....	64
Figura 53: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 3 semanas (21 dias) de simulação. ....	65
Figura 54: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 4 semanas (28 dias) de simulação. ....	66
Figura 55: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 30 dias de simulação. ....	67
Figura 56: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 45 dias de simulação. ....	67
Figura 57: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 60 dias de simulação. ....	68
Figura 58: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória de condições meteo-oceanográficas frequentes, no cenário de verão. ....	69
Figura 59: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 12 horas de simulação. ....	69
Figura 60: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 36 horas de simulação. ....	70
Figura 61: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 60 horas de simulação. ....	70
Figura 62: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 1 semana (7 dias) de simulação. ....	71
Figura 63: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação. ....	72
Figura 64: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação. ....	73
Figura 65: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação. ....	74
Figura 66: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 30 dias de simulação. ....	75
Figura 67: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 45 dias de simulação. ....	76
Figura 68: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 60 dias de simulação. ....	77

Figura 69: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória de condições meteo-oceanográficas frequentes, no cenário de inverno. ....	78
Figura 70: Evolução Temporal do Balanço de Massa ao longo da Simulação. Ponto de Fronteira 4. ...	78
Figura 71: Balanço de Massa, após 6 horas de simulação. ....	79
Figura 72: Balanço de Massa, após 12 horas de simulação. ....	79
Figura 73: Balanço de Massa, após 24 horas de simulação. ....	80
Figura 74: Balanço de Massa, após 36 horas de simulação. ....	80
Figura 75: Balanço de Massa, após 48 horas de simulação. ....	81
Figura 76: Balanço de Massa, após 120 horas de simulação. ....	81
Figura 77: Balanço de Massa, após 1440 horas de simulação. ....	82

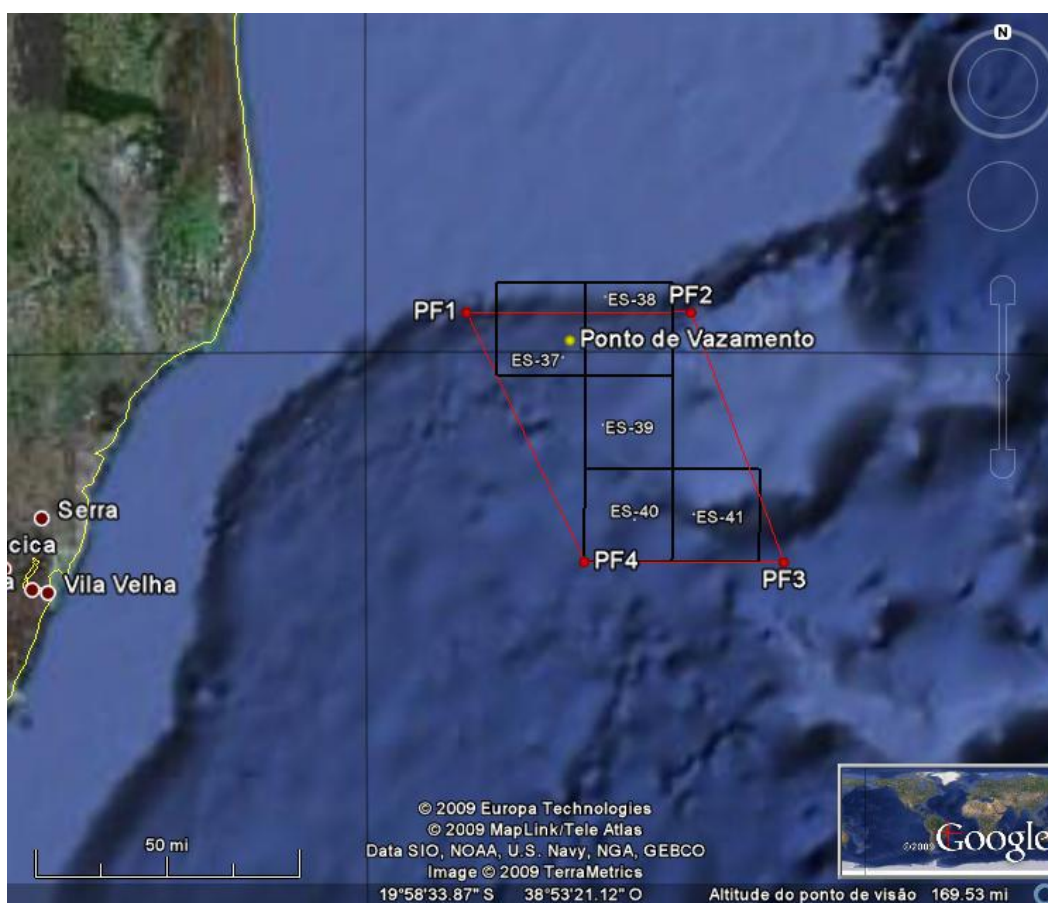
## Lista de Tabelas

Tabela 1: Características do óleo utilizadas na simulação. ....	21
Tabela 2: Local do Vazamento. ....	21
Tabela 3: Ordem de apresentação dos resultados. ....	29
Tabela 4: Volume máximo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento de <i>blow-out</i> , nos cenários de verão e inverno. ....	42



## I. INTRODUÇÃO

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica do transporte de óleo (condensado) no mar para um ponto de vazamento dentro do polígono formado pelos pontos de fronteira (PF1, PF2, PF3 e PF4), onde encontram-se os blocos BM-ES-37-38-39-40-41, Bacia do Espírito Santo, costa sudeste do litoral brasileiro (Figura 1).



**Figura 1: Localização dos blocos (BM-ES-37-38-39-40-41), pontos de fronteira e vazamento. Legenda: em preto – limite dos blocos; PF – pontos de fronteira**

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. 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.1.1. Modo Determinístico

A emissão de óleo no mar é representada pela inserção de um número de elementos  $n_e$  a cada intervalo de tempo  $\Delta t$  na região fonte. Considerando uma vazão  $Q$  m<sup>3</sup>/s, o volume inicialmente associado a cada elemento será:

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

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:

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

Onde:

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

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

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 ideia central consiste em adicionar um desvio de velocidade aleatório  $\vec{u}'_i$  às velocidades advectivas (Csanady, 1972).

### II.1.1.1. 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.1.1.2. 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  $\rho_o$  é a densidade do óleo,  $\rho_0$  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  $\mu$  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  $\mu_0$  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, seguindo 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.1.1.3. 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:

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

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  $\Delta$  a diferença relativa de densidade da água e do óleo:

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

### II.1.1.4. 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:

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

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;  $\chi_j$  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:

$$K_j = 0,0048 \cdot U^{\frac{7}{9}} \cdot Z^{-\frac{1}{9}} \cdot Sc_j^{-\frac{2}{3}} \quad (II.2-10)$$

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:

$$\bar{V}_j = 7 \times 10^{-5} - (2,102 \times 10^{-7} BP_j) + [1 \times 10^{-9} (BP_j)^2] \quad (11.2-11)$$

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

$$BP_j = T_0 + \frac{dT}{df} \frac{(j - 1/2)}{5} \quad (11.2-12)$$

Sendo que:

$$\frac{dT}{df} = 1356,7 - 247,36 \cdot \ln(API) \quad (11.2-13)$$

$$T_0 = 457,16 - 3,3447 \cdot API \quad (11.2-14)$$

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):

$$\ln \frac{P_j}{P^0} = \frac{\Delta S_j \cdot (BP_j - C)^2}{R \cdot BP_j} \cdot \left[ \frac{1}{BP_j - C} - \frac{1}{T - C} \right] \quad (11.2-15)$$

onde  $P^0$  é a pressão atmosférica;  $\Delta S_j = 8,75 + 1,987 \log(BP_j)$ , é a variação na entropia do componente oriunda da vaporização e  $C = (0,19 \cdot BP_j) - 18$  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):

$$K_i = 0,0048 \cdot U^{7/9} \cdot Z^{-1/9} \cdot Sc_j^{-2/3} \quad (11.2-16)$$

onde  $U$  é a velocidade do vento;  $Z$  é o comprimento da mancha na direção do vento; e  $Sc$  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):

$$D_j = D_{\text{água}} \sqrt{\frac{MW_{\text{água}}}{MW_j}} \quad (11.2-17)$$

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:

$$MW_j = 0,04132 - \left( 1,985 \cdot 10^{-4} \cdot BP_j \right) + \left[ 9,494 \cdot 10^{-7} \cdot (BP_j)^2 \right] \quad (11.2-18)$$

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

$$\frac{dV_j}{dt} = - \frac{A \cdot K_j \cdot P_j \cdot V_j}{R \cdot T \cdot \sum_{k=1}^{nc} \frac{V_j}{V_k}} \quad (11.2-19)$$

### II.1.1.5. Emulsificação

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

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

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.1.1.6. 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:

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

onde  $Q(d_0)$  é a taxa de entranhamento por unidade de área no intervalo  $\Delta d$  de diâmetros de gotículas de óleo em torno de  $d_0$   $\left( d_0 - \frac{1}{2} \Delta d$  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:

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

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;  $\rho_w$  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:

$$F_{wc} = \frac{0,025 \cdot (U - 3)}{T_M} \rightarrow 0 \leq U \leq 4;$$

$$F_{wc} = \frac{0,01 \cdot U + 0,01}{T_M} \rightarrow U > 4,$$
(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  $\mu$  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:

$$C_0 = 1827 \cdot \nu^{0,0658} \quad \square \quad \nu < 125 \text{ cSt};$$

$$C_0 = 1827 \cdot \nu^{1,1951} \quad \square \quad \nu > 125 \text{ cSt};$$
(II.2-24)

onde  $\nu$  é a viscosidade do óleo.

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

$$Q = \frac{d_{\max}}{1,7} \cdot C_0 \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot F_{wc} \cdot S_{cov}$$
(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):

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

onde  $H_b$  é a altura de quebra da onda.

#### II.1.1.7. Cálculo da Espessura

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



$$esp_e(x, y, t) = \frac{q_e}{2\pi[\sigma(t)]^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x - p_{x,e}(t)}{\sigma(t)} \right)^2 + \left( \frac{y - p_{y,e}(t)}{\sigma(t)} \right)^2 \right] \right\} \quad (11.2-27)$$

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:

$$D = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2(t)}{dt} \quad (11.2-28)$$

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

$$D = C \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11.2-29)$$

onde  $\Delta x$  e  $\Delta y$  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).

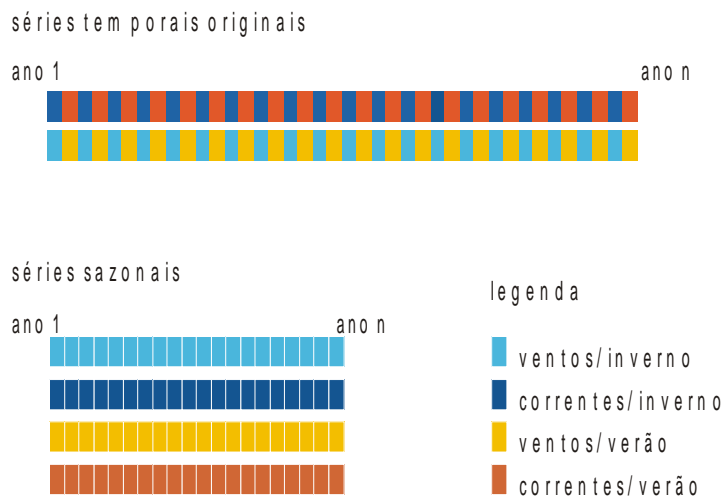
A espessura resultante de todo o descarte é então obtida através da soma da contribuição de cada elemento:

$$ESP(x, y, t) = \sum_{e=1}^{n_e} esp_e(x, y, t) \quad (11.2-30)$$

### 11.1.2. Modo Probabilístico

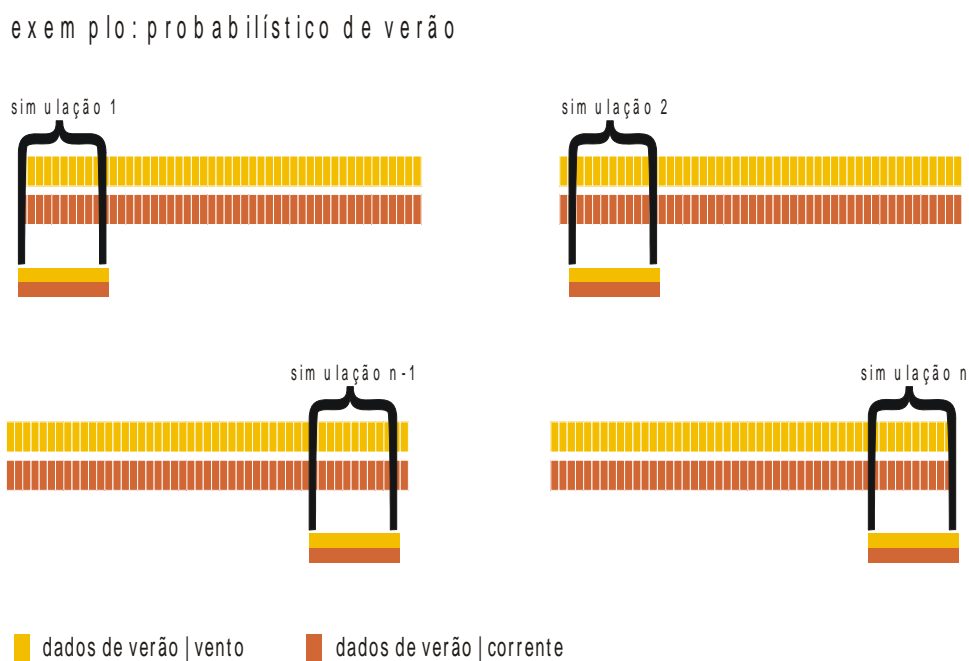
Na abordagem probabilística utilizada são realizadas diversas simulações determinísticas, considerando-se todos os processos citados nos itens anteriores, em diferentes cenários meteo-oceanográficos. Este módulo do STROLL tem por objetivo verificar a probabilidade de presença do constituinte na região 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 2.



**Figura 2: 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 3).



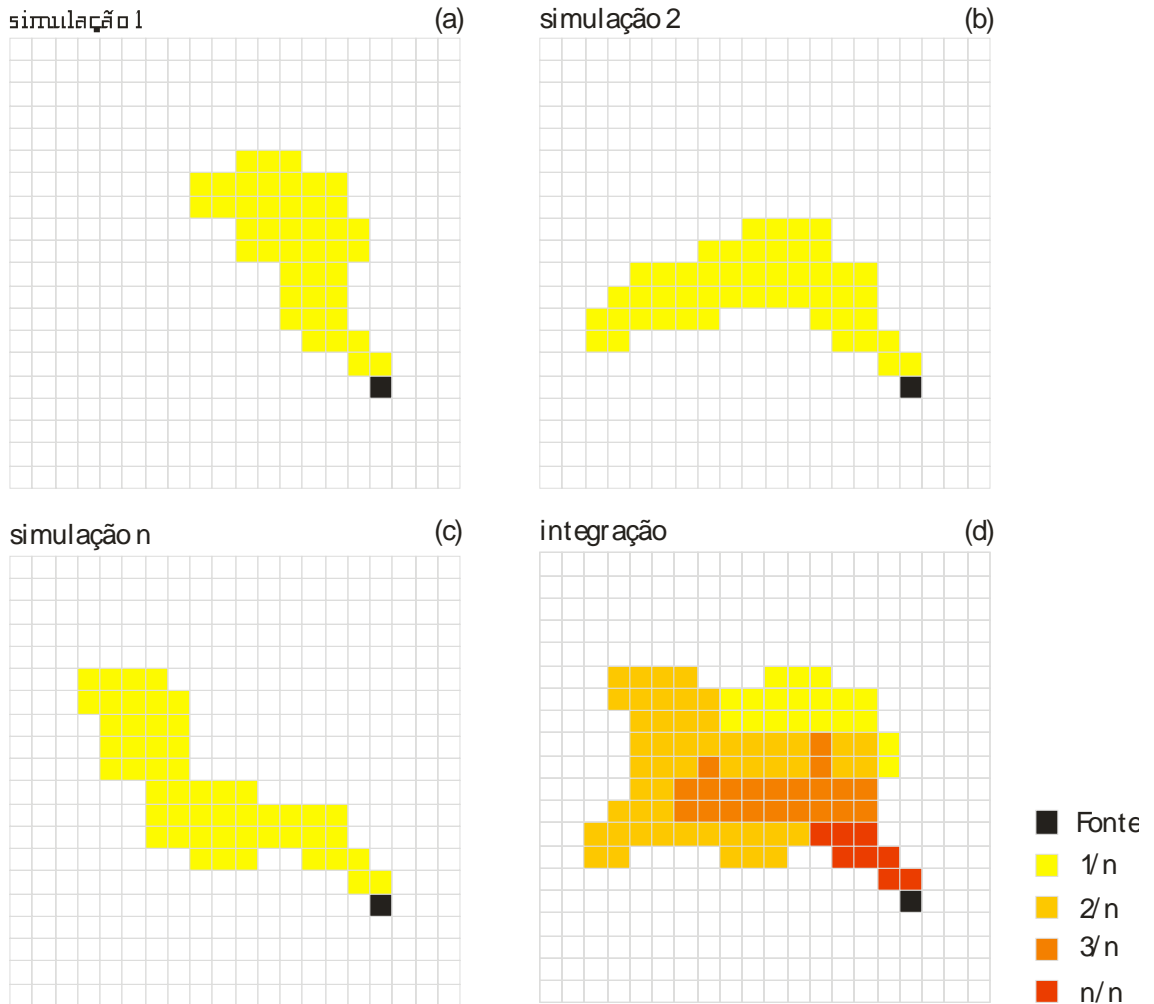
**Figura 3: Representação esquemática da combinação dos dados de vento e corrente para a simulação probabilística.**

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 4 , 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 4 d):

$$P(x, y) = \sum_{i_{sim}=1}^{n_{com}} \left( \frac{I(x, y)}{n_{com}} \right) \quad (11.2-31)$$



**Figura 4: 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 *blow-out* com vazamento contínuo por 30 dias (720 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 mais 30 dias. Portanto ao final das simulações foram totalizados 60 dias de simulação (1440 horas).

Em todas as simulações considerou-se como critério de existência de óleo espessuras maiores ou iguais ao limiar de  $3 \times 10^{-7}$  metros (limiar de detecção) (ELPN/IBAMA, 2002).

A seguir, na Tabela 1 e na Tabela 2, serão apresentadas as características do óleo e o local do vazamento, respectivamente.

**Tabela 1: Características do óleo utilizadas na simulação.**

Parâmetro	Valor	Unidade	Temperatura
API	47,0		
Viscosidade	2,85	cp	15,55 °C

FONTE: PERENCO

**Tabela 2: Local do Vazamento.**

Coordenadas Geográficas	
Latitude	19° 39' 24,35"S
Longitude	38° 47' 30,05"O

FONTE: PERENCO

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-ES-37-38-39-40-41 (Figura 5 e Figura 6).

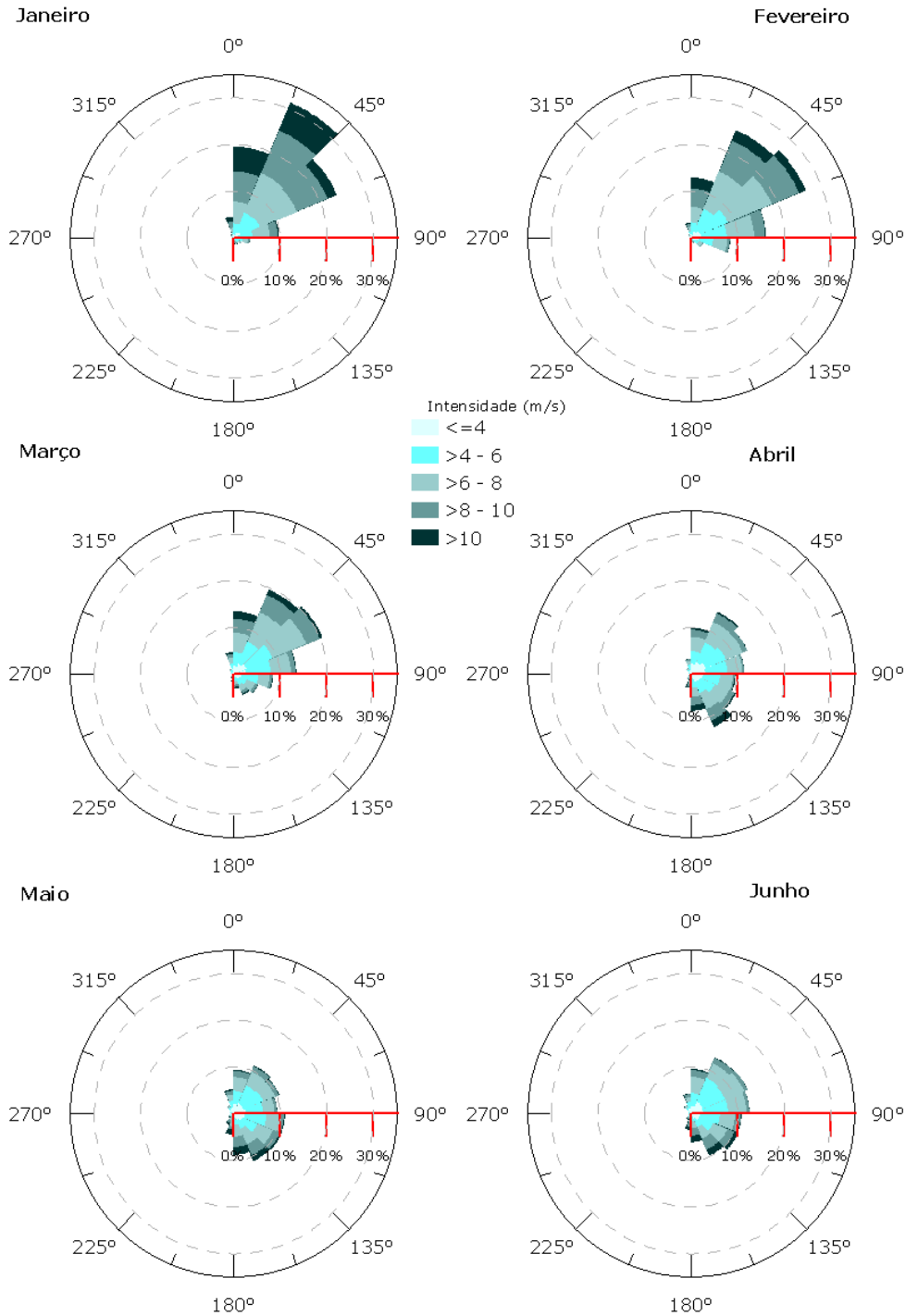


Figura 5: Rosa dos ventos nos meses de janeiro a junho na região do Bloco BM-ES-37-38-39-40-41.



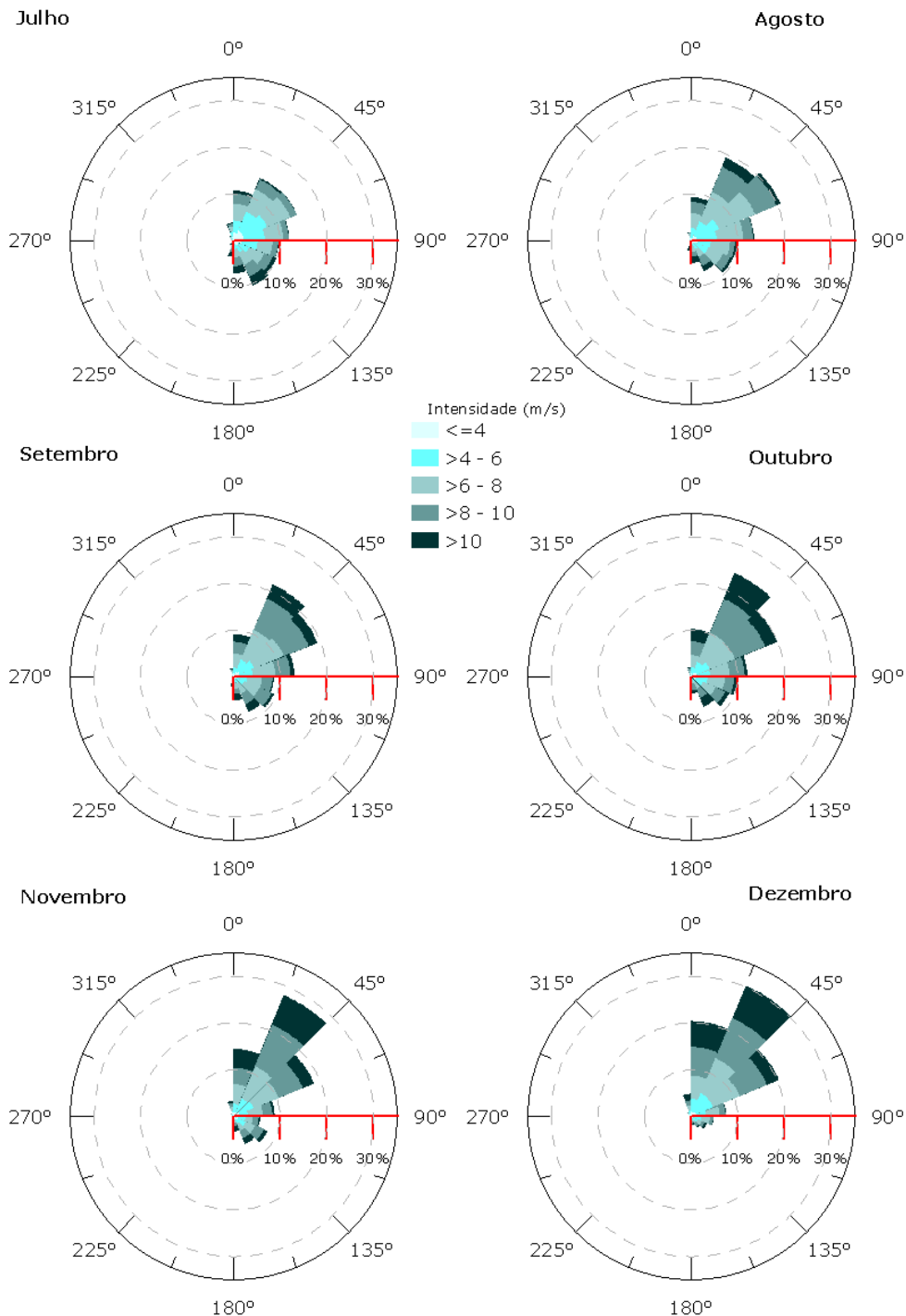


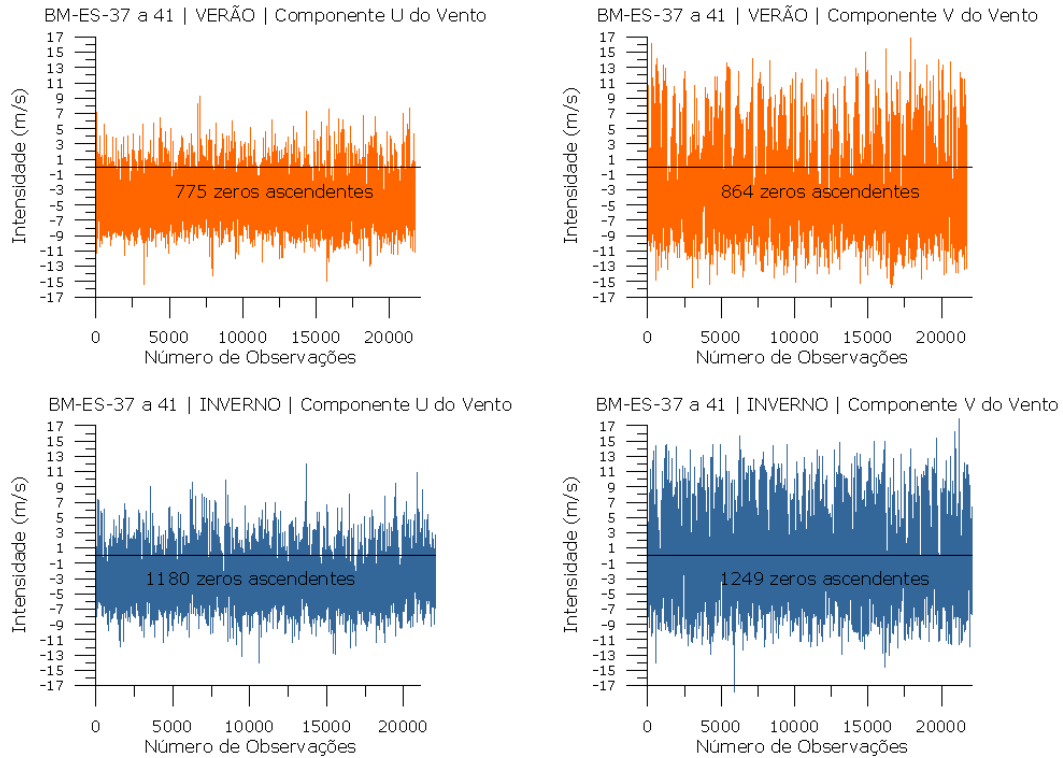
Figura 6: Rosa dos ventos nos meses de julho a dezembro na região do Bloco BM-ES-37-38-39-40-41.

Nota-se um claro domínio dos ventos de nordeste ao longo de todo o ano, influência do domínio da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) na circulação atmosférica da região. No período entre os meses de setembro e fevereiro, a ocorrência dos ventos intensos de nordeste é ainda mais acentuada, tendo sido esse o período definido como de verão para as simulações de óleo. Entre março e agosto, embora ainda exista uma acentuada ocorrência de ventos de nordeste, estes apresentam intensidades menos expressivas, sendo que nesse período observa-se uma maior incidência de eventos extremos de vento associados à direção sudeste, devido à maior ocorrência de sistemas frontais nessa época do ano. Devido a essas diferenças, o período entre os meses de março e agosto foi definido como de inverno para as simulações conduzidas.

Os dados de correntes utilizados foram obtidos da base de dados da PROOCEANO. Nesse estudo foi analisada uma série temporal de 1 ano de dados, sendo utilizado na modelagem um período de 6 meses, característicos para cada situação sazonal. Uma descrição detalhada dos mesmos encontra-se no Relatório de Modelagem Hidrodinâmica, onde é descrita a dinâmica oceânica dessa região.

#### 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 7.



**Figura 7: Séries temporais das componentes “u” e “v”, do vento, para a região dos blocos BM-ES-37-38-39-40-41, 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 800, tanto para a componente zonal (u), como para a meridional (v). No período de inverno, ambas ficaram próximas a 1200. 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 4,5 dias no período de inverno e de 6,8 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 1249 e 864, para os períodos de inverno e verão, respectivamente. Adotando uma estratégia conservadora serão utilizadas 1250 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 do vazamento de  $1.751 \text{ m}^3$ , para os cenários de verão e inverno.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas 1.250 diferentes simulações para cada cenário (verão e inverno) totalizando 2.500 possíveis cenários ambientais de vazamento.

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

Também serão apresentadas duas trajetórias que representarão a deriva do óleo nas condições meteo-oceanográficas mais frequentes da região. Devido às características locais são necessários dois cenários sazonais para representar as condições meteo-oceanográficas dominantes. No período de verão, observa-se na região a presença semi-permanente de um vórtice ciclônico, entre 20° e 21° S, denominado vórtice de Vitória. No período de inverno essa feição não se faz presente de forma tão marcante (Fragoso, 2004). A escolha de dois cenários tenta mostrar a influência dessa feição, em um possível acidente com vazamento de óleo no mar.

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.**

<b>Modo Probabilístico</b>
<b><i>Blowout - Vazamento de pior caso (1.751 m<sup>3</sup>) *</i></b>
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
Mapas de Probabilidade por Classes de Volume de Óleo
<b>Modo Determinístico *</b>
Crítico
Condições Meteo-oceanográficas frequentes
Evolução Temporal de Volume de Óleo Acumulado na Costa
Intemperismo

\* cenário de verão e inverno.

## V.1. Modo Probabilístico

### V.1.1. Blow-out

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações probabilísticas de *blow-out*. Para esses cenários foi considerado um vazamento contínuo durante 30 (trinta) dias. O tempo simulado abrange os 30 dias de vazamento e mais 30 dias após o término do mesmo, totalizando 60 dias de simulação.

#### V.1.1.1. Verão

O Mapa de Probabilidade e o Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo para um cenário de *blow-out* com volume vazado de 1.751m<sup>3</sup>, no período de verão são apresentados na Figura 8 e Figura 9, respectivamente.

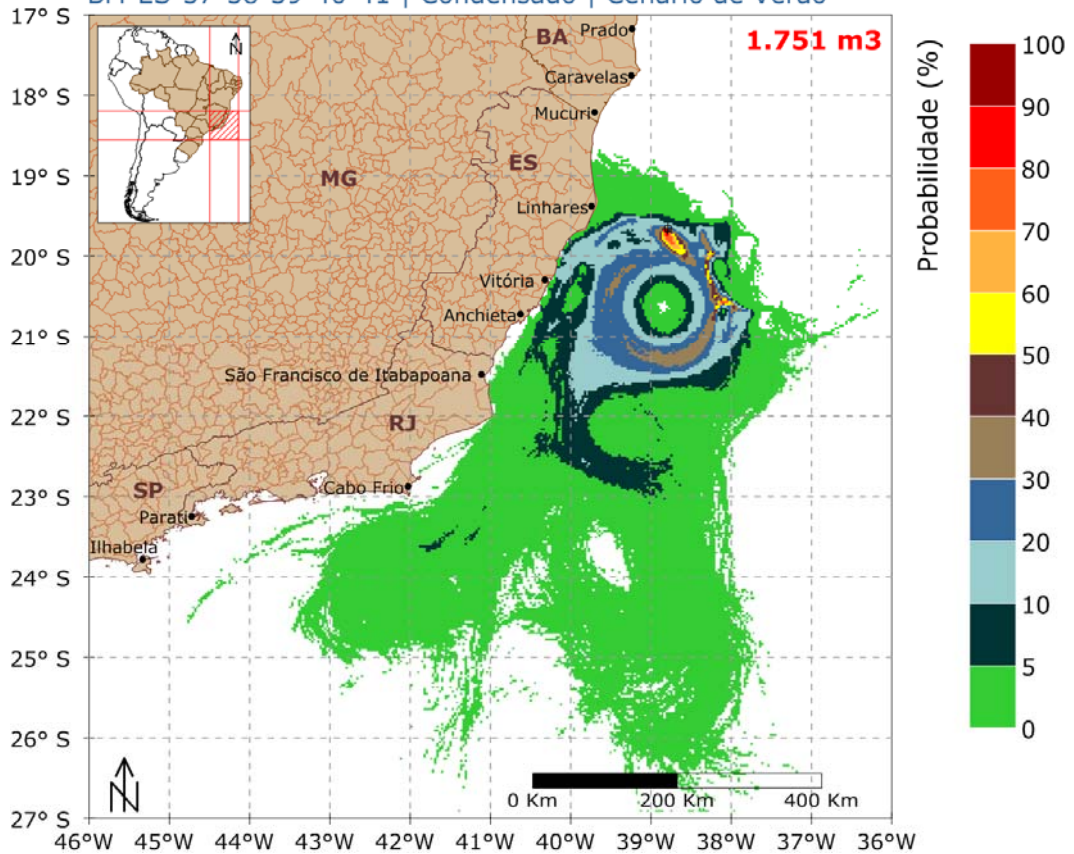
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | simulação 60 dias

BM-ES-37-38-39-40-41 | Condensado | Cenário de Verão



**Figura 8: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.**

A deriva do óleo ocorreu preferencialmente para sudoeste do poço, porém derivas rumo a noroeste também foram observadas, e resultaram em chegada de óleo na costa. A maior probabilidade registrada, 20-10%, ocorreu em Serra, no estado do Espírito Santo.

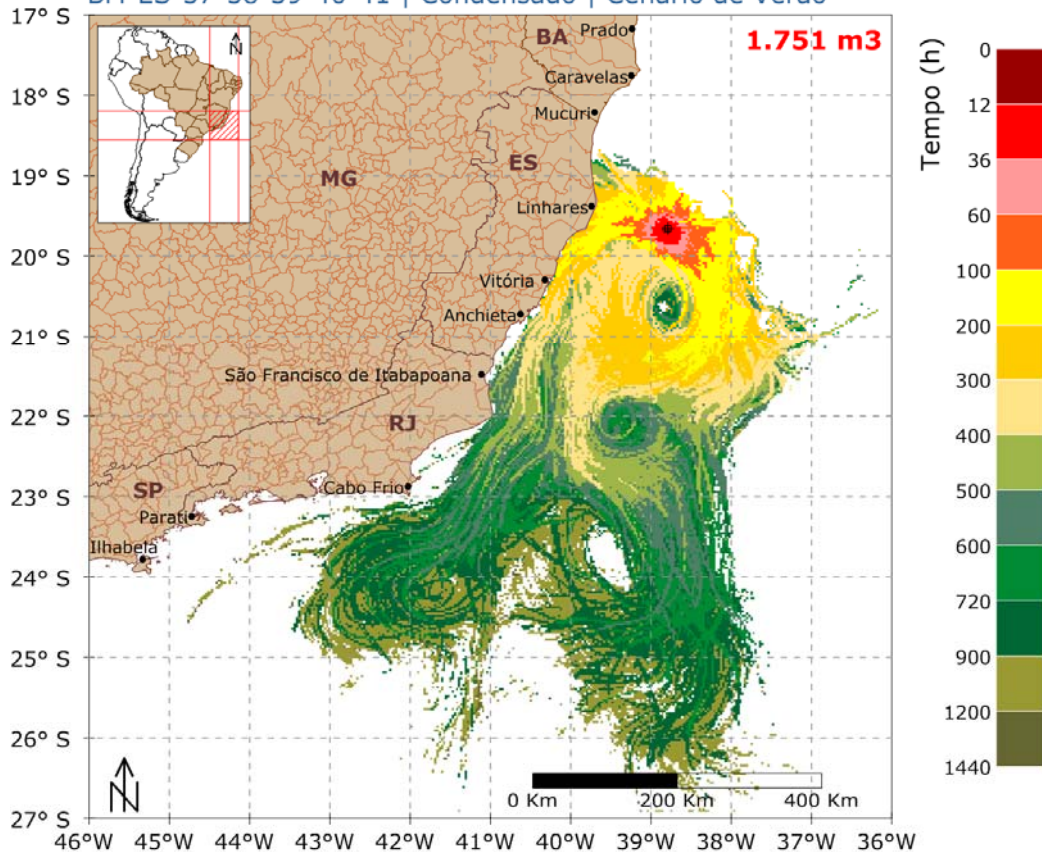
A região de costa que pode apresentar óleo estendeu-se de Conceição da Barra – ES, e de São Francisco do Itabapoana até Campos dos Goytacazes - RJ (Tabela 4).

## STROLL - modo probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Blow-out 30 dias | simulação 60 dias

BM-ES-37-38-39-40-41 | Condensado | Cenário de Verão



**Figura 9: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.**

O menor tempo mínimo de toque na costa, nesse cenário, ocorreu entre 100-200 horas, em Linhares, Aracruz e Serra, estado do Espírito Santo.

O estado do Rio de Janeiro pode apresentar óleo na costa com o tempo mínimo de 400-500 horas (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. (Figura 10).

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.

## STROLL - modo probabilístico

Volume Máximo de Óleo na Costa  
 BM-ES-37 a 41 | Condensado  
 Cenário de Verão

1.751 m<sup>3</sup>

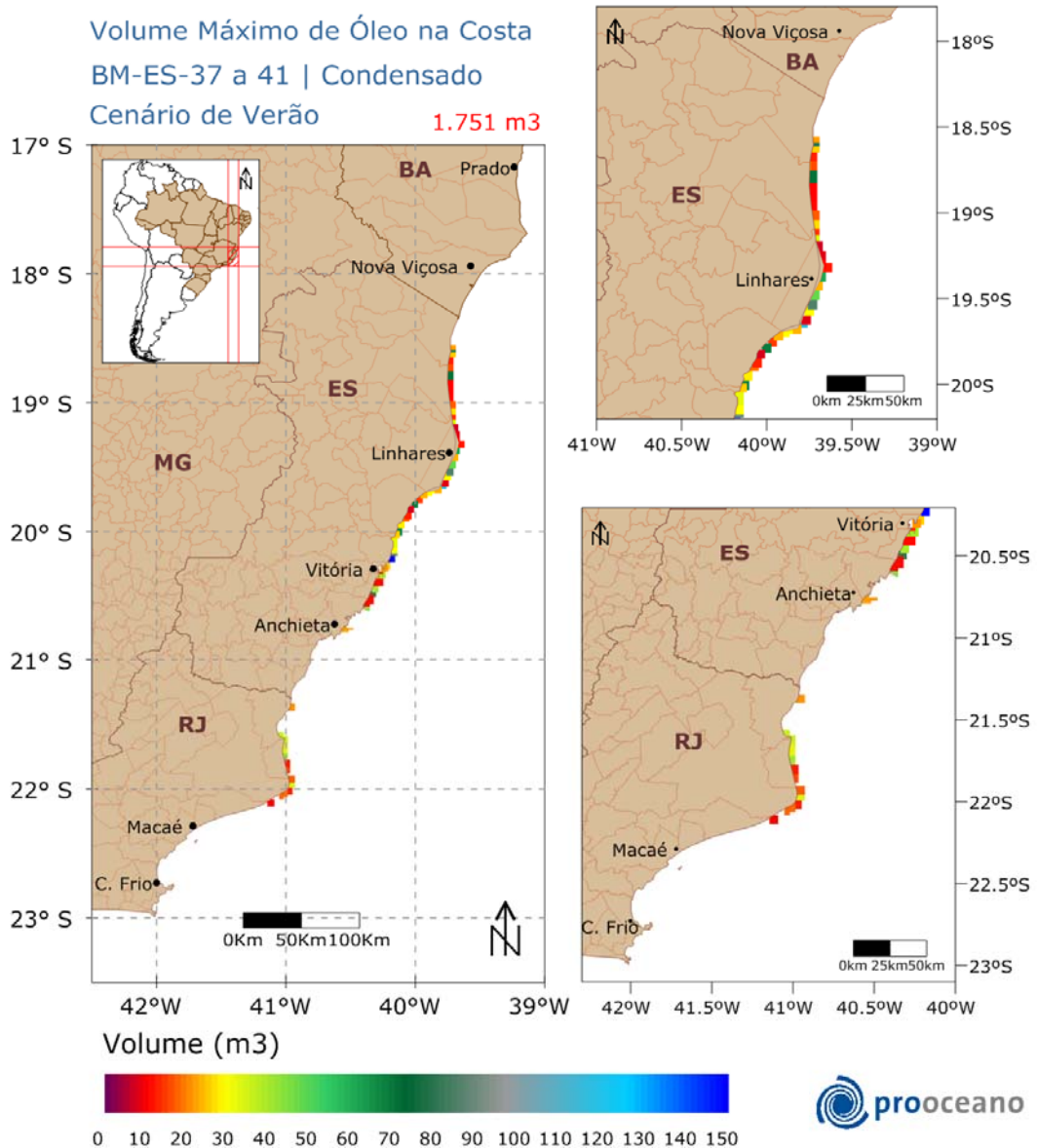


Figura 10: Volume máximo de óleo na costa no cenário de verão.

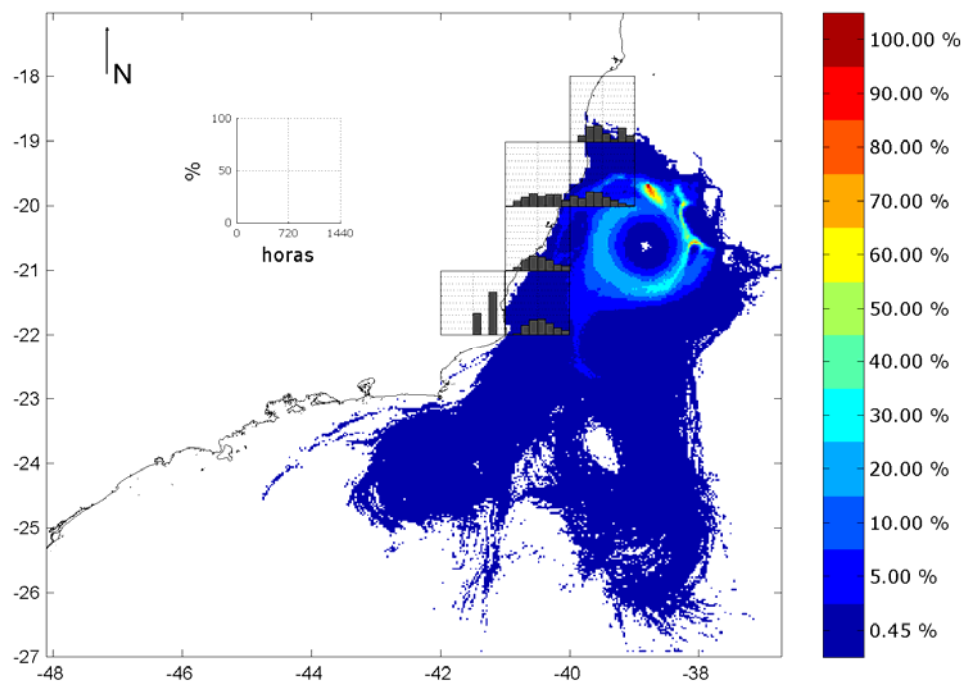
Ao analisarmos o volume máximo de óleo que atinge a costa (Figura 10), observamos que o município que apresentou o maior valor foi Serra – ES, 151,25m<sup>3</sup> (Tabela 4). Também podemos observar que os menores valores encontram-se nas extremidades norte e sul do mapa.

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 11). 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 1 grau 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 11: Histogramas de tempo de chegada de óleo na costa no cenário de verão. A escala à direita é de probabilidade.**

Os histogramas de tempo de chegada, no cenário de verão, mostraram que nas regiões com maior probabilidade de presença de óleo, a maior parte dos tempos de chegada, ocorrem antes da metade da simulação (720h). No limite sul do mapa, os tempos de chegada estão concentrados na 2ª metade da simulação (720-1440h).

### ***Mapas de Probabilidade por Classes de Volume de Óleo***

A seguir serão apresentados mapas de probabilidade de ocorrência por classes de volume de óleo. Esses mapas foram elaborados, considerando os volumes máximos na costa (Figura 12 e Figura 13) e volumes médios (Figura 14 e Figura 15) presentes em cada ponto de grade, em cada uma das 1.250 simulações realizadas para cada cenário ambiental.

Foram consideradas três classes de volume, são elas: Classe 1 – menor que 8 m<sup>3</sup>; Classe 2 – 8 a 200 m<sup>3</sup>; e Classe 3 – maior que 200m<sup>3</sup>.

### STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de P. de Óleo Condensado | Volume Máximo Cenário de Verão | Classe 1

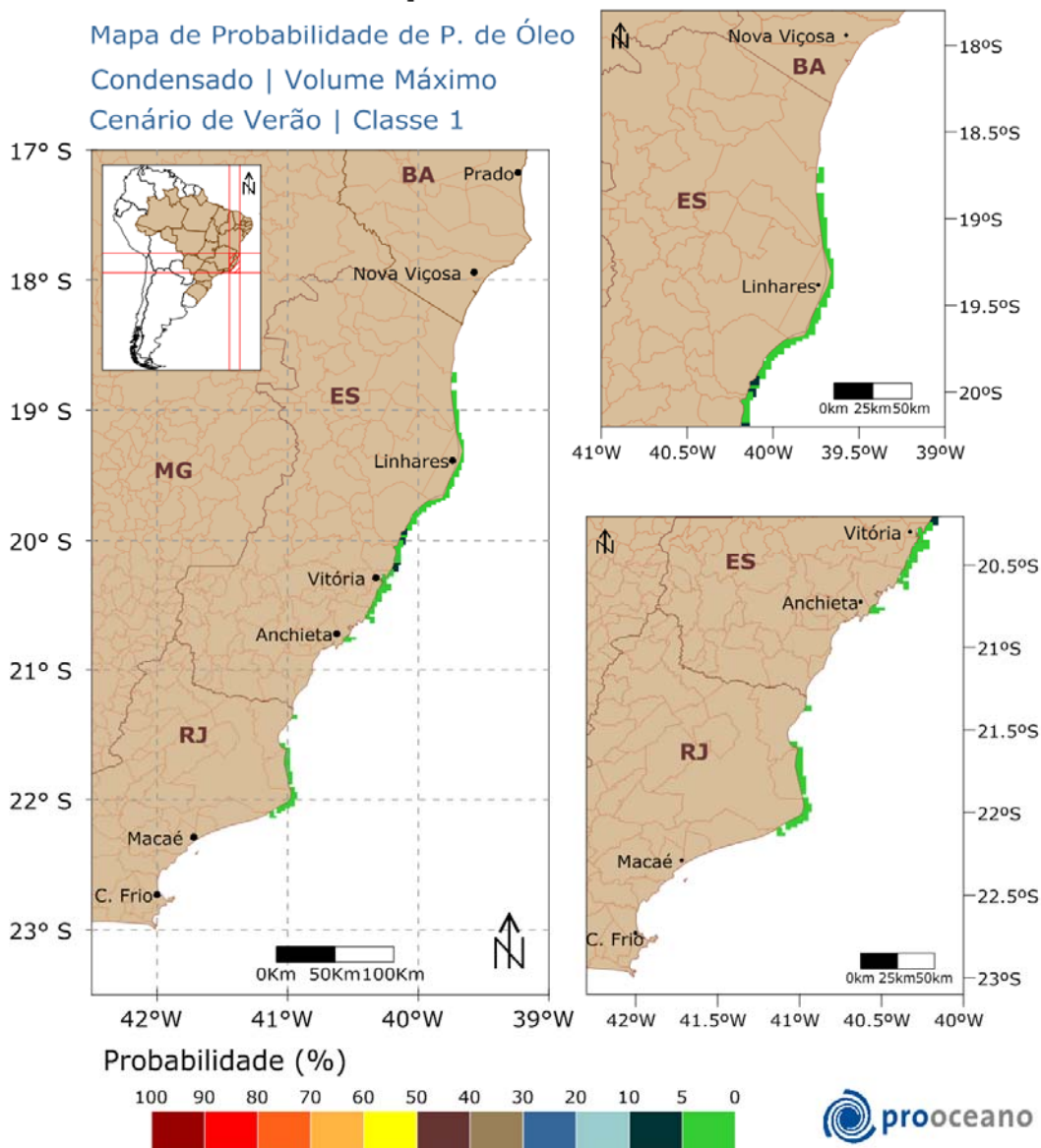


Figura 12: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

Observamos probabilidades de presença de óleo nesta faixa de volume (menor que 8m<sup>3</sup>) desde o estado do Espírito Santo até o Rio de Janeiro. Em alguns locais no estado do Espírito Santo houve probabilidade entre 10-5%.

## STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de P. de Óleo  
Condensado | Volume Máximo  
Cenário de Verão | Classe 2

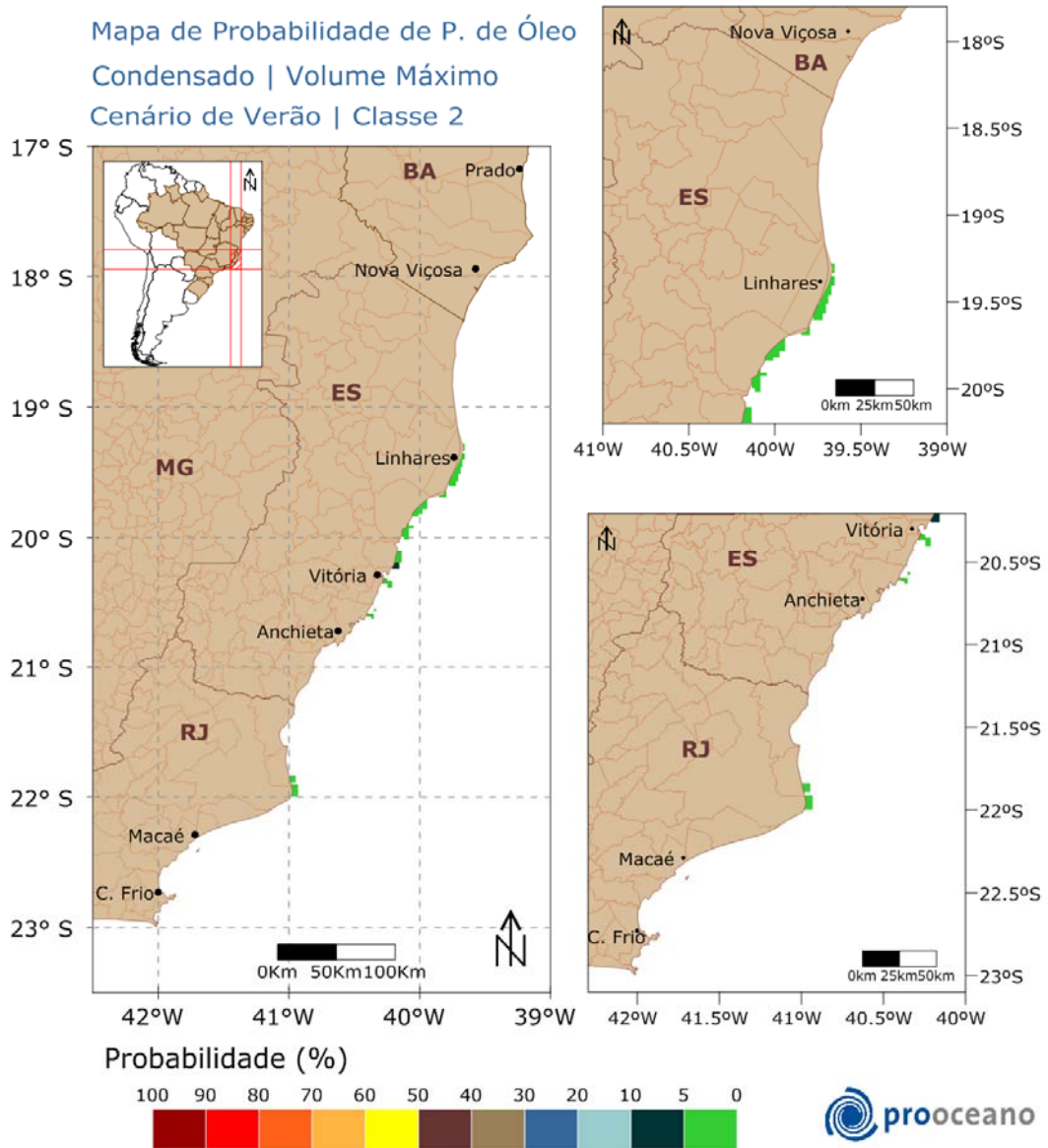


Figura 13: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

Nesta faixa de volume (8-200m<sup>3</sup>) a probabilidade de presença de óleo é mais restrita. No município de Serra – ES foi registrada a maior probabilidade, 10-5%.

A classe 3 (maior que 200m<sup>3</sup>) não foi representada pois nenhuma área na costa apresentou probabilidade nesta faixa.

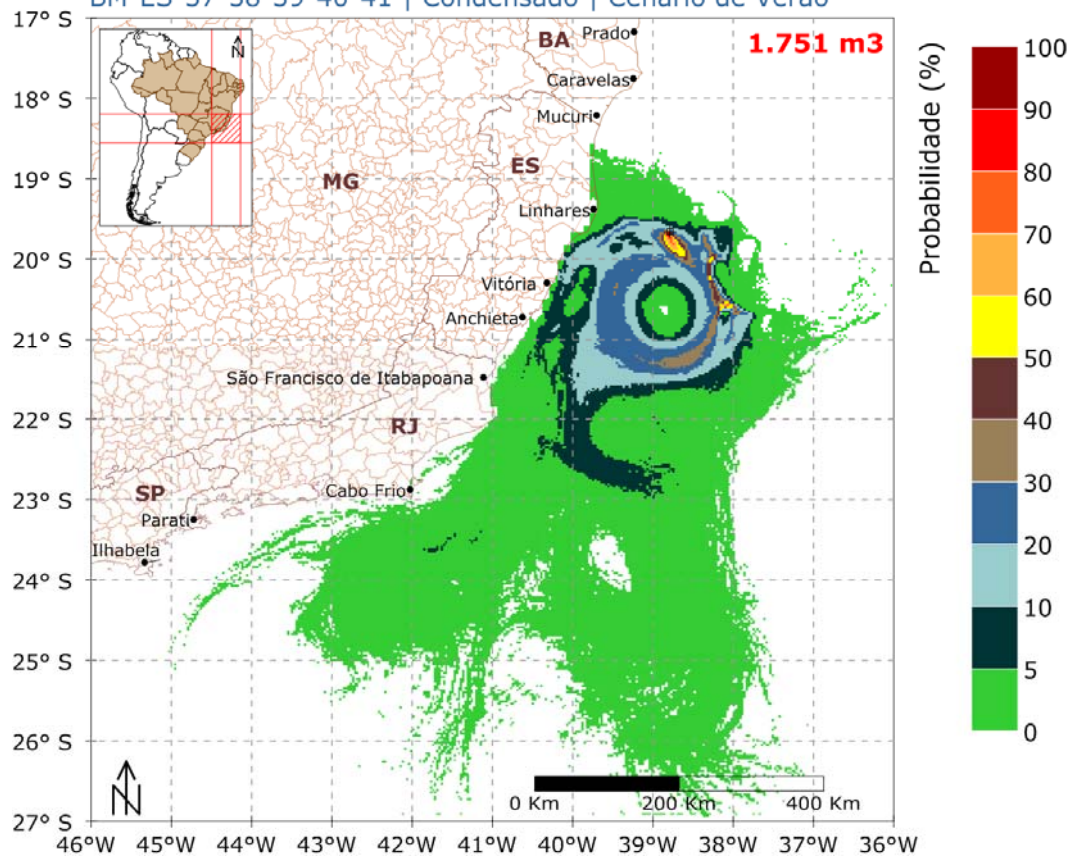
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Volume Médio | Classe 1 | menor que 8 m<sup>3</sup>

BM-ES-37-38-39-40-41 | Condensado | Cenário de Verão



**Figura 14: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.**

Analisando o mapa de probabilidade de presença de volume médio de óleo na classe 1 (menor que 8m<sup>3</sup>) observamos que todas as regiões na costa já apresentadas na Figura 8 (mapa de probabilidade de presença de óleo) estão incluídas neste também.

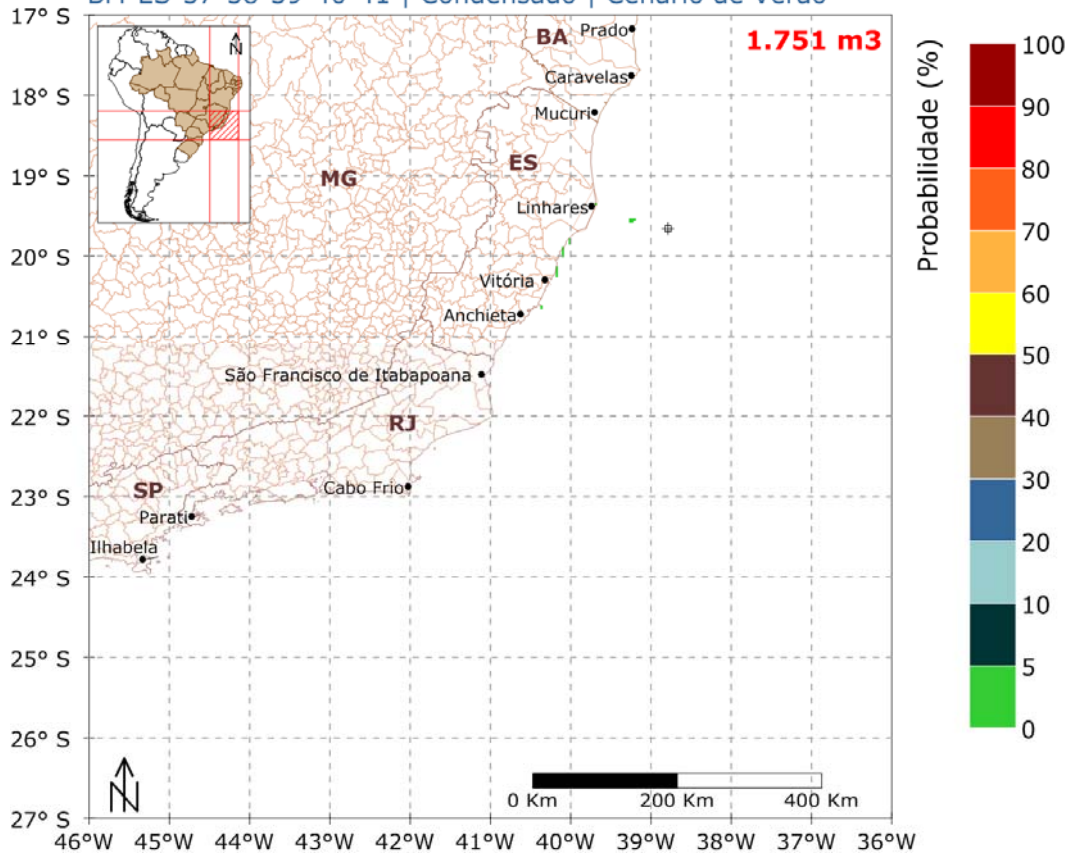
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Volume Médio | Classe 2 | 8-200 m<sup>3</sup>

BM-ES-37-38-39-40-41 | Condensado | Cenário de Verão



**Figura 15: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.**

Nesta classe (8-200m<sup>3</sup>), considerando faixas de volume médio, os municípios de Linhares Aracruz, Serra e Guarapari, no estado do Espírito Santo foram os que apresentaram probabilidade, 5-0%, de serem atingidos.

A classe 3 (maior que 200m<sup>3</sup>) não foi representada pois nenhuma área apresentou probabilidade nesta faixa.

### V.1.1.2. Inverno

A seguir, na Figura 16 à Figura 19, serão apresentados os resultados obtidos no período de inverno para um cenário de *blow-out*, volume vazado de 1.751 m<sup>3</sup>.

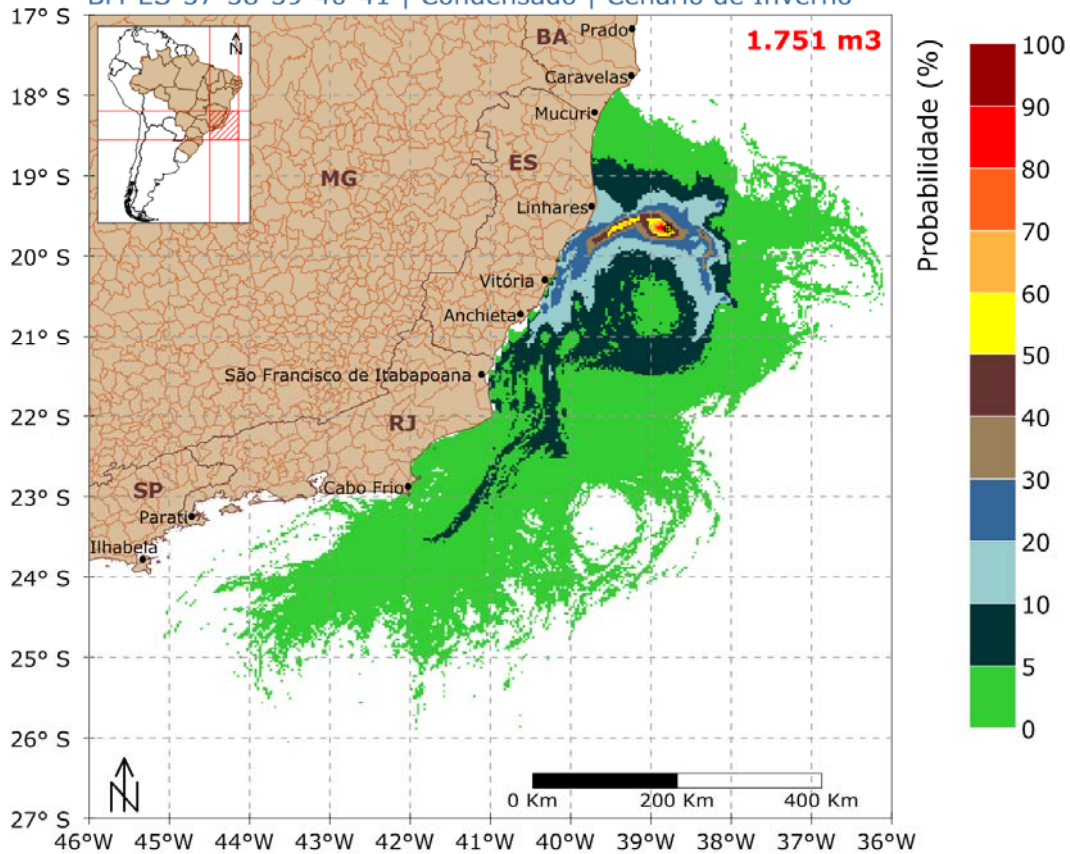
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | simulação 60 dias

BM-ES-37-38-39-40-41 | Condensado | Cenário de Inverno



**Figura 16: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.**

Nesse cenário a deriva do óleo também foi preferencial para sudoeste do poço, no entanto, as derivas rumo a norte tiveram uma presença maior, devido principalmente à passagem de sistemas frontais nesta época do ano.

Os locais que podem ser atingidos pelo óleo se estenderam de Nova Viçosa – BA a Arraial do Cabo - RJ

A região com maior probabilidade de presença de óleo, 30-20% foi registrada no estado do Espírito Santo (Tabela 4).

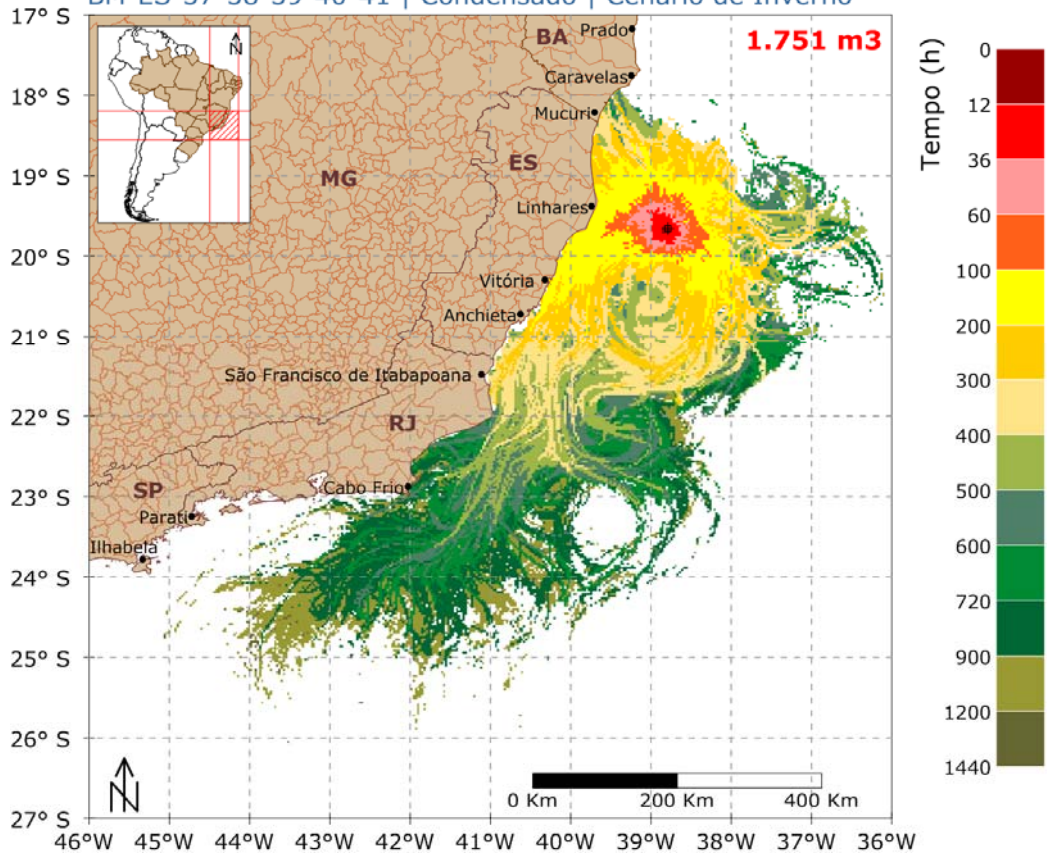
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Blow-out 30 dias | simulação 60 dias

BM-ES-37-38-39-40-41 | Condensado | Cenário de Inverno



**Figura 17: 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 também foi de 100-200 horas, atingindo a maior parte dos municípios do estado do Espírito Santo, neste intervalo de tempo. O estado da Bahia e do Rio de Janeiro apresentaram tempo mínimo de 300-400h e 200-300 horas, respectivamente (Tabela 4).

## STROLL - modo probabilístico

Volume Máximo de Óleo na Costa  
 BM-ES-37 a 41 | Condensado  
 Cenário de Inverno **1.751 m<sup>3</sup>**

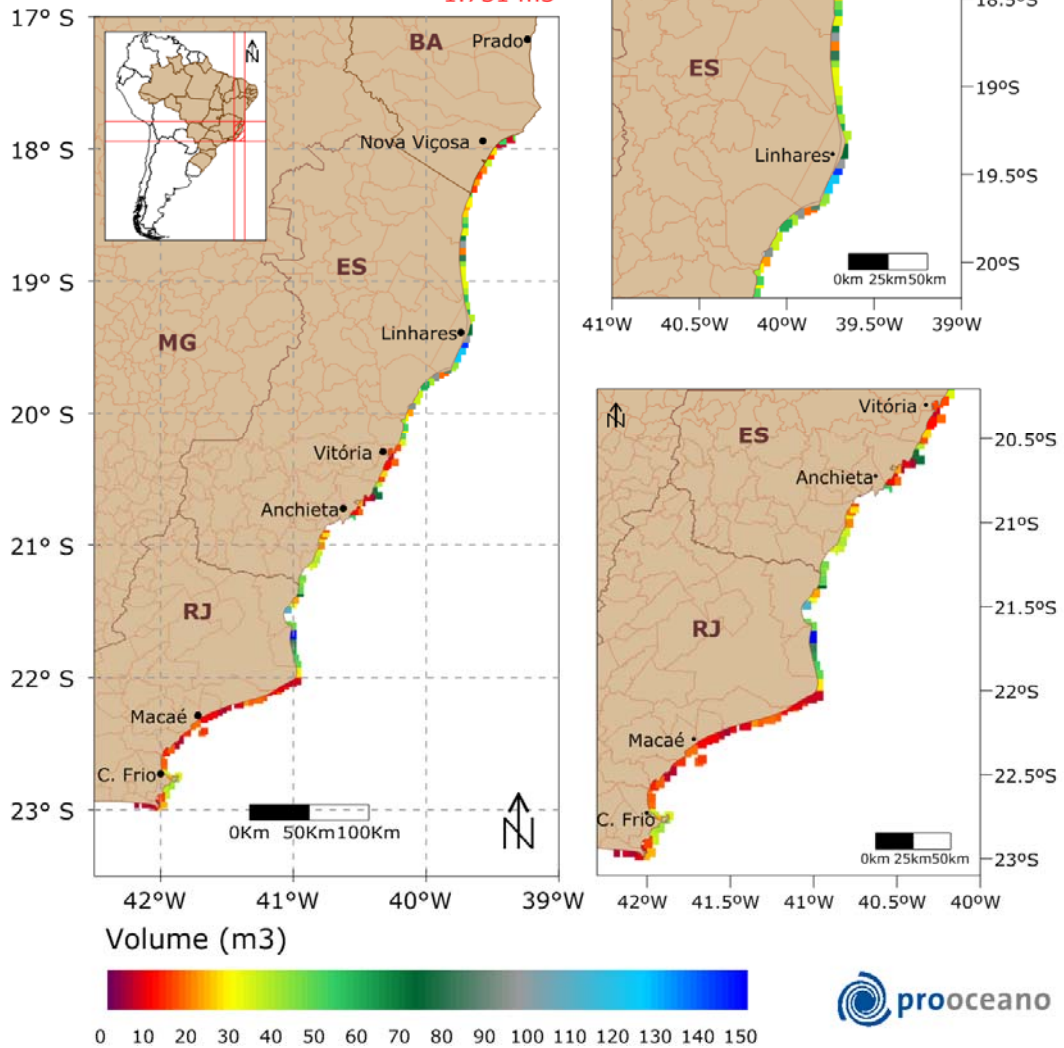
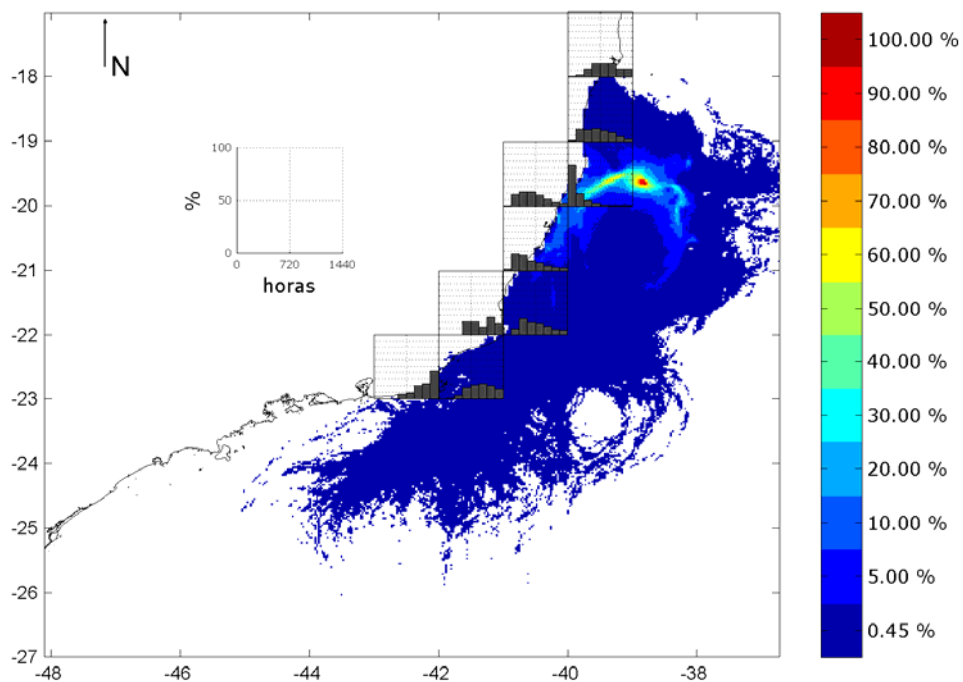


Figura 18: Volume máximo de óleo na costa no cenário de inverno.

Os maiores volumes máximos de óleo na costa foram registrados na região de Linhares – ES e na porção norte do estado do Rio de Janeiro (Tabela 4). Nos limites norte e sul do mapa de probabilidade foram observados os menores valores de volume máximo.

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 19).





**Figura 19: Histogramas de tempo de chegada de óleo na costa no cenário de inverno. A escala à direita é de probabilidade.**

No cenário de inverno a maior parte das regiões com maior probabilidade de presença de óleo apresentou tempos de chegada na primeira metade da simulação (0-720h) . No limite norte e sul do mapa os tempos de chegada concentram-se na 2ª metade da simulação (720-1440h).

A seguir, na Tabela 4, serão apresentados os volumes máximos, as classes de probabilidade e tempo mínimo de chegada de óleo de cada município com possibilidade de serem atingidos pelo óleo em um evento de *blow-out*.

**Tabela 4: Volume máximo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento de *blow-out*, nos cenários de verão e inverno.**

MUNICÍPIOS		Volume Máximo (m <sup>3</sup> )		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo de Toque (h)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
BA	Nova Viçosa	-	53,48	-	5 - 0	-	400 - 500
	Mucuri	-	36,91	-	5 - 0	-	300 - 400
ES	Conceição da Barra	79,85	99,54	5 - 0	5 - 0	300 - 400	200 - 300
	São Mateus	71,57	99,54	5 - 0	10 - 5	300 - 400	100 - 200
	Linhares	114,87	145,09	5 - 0	30 - 20	100 - 200	100 - 200
	Aracruz	69,87	95,94	10 - 5	30 - 20	100 - 200	100 - 200
	Fundão	26,85	40,64	5 - 0	10 - 5	200 - 300	200 - 300
	Serra	151,25	52,52	20 - 10	30 - 20	100 - 200	100 - 200
	Vitória	26,61	17,12	5 - 0	10 - 5	500 - 600	100 - 200
	Vila Velha	82,13	38,86	5 - 0	20 - 10	200 - 300	100 - 200
	Guarapari	-	71,71	-	5 - 0	200 - 300	300 - 400
	Anchieta	-	-	-	-	-	-
	Piúma	-	-	-	-	-	-
	Itapemirim	-	34,01	-	5 - 0	-	300 - 400
	Marataízes	-	40,32	-	5 - 0	-	300 - 400
	Presidente Kennedy	-	47,58	-	5 - 0	-	300 - 400
RJ	São Francisco de Itabapoana	36,33	112,12	5 - 0	10 - 5	500 - 600	300 - 400
	São João da Barra	41,50	151,68	5 - 0	10 - 5	400 - 500	200 - 300
	Campos dos Goytacazes	19,45	48,43	5 - 0	5 - 0	500 - 600	200 - 300
	Quissamã	-	22,20	-	5 - 0	-	500 - 600
	Carapebus	-	11,17	-	5 - 0	-	500 - 600
	Macaé	-	19,30	-	5 - 0	-	500 - 600
	Rio das Ostras	-	26,43	-	5 - 0	-	600 - 720
	Casimiro de Abreu	-	20,79	-	5 - 0	-	600 - 720
	Armação dos Búzios	-	45,74	-	5 - 0	-	720 - 900
	Cabo Frio	-	38,24	-	5 - 0	-	600 - 720
Arraial do Cabo	-	24,88	-	5 - 0	-	600 - 720	

#### **Mapas de Probabilidade por Classes de Volume de Óleo**

A seguir serão apresentados mapas de probabilidade de ocorrência por classes de volume de óleo. Esses mapas foram elaborados, considerando os volumes máximos na costa (Figura 20 e Figura 21) e volumes médios (Figura 22 e Figura 23) presentes em cada ponto de grade, em cada uma das 1.250 simulações realizadas para cada cenário ambiental.

Foram consideradas três classes de volume, são elas: Classe 1 – menor que 8 m<sup>3</sup>; Classe 2 – 8 a 200 m<sup>3</sup>; e Classe 3 – maior que 200m<sup>3</sup>.

### STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de P. de Óleo Condensado | Volume Máximo Cenário de Inverno | Classe 1

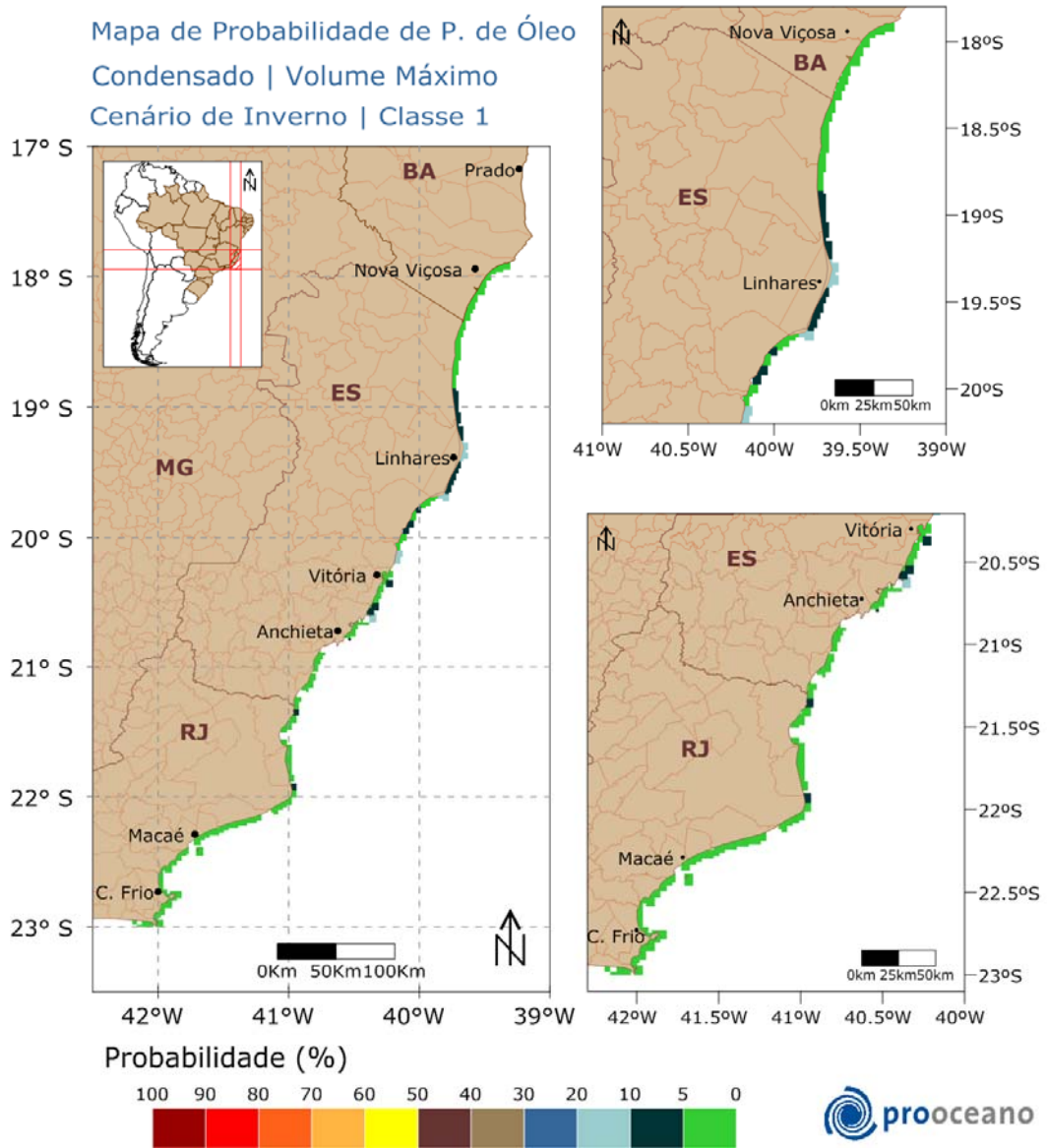


Figura 20: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

As regiões que podem apresentar óleo na costa nesta faixa de volume (menor 8m<sup>3</sup>) estenderam-se do estado da Bahia até o Rio de Janeiro com probabilidade máxima de 20-10%, registrada no estado do Espírito Santo.

## STROLL - modo probabilístico

Mapa de Probabilidade de P. de Óleo Condensado | Volume Máximo Cenário de Inverno | Classe 2

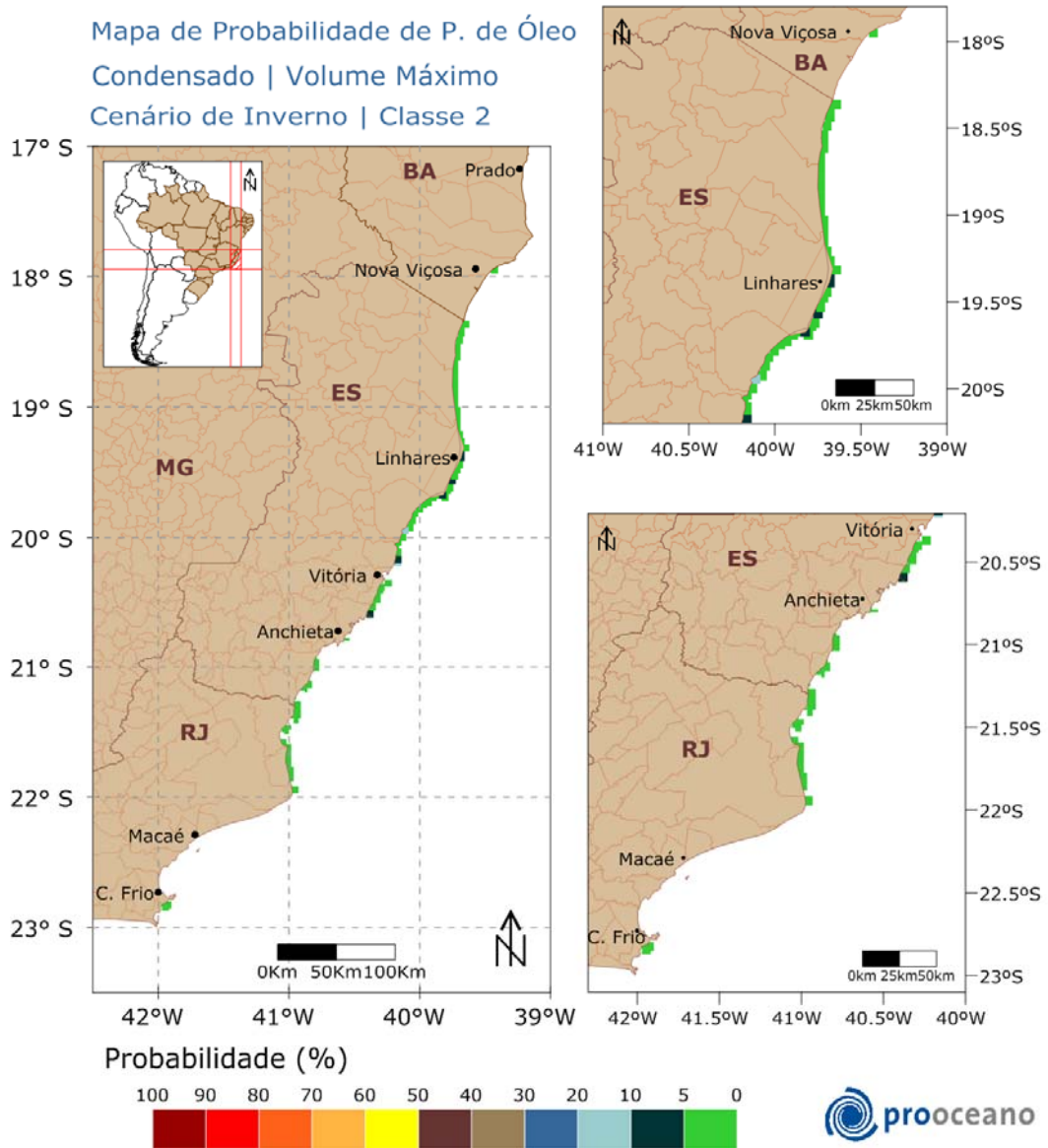


Figura 21: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

Nesta classe ( $8-200m^3$ ) áreas mais restritas da costa apresentaram probabilidade de presença de óleo, sendo que as máximas probabilidade 10-5% foram registradas no estado do Espírito.

A classe 3 (maior que  $200m^3$ ) não foi representada pois nenhuma área na costa apresentou probabilidade nesta faixa.

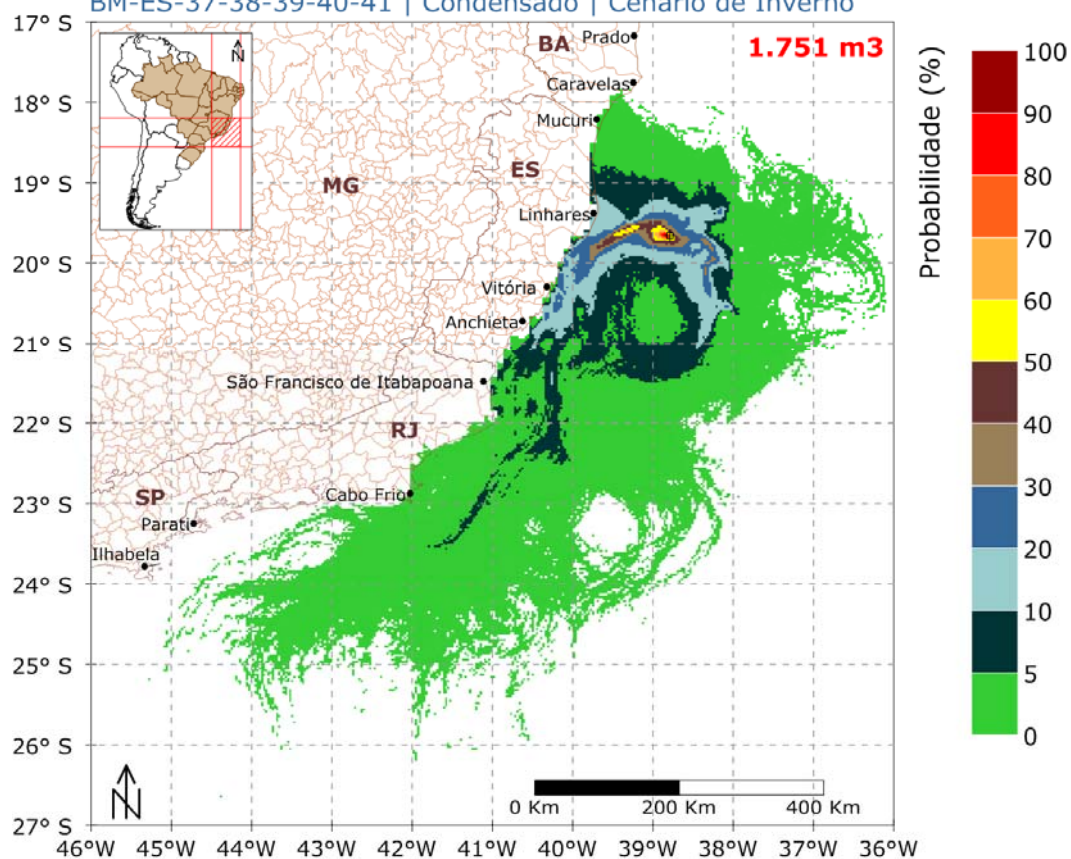
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Volume Médio | Classe 1 | menor que 8 m<sup>3</sup>

BM-ES-37-38-39-40-41 | Condensado | Cenário de Inverno



**Figura 22: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.**

Todas as regiões identificadas na Figura 16 (Mapa de Probabilidade de Óleo) também podem apresentar óleo nesta faixa de volume médio, classe 1 (menor que 8m<sup>3</sup>).

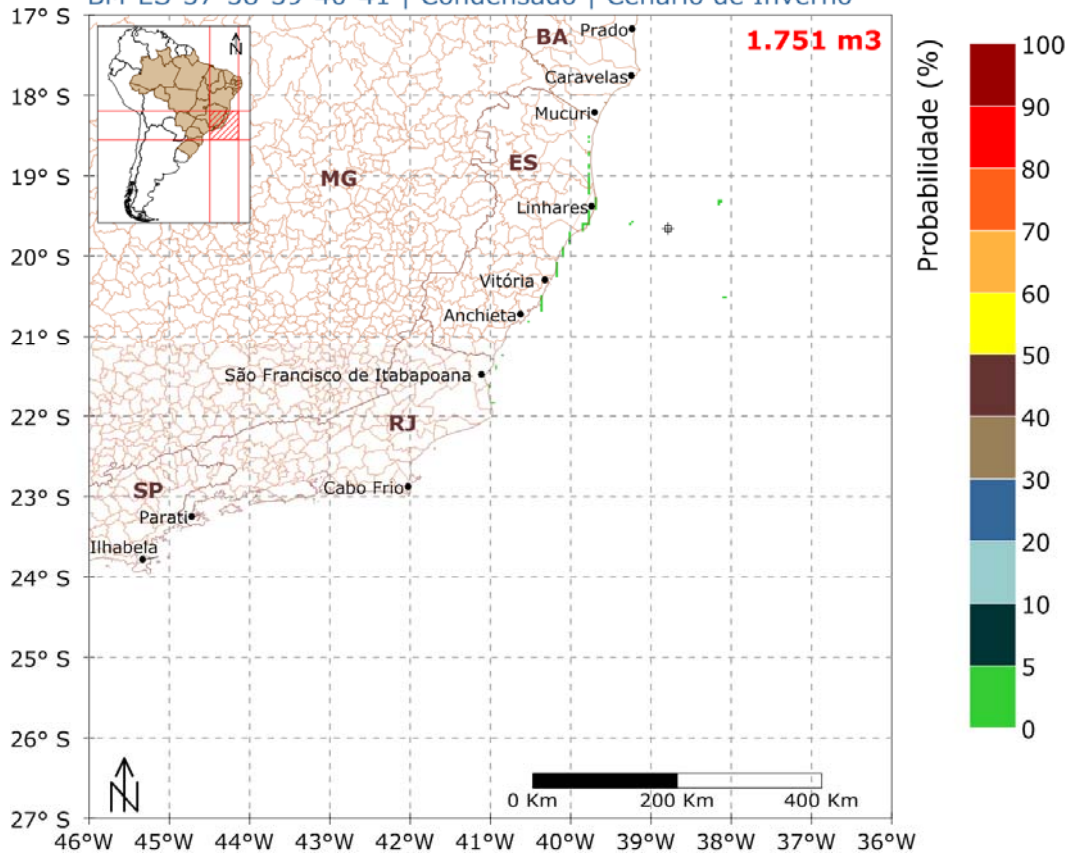
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Volume Médio | Classe 2 | 8-200 m<sup>3</sup>

BM-ES-37-38-39-40-41 | Condensado | Cenário de Inverno



**Figura 23: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.**

Nesta faixa de volume (8-200m<sup>3</sup>) regiões desde Conceição da Barra até Guarapari – ES, além de São Francisco do Itabapoana e São João da Barra - RJ podem apresentar óleo com probabilidades entre 5-0%.

A classe 3 (maior que 200m<sup>3</sup>) não foi representada pois nenhuma área apresentou probabilidade nesta faixa.

### V.2. Modo Determinístico

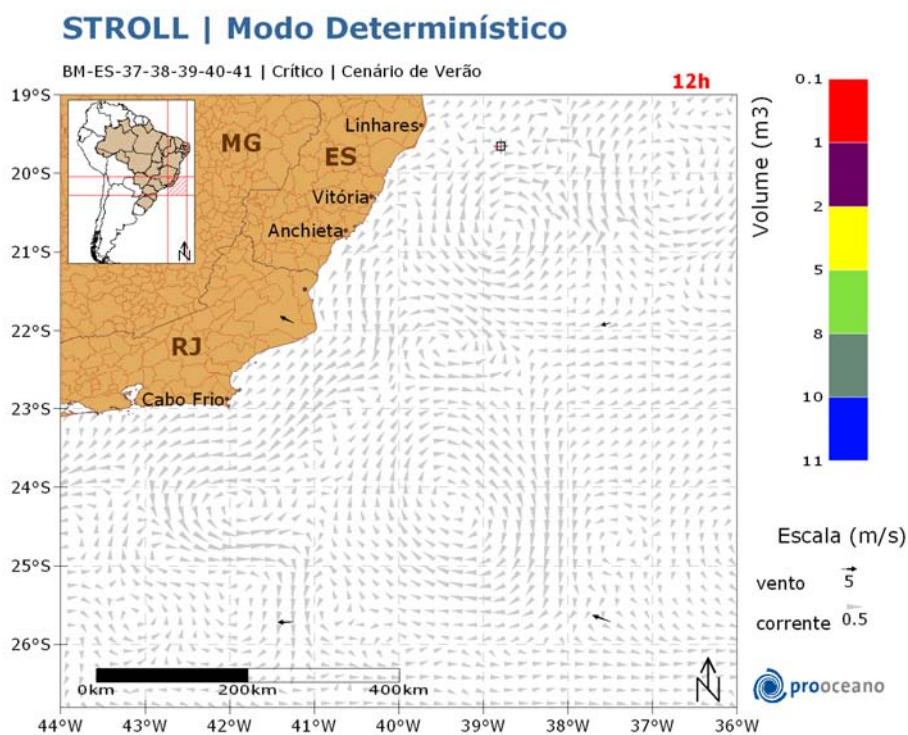
Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas foi identificado o cenário crítico para ocorrência de um evento de *blow-out* no ponto simulado. Tendo em vista que tanto no verão quanto no inverno foram observados tempos mínimos de toque na costa entre 100-200 horas, serão apresentadas duas trajetórias críticas.

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 apresentados os campos de vento e correntes que transportaram o óleo nesse cenário.

#### V.2.1.1. Crítico

Na Figura 24 à Figura 34 é mostrada a trajetória do óleo no cenário de verão para a situação crítica, onde o óleo atinge a costa mais rapidamente.



**Figura 24: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 12 horas de simulação.**

### STROLL | Modo Determinístico

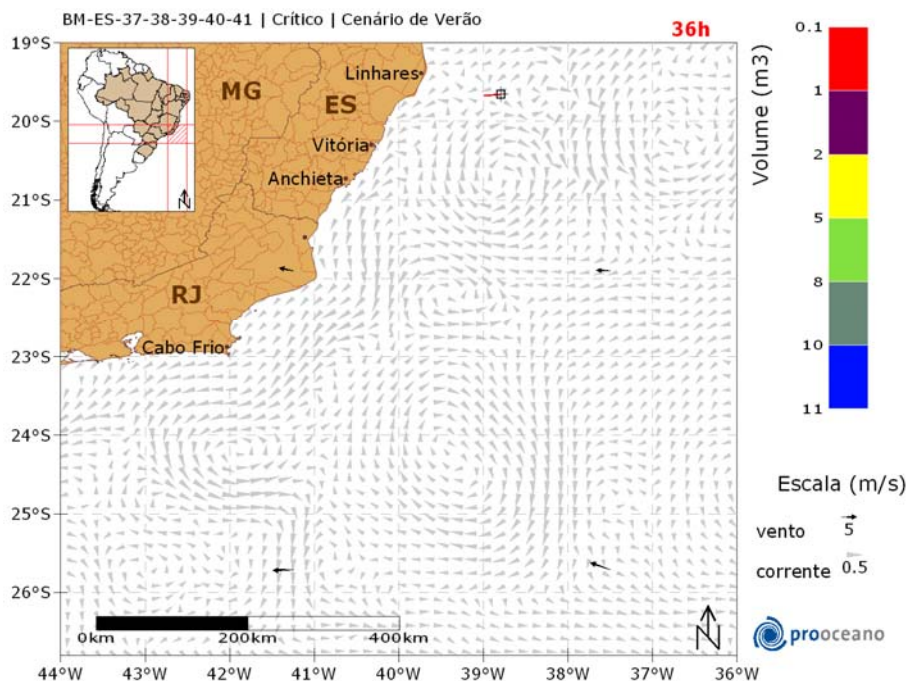


Figura 25: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 36 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

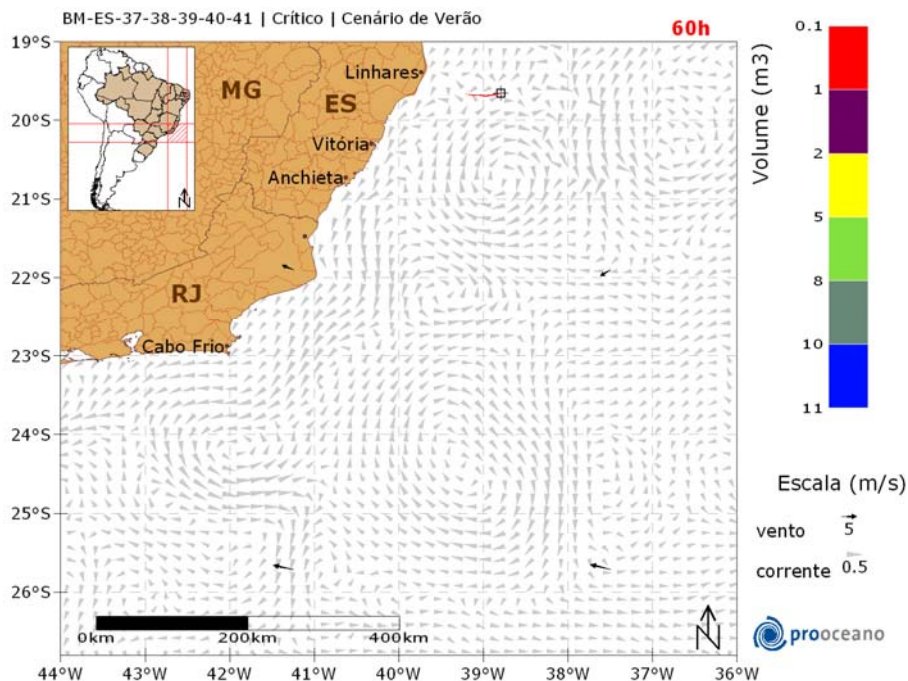


Figura 26: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 60 horas de simulação.



### STROLL | Modo Determinístico

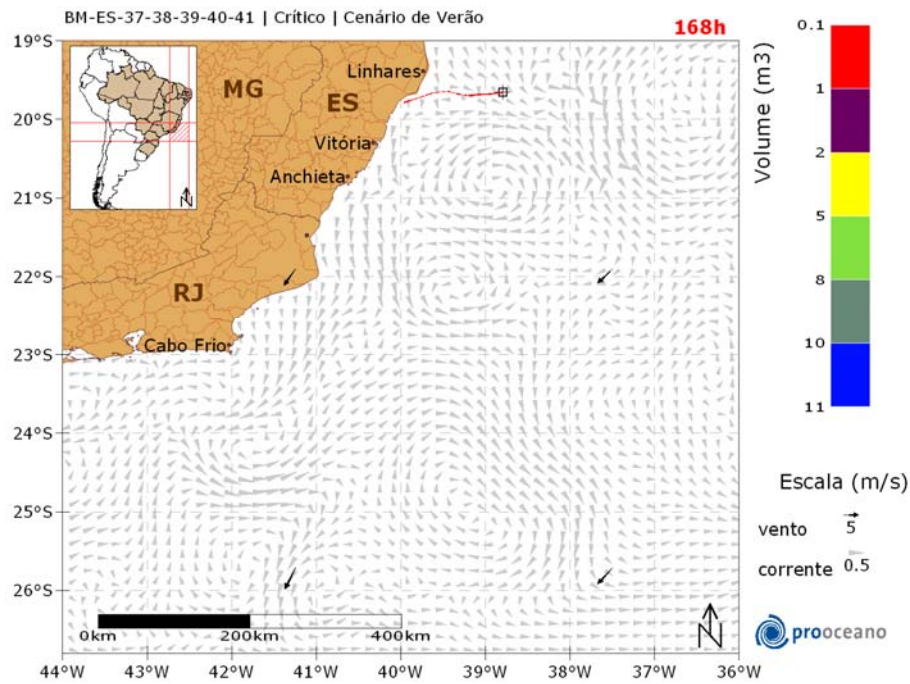


Figura 27: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 1 semana (7 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

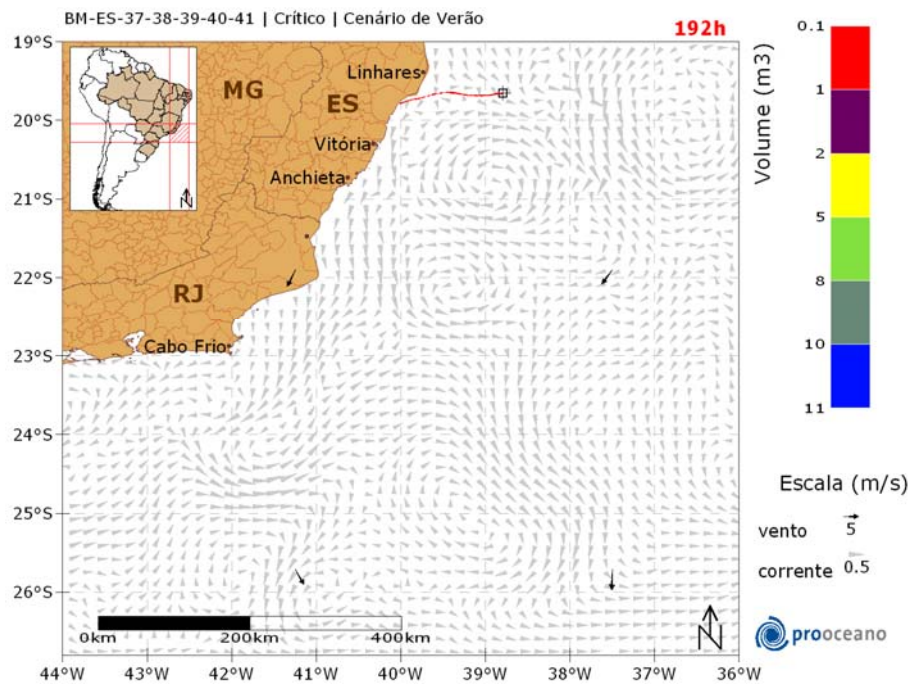


Figura 28: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 192 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

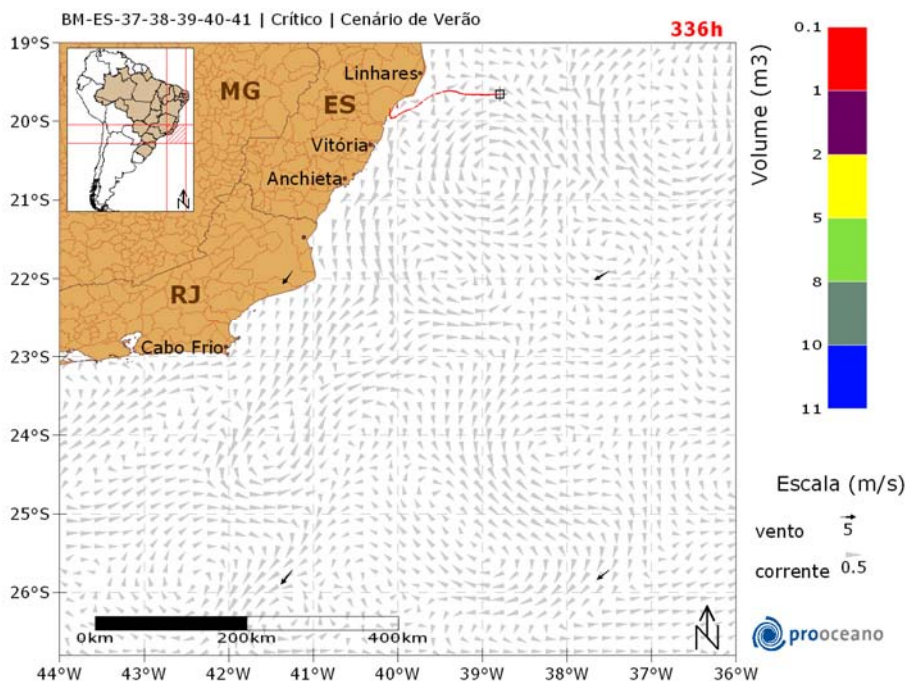


Figura 29: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 2 semanas (14 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

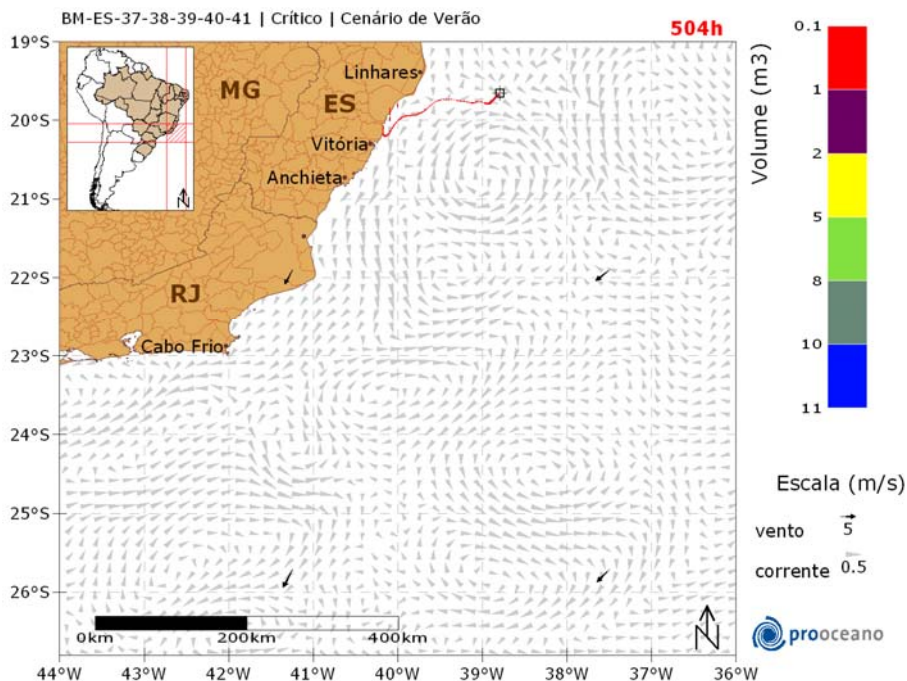


Figura 30: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 3 semanas (21 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

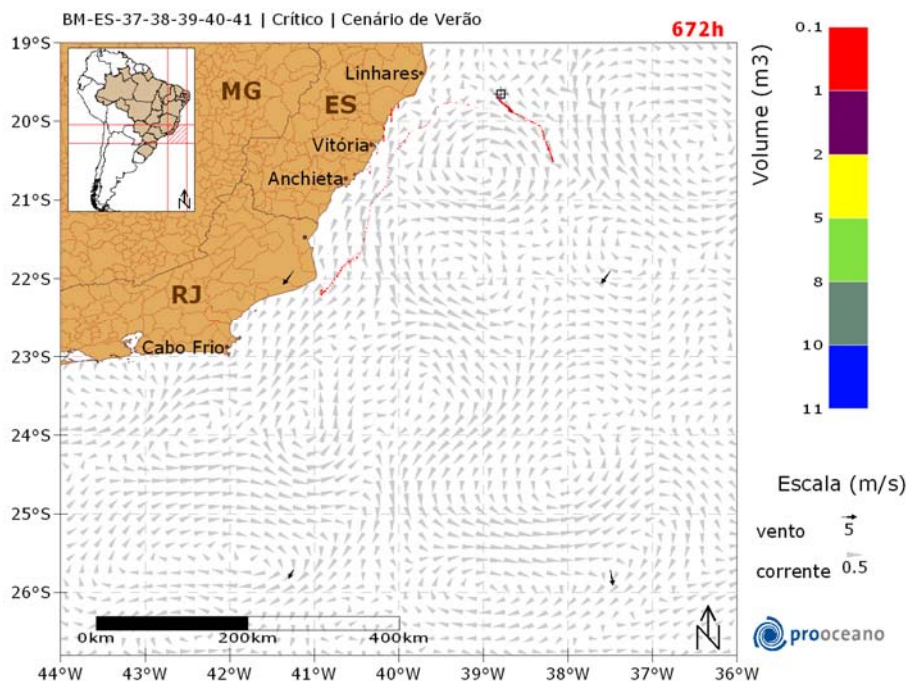


Figura 31: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 4 semanas (28 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

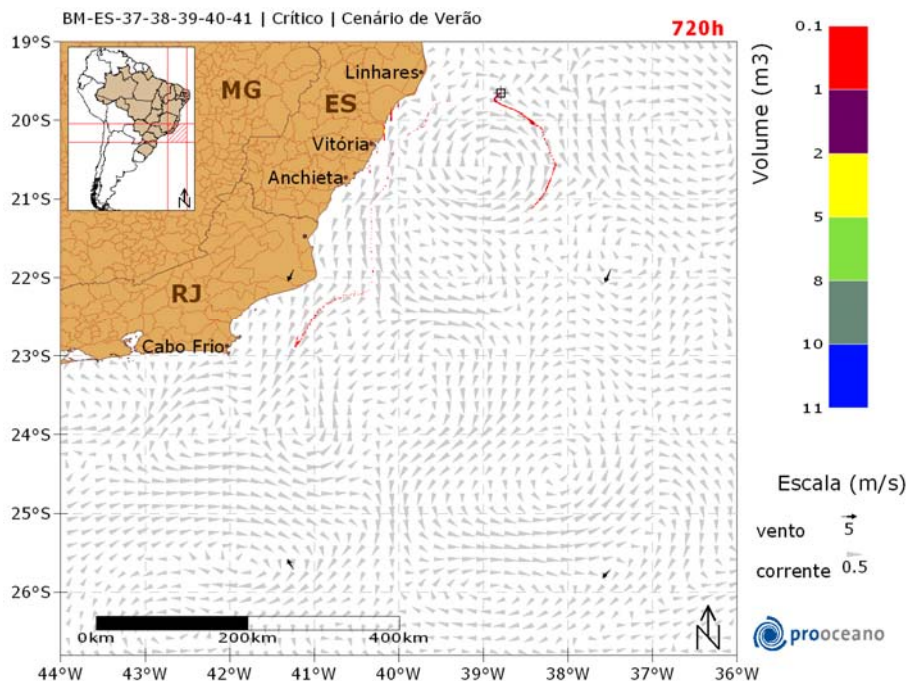


Figura 32: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 30 dias de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

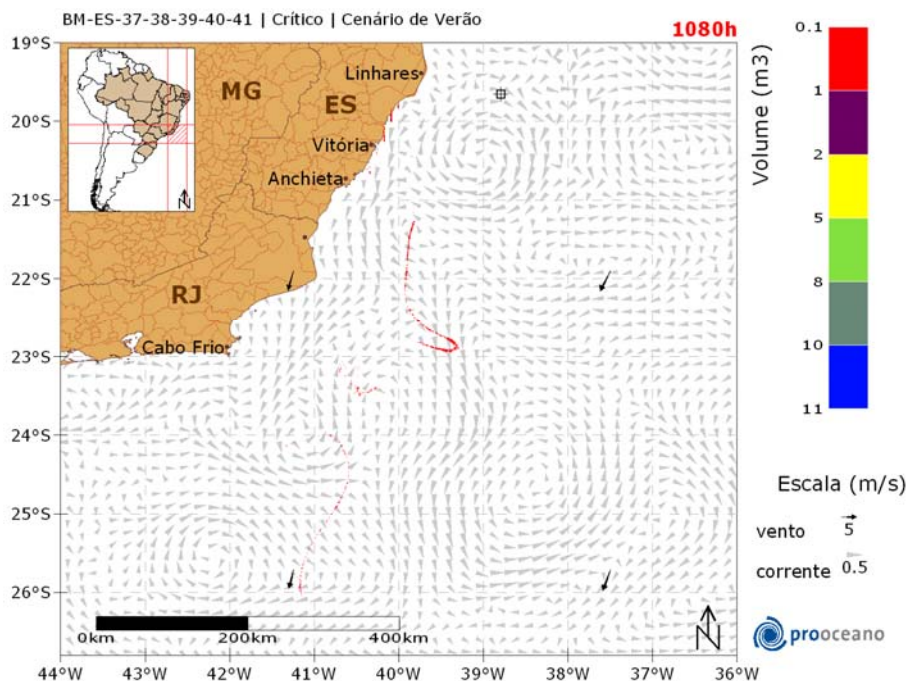


Figura 33: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 45 dias de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

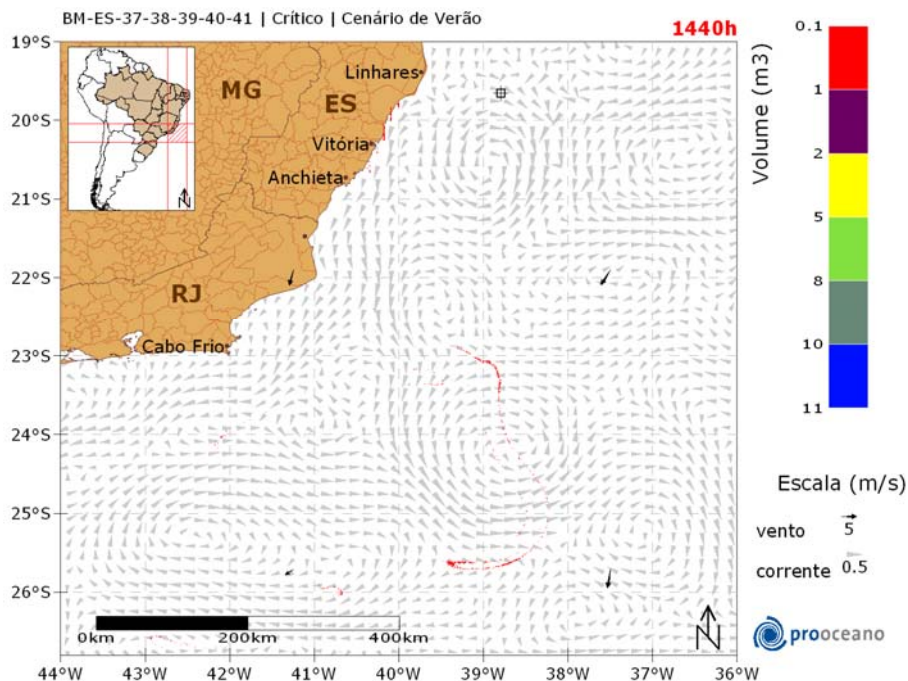
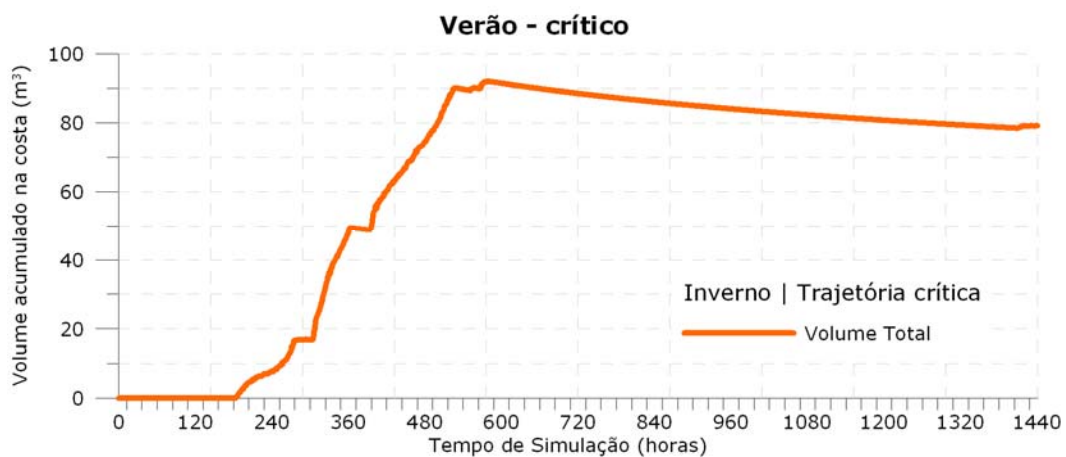


Figura 34: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de verão, após 60 dias de simulação.

A deriva do óleo ocorreu inicialmente rumo a oeste do poço, quando em 192 horas houve toque na costa na região de Aracruz – ES. Após este instante regiões a sul também foram sendo atingidas. Após o final da simulação, 1440 horas, somente áreas no estado do Espírito Santo apresentaram óleo na costa.

No gráfico (Figura 47), 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,  $\sim 90 \text{ m}^3$ , foi alcançado em aproximadamente 600 horas após o início da simulação.



**Figura 35: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória crítica no cenário de verão.**

Na Figura 36 à Figura 46 é mostrada a trajetória do óleo no cenário de inverno para a situação crítica, onde o óleo atinge a costa mais rapidamente.

### STROLL | Modo Determinístico

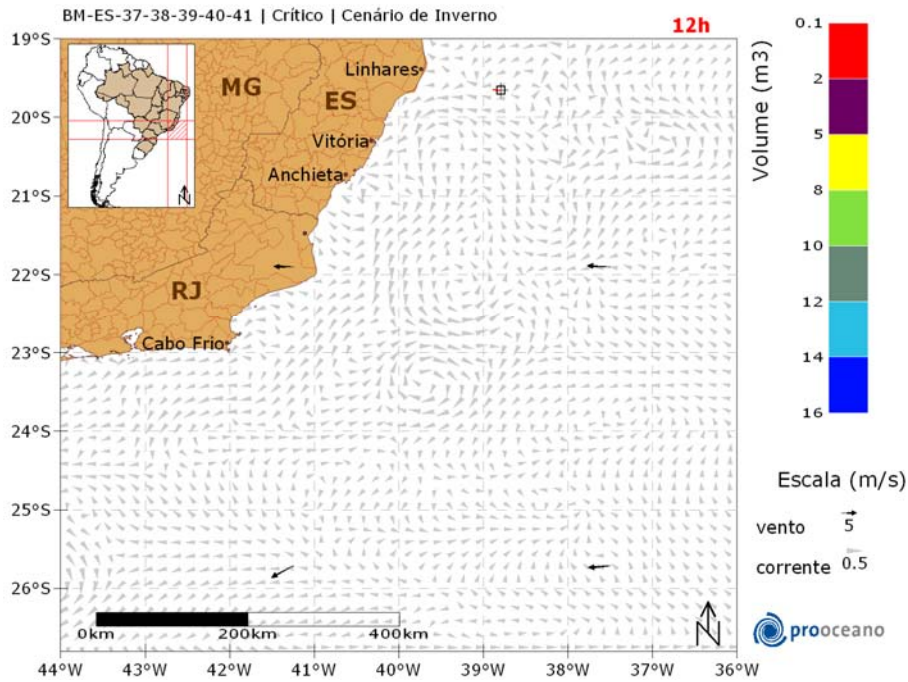


Figura 36: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

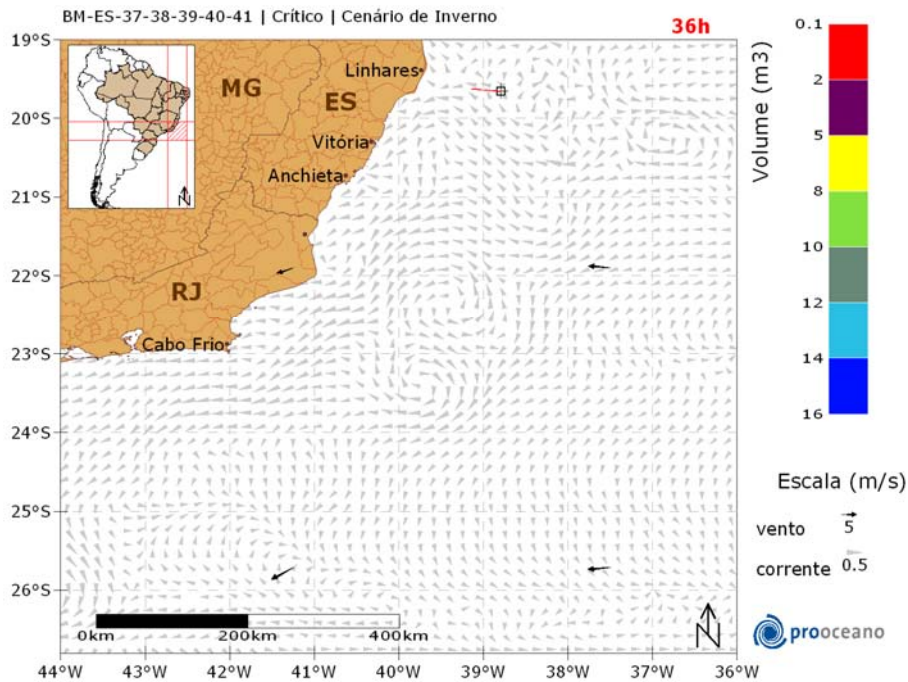


Figura 37: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

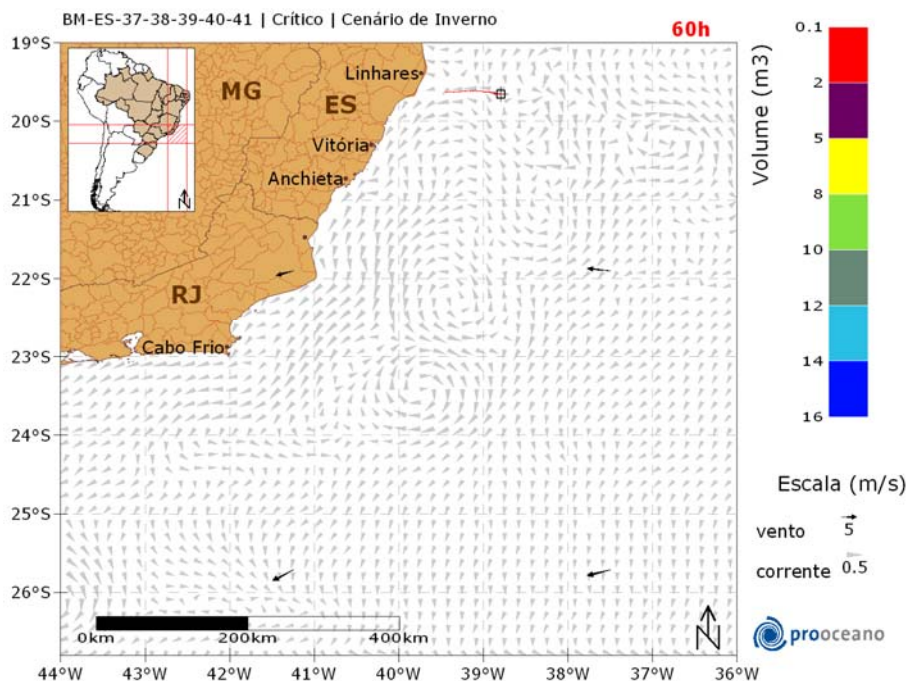


Figura 38: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

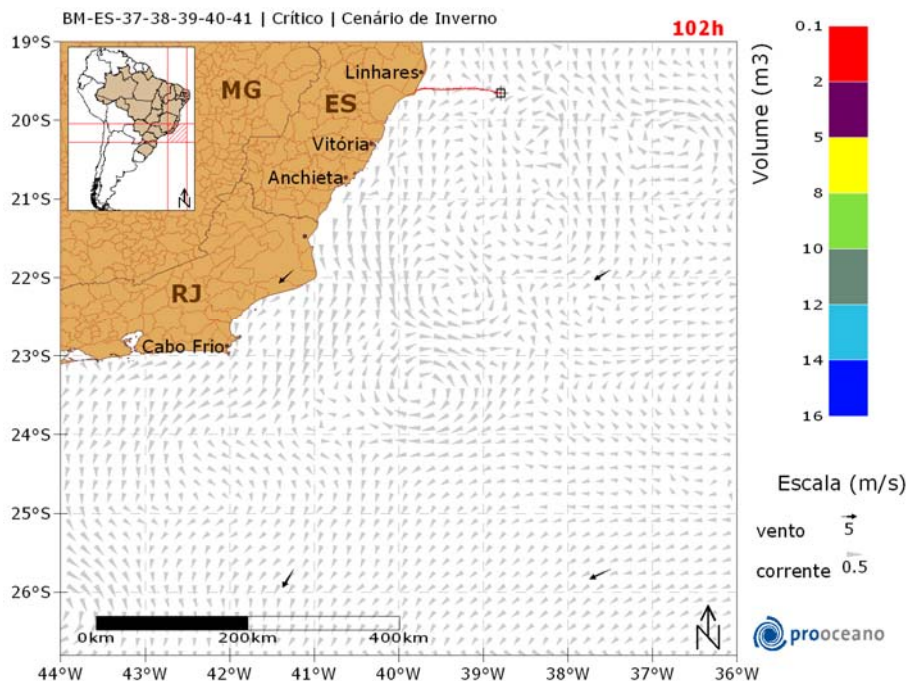


Figura 39: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 102 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

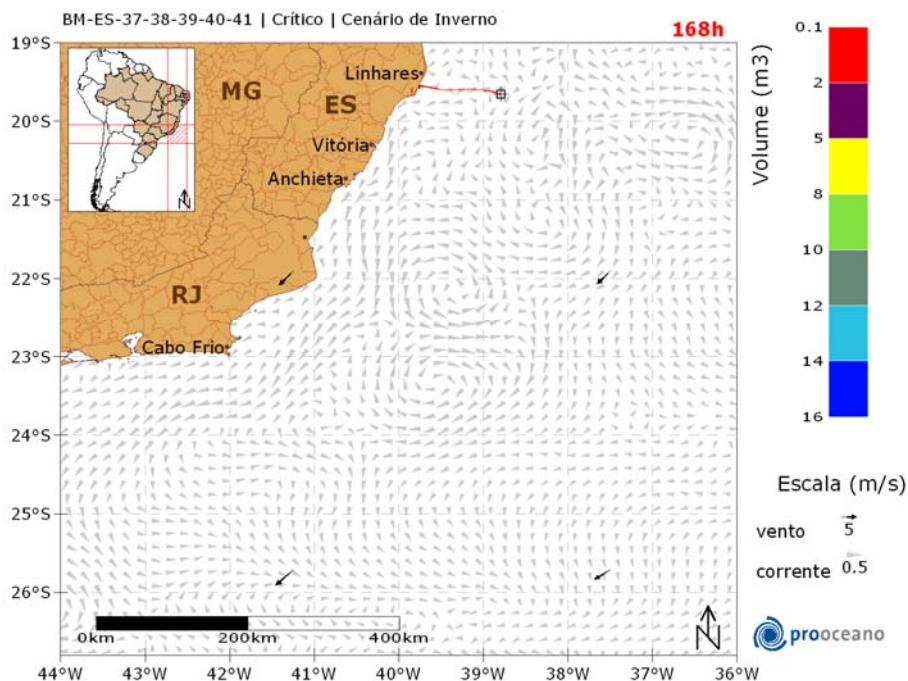


Figura 40: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 1 semana (7 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

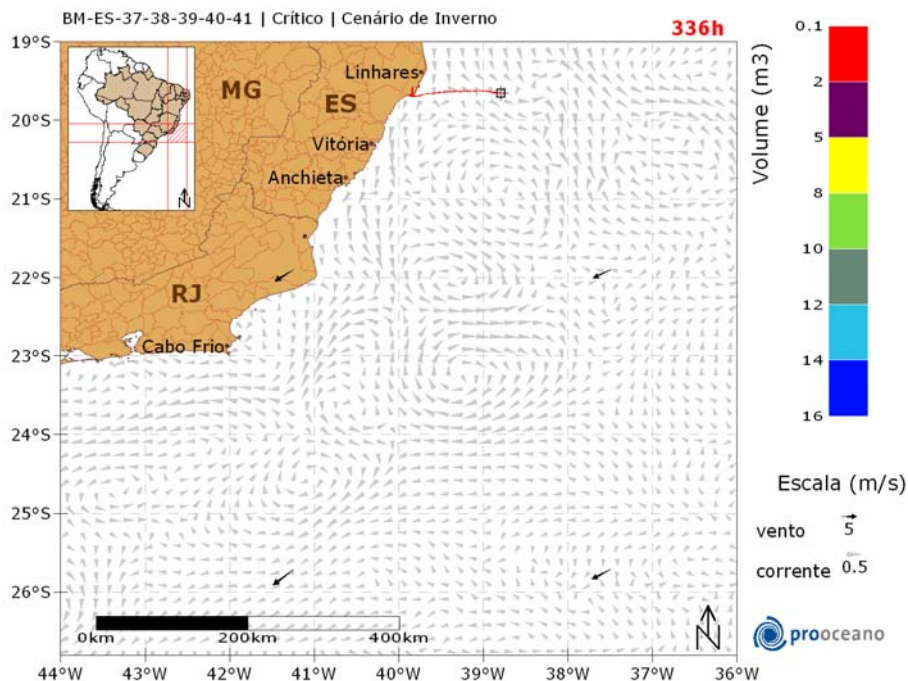


Figura 41: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação.



### STROLL | Modo Determinístico

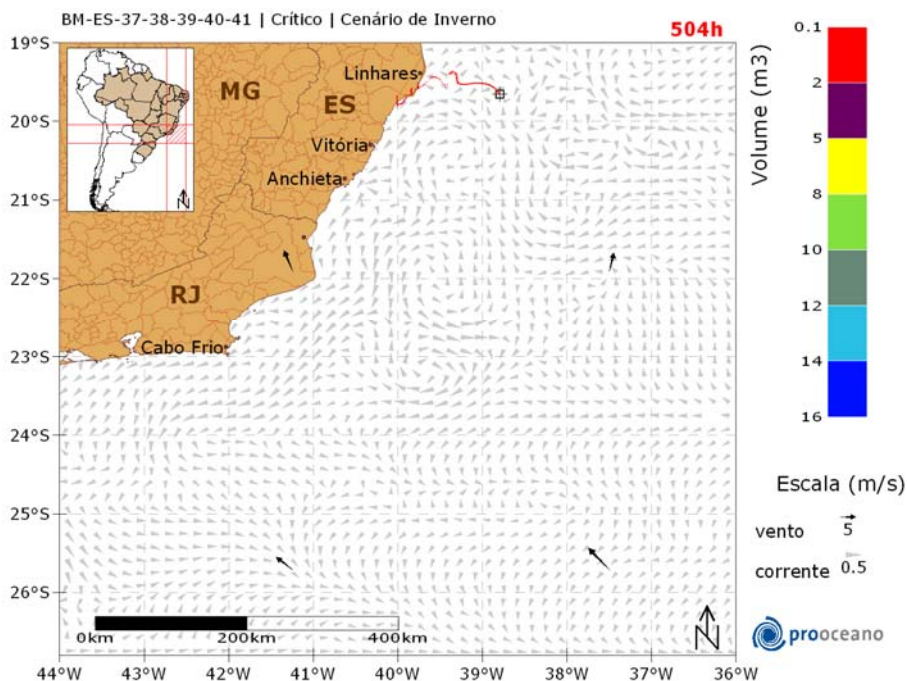


Figura 42: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

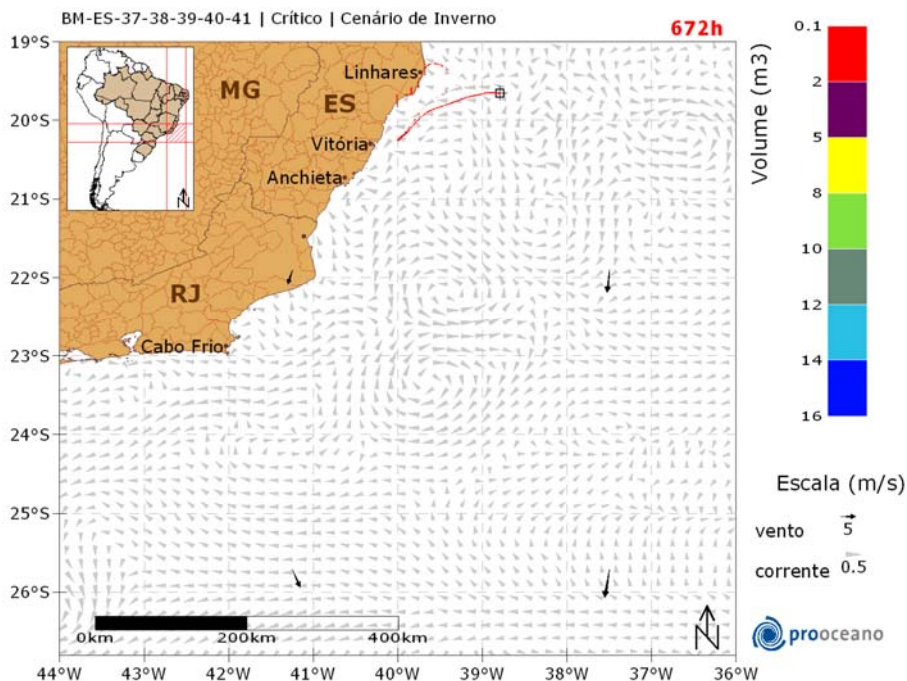


Figura 43: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

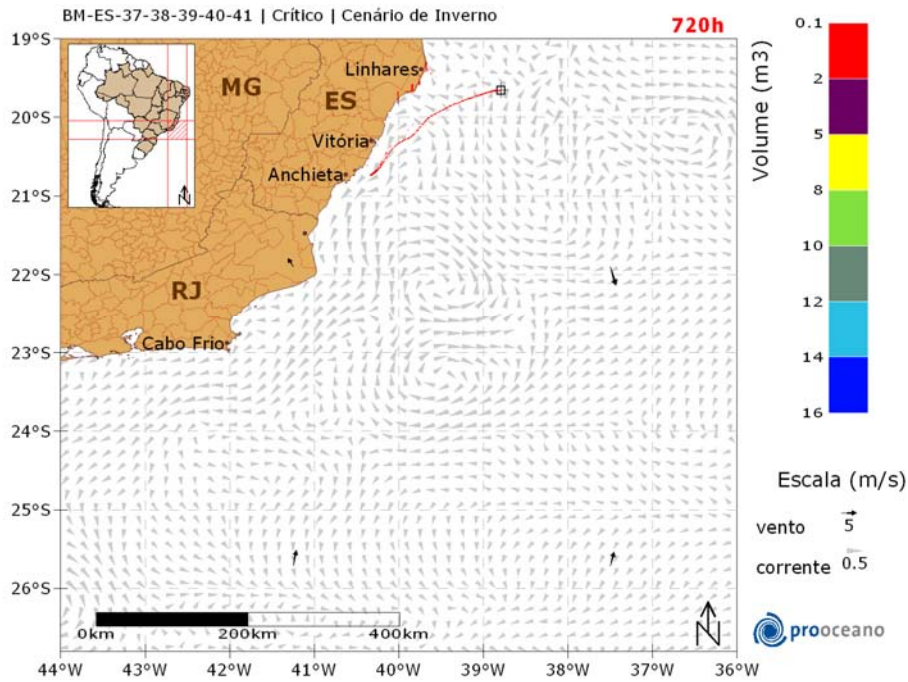


Figura 44: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 30 dias de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

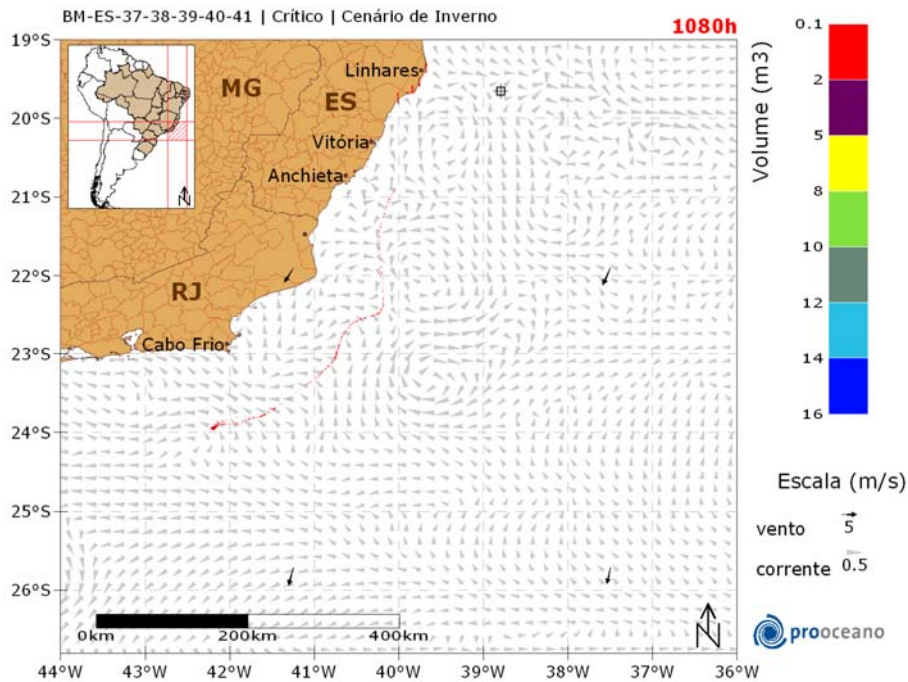


Figura 45: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 45 dias de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

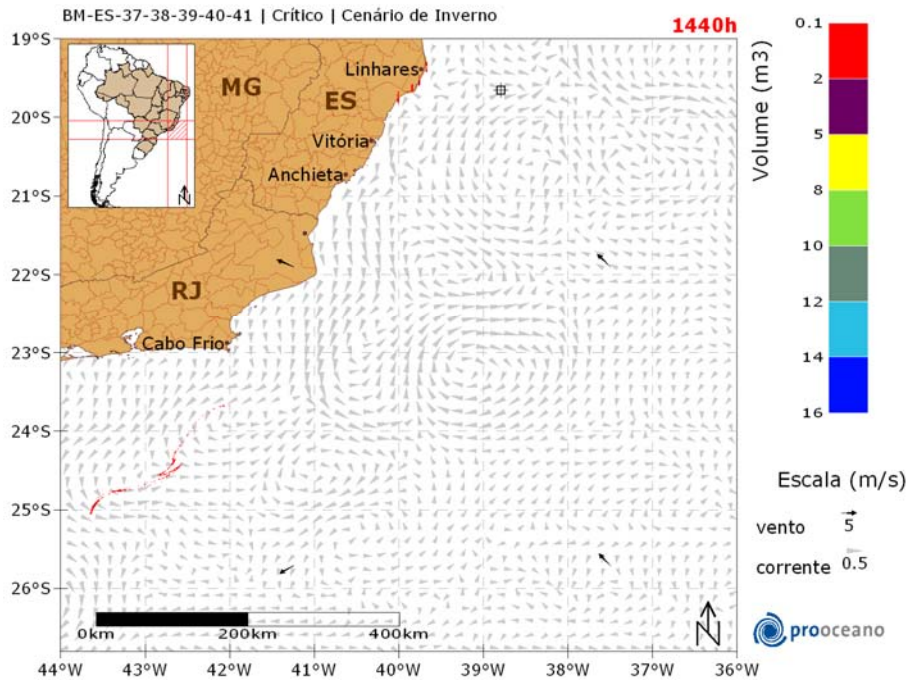
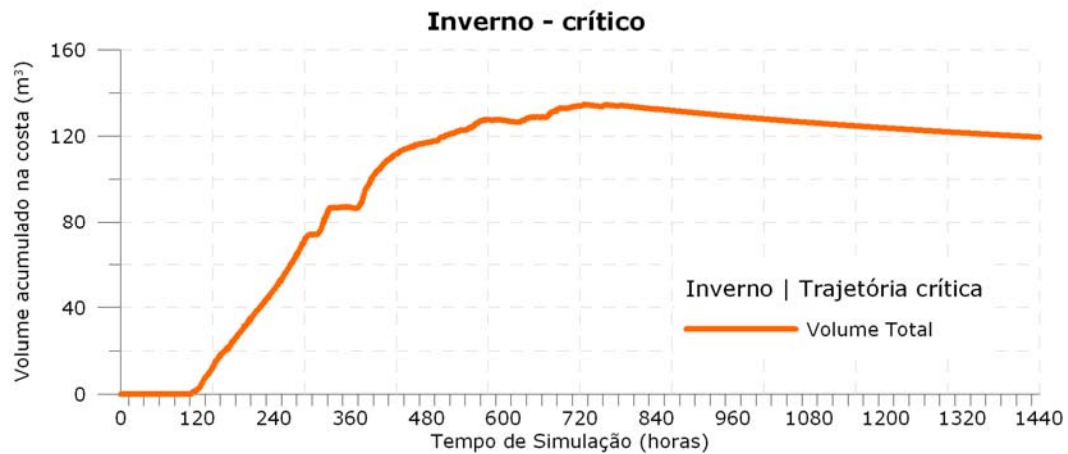


Figura 46: Resultado da simulação determinística crítica, cenário de inverno, após 60 dias de simulação.

A deriva do óleo neste cenário também ocorreu rumo a oeste do poço com toque na costa ocorrendo em 102 horas após o início da simulação no município de Linhares – ES. Ao final da simulação, 1440 h, somente alguns locais na costa do estado do Espírito Santo apresentaram parte do óleo remanescente.

No gráfico (Figura 47), 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,  $\sim 140 \text{ m}^3$ , foi alcançado em aproximadamente 720 horas após o início da simulação.



**Figura 47: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória crítica no cenário de inverno.**

#### V.2.1.2. Condições Meteo-oceanográficas frequentes

A seguir, na Figura 48 à Figura 57 é apresentada a trajetória do óleo em condições meteo-oceanográficas frequentes no verão.

### STROLL | Modo Determinístico

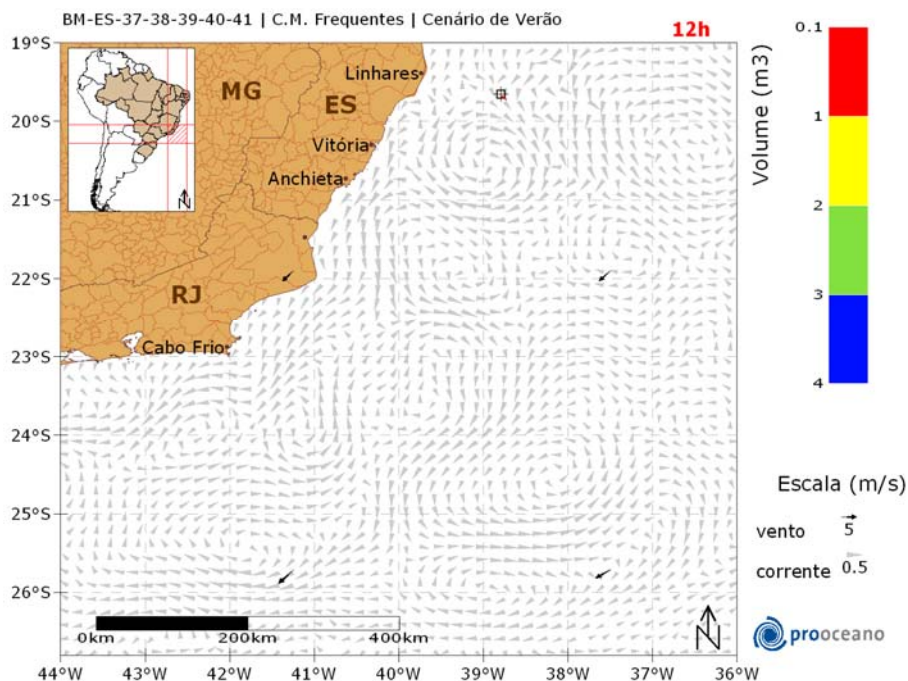


Figura 48: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 12 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

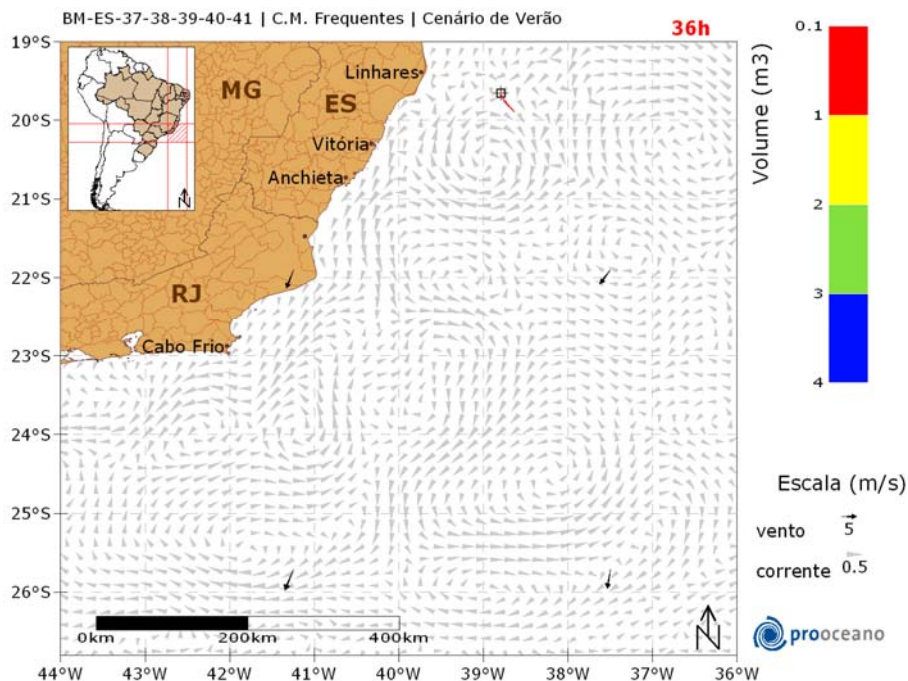


Figura 49: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 36 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

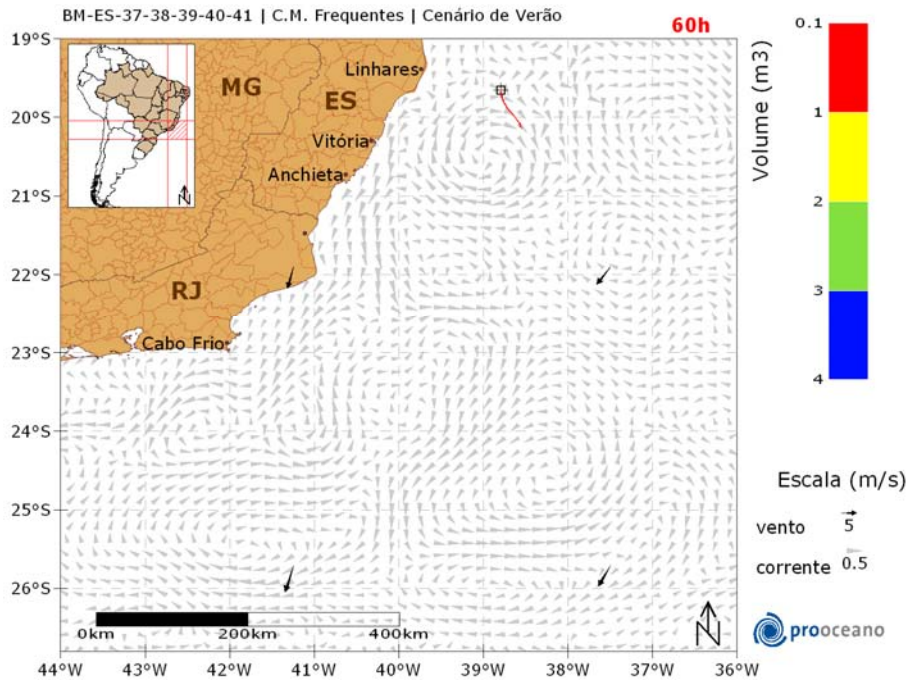


Figura 50: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 60 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

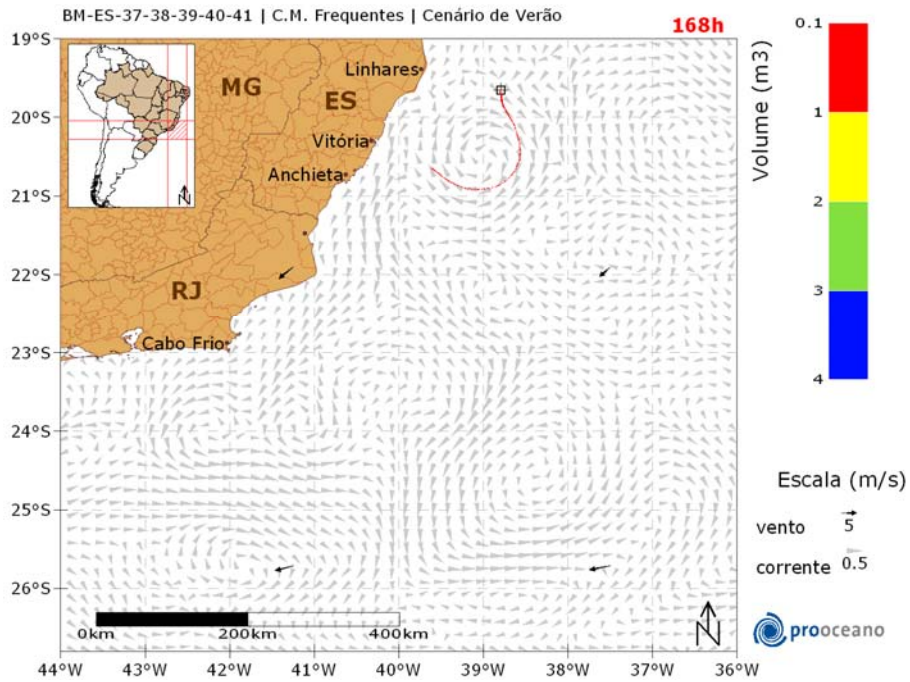


Figura 51: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 1 semana (7 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

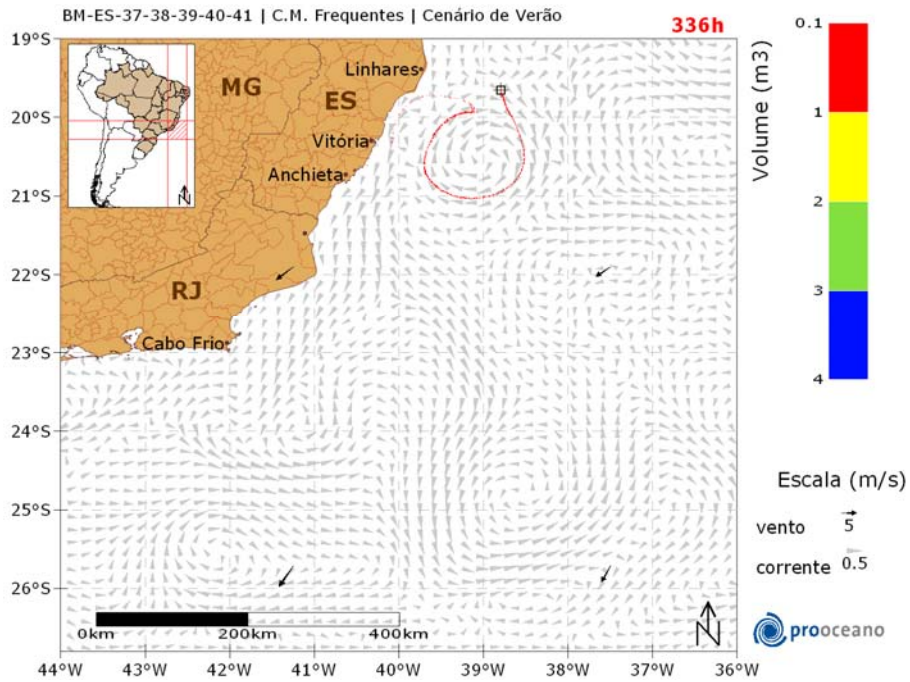


Figura 52: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 2 semanas (14 dias) de simulação.



### STROLL | Modo Determinístico

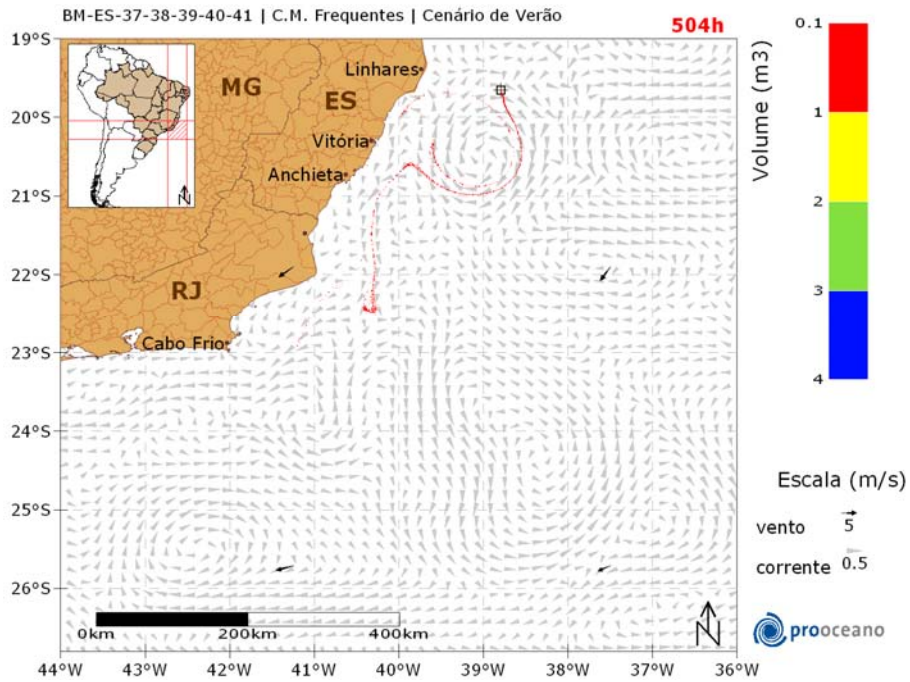


Figura 53: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 3 semanas (21 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

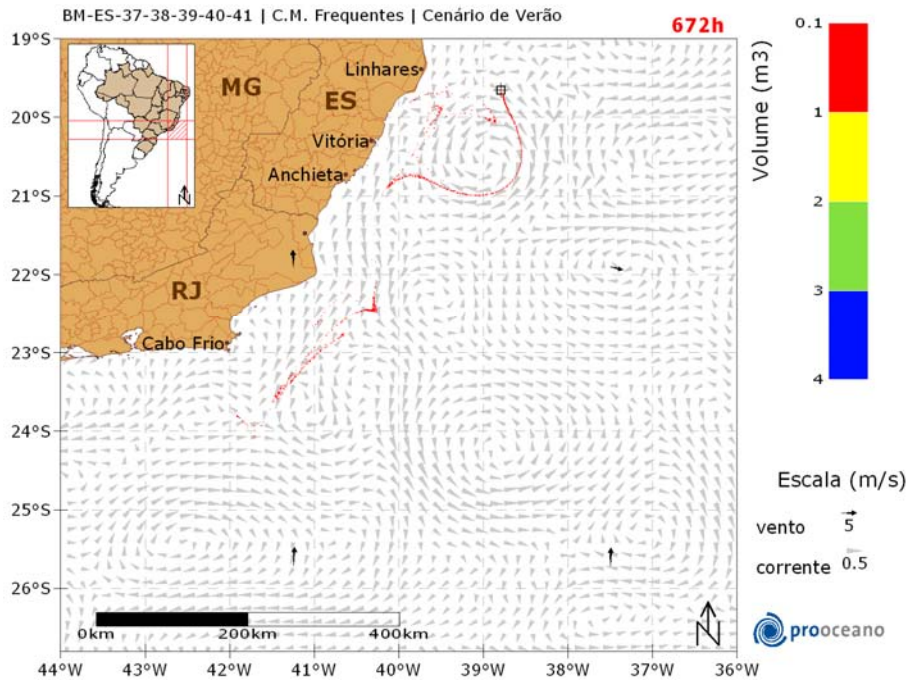


Figura 54: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 4 semanas (28 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

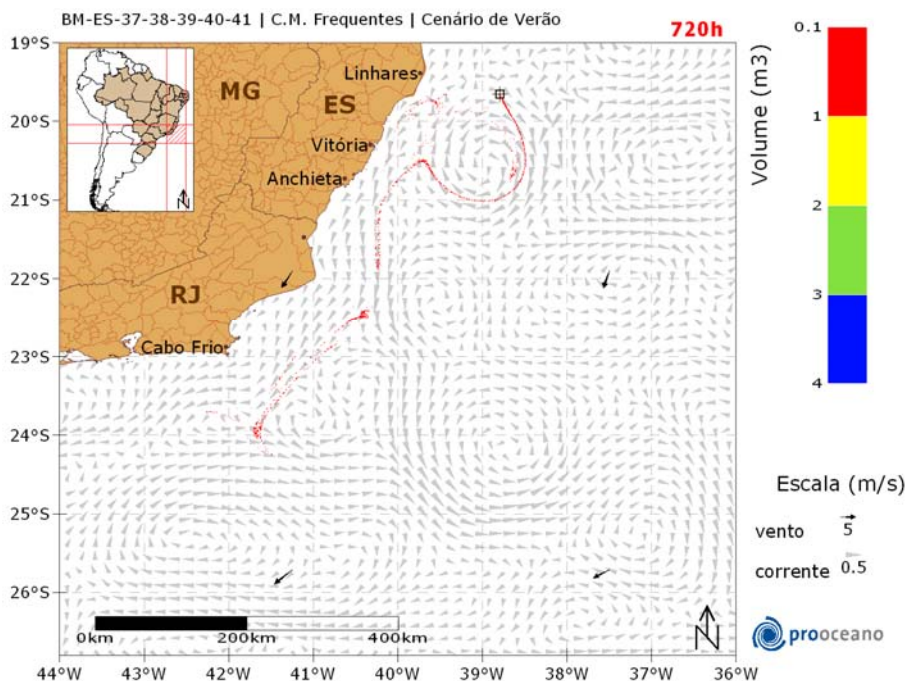


Figura 55: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 30 dias de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

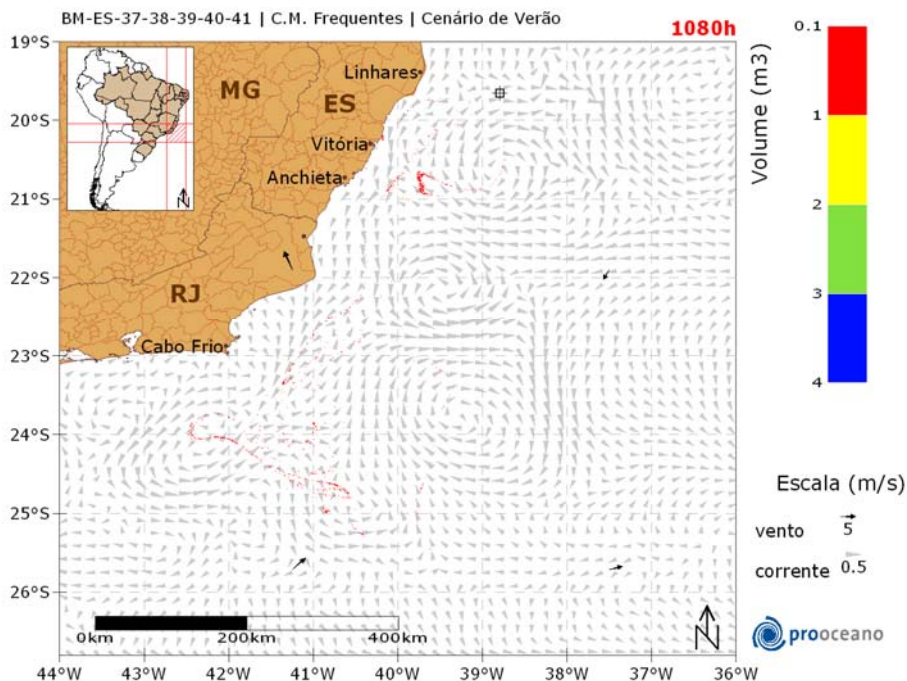
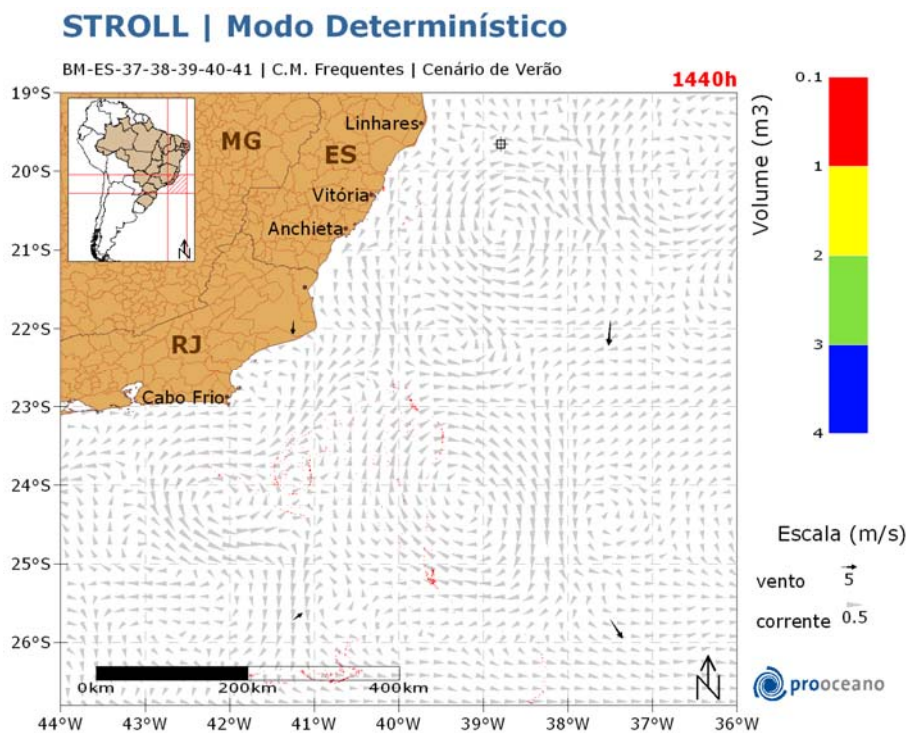


Figura 56: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 45 dias de simulação.



**Figura 57: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 60 dias de simulação.**

A deriva do óleo ocorreu rumo a sudeste do poço inicialmente, transportada pelo vórtice de Vitória. Em 504 horas já se encontra rumo a sudoeste. Com 45 dias observa-se óleo na costa de Serra – ES, único local que apresentou presença de óleo durante toda a simulação.

No gráfico (Figura 58), 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,  $\sim 5 \text{ m}^3$ , foi alcançado em aproximadamente 900 horas após o início da simulação.

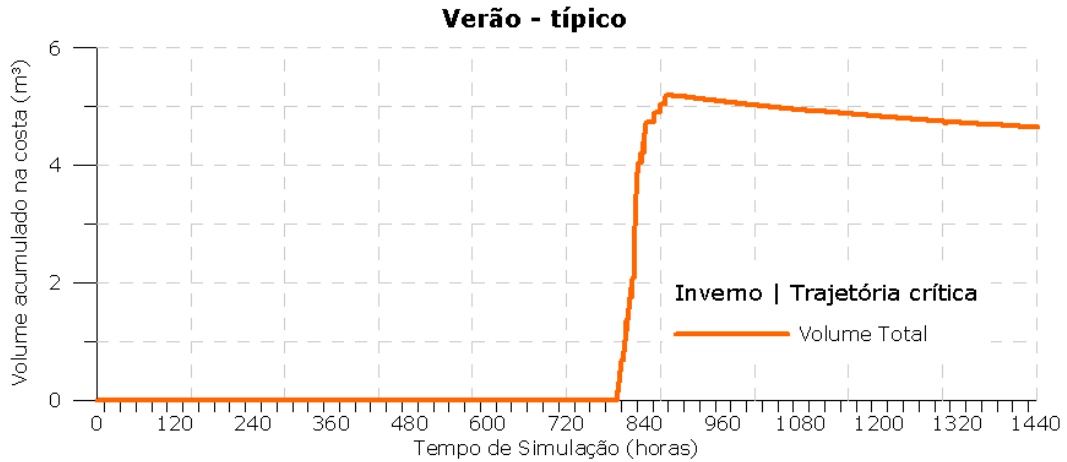


Figura 58: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória de condições meteo-oceanográficas frequentes, no cenário de verão.

A seguir na Figura 59 à Figura 68 é apresentada a trajetória do óleo em condições meteo-oceanográficas frequentes no inverno.

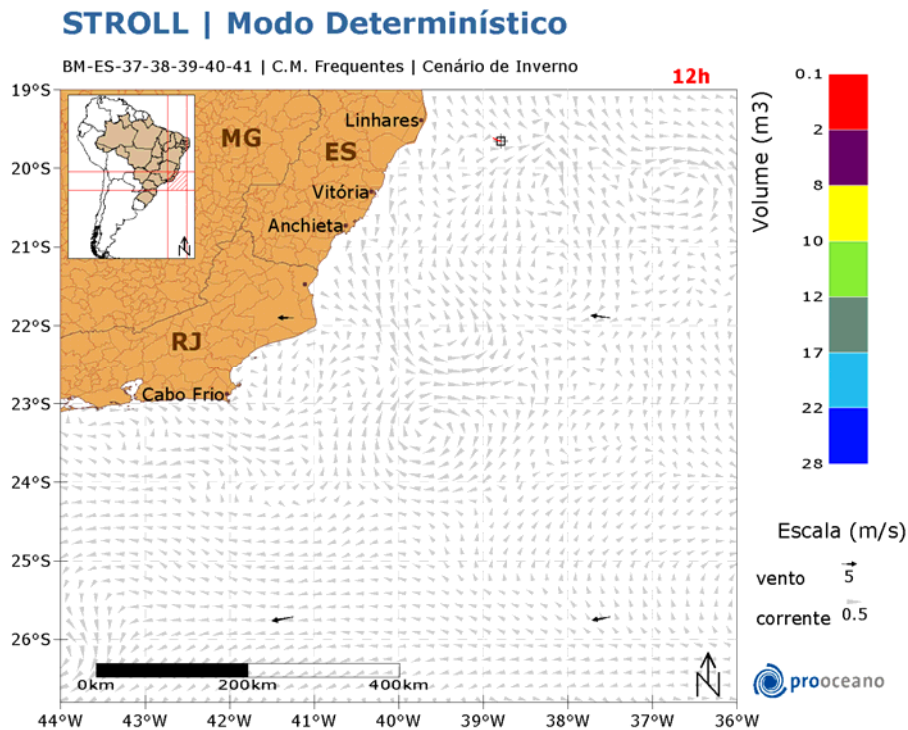


Figura 59: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

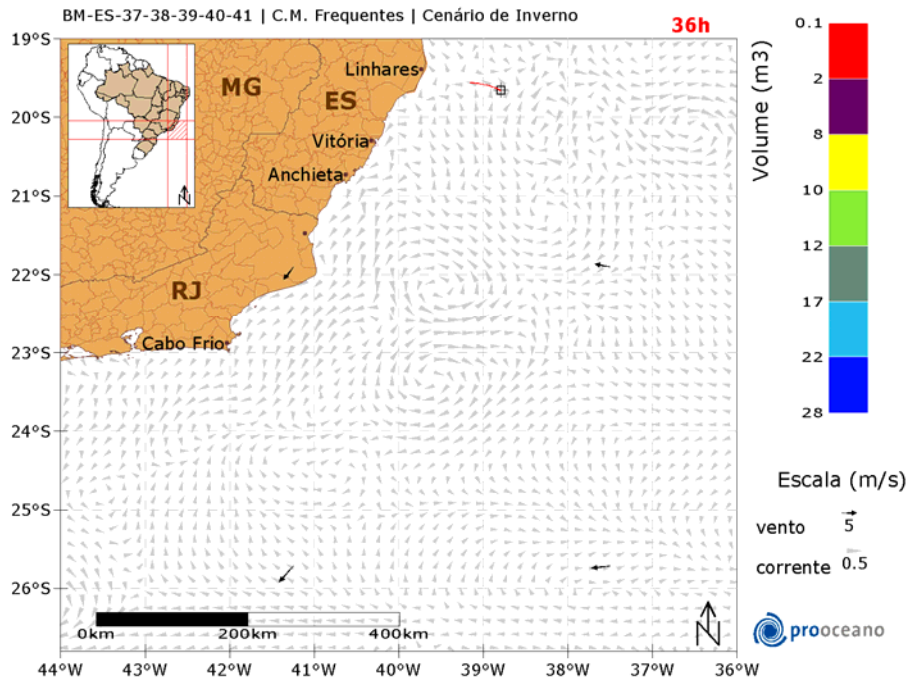


Figura 60: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

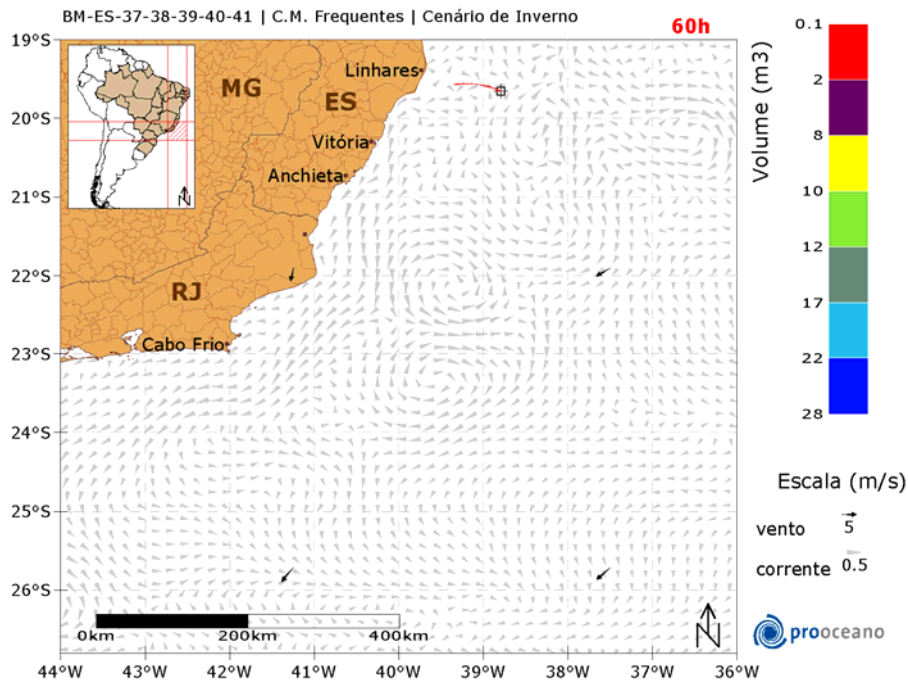


Figura 61: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

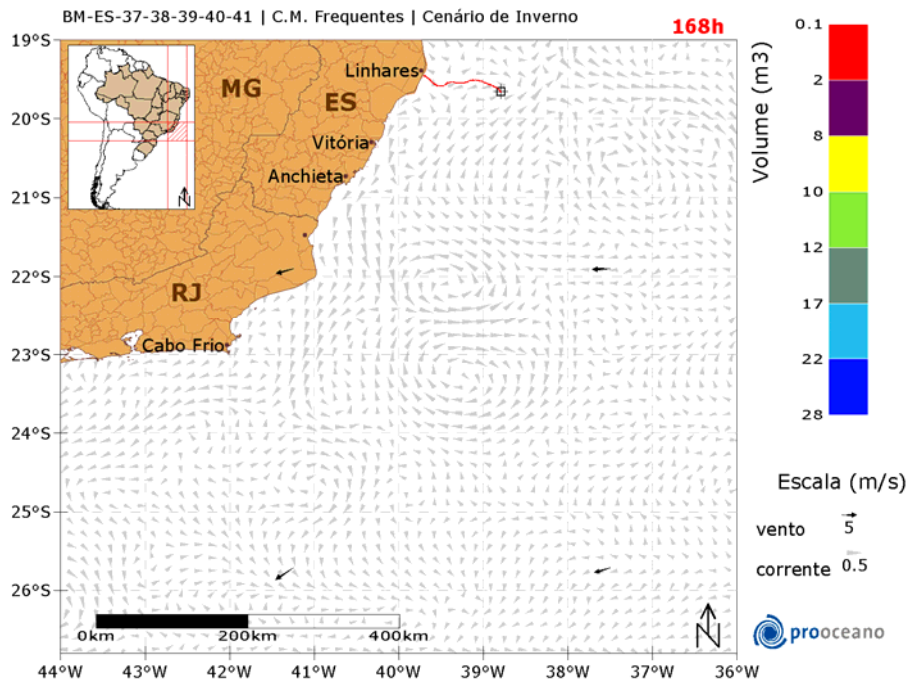


Figura 62: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 1 semana (7 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

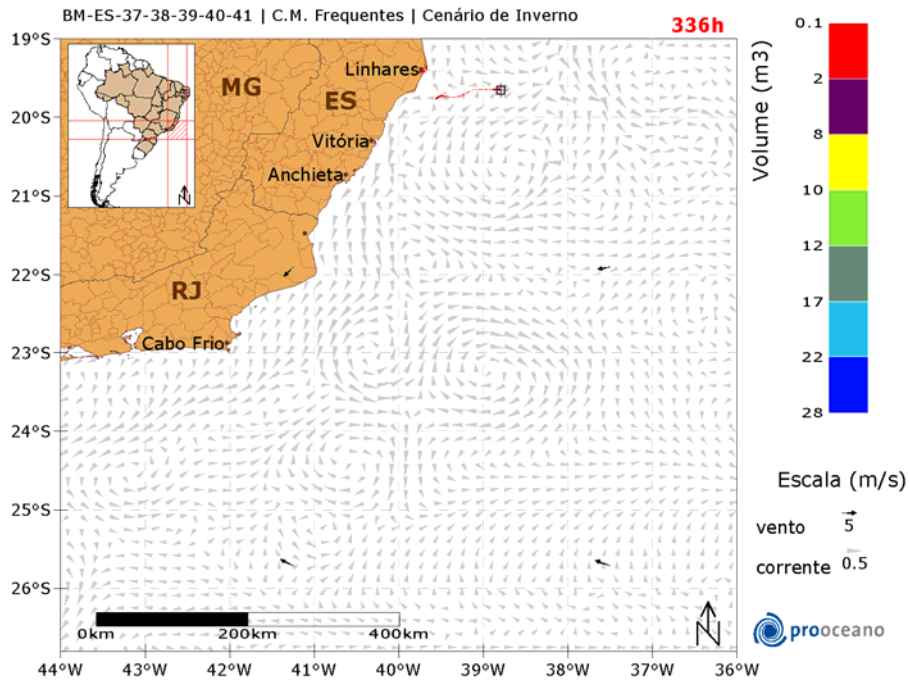


Figura 63: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação.



### STROLL | Modo Determinístico

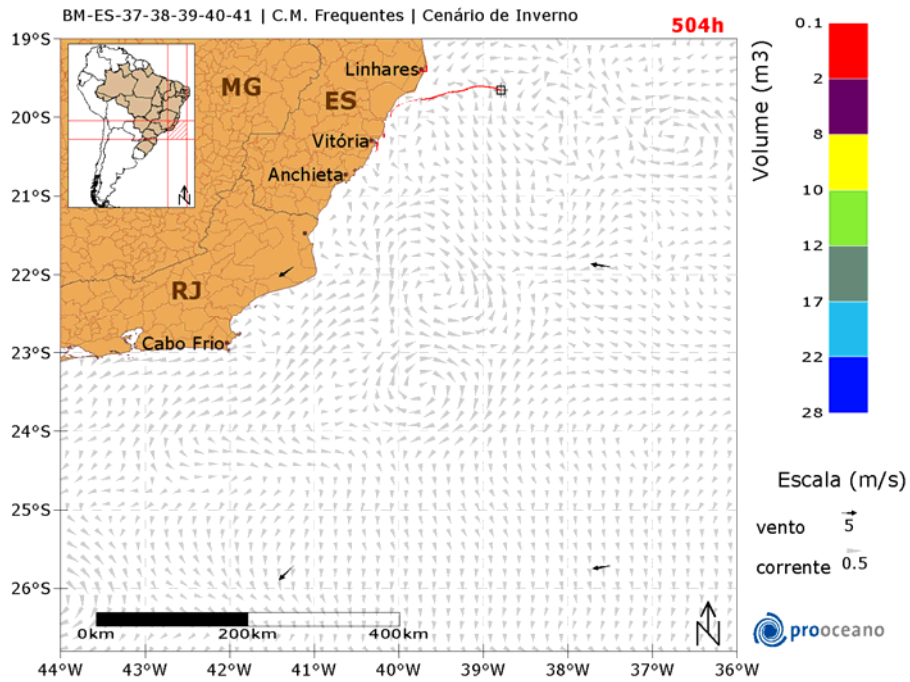


Figura 64: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

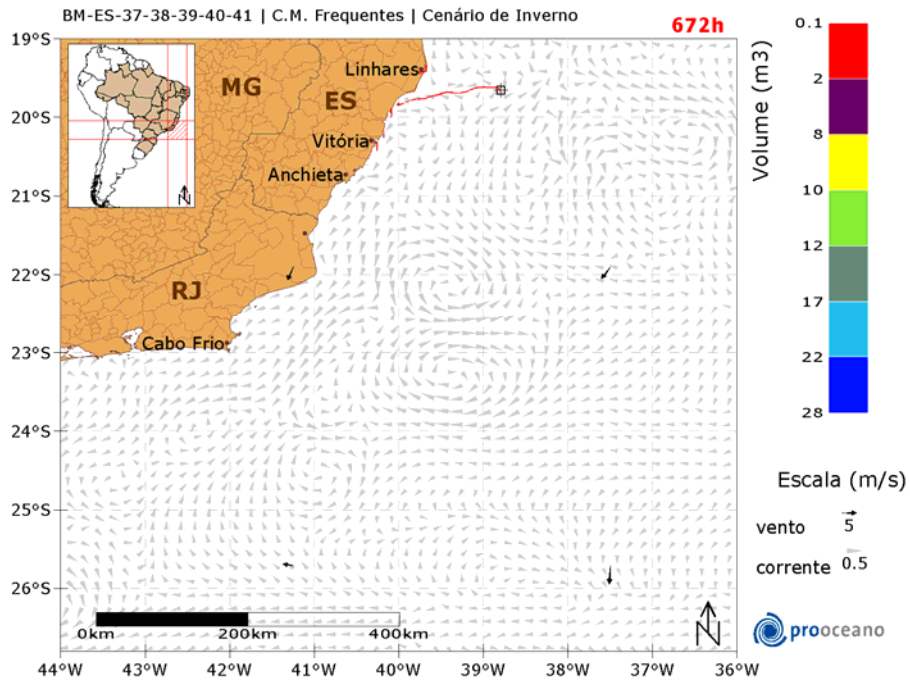


Figura 65: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

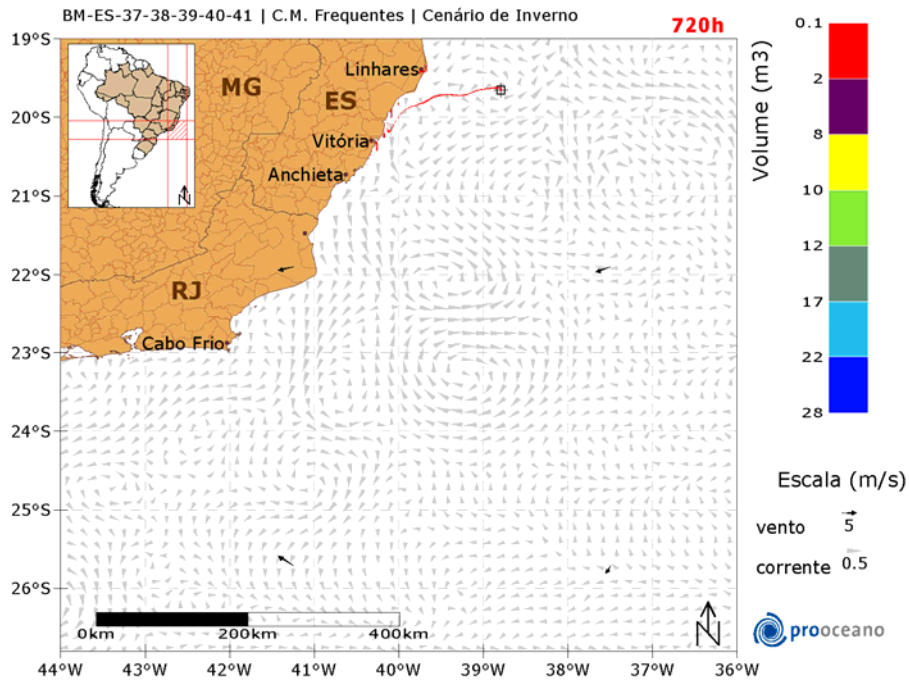


Figura 66: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 30 dias de simulação.

### STROLL | Modo Determinístico

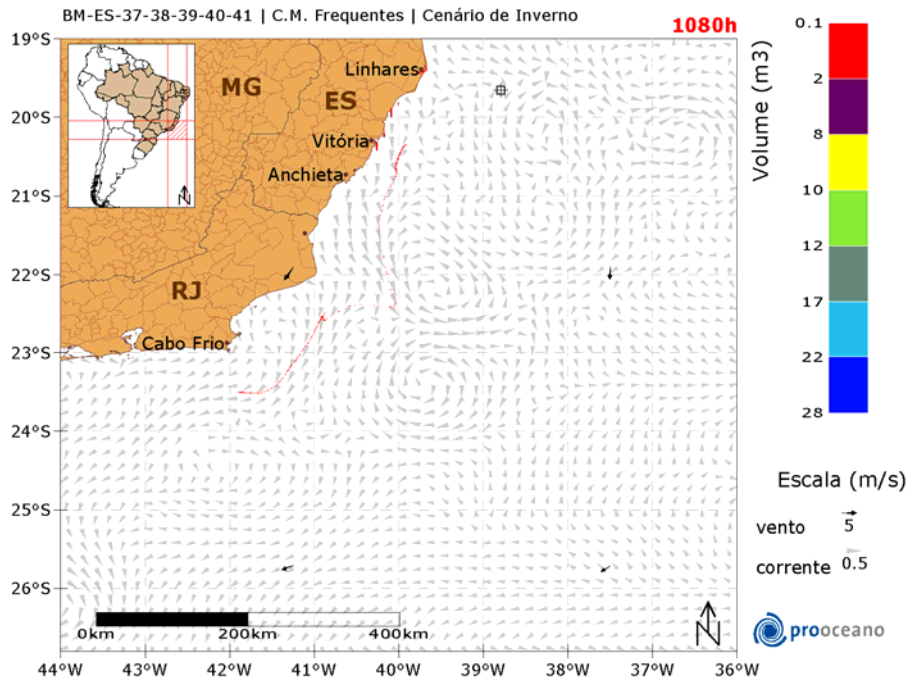
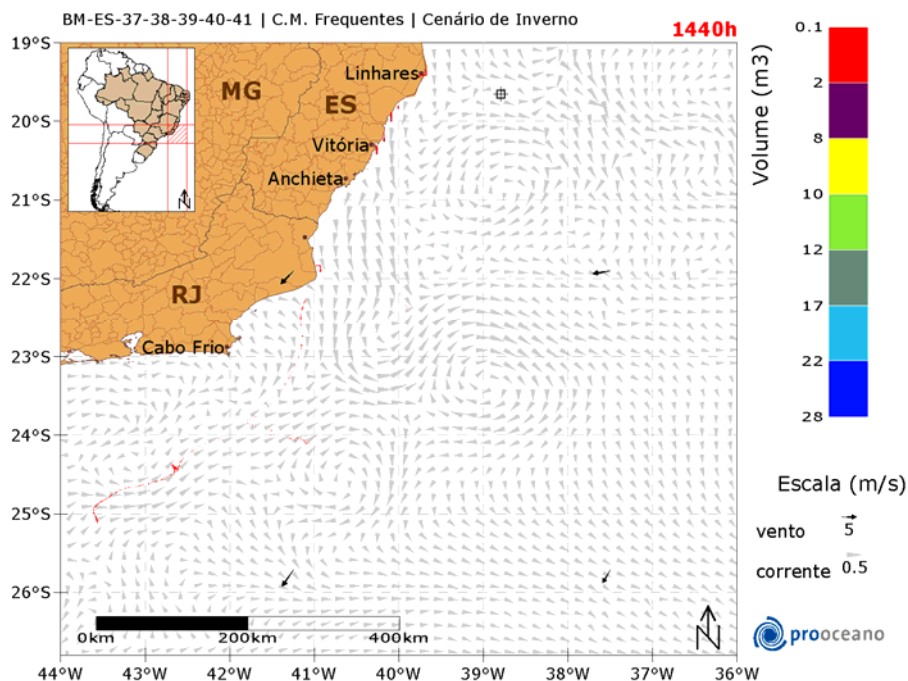


Figura 67: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 45 dias de simulação.

## STROLL | Modo Determinístico

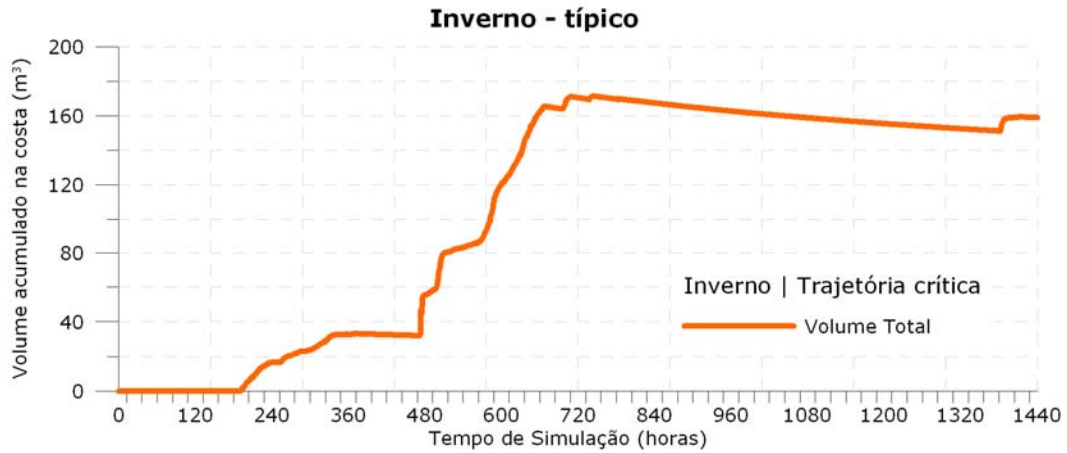


**Figura 68: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 60 dias de simulação.**

A deriva do óleo inicialmente foi rumo a noroeste do poço, quando em 336 horas derivas a sudoeste são observadas. Nota-se que em 168 horas há óleo na costa de Linhares – ES. Ao final da simulação, 1440 horas, o óleo remanescente encontra-se na costa do Espírito Santo e Rio de Janeiro, e no oceano entre as latitude de 22,5°S e 25°S.

No gráfico (Figura 69), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo da simulação.

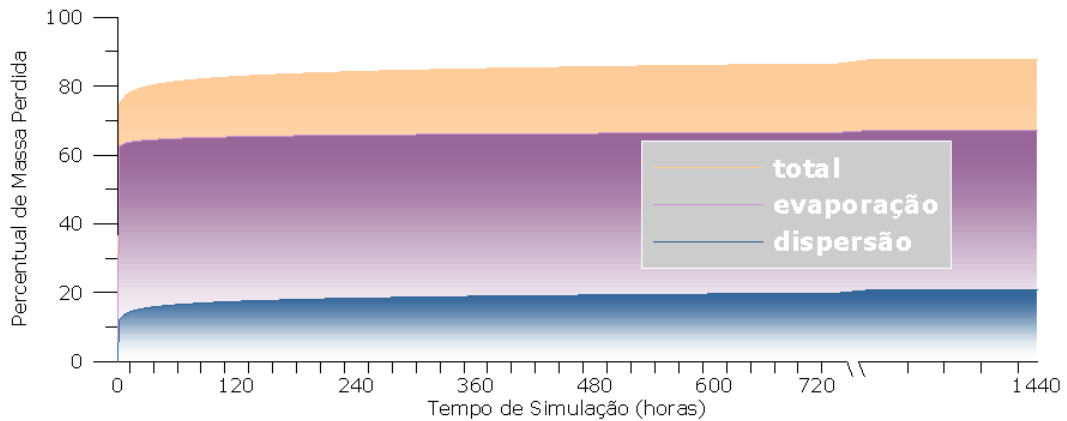
Observa-se que o volume máximo de óleo acumulado na costa,  $\sim 180 \text{ m}^3$ , foi alcançado em aproximadamente 720 horas após o início da simulação.



**Figura 69: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória de condições meteo-oceanográficas frequentes, no cenário de inverno.**

### V.3. Balanços de Massa (ou Processos do Intemperismo)

A evolução temporal do balanço de massa obtido nas simulações é apresentada na Figura 70.



**Figura 70: Evolução Temporal do Balanço de Massa ao longo da Simulação. Ponto de Fronteira 4.**

Ao final da simulação a massa total de óleo perdida foi de 87,85%, sendo que desse valor, a perda total por evaporação foi o processo mais efetivo, alcançando 67,04% do total. Já a perda de massa por dispersão consumiu 20,81% do óleo.

O balanço de massa ao longo do tempo pode ser observado na Figura 71 à Figura 77.

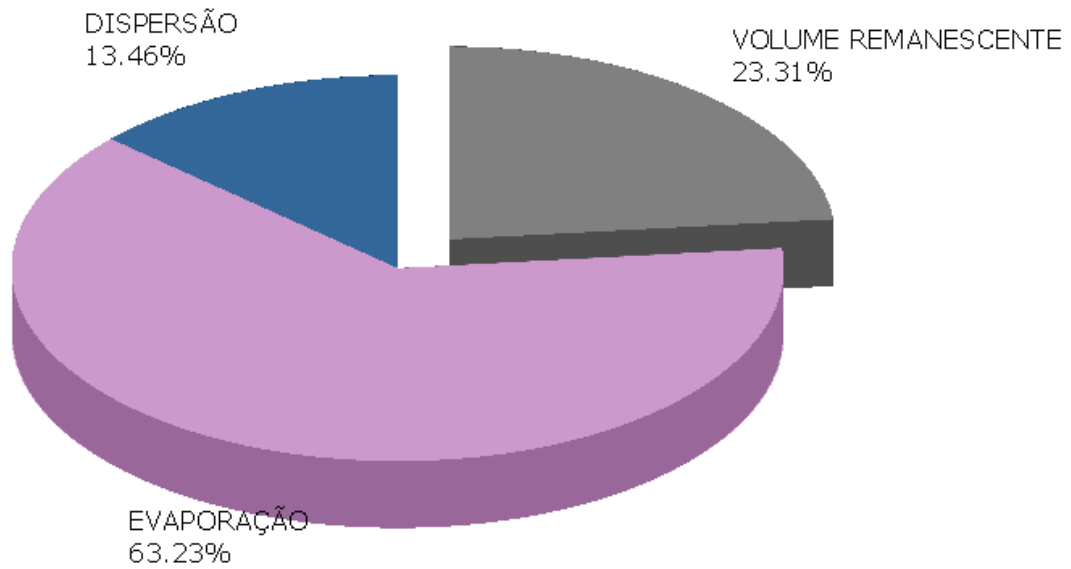


Figura 71: Balanço de Massa, após 6 horas de simulação.

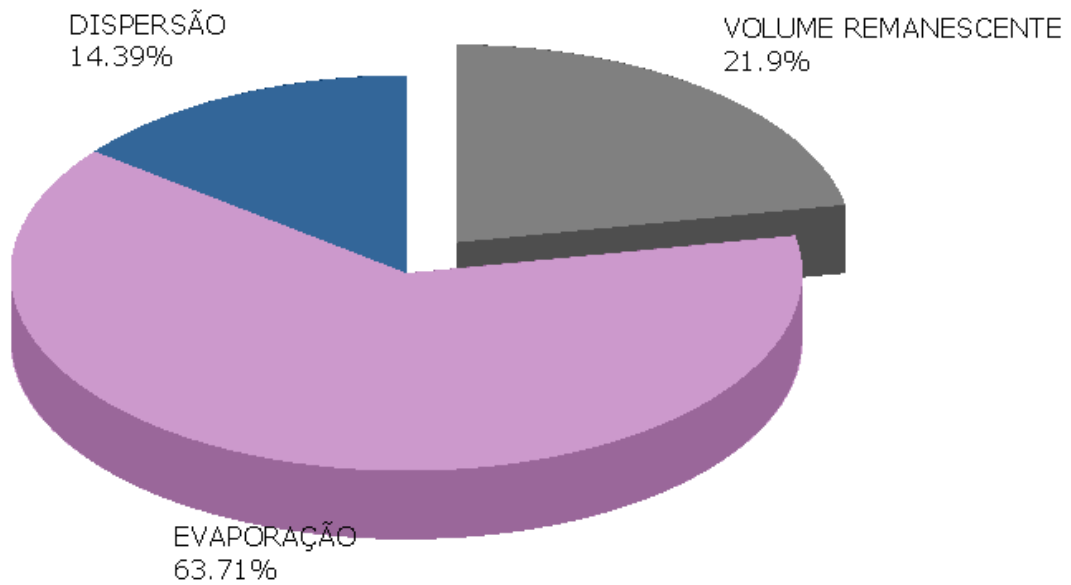


Figura 72: Balanço de Massa, após 12 horas de simulação.

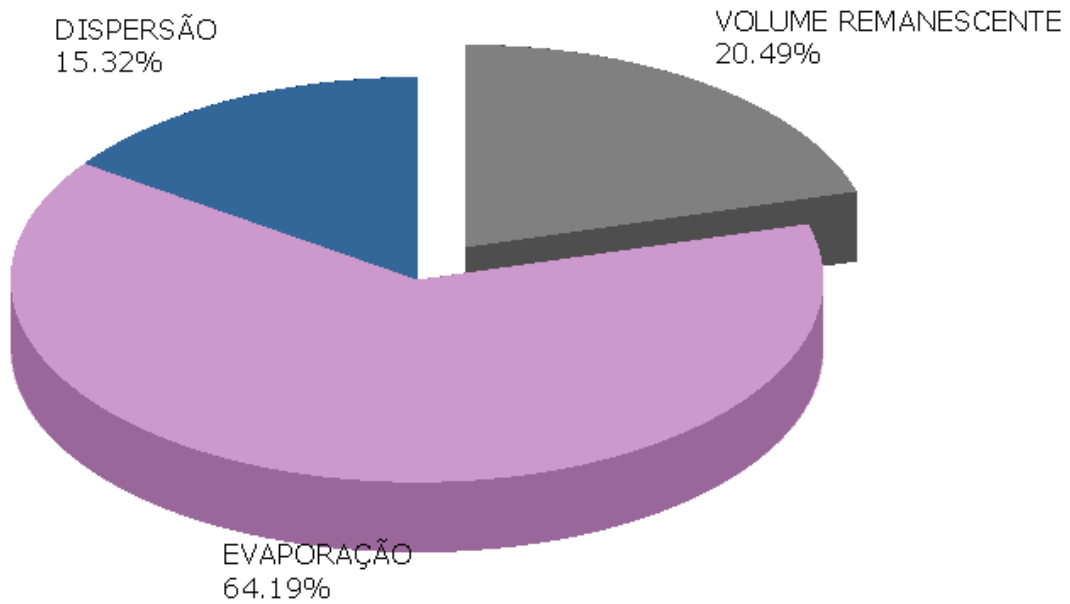


Figura 73: Balanço de Massa, após 24 horas de simulação.

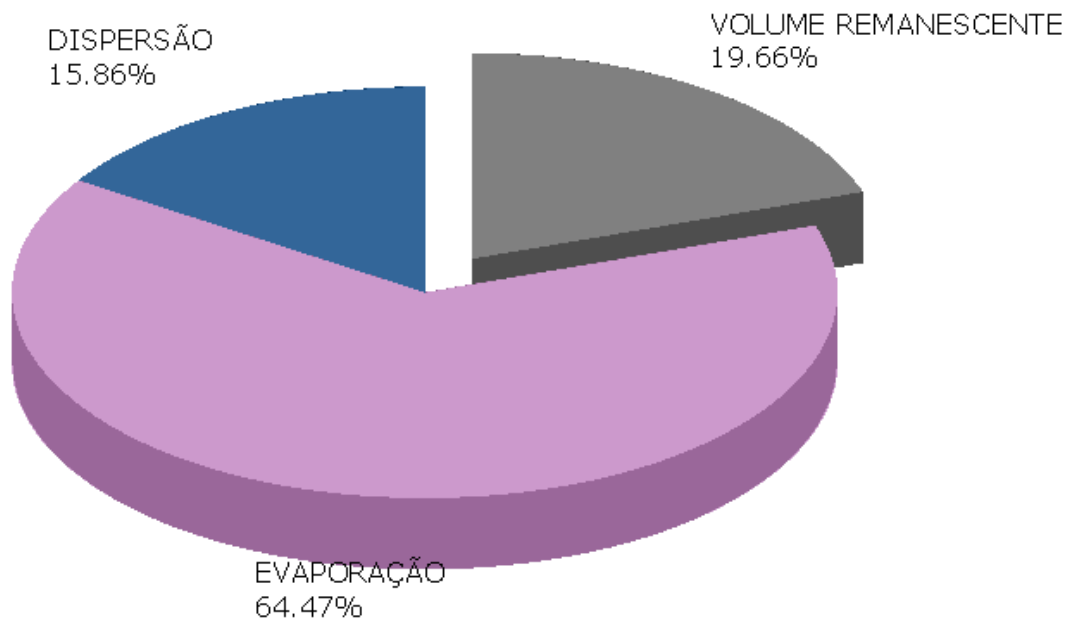


Figura 74: Balanço de Massa, após 36 horas de simulação.



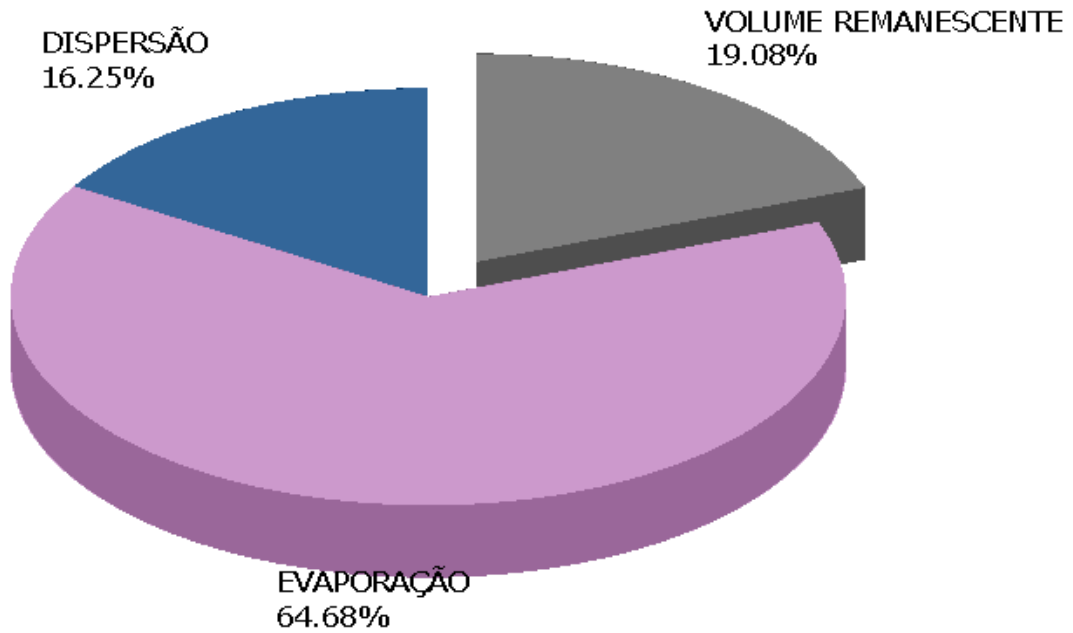


Figura 75: Balanço de Massa, após 48 horas de simulação.

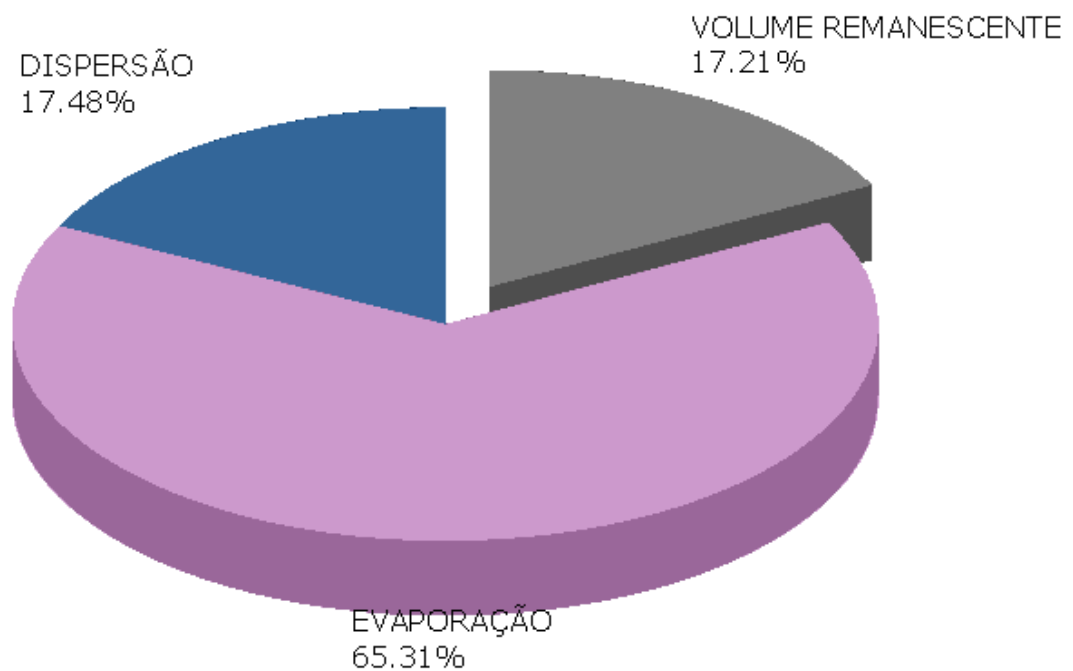
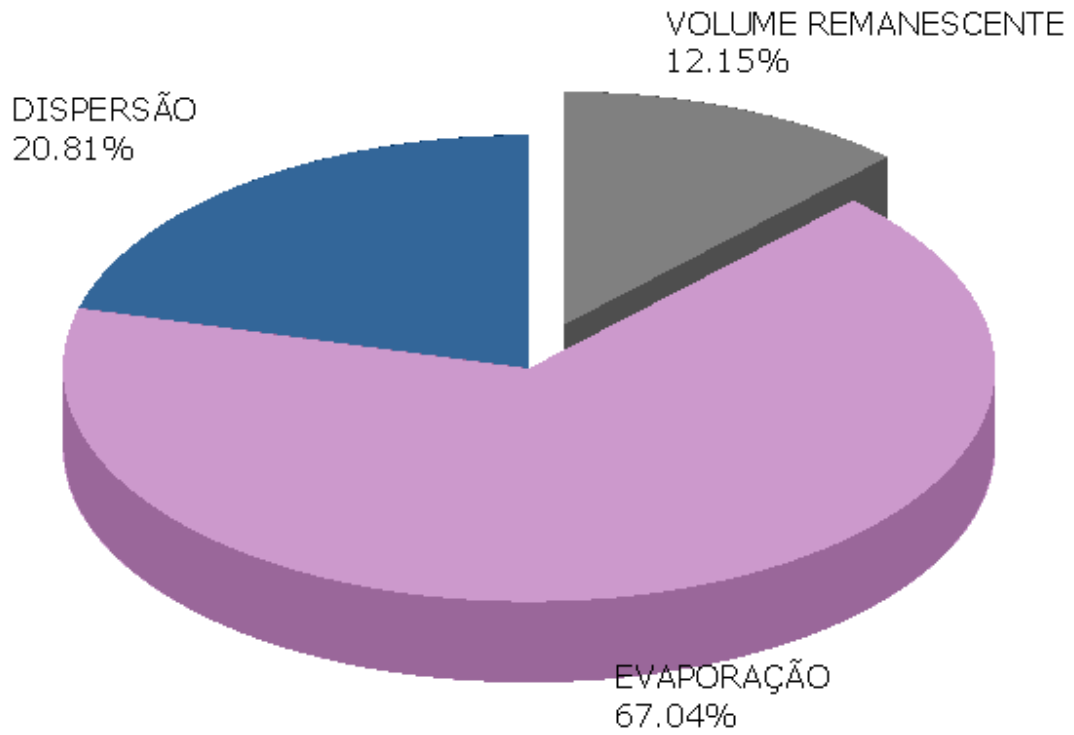


Figura 76: Balanço de Massa, após 120 horas de simulação.



**Figura 77: Balanço de Massa, após 1440 horas de simulação.**

## VI. CONCLUSÃO

Em todas as simulações probabilísticas, cenários de verão e inverno, a deriva preferencial do óleo foi para sudoeste do poço, sendo que no inverno, derivas rumo a norte também foram observadas, devido, principalmente, a maior ocorrência de sistemas frontais nessa época do ano. No caso do cenário de verão nota-se uma feição bastante marcante, o vórtice de Vitória, na latitude de  $\sim 20,5^{\circ}\text{S}$ .

A maior probabilidade de óleo na costa, 30-20% foi registrada no inverno, no entanto o menor tempo mínimo de chegada na costa, 100-200 horas, foi registrado em ambos os cenários.

A extensão de costa que pode apresentar óleo foi maior no inverno estendendo-se, de forma geral, de Nova Viçosa, no estado da Bahia até Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro.

Os maiores volumes máximos foram registrados em Serra – ES e São João da Barra - RJ, no verão e inverno, respectivamente.

No modo determinístico foram simuladas situações críticas de verão e inverno, onde o toque na costa ocorreu em 192h e 102 horas, respectivamente. Nas duas trajetórias determinísticas em condições meteo-oceanográficas frequentes, de verão e inverno, houve probabilidade de toque na costa.

Os resultados obtidos em relação ao intemperismo do óleo mostraram que a massa total de óleo perdida foi de 87,85%, sendo que a evaporação consumiu 67,04% desse total em 1440 horas de simulação.

## 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](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. BUIST, 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.