



RELATÓRIO TÉCNICO [REV. 00]

MODELAGEM DE DISPERSÃO DE ÓLEO
Bloco BM-PAMA-17

Preparado para:
OGX

Preparado por:
Anna Paula Fagundes
Leandro Calil
Leonardo Marques da Cruz
Bruna Cerrone
Maurício Fragoso

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 DISPERSÃO DE ÓLEO
Bloco BM-PAMA-17

Preparado para:
OGX

Preparado por:
Anna Paula Fagundes
Leandro Calil
Leonardo Marques da Cruz
Bruna Cerrone
Maurício Fragoso

29 de junho de 2009

ÍNDICE:

| | |
|---|------------|
| I. INTRODUÇÃO..... | 4 |
| II. MODELO STROLL | 4 |
| II.1. Modo Determinístico..... | 4 |
| II.1.1. Intemperismo | 5 |
| II.1.2. Cálculo da Espessura | 10 |
| II.2. Modo Probabilístico | 11 |
| IV. CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO | 19 |
| V. FORÇANTES..... | 20 |
| VI. RESULTADOS | 23 |
| VI.1. Modo Probabilístico | 24 |
| VI.1.1. Vazamento de 8m ³ | 24 |
| VI.1.2. Vazamento de 200m ³ | 28 |
| VI.1.3. Blow-out | 33 |
| VI.2. Modo Determinístico..... | 52 |
| VI.2.1. Verão | 54 |
| VI.2.2. Inverno | 78 |
| VI.3. Balanços de Massa (ou Processos do Intemperismo) | 102 |
| VI.4. Comparação dos Resultados Numéricos com Dados Medidos | 105 |
| VII. CONCLUSÃO | 110 |
| VIII. BIBLIOGRAFIA..... | 112 |

I. INTRODUÇÃO

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica do transporte de óleo no mar para um cenário acidental de vazamento no Bloco BM-PAMA-17, Bacia do Pará-Maranhão, costa norte do litoral brasileiro. As coordenadas geográficas do local do vazamento são: 0° 37' 30" S e 40° 00' 00" W, este corresponde ao vértice do bloco mais próximo da costa.

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

Este relatório traz ainda a calibração dos parâmetros turbulentos do modelo e uma comparação de seus resultados com dados medidos por derivadores oceânicos em uma campanha de medição desenhada especificamente para obtenção de informações diretas sobre a deriva de óleo na região. A descrição dessa campanha e de seus resultados está no documento Relatório de Monitoramento da Deriva, Corrente Superficial e Temperatura da Superfície do Mar, em anexo.

II. MODELO STROLL

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. 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:

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

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:

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

Onde:

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

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

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 \bar{u}'_i às velocidades advectivas (Csanady, 1972).

II.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.1.1.1. 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:

$$\rho_o(t) = Wc * \rho_{\text{água}} + (1 - Wc) \rho_0 \left[1 - c_1 (T - T_{\text{água}}) (1 - c_2 \cdot frac_{evap}) \right] \quad (\text{II-5})$$

onde ρ_o é a densidade do óleo, ρ_0 é a densidade inicial do óleo, $\rho_{\text{água}}$ a densidade da água, T e $T_{\text{água}}$ a temperatura do óleo e da água, respectivamente, $\text{frac}_{\text{evap}}$ a fração de óleo evaporada, e c_1 e c_2 as constantes empíricas específicas para cada tipo de óleo.

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

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp \left[\left(C_{\text{evap}} \text{frac}_{\text{evap}} \right) + \frac{C_{\text{emul1}} Wc}{1 - C_{\text{emul2}}} + C_{\text{temp}} \left(\frac{T_{\text{água}} - T}{T_{\text{água}} T} \right) \right] \quad (\text{II-6})$$

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. Para as constantes adimensionais C_{emul1} e C_{emul2} , NOAA(2000) sugere valores de 2,5 e 0,65, respectivamente.

II.1.1.2. 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 da área inicial é calculado por:

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

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:

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

II.1.1.3. 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:

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

onde j varia de acordo com o número de pseudo-componentes, 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 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:

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

onde BP_j é o ponto de ebulição de cada componente.

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):

$$\ln \frac{P_j}{P^0} = \frac{\Delta S_j \cdot (BP_j - C)^2}{R \cdot BP_j} \cdot \left[\frac{1}{BP_j - C} - \frac{1}{T - C} \right] \quad (\text{II-11})$$

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):

$$K_i = 0,0048 \cdot U^{7/9} \cdot Z^{-1/9} \cdot Sc_j^{-2/3} \quad (\text{II-12})$$

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):

$$D_j = D_{\text{água}} \sqrt{\frac{MW_{\text{água}}}{MW_j}} \quad (\text{II-13})$$

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:

$$MW_j = 0,04132 - \left(1,985 \cdot 10^{-4} \cdot BP_j \right) + \left[9,494 \cdot 10^{-7} \cdot (BP_j)^2 \right] \quad (\text{II-14})$$

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

$$\frac{dV_j}{dt} = - \frac{A \cdot K_j \cdot P_j \cdot V_j}{R \cdot T \cdot \sum_{k=1}^{nc} \frac{V_j}{V_k}} \quad (\text{II-15})$$

II.1.1.4. Emulsificação

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

$$\frac{dfrac_{wv}}{dt} = K_w (1 + W)^2 \left(1 - \frac{frac_{wv}}{frac_{wv}^{final}} \right) \quad (\text{II-16})$$

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.1.1.5. 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:

$$Q(d_0) = C_0 \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot S_{cov} \cdot F_{wc} \cdot d_0^{0,7} \cdot \Delta d \quad (\text{II-17})$$

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 $\left(d_0 - \frac{1}{2} \Delta d$ 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:

$$D_{ba} = 0,0034 \cdot \rho_w \cdot g \left[\frac{HS}{\sqrt{2}} \right]^2 \quad (\text{II-18})$$

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:

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

$$F_{wc} = \frac{0,01 \cdot U + 0,01}{T_M} \rightarrow U > 4, \quad (\text{II-19})$$

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:

$$\begin{aligned}
 C_0 &= 1827 \nu^{0,0658} \rightarrow \nu < 125 \text{ cSt}; \\
 C_0 &= 1827 \nu^{1,1951} \rightarrow \nu > 125 \text{ cSt};
 \end{aligned}
 \tag{II-20}$$

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:

$$Q = \frac{d_{\max}}{1,7} \cdot C_0 \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot F_{wc} \cdot S_{cov}
 \tag{II-21}$$

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):

$$Z_i = (1,5 \pm 0,35) \cdot H_b
 \tag{II-22}$$

onde H_b é a altura de quebra da onda.

II.1.2. Cálculo da Espessura

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

$$esp_e(x, y, t) = \frac{q_e}{2\pi[\sigma(t)]^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x - p_{x,e}(t)}{\sigma(t)}\right)^2 + \left(\frac{y - p_{y,e}(t)}{\sigma(t)}\right)^2\right]\right\}
 \tag{II-23}$$

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:

$$D = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2(t)}{dt}
 \tag{II-24}$$

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

$$D = C \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{II-25})$$

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:

$$ESP(x, y, t) = \sum_{e=1}^{n_e} esp_e(x, y, t) \quad (\text{II-26})$$

II.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 1.

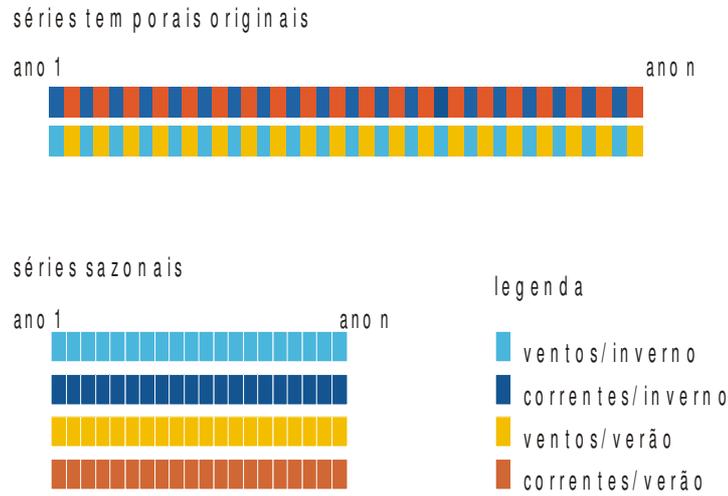


Figura 1: Representação esquemática da separação sazonal dos dados para a modelagem probabilística.

As séries de vento e corrente são então combinadas em diversos arranjos de forma a contemplar de forma ideal os possíveis cenários ambientais (Figura 2).

exemplo: probabilístico de verão

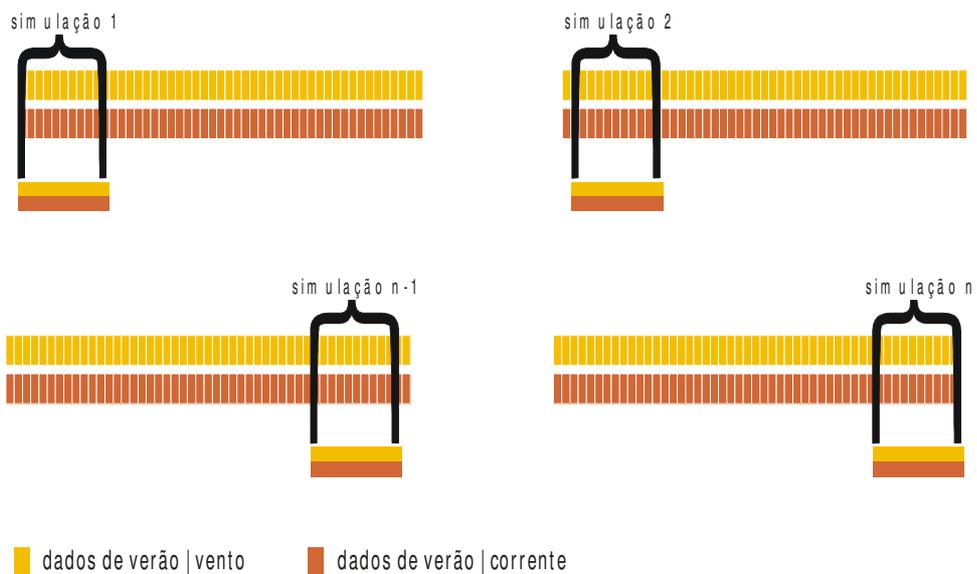


Figura 2: Representação esquemática da combinação dos dados de vento e corrente para a simulação probabilística.

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 3 , 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 3 d):

$$P(x, y) = \sum_{i_{sim}=1}^{n_{com}} \left(\frac{I(x, y)}{n_{com}} \right) \quad (\text{II-27})$$

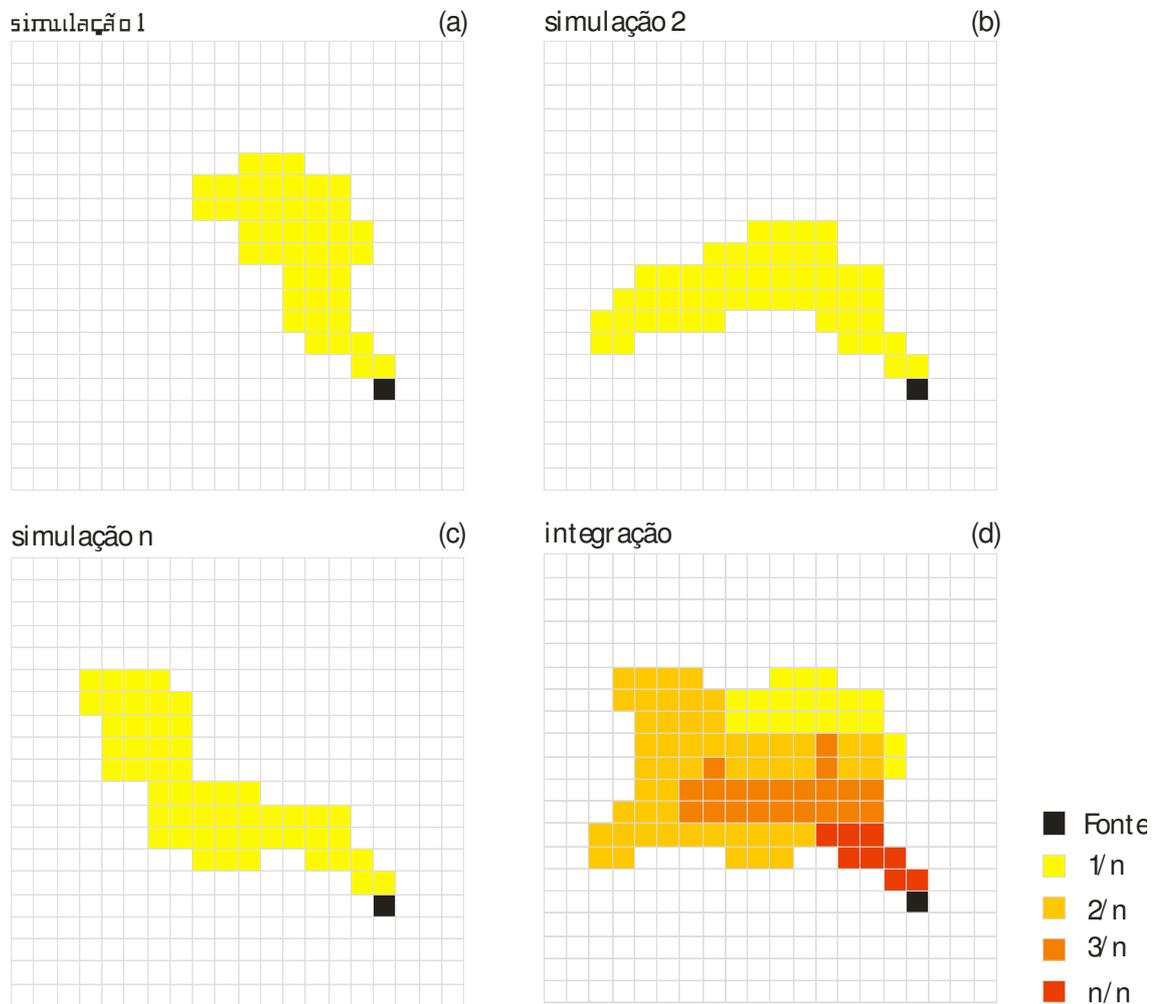


Figura 3: Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença de constituinte no STROLL.

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. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS TURBULENTOS

A calibração dos parâmetros turbulentos do STROLL foi feita a partir dos dados gerados pelos derivadores SVP lançados em grupo no projeto mondoNORTE. A partir da deriva relativa destes derivadores, foram calculados os novos parâmetros turbulentos, a serem utilizados na modelagem descrita neste relatório.

Seguindo os trabalhos de Richardson a difusão relativa pode ser descrita pela equação de difusão generalizada:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla \rho) \quad (\text{II-28})$$

onde ρ representa a probabilidade de que um conjunto de partículas que foram soltas inicialmente juntas, na origem de um sistema de coordenadas, tenham uma separação interpartículas L (dispersão relativa) no instante t . Aqui, $K \propto L^{4/3}$ é a lei indicada por Richardson, a qual foi modificada sob o argumento de que a difusividade é afetada pela natureza fractal da turbulência (Hentshel & Procaccia, 1984).

O parâmetro de dispersão A_L é comumente utilizado para estudos de dispersão horizontal no oceano baseando-se na lei dos 4/3, (Brandsma, 1999):

$$K_i = A_{L_i} L_i^{4/3} \quad (\text{II-29})$$

onde i representa a direção ($x = 1, y = 2$).

Para a estimativa de A_{L_i} foram ajustadas retas às curvas de difusividade calculadas com os dados dos derivadores.

A difusividade foi calculada com o método descrito em Lacorata *et al.* (2001). Considerando $x_i^{(k,j)}$ como a i -ésima coordenada espacial da j -ésima partícula no k -ésimo grupo, temos que a dispersão relativa S_i^2 no instante t é:

$$S_i^2(t) = \frac{1}{N_c} \sum_{k=1}^{N_c} \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} \left(x_i^{(k,j)}(t) - \langle x_i(t) \rangle^{(k)} \right)^2 \quad (\text{II-30})$$

onde

$\langle x_i(t) \rangle^{(k)} = \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} x_i^{(k,j)}(t)$ é o centro de massa do grupo;

N_c é o número de grupos e

n_k é o número de derivadores por grupo.

O cálculo do coeficiente de difusividade é feito por:

$$K_i(t) = \frac{1}{2} S_i^2(t) \quad (\text{II-31})$$

De forma a obter a série temporal mais extensa, este método foi aplicado aos 5 primeiros grupos de i-SPHERES lançados no Projeto mondoNORTE. Os derivadores do 6º grupo foram capturados ou chegaram à costa em menos de 8 dias e considerou-se que sua utilização restringiria demais a série temporal analisada.

Na Figura 4 são apresentados os resultados obtidos para os derivadores i-SPHERE.

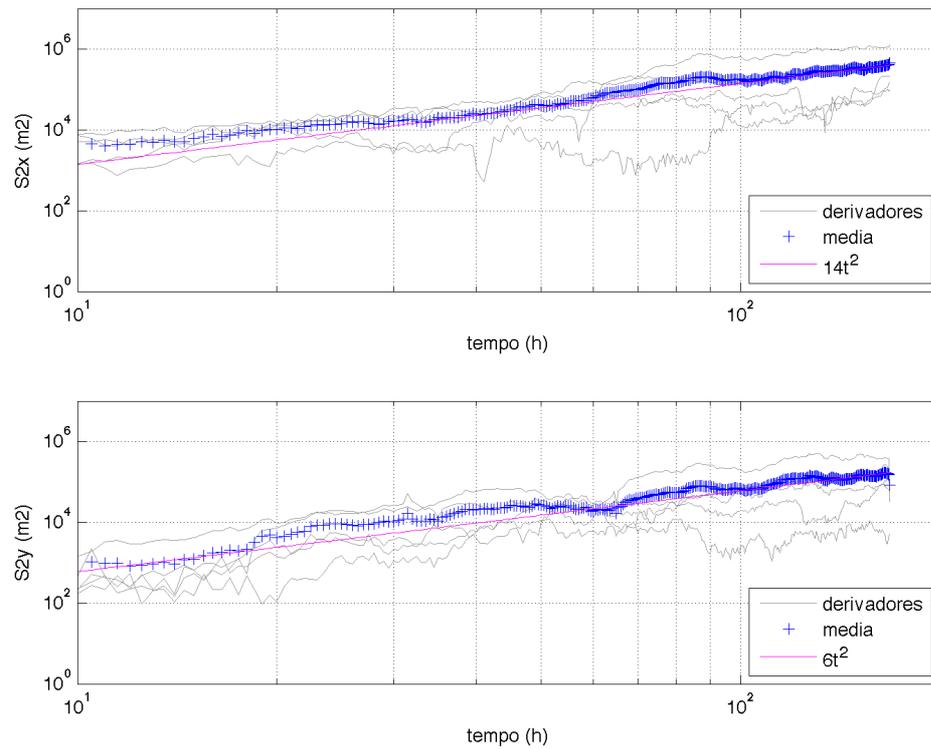


Figura 4: Evolução temporal da dispersão (S2) em x (quadro superior) e y (quadro inferior), mostrando o comportamento assintótico em t^2 para tempos superiores a 50 horas.

Observa-se que o sistema apresenta uma dependência não-linear no crescimento temporal da variância ($\langle S_i^2(t) \rangle \propto t^2$) nos tempos superiores a 50 horas (~ 2 dias).

A partir da equação (II-8) foram estimados coeficientes de difusividade do ambiente com base nos dados dos derivadores. Os resultados podem ser observados na Figura 5.

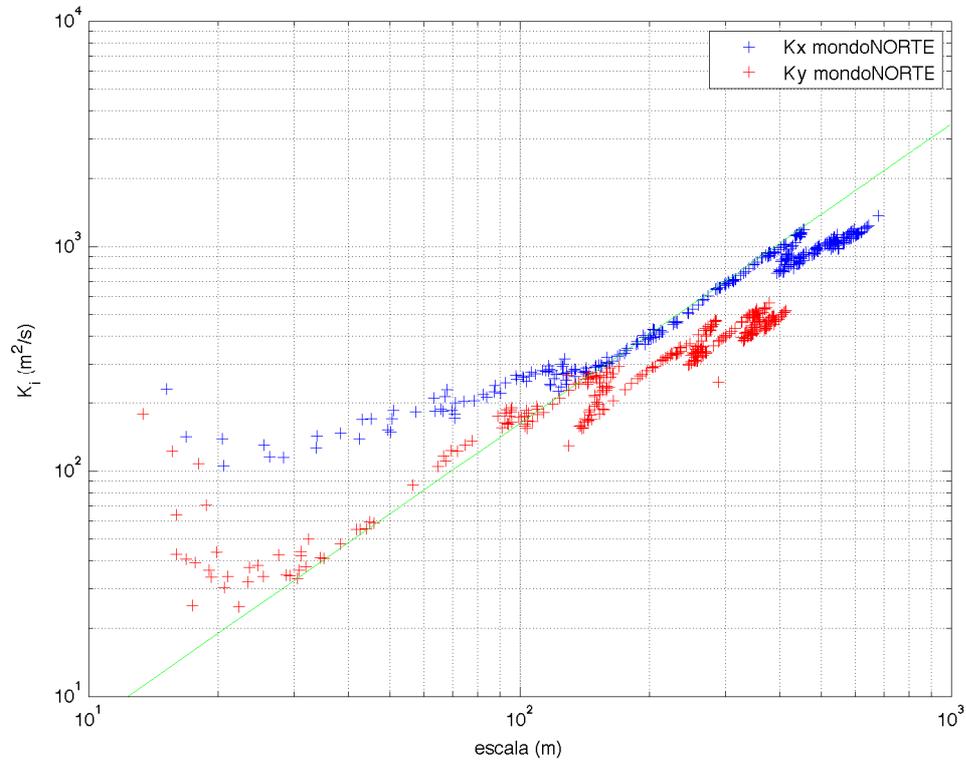


Figura 5: Coeficientes de difusão obtidos a partir de um conjunto de 5 derivadores do projeto MONDO Norte.

Observa-se que a componente y apresenta um comportamento assintótico, obedecendo a lei dos 4/3, de 20 m até uma escala de dispersão de 150 m, aproximadamente, enquanto que a componente x, somente a partir dos 100m.

Assim, admitindo somente o comportamento linear, o parâmetro de dispersão obtido foi de $AL = 0,35$.

Para a calibração do modelo foram lançados 100 grupos de 5 partículas do mesmo ponto de lançamento dos derivadores, utilizando-se o coeficiente AL obtido com os derivadores. Os resultados obtidos com o STROLL foram comparados aos dos derivadores e são apresentados na Figura 6.

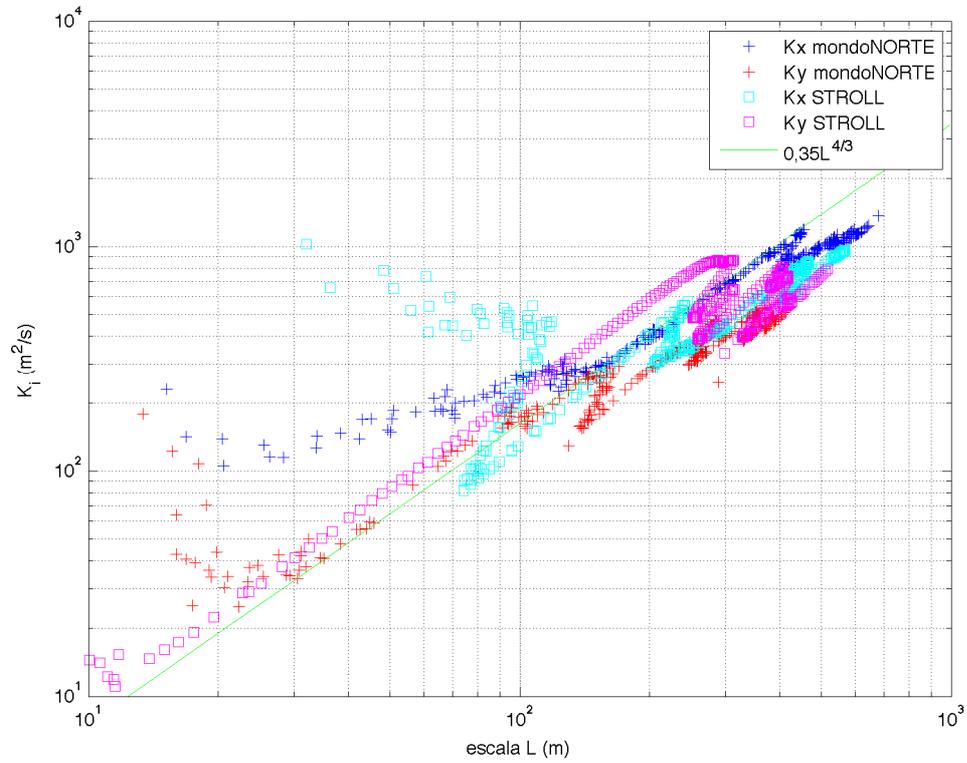


Figura 6: Coeficientes de difusão obtidos com base nas trajetórias dos derivadores e das partículas teóricas utilizadas no modelo já ajustado.

A Figura 7 apresenta a mesma comparação sem o ajuste do coeficiente AL.

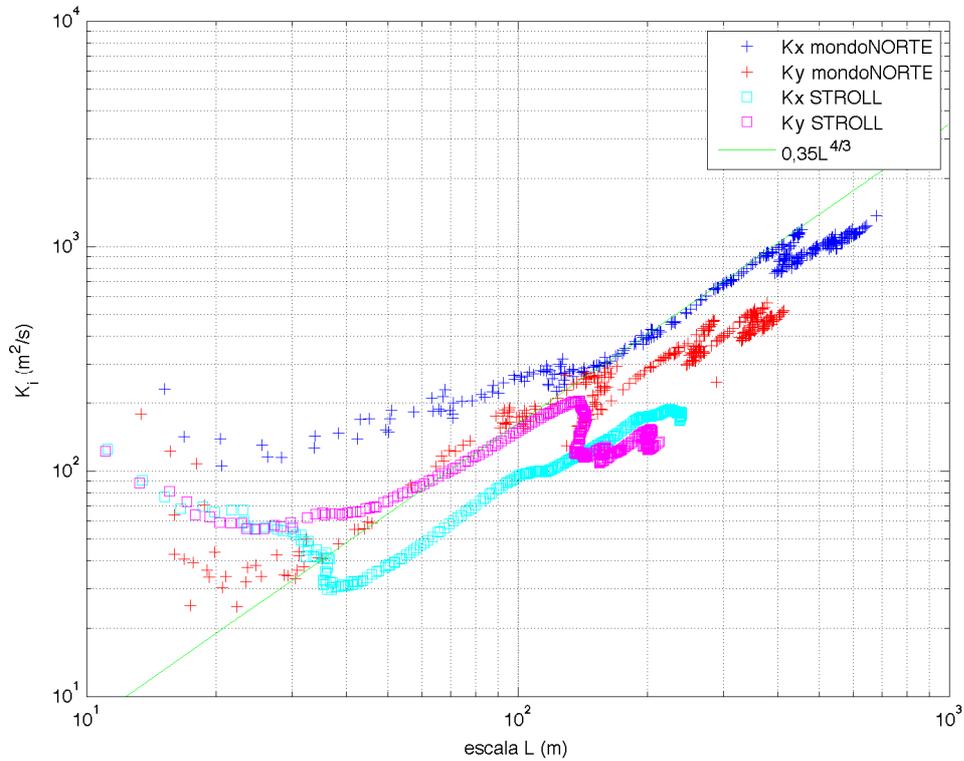


Figura 7: Coeficientes de difusão obtidos com base nas trajetórias dos derivadores e das partículas teóricas utilizadas no modelo ajustado.

Nota-se que, apesar de aparentemente obedecer à lei dos 4/3, os resultados do modelo apresentavam uma subestimação do parâmetro AL, corrigida com a calibração.

IV. 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 do óleo na água, o comportamento de sua deriva foi acompanhado por 30 dias. Portanto ao final das simulações foram totalizados 60 dias (1440 horas).

Além da simulação de *blow-out*, na qual é considerado o volume de pior caso (9.900 m³), foram ainda realizadas simulações para vazamentos de pequeno e médio volume, 8 m³ e 200 m³, respectivamente. Nesses casos as simulações duraram 30 dias e os vazamentos instantâneos.

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).

A seguir, nas Tabelas 1 e 2, serão apresentadas as características do óleo e do vazamento.

Tabela 1: Características do óleo utilizadas na simulação.

| Parâmetro | Valor | Unidade | Temperatura |
|-------------|-------|-----------------|-------------|
| API | 42,5 | | |
| Densidade | 0,79 | g/cm^3 | 142° C |
| Viscosidade | 0,43 | Cp | 148° C |

Tabela 2: Local do Vazamento.

| | |
|-----------|---------------|
| Longitude | 40° 00' 00" W |
| Latitude | 0° 37' 30" S |

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

V. FORÇANTES

Os dados de vento utilizados são provenientes das reanálises do NCEP – *National Centers for Environmental Prediction* – (Kalnay *et al.*, 1996). Essa base consiste em uma série de dados meteorológicos, com $\sim 1,8^\circ$ de resolução espacial cobrindo todo o globo e disponível gratuitamente na internet (<http://www.ncep.noaa.gov>).

Para este estudo foram tratados 30 anos de dados (1977 a 2006) com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia).

A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos, elaboradas para o período analisado, na região do Bloco BM-PAMA-17 (Figura 8 e Figura 9).

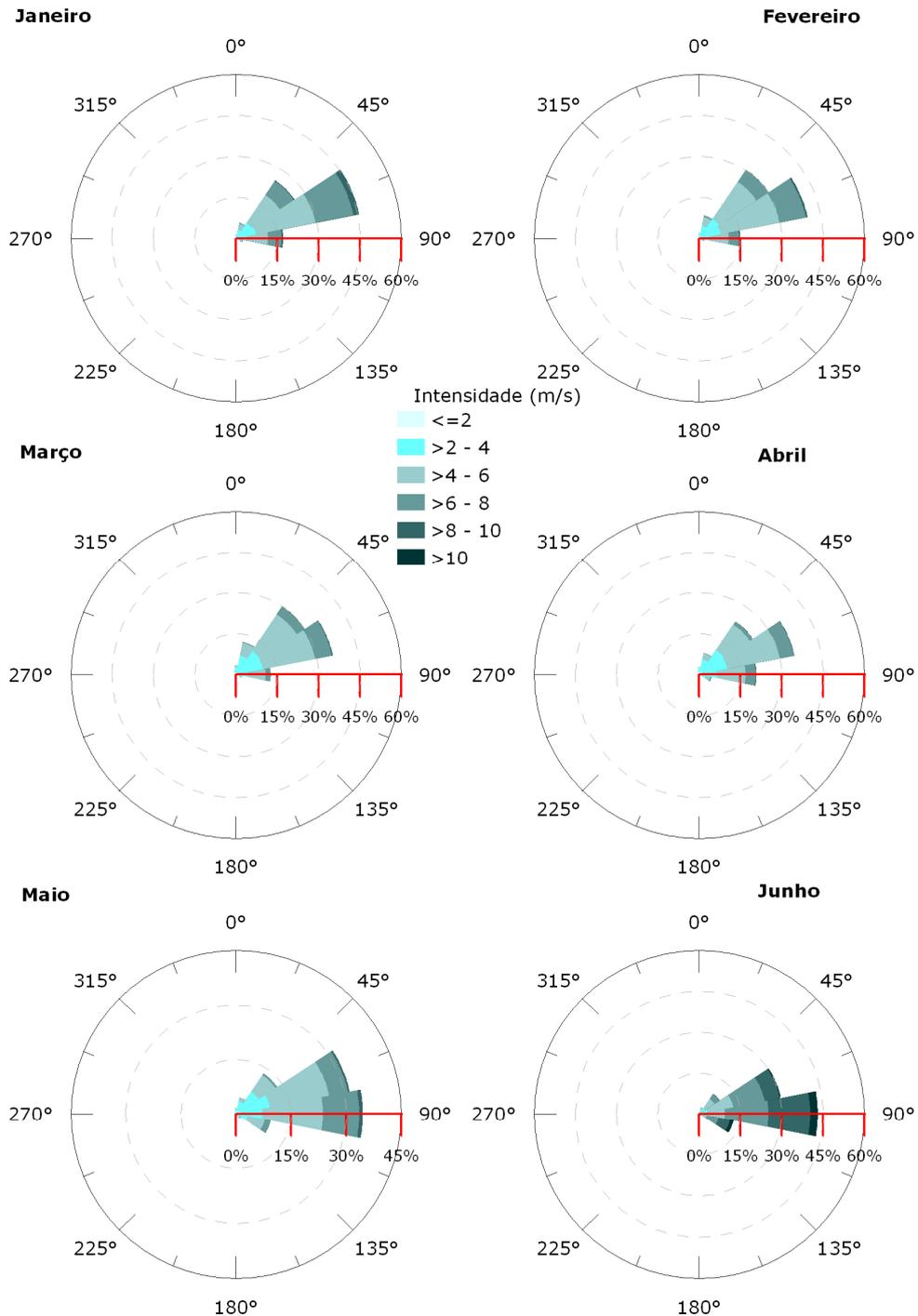


Figura 8: Rosa dos ventos para o período de verão/chuva (janeiro a junho) na região do Bloco BM-PAMA-17.

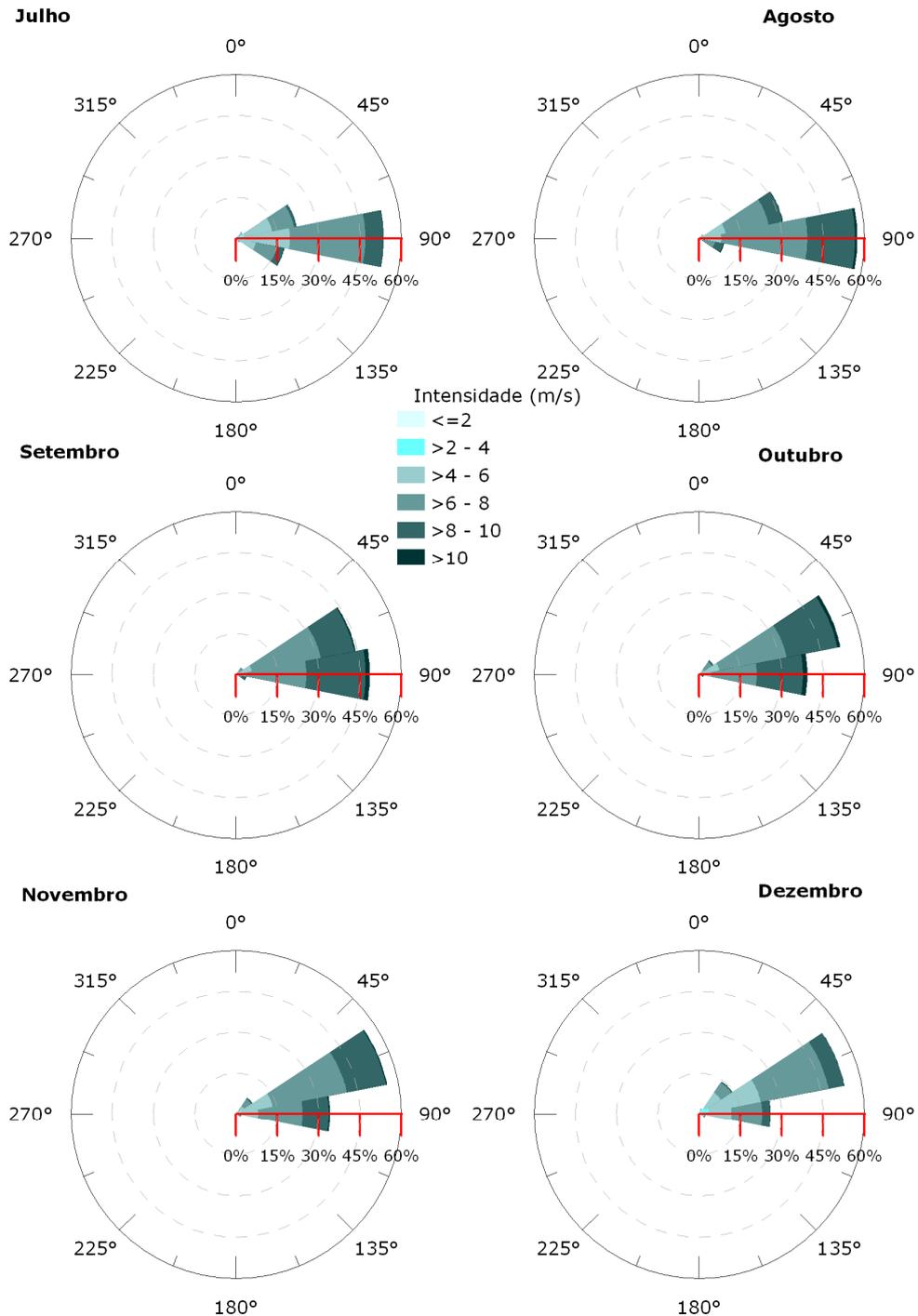


Figura 9: Rosa dos ventos para o período de inverno/seca (julho a dezembro) na região do Bloco BM-PAMA-17.

A análise desses dados possibilitou a caracterização de dois períodos bem marcados, com condições de seca e chuva. Para manter o padrão adotado em estudos prévios, chamaremos a estação seca de inverno, e a estação chuvosa de verão. Uma melhor caracterização dessas estações encontra-se no Relatório de Meio Físico | Meteorologia.

Pode-se observar a predominância de ventos de leste e nordeste, em todos os meses. De forma geral, no período de janeiro a junho caracterizam-se condições de estação chuvosa (verão), com ventos predominantes de nordeste e leste de menor intensidade. O período de julho a dezembro, é caracterizado por condições de seca (inverno), onde existe a predominância dos ventos de leste, com intensidade mais elevada.

Os dados de correntes utilizados foram obtidos da base de dados da PROOCEANO e de medições com derivadores oceânicos, lançados da região de interesse. Uma descrição detalhada dos mesmos encontram-se no Relatório de Modelagem Hidrodinâmica e no Relatório de Monitoramento da Deriva, Corrente Superficial e Temperatura da Superfície do Mar, ambos em anexo.

VI. 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 9.900 m³, nos cenários de verão e inverno.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas 1.500 diferentes simulações para cada cenário (verão e inverno) nos diferentes volumes de vazamento (8, 200 e 9.900 m³), totalizando 9.000 possíveis cenários ambientais de vazamento.

O cenário de pior caso, para ser simulado no modo determinístico, será definido 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 no modo determinístico serão apresentadas as trajetórias seguidas pelo óleo em condições meteo-oceanográficas dominantes na região.

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.

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

Tabela 3: Ordem de apresentação dos resultados.

Modo Probabilístico

Vazamentos instantâneos (8 e 200 m³)*

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Tabela comparativa entre os cenários

Blow-out *

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

- Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo
- Histogramas de Tempo de Chegada de Óleo Próximo à Costa
- Volume Máximo de Óleo na Costa
- Tabela comparativa de probabilidade, tempo e volume de óleo, entre os cenários
- Mapas de Probabilidade por Classes de Volume de Óleo

Modo Determinístico *

- Pior caso
- Condições Meteo-oceanográficas freqüentes
- Evolução Temporal de Volume de Óleo Acumulado na Costa
- Intemperismo

* cenário de verão e inverno.

VI.1. Modo Probabilístico

VI.1.1. Vazamento de 8m³

VI.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 10, enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 11.

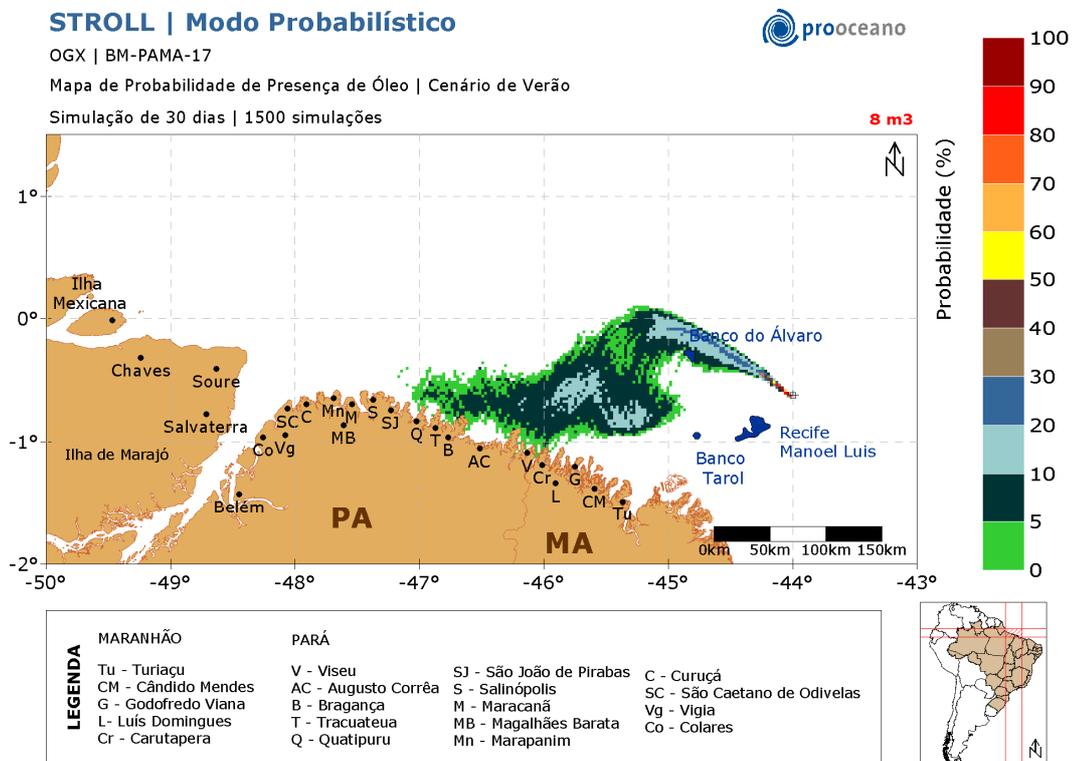


Figura 10: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 8 m³, no cenário de verão.

Neste cenário a deriva do óleo ocorre para oeste do poço. A maior probabilidade de presença de óleo na costa foi de 10-5% (Tabela 4).

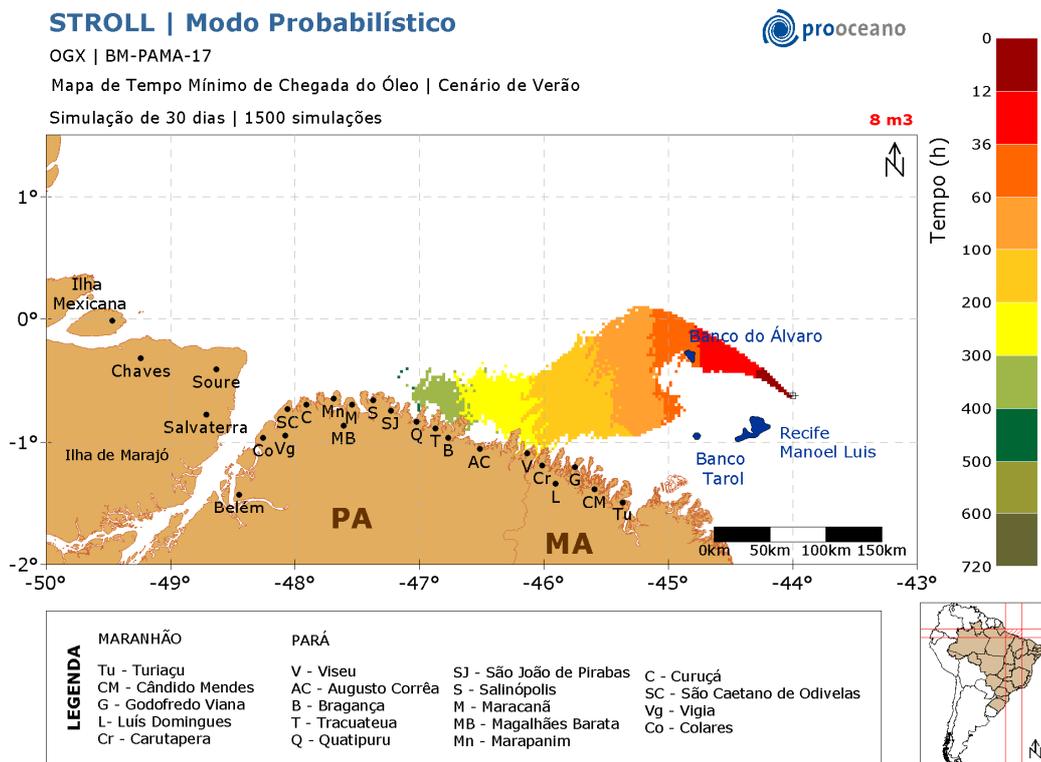


Figura 11: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 8 m³, no cenário de verão.

Observa-se que o tempo mínimo de toque na costa foi de 100-200 horas, após o início do vazamento.

VI.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 12 enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 13.

STROLL | Modo Probabilístico

OGX | BM-PAMA-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Inverno

Simulação de 30 dias | 1500 simulações

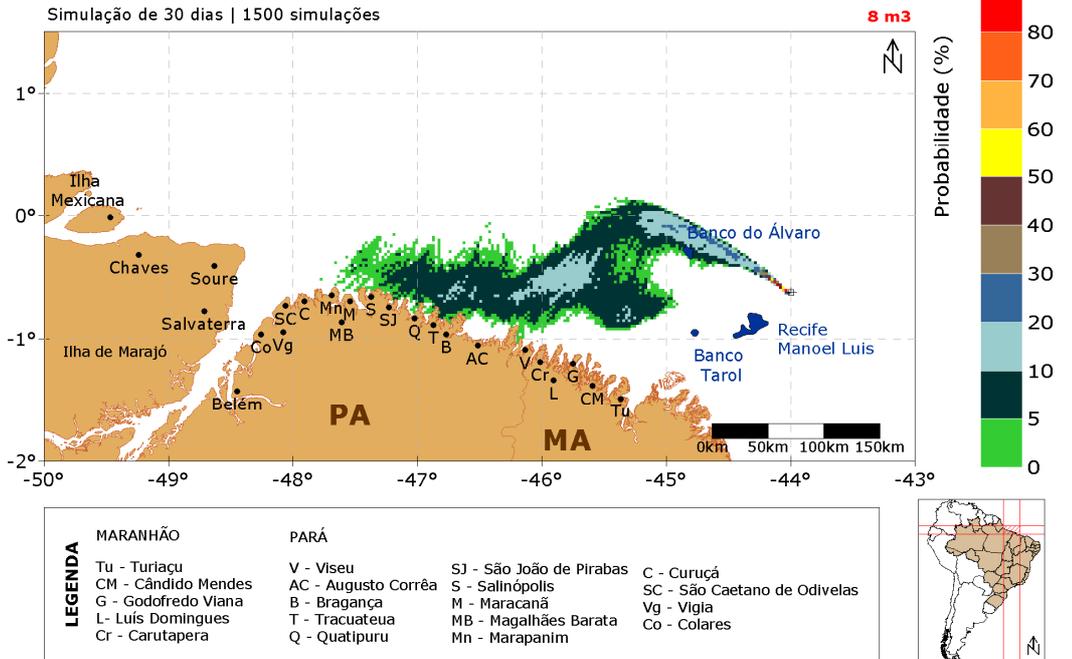


Figura 12: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 8 m³, no cenário de inverno.

Neste cenário a deriva do óleo também foi para oeste do poço, porém atingiu longitudes menores. A maior probabilidade de presença de óleo na costa foi de 10-5% (Tabela 4).

STROLL | Modo Probabilístico

OGX | BM-PAMA-17

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada do Óleo | Cenário de Inverno

Simulação de 30 dias | 1500 simulações

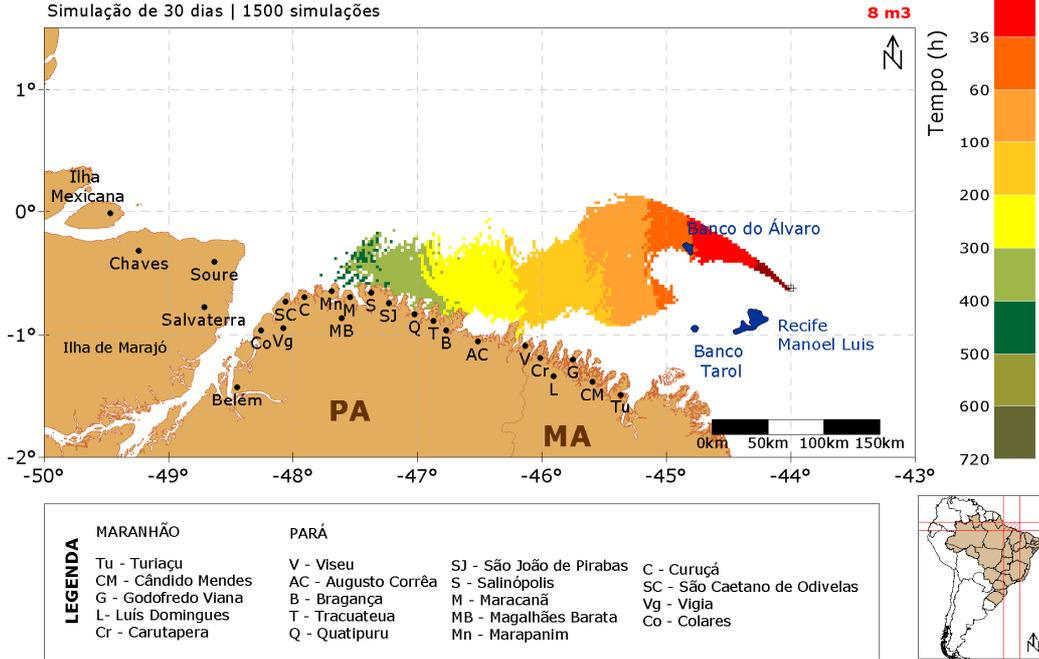


Figura 13: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 8 m³, no cenário de inverno.

Observa-se que o tempo mínimo de chegada do óleo na costa também foi de 100-200 horas.

A seguir, na Tabela 4, serão apresentadas às classes de probabilidade e tempo mínimo de chegada de óleo de cada município com possibilidade de serem atingidos pelo óleo em um derrame de pequeno volume (8 m³).

Tabela 4: Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de 8 m³, nos cenários de verão e inverno.

| | MUNICÍPIOS | Probabilidade de Presença (%) | | Tempo Mínimo (h) | |
|-----------------|---------------------|-------------------------------|---------|------------------|---------|
| | | VERÃO | INVERNO | VERÃO | INVERNO |
| PA | Marapanim | - | 5-0 | - | 400-500 |
| | Magalhães Barata | - | - | - | - |
| | Maracanã | - | - | - | - |
| | Salinópolis | - | 5-0 | - | 300-400 |
| | São João de Pirabas | - | 10-5 | - | 300-400 |
| | Quatipuru | 5-0 | 10-5 | 300-400 | 300-400 |
| | Tracuateua | 5-0 | 10-5 | 300-400 | 300-400 |
| | Bragança | 10-5 | 10-5 | 200-300 | 200-300 |
| | Augusto Corrêa | - | - | - | - |
| | Viseu | 10-5 | 5-0 | 100-200 | 100-200 |
| | MA | Carutapera | 10-5 | - | 100-200 |
| Áreas Sensíveis | Banco do Álvaro | 10-5 | 20-10 | 36-60 | 12-36 |
| | Recife Manoel Luis | - | - | - | - |
| | Banco Tarol | - | - | - | - |

VI.1.2. Vazamento de 200m³

VI.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 14 enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 15.

STROLL | Modo Probabilístico

OGX | BM-PAMA-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Verão

Simulação de 30 dias | 1500 simulações

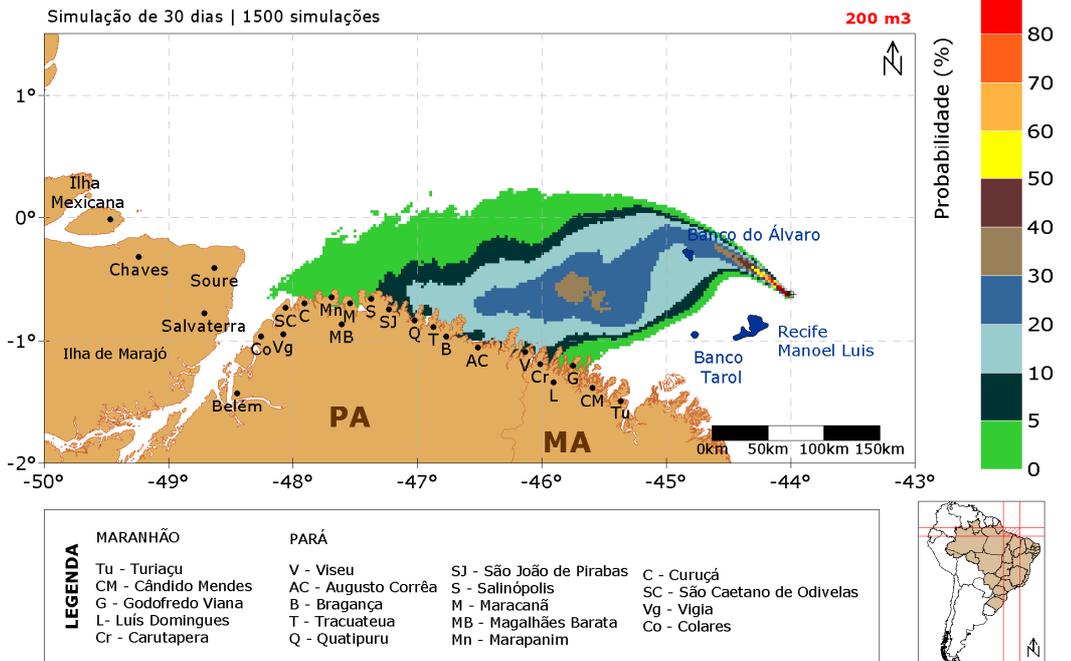


Figura 14: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m³, no cenário de verão.

Podemos observar no Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo, que a deriva do óleo ocorreu rumo a oeste do poço. O óleo pode atingir desde Curuçá, no Estado do Pará, até Godofredo Viana, no Estado do Maranhão. A mais alta probabilidade registrada, 20-10%, ocorreu em alguns municípios do Pará e na divisa com o Maranhão (Tabela 5).

STROLL | Modo Probabilístico

OGX | BM-PAMA-17

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada do Óleo | Cenário de Verão

Simulação de 30 dias | 1500 simulações

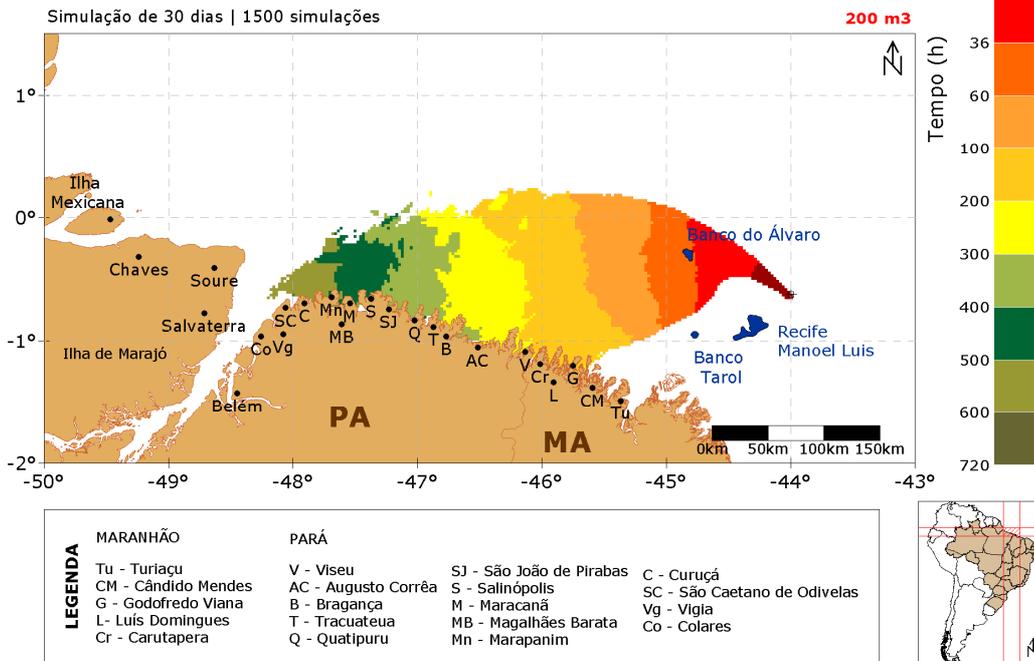


Figura 15: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m³, no cenário de verão.

Observa-se na Figura 15 que o tempo mínimo de chegada de óleo na costa é de 100-200 horas. Os municípios mais a oeste foram atingidos 500-600 horas do início da simulação.

VI.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 16 enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 17.

STROLL | Modo Probabilístico

OGX | BM-PAMA-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Inverno

Simulação de 30 dias | 1500 simulações

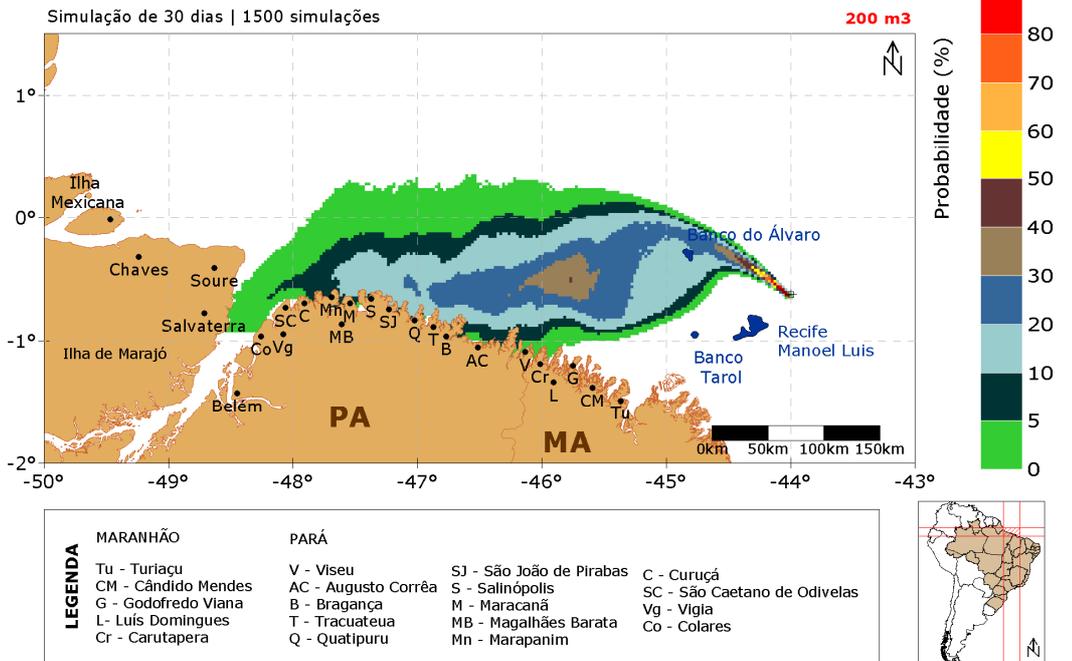


Figura 16: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m³, no cenário de inverno.

Nesse cenário, a deriva do óleo a oeste do poço foi maior, atingindo municípios da Ilha de Marajó - PA. As áreas atingidas podem se estender na costa desde Soure, estado do Pará até Carutapera, estado do Maranhão (Tabela 5).

STROLL | Modo Probabilístico

OGX | BM-PAMA-17

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada do Óleo | Cenário de Inverno

Simulação de 30 dias | 1500 simulações

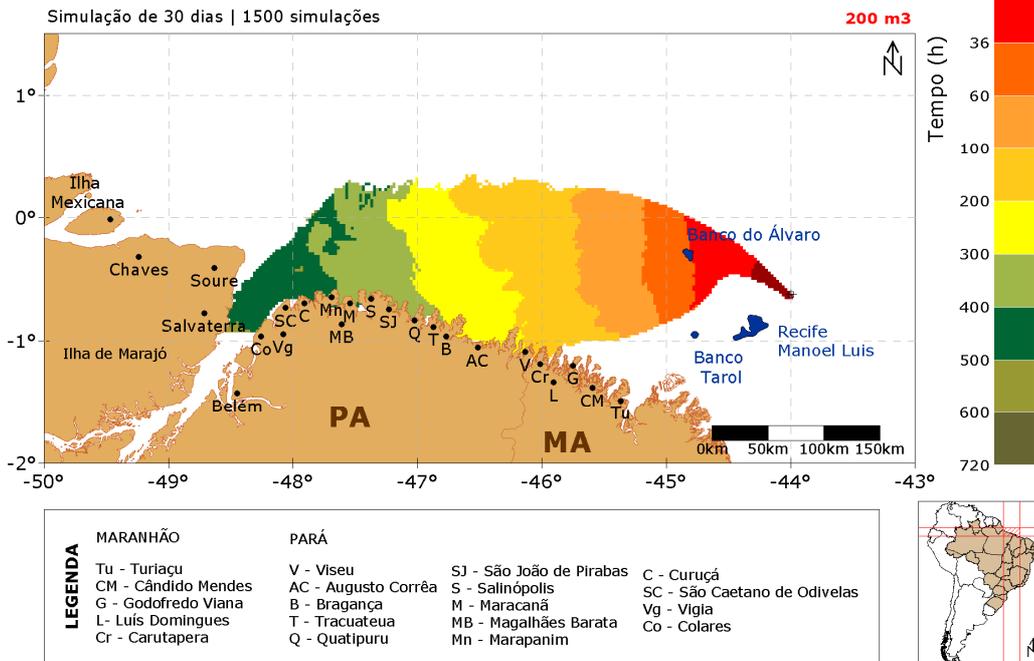


Figura 17: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m³, no cenário de inverno.

Assim como no cenário de verão, neste cenário o tempo mínimo de toque na costa também foi de 100-200 horas.

A seguir, na Tabela 5, serão apresentadas às classes de probabilidade e tempo mínimo de chegada de óleo de cada município com possibilidade de serem atingidos pelo óleo em um derrame de médio volume (200 m³).

Tabela 5: 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 | Probabilidade de Presença (%) | | Tempo Mínimo (h) | |
|-----------------|-------------------------|-------------------------------|---------|------------------|---------|
| | | VERÃO | INVERNO | VERÃO | INVERNO |
| PARÁ | Soure | - | 5-0 | - | 400-500 |
| | Salvaterra | - | 5-0 | - | 400-500 |
| | Colares | - | 5-0 | - | 400-500 |
| | Vigia | - | - | - | - |
| | São Caetano de Odivelas | - | 5-0 | - | 400-500 |
| | Curuçá | 5-0 | 10-5 | 500-600 | 300-400 |
| | Marapanim | 5-0 | 20-10 | 400-500 | 300-400 |
| | Magalhães Barata | 5-0 | 10-5 | 400-500 | 300-400 |
| | Maracanã | 5-0 | 20-10 | 400-500 | 300-400 |
| | Salinópolis | 10-5 | 20-10 | 300-400 | 300-400 |
| | São João de Pirabas | 10-5 | 20-10 | 300-400 | 300-400 |
| | Quatipuru | 20-10 | 20-10 | 300-400 | 300-400 |
| | Tracuateua | 20-10 | 20-10 | 200-300 | 200-300 |
| | Bragança | 20-10 | 20-10 | 200-300 | 200-300 |
| | Augusto Corrêa | 20-10 | 10-5 | 200-300 | 200-300 |
| Viseu | 20-10 | 20-10 | 100-200 | 100-200 | |
| MA | Carutapera | 20-10 | 5-0 | 100-200 | 100-200 |
| | Luís Domingues | 5-0 | - | 100-200 | - |
| | Godofredo Viana | 5-0 | - | 100-200 | - |
| Áreas Sensíveis | Banco do Álvaro | 30-20 | 30-20 | 12-36 | 12-36 |
| | Recife Manoel Luis | - | - | - | - |
| | Banco Tarol | - | - | - | - |

VI.1.3. 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.

VI.1.3.1. 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 9.900 m³, no período de verão, são apresentados na Figura 18 a Figura 21.

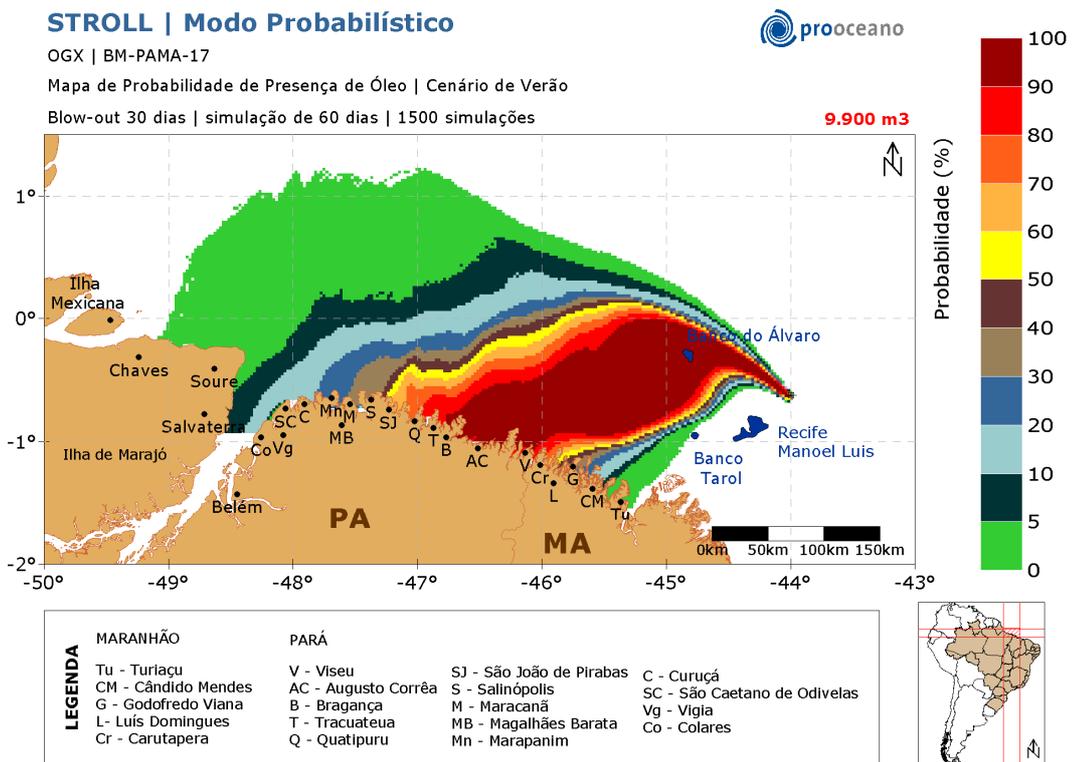


Figura 18: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

A deriva do óleo ocorre preferencialmente para oeste do poço. O óleo pode atingir desde Turiacu, no estado do Maranhão até Chaves, no estado do Pará (Tabela 6). A região que tem probabilidade de presença de óleo 100-90% encontra-se entre Bragança e Viseu – PA.

O Banco do Álvaro pode ser atingido pelo óleo com 100-90% de probabilidade, enquanto o Banco do Tarol de 5-0% de probabilidade.

STROLL | Modo Probabilístico

OGX | BM-PAMA-17

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada do Óleo | Cenário de Verão

Blow-out 30 dias | simulação de 60 dias | 1500 simulações

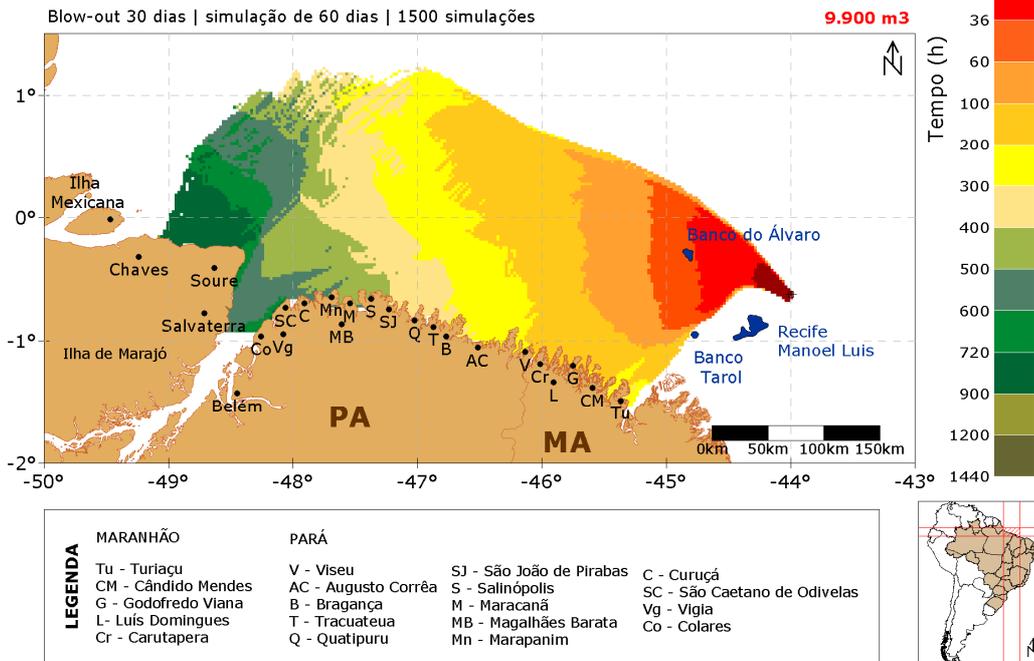


Figura 19: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

O tempo mínimo de toque na costa, nesse cenário ocorreu entre 100-200 horas, na região entre Viseu - PA e Turiçu - MA. A Ilha de Marajó foi atingida com o tempo mínimo de 500-600 horas (Tabela 6).

O Banco do Álvaro tem o tempo mínimo de chegada de óleo de 36-60 horas e o Banco do Tarol de 60-100 horas após o início do vazamento.

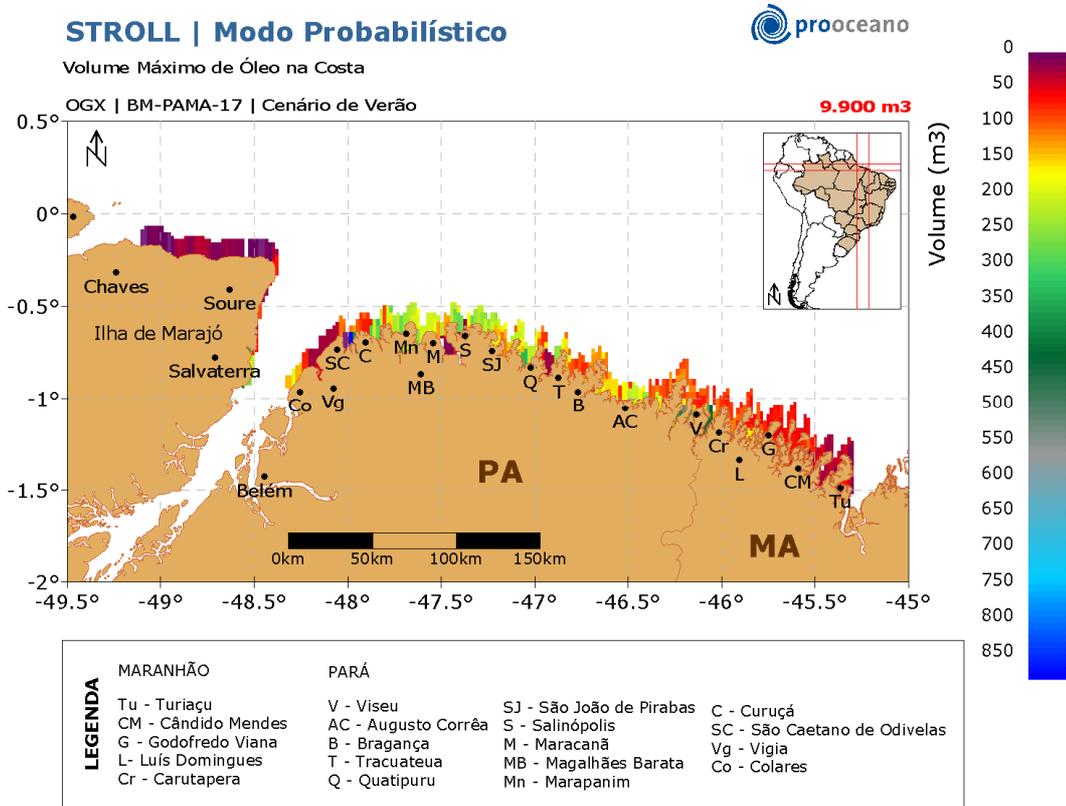


Figura 20: Volume máximo de óleo na costa, após as simulações de 60 dias no cenário de verão.

Ao analisarmos o volume máximo de óleo que atinge a costa, observamos que as áreas que apresentaram os maiores valores situam-se em São Caetano de Odivelas (892,24 m³) no Pará.

Para uma melhor análise dos tempos de chegada de óleo na costa, foram gerados histogramas com as frequências de ocorrência das classes de tempo e fração de massa na costa para toda a simulação probabilística (Figura 21). O gráfico de probabilidade com os histogramas de tempo de chegada facilita a análise conjunta dos resultados.

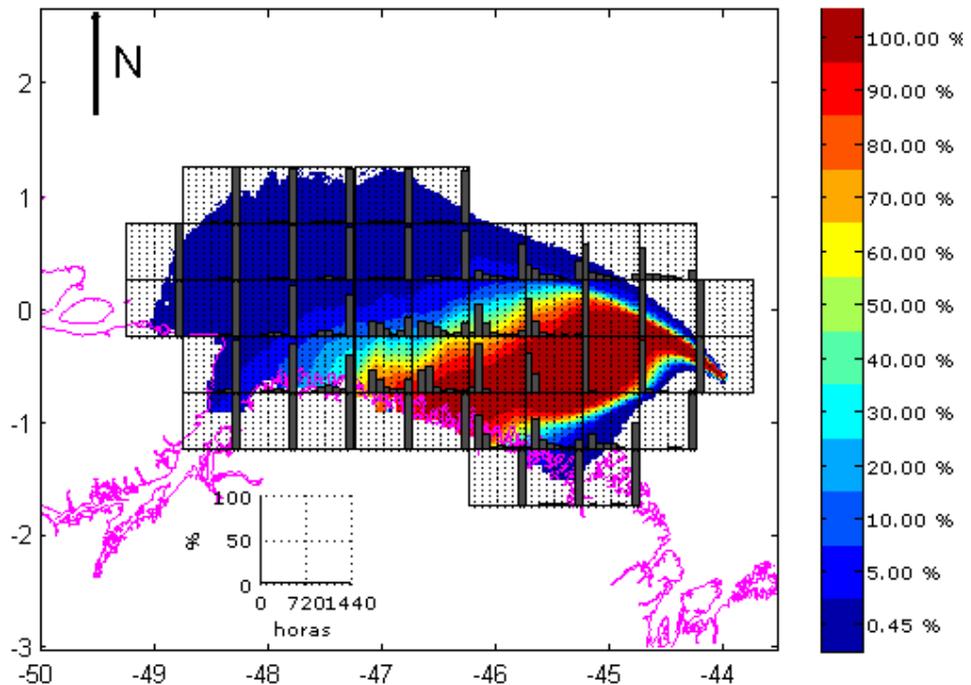


Figura 21: Histogramas de tempo de chegada de óleo próximo à costa no cenário de verão.

Os histogramas de tempo de chegada, no cenário de verão, mostram que nas regiões com maior probabilidade de presença de óleo, a maior fração dos tempos de chegada, estão antes da metade da simulação (720h). Destas regiões, seguindo para oeste, os tempos de chegada aumentam progressivamente.

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 médios (Figura 22 e Figura 23) e volumes máximos na costa (Figura 24, Figura 25 e Figura 26) presentes em cada ponto de grade, em cada uma das 1.500 simulações realizadas para o cenário de verão.

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

STROLL | Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Volume Médio | Classe 1 | menor que 8 m³

OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Verão

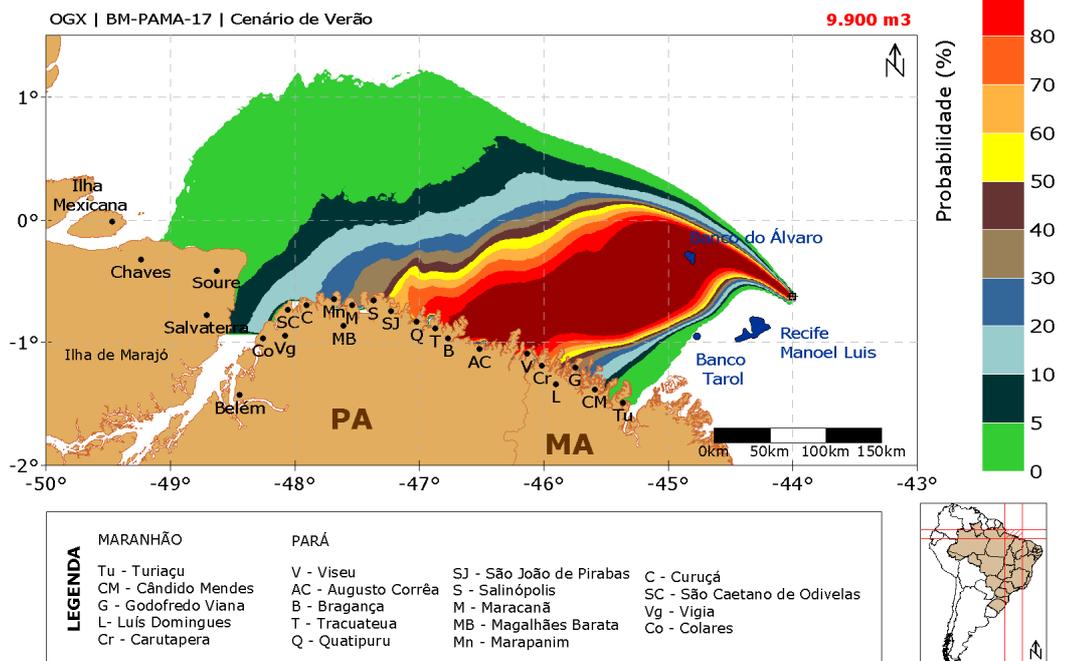


Figura 22: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

STROLL | Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Volume Médio | Classe 2 | 8 - 200 m³

OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Verão

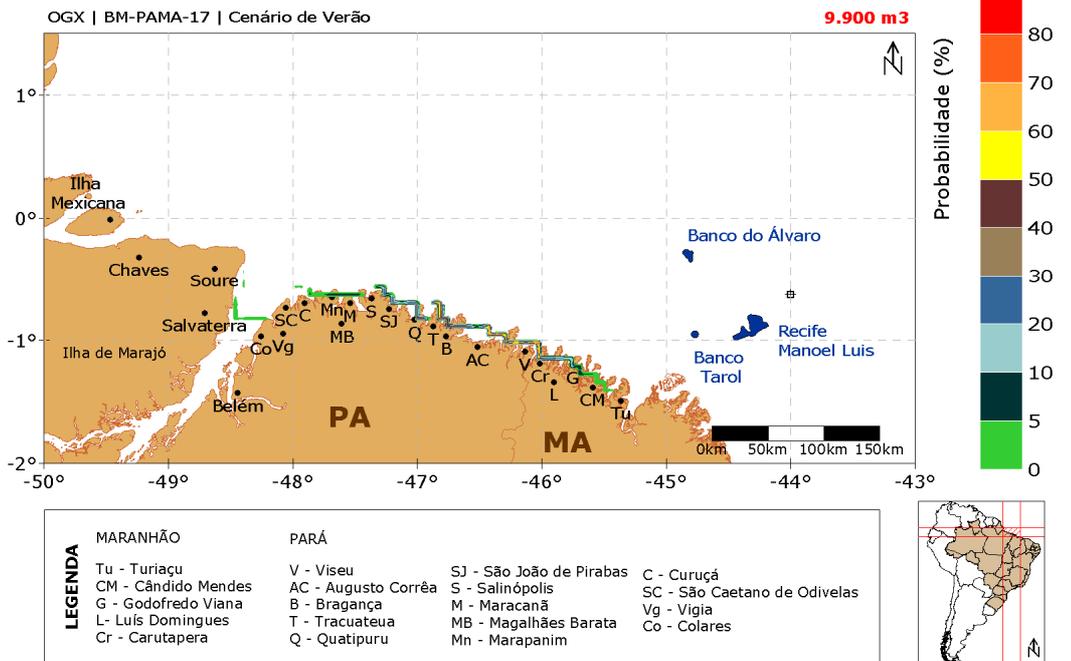


Figura 23: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

Observa-se que a classe 1 (menor que 8 m³) foi a que esteve presente em mais regiões tanto no oceano quanto na costa. A classe 2 (8-200m³) também apresentou probabilidade de presença em quase toda área de costa, sendo que as mais altas probabilidades foram registradas na divisa entre o estado do Pará e Maranhão.

A classe 3 (maior que 200m³) não foi representada, pois nenhuma região apresentou probabilidade de presença de óleo nesta faixa de volume médio.

STROLL | Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Óleo na Costa
 Volume Máximo | Classe 1 | menor que 8 m³
 OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Verão

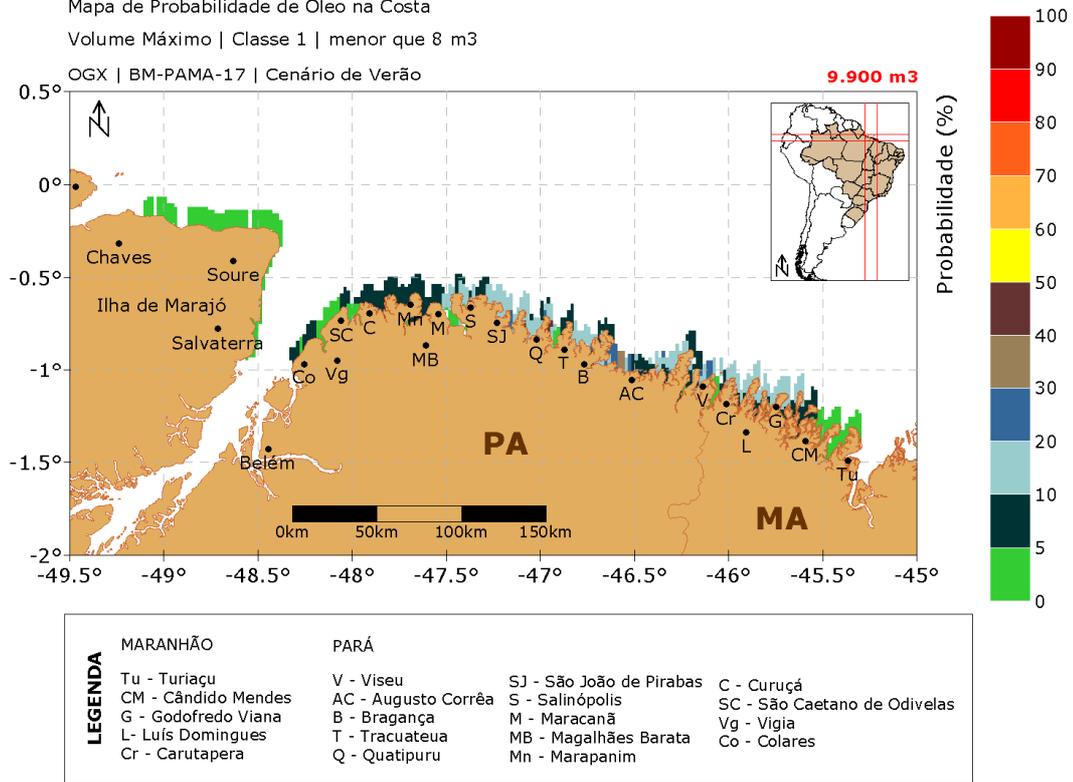


Figura 24: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

STROLL | Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Óleo na Costa

Volume Máximo | Classe 2 | 8 - 200 m3

OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Verão

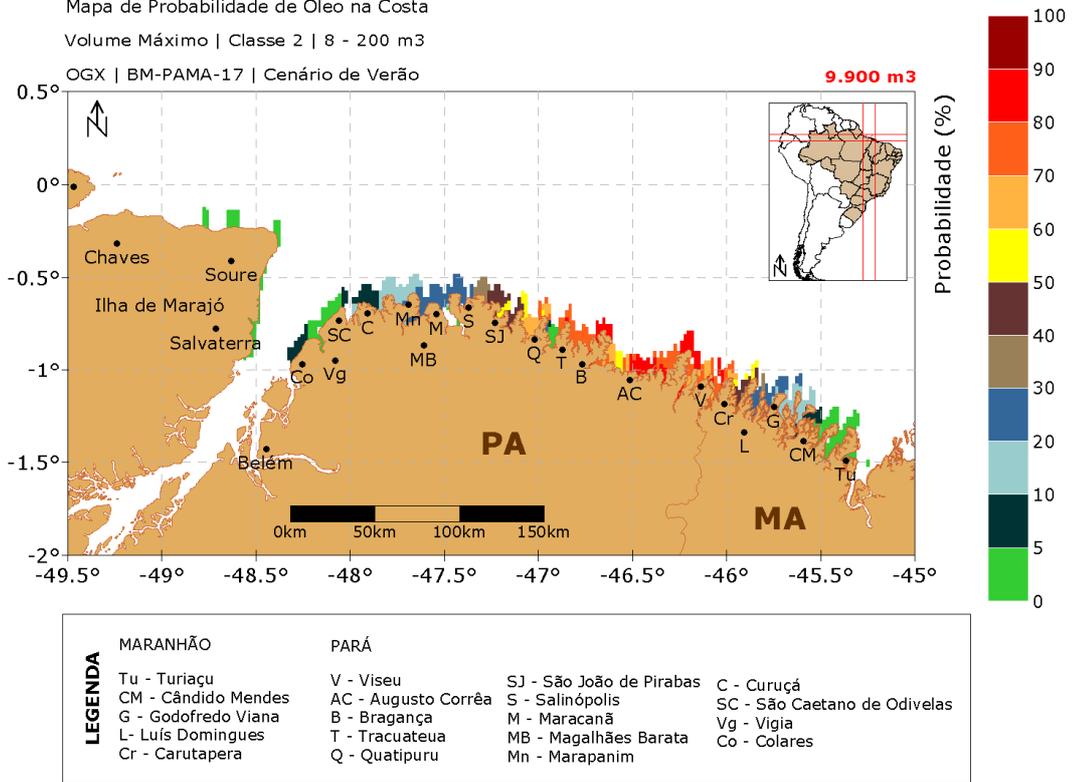


Figura 25: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

STROLL | Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Óleo na Costa

Volume Máximo | Classe 3 | maior que 200 m³

OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Verão

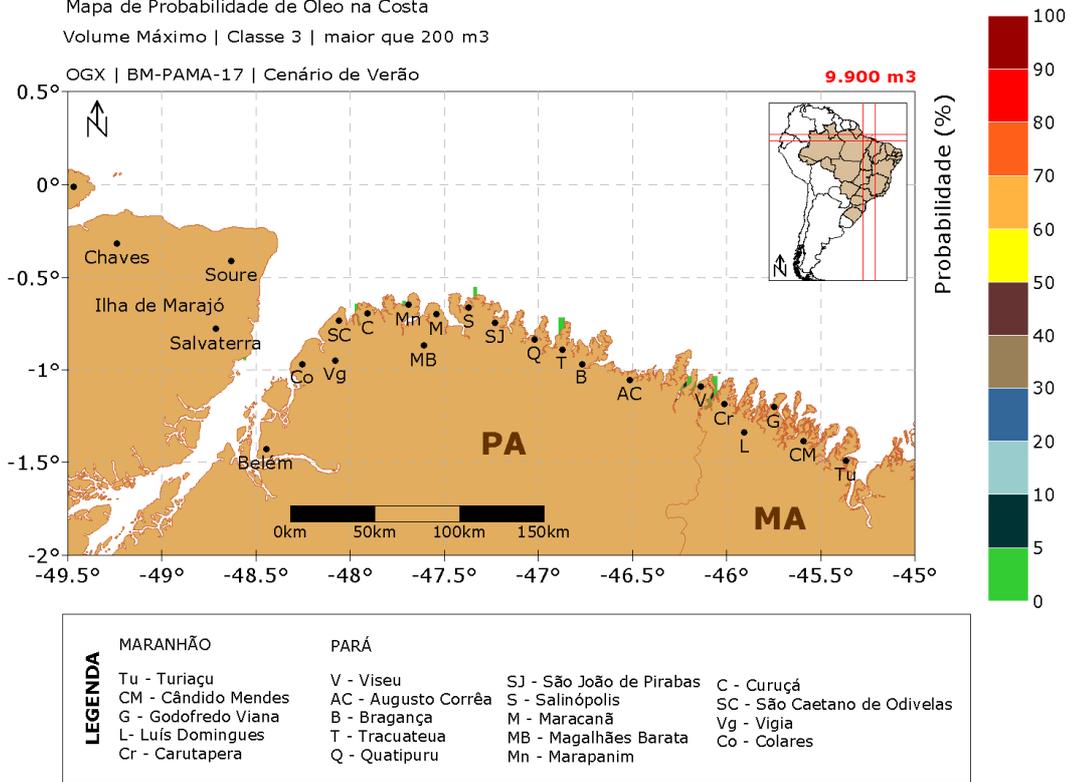


Figura 26: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 3, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

Dentre as três faixas de probabilidade de volume máximo na costa observa-se que a classe 3 (maior que 200m³) só apresentou probabilidade 5-0% em alguns locais na costa do Pará e na divisa com o Maranhão. As maiores probabilidades, 90-80% foram registradas na classe 2 (8-200m³).

VI.1.3.2. Inverno

A seguir, nas Figura 27 a Figura 30, serão apresentados os resultados obtidos no período de inverno para um cenário de *blow-out*, volume vazado de 9.900 m³.

STROLL | Modo Probabilístico

OGX | BM-PAMA-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Inverno

Blow-out 30 dias | simulação de 60 dias | 1500 simulações

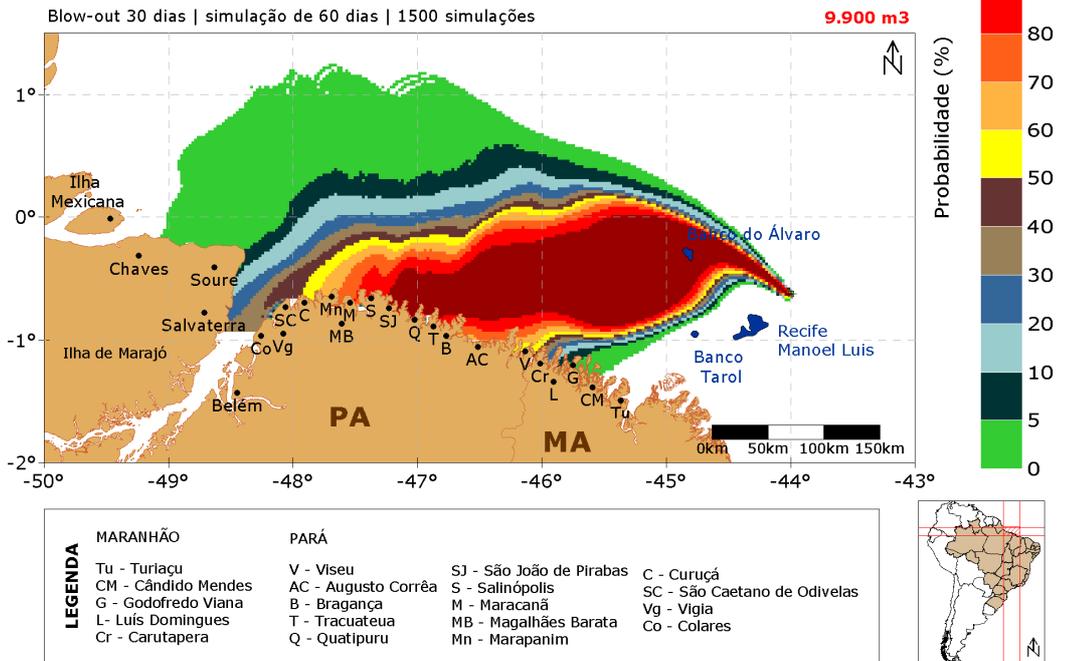


Figura 27: Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

Nesse cenário a deriva do óleo também foi preferencial para oeste do poço. A extensão de costa com probabilidade de presença de óleo abrangeu desde Chaves – PA à Cândido Mendes – MA. Os municípios de São João de Pirabas até Bragança apresentaram a maior probabilidade, 100-90%.

Assim como no cenário de verão o Banco do Álvaro pode ser atingido pelo óleo com 100-90% de probabilidade.

STROLL | Modo Probabilístico

OGX | BM-PAMA-17

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada do Óleo | Cenário de Inverno

Blow-out 30 dias | simulação de 60 dias | 1500 simulações

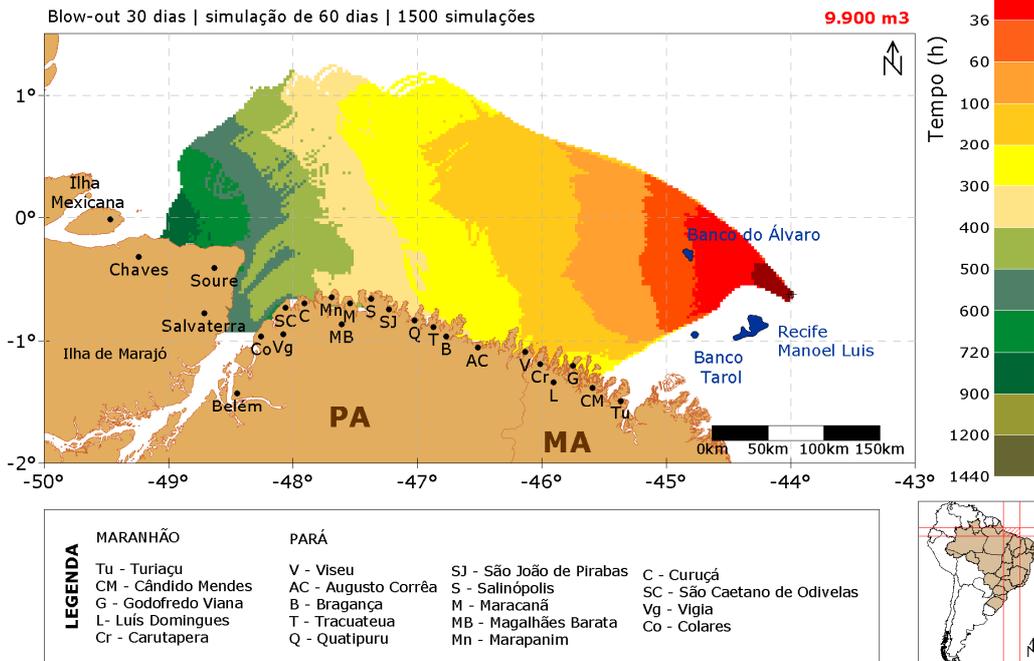


Figura 28: Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para vazamento de 9.900 m³, no cenário de inverno.

No cenário de inverno o tempo mínimo de chegada de óleo é igual a do cenário de verão, 100-200 horas. Os municípios quem podem ser atingidos nesse intervalo de tempo estão entre Viseu-PA e Godofredo Viana-MA.

O Banco do Álvaro tem o tempo mínimo de chegada de óleo de 12-36 horas.

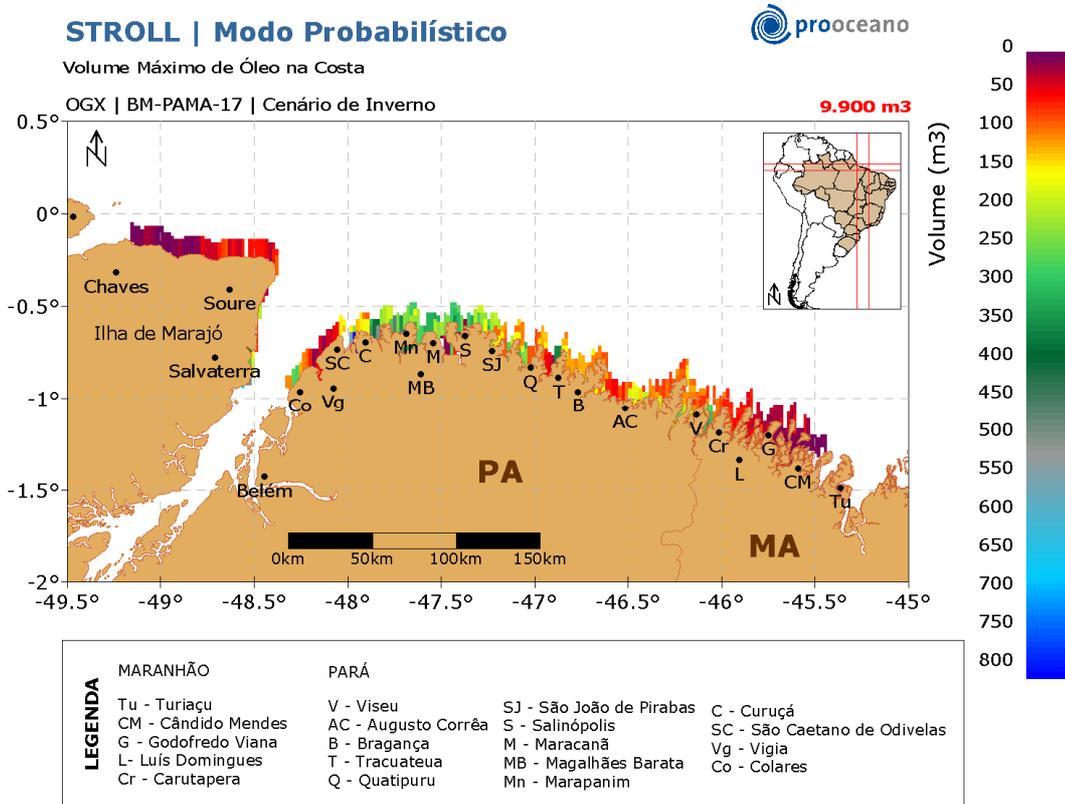


Figura 29: Volume máximo de óleo na costa, após as simulações de 60 dias no cenário de inverno.

A região da costa do município de Curuçá (825,89 m³) e Tracuateua - PA (580,54 m³) foram as que apresentaram os maiores valores de volume máximo de óleo. Assim como no cenário de verão neste cenário os menores volumes máximos também foram registrados nos limites leste e oeste das áreas com probabilidade de presença de óleo.

Para uma melhor análise dos tempos de chegada de óleo na costa, foram gerados histogramas com as frequências de ocorrência das classes de tempo e fração de massa na costa para toda a simulação probabilística (Figura 30).

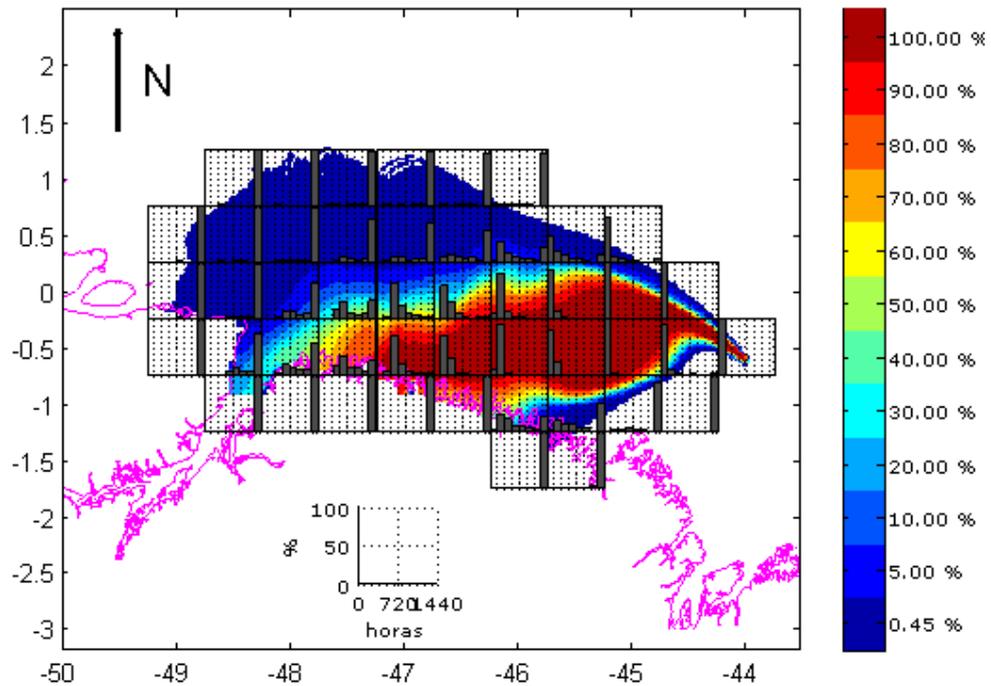


Figura 30: Histogramas de tempo de chegada de óleo próximo à costa no cenário de inverno.

No cenário de inverno observa-se um resultado semelhante ao cenário de verão, com o tempo de chegada aumentando, principalmente, na direção oeste dos locais de maior probabilidade de presença de óleo.

A seguir, na Tabela 6, serão apresentados os volumes máximos, às 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 6: 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 ³) | | Probabilidade de Presença (%) | | Tempo Mínimo (h) | |
|-----------------|-------------------------|---------------------------------|----------|-------------------------------|-----------|------------------|-----------|
| | | VERÃO | INVERNO | VERÃO | INVERNO | VERÃO | INVERNO |
| PARÁ | Chaves | 24,881 | 28,336 | 5 - 0 | 5 - 0 | 720 - 900 | 720 - 900 |
| | Soure | 53,217 | 321,38 | 10-5 | 30-20 | 500-600 | 500 - 600 |
| | Salvaterra | 412,61 | 692,51 | 10-5 | 40-30 | 500-600 | 500 - 600 |
| | Colares | 201,12 | 284,06 | 20 - 10 | 40 - 30 | 600 - 720 | 500 - 600 |
| | Vigia | 33,865 | 49,761 | 10 - 5 | 30 - 20 | 600 - 720 | 600 - 720 |
| | São Caetano de Odivelas | 892,24 | 158,27 | 20 - 10 | 50 - 40 | 500 - 600 | 500 - 600 |
| | Curuçá | 394,64 | 825,89 | 30-20 | 70 - 60 | 400-500 | 300 - 400 |
| | Marapanim | 289,58 | 476,19 | 30 - 20 | 80 - 70 | 400 - 500 | 300 - 400 |
| | Magalhães Barata | 264,01 | 253,65 | 40-30 | 80 - 70 | 400-500 | 300 - 400 |
| | Maracanã | 242,59 | 341,42 | 40 - 30 | 90 - 80 | 400 - 500 | 300 - 400 |
| | Salinópolis | 319,3 | 379,43 | 60 - 50 | 90 - 80 | 400 - 500 | 300 - 400 |
| | São João de Pirabas | 345,57 | 320 | 80 - 70 | 100 - 90 | 300 - 400 | 300 - 400 |
| | Quatipuru | 345,57 | 249,5 | 90 - 80 | 100 - 90 | 300 - 400 | 200 - 300 |
| | Tracuateua | 326,91 | 580,54 | 90 - 80 | 100 - 90 | 300 - 400 | 200 - 300 |
| | Bragança | 232,22 | 230,84 | 100 - 90 | 100 - 90 | 200 - 300 | 200 - 300 |
| Augusto Corrêa | 242,59 | 239,13 | 100 - 90 | 80 - 70 | 200 - 300 | 200 - 300 | |
| Viseu | 528,02 | 337,27 | 100 - 90 | 90 - 80 | 100 - 200 | 100 - 200 | |
| MARANHÃO | Carutapera | 436,1 | 322,07 | 90 - 80 | 60 - 50 | 100 - 200 | 100 - 200 |
| | Luís Domingues | 192,13 | 86,392 | 60 - 50 | 20 - 10 | 100 - 200 | 100 - 200 |
| | Godofredo Viana | 80,862 | 55,291 | 50 - 40 | 10 - 5 | 100 - 200 | 100 - 200 |
| | Cândido Mendes | 107,13 | 51,835 | 30 - 20 | 5 - 0 | 100 - 200 | 200 - 300 |
| | Turiação | 71,187 | - | 5 - 0 | - | 100 - 200 | - |
| Áreas Sensíveis | Banco do Álvaro | - | - | 100 - 90 | 100 - 90 | 36-60 | 12-36 |
| | Recife Manoel Luis | - | - | - | - | - | - |
| | Banco Tarol | - | - | 5 - 0 | - | 60-100 | - |

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 médios (Figura 31 e Figura 32) e volumes máximos na costa (Figura 33, Figura 34 e Figura 35) presentes em cada ponto de grade, em cada uma das 1.500 simulações realizadas para o cenário de inverno.

Foram consideradas três classes de volume, são elas: Classe 1 – menor que 8 m³; Classe 2 – 8 a 200 m³; e Classe 3 – maior que 200m³.

STROLL | Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Volume Médio | Classe 1 | menor que 8 m³

OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

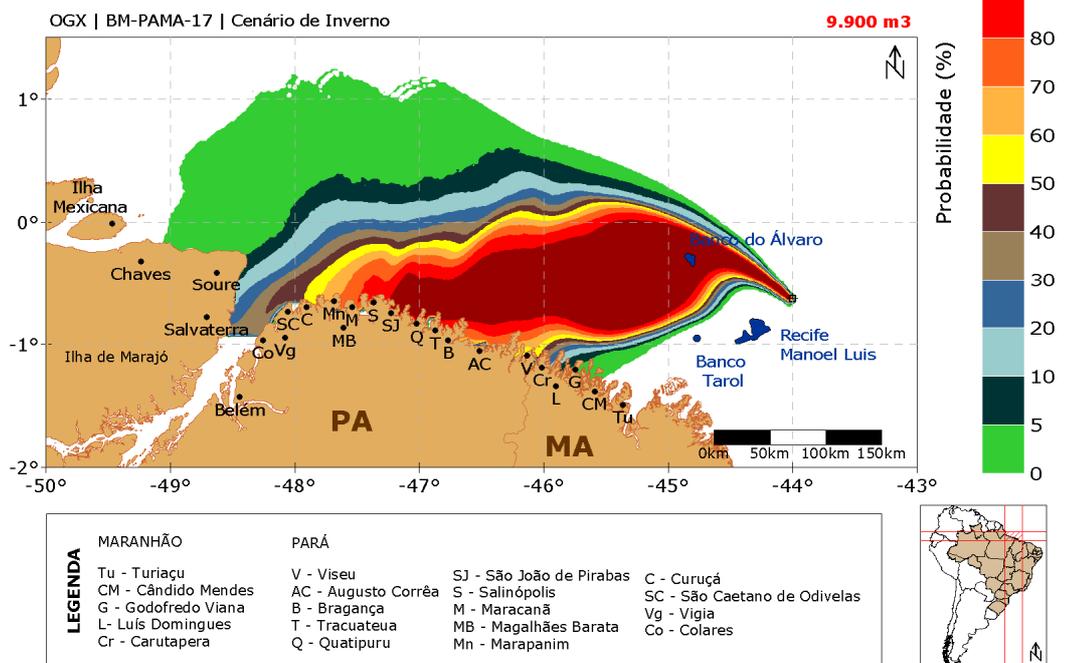


Figura 31: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

STROLL | Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Volume Médio | Classe 2 | 8 - 200 m³

OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

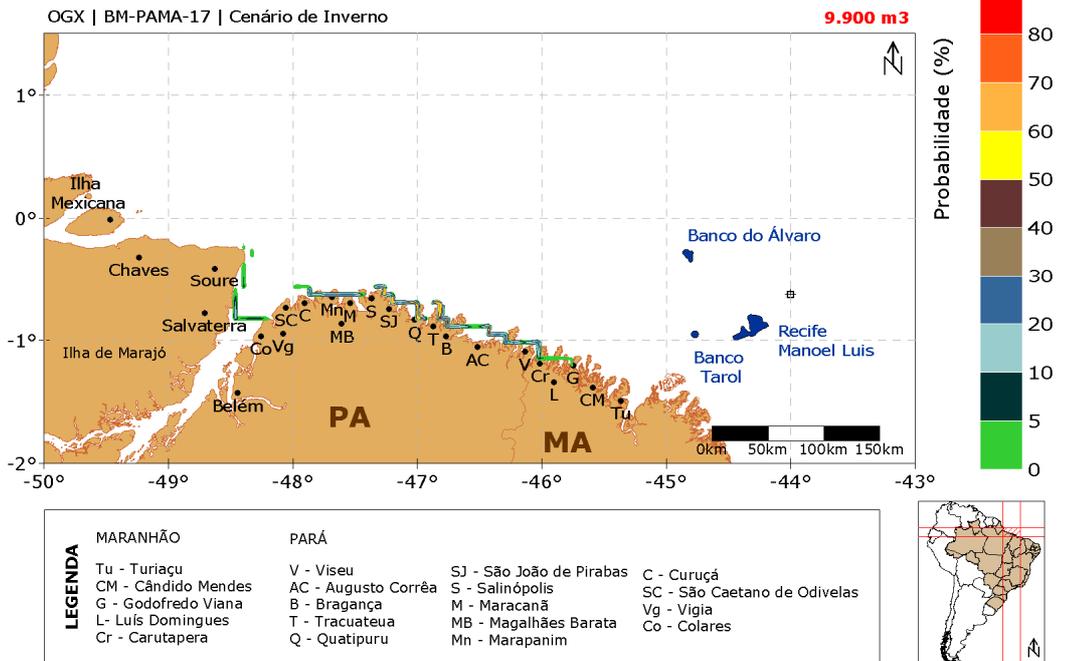


Figura 32: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume médio, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

Assim como no cenário de verão, neste cenário, a classe 1 (menor que 8m³) também foi a que apresentou mais áreas com probabilidade de presença de óleo nesta faixa de volume. Na classe 2 (8-200m³) somente áreas na costa foram registradas com probabilidade, destacando-se que a probabilidade máxima, 80-70%, foi registrada na região de Quatipuru - PA e adjacências.

A classe 3 (maior que 200m³) não foi representada, pois nenhuma região apresentou probabilidade de presença de óleo nesta faixa de volume.

STROLL | Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Óleo na Costa
 Volume Máximo | Classe 1 | menor que 8 m³
 OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

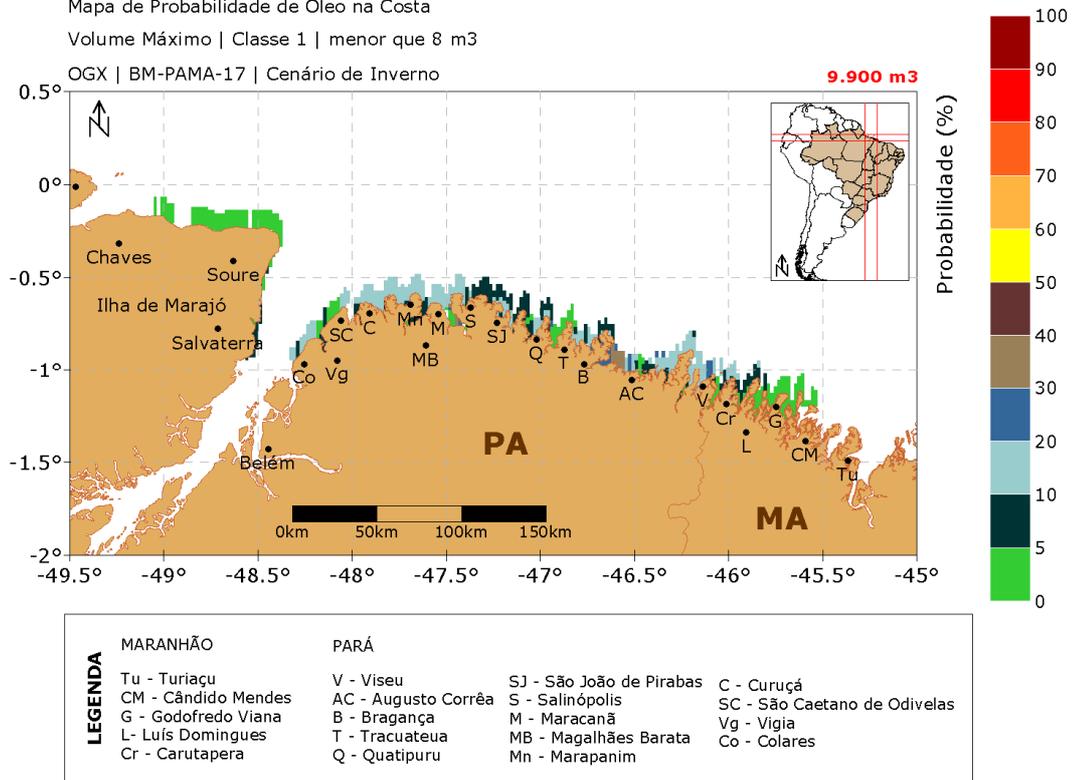


Figura 33: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 1, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

STROLL | Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Óleo na Costa

Volume Máximo | Classe 2 | 8 - 200 m3

OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

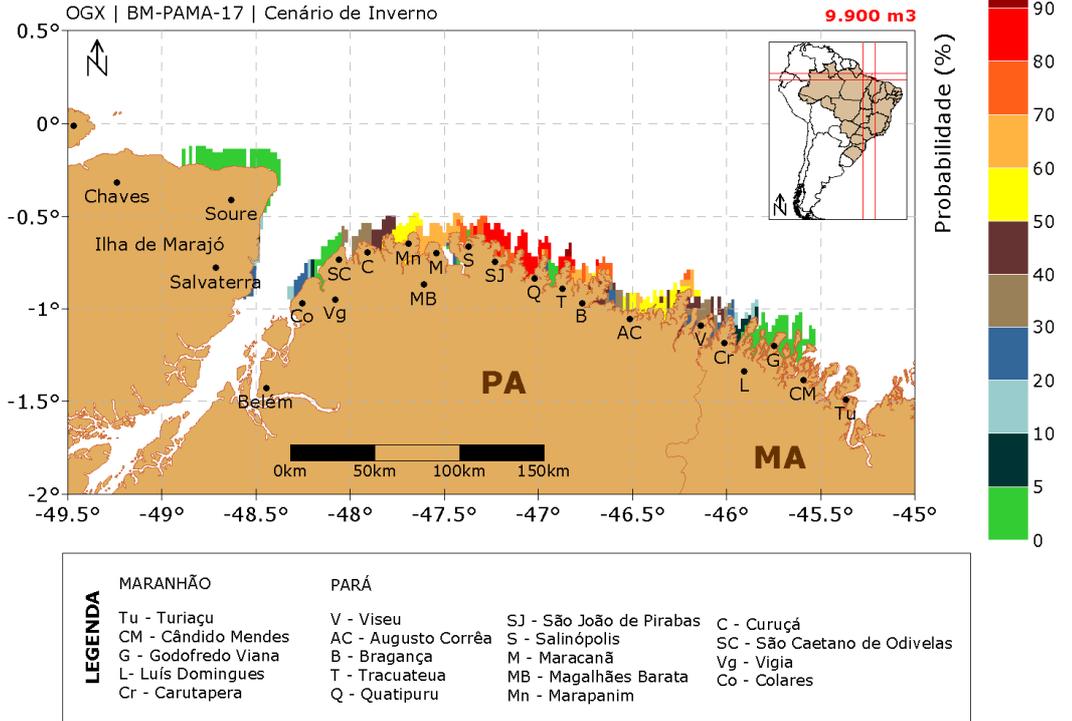


Figura 34: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 2, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

STROLL | Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Óleo na Costa

Volume Máximo | Classe 3 | maior que 200 m³

OGX | BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

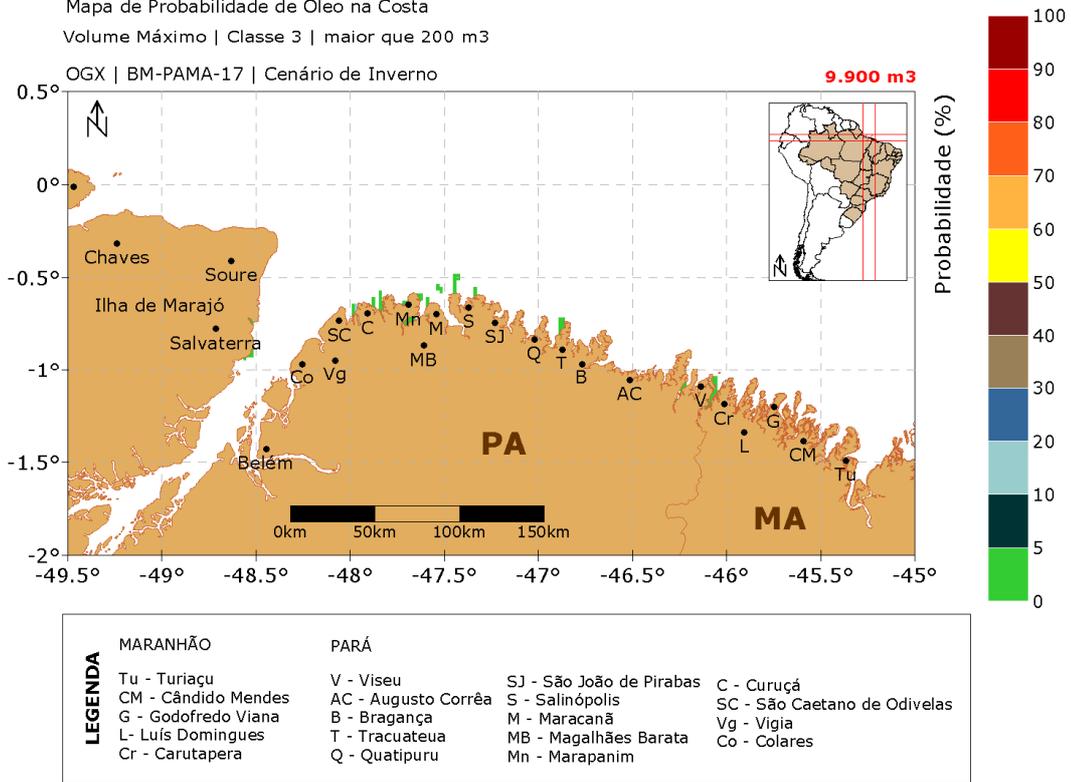


Figura 35: Mapa de Probabilidade de presença de óleo por faixa de volume máximo, na Classe 3, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

A distribuição das probabilidades por faixa de volume máximo na costa, neste cenário, foi semelhante à observada no verão. As mais altas probabilidades foram registradas na classe 2 (8- 200m³) e na classe 3 (maior que 200m³) somente algumas áreas apresentaram probabilidade, 5-0%.

VI.2. Modo Determinístico

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas foi identificado o cenário de pior caso para ocorrência de um evento de *blow-out* decorrente da atividade de perfuração no bloco BM-PAMA-17. Ambos os cenários apresentaram tempo mínimo de toque na costa de 100-200 horas. Dessa forma, será apresentada uma trajetória de pior caso ocorrida em cada cenário.

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

Foi identificado um domínio de correntes com direção NW no regime hidrodinâmico da região em ambos os cenários sazonais, isto se deve à presença da Corrente Norte do Brasil. Também foi notada uma grande influência da maré na circulação, principalmente na região sobre a plataforma. No regime de ventos, foi identificada uma migração sazonal, com ventos predominantes de leste no período de inverno, e nordeste no período de verão.

Com o intuito de representar da melhor forma as duas condições sazonais citadas anteriormente, foi conduzida uma investigação no vento, de forma a se obter o período de 1440 horas que tivesse a maior incidência de ventos de nordeste (verão - Figura 36) e leste (inverno - Figura 37).

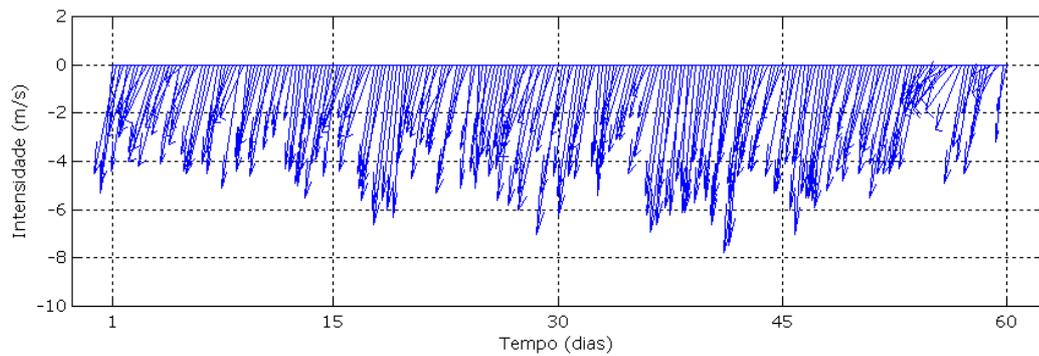


Figura 36: Vento utilizado na simulação de condições meteo-oceanográficas de verão.

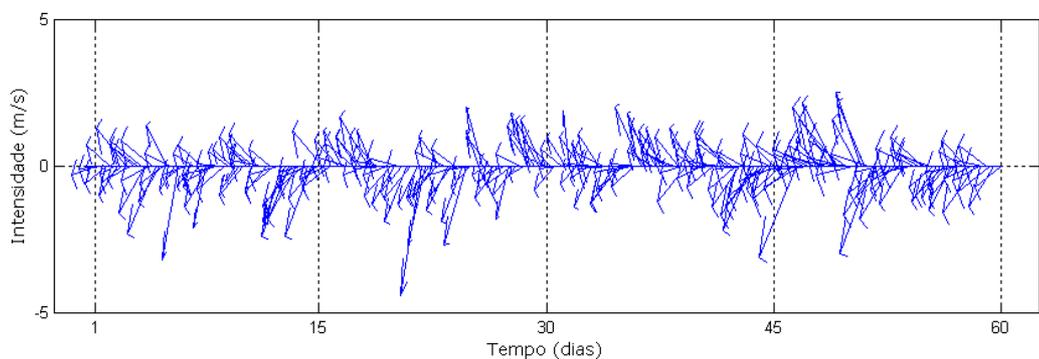


Figura 37 Vento utilizado na simulação de condições meteo-oceanográficas de inverno.

Nas figuras dos itens V.2.1 e V.2.2 são apresentados instantâneos com os resultados da simulação da dispersão de óleo realizada para cada situação escolhida. São também mostrados nas figuras os campos de vento e correntes que transportaram o óleo nesses cenários.

VI.2.1. Verão

Na Figura 38 à Figura 48 serão apresentados os resultados do modo determinístico para o cenário de verão de pior caso.

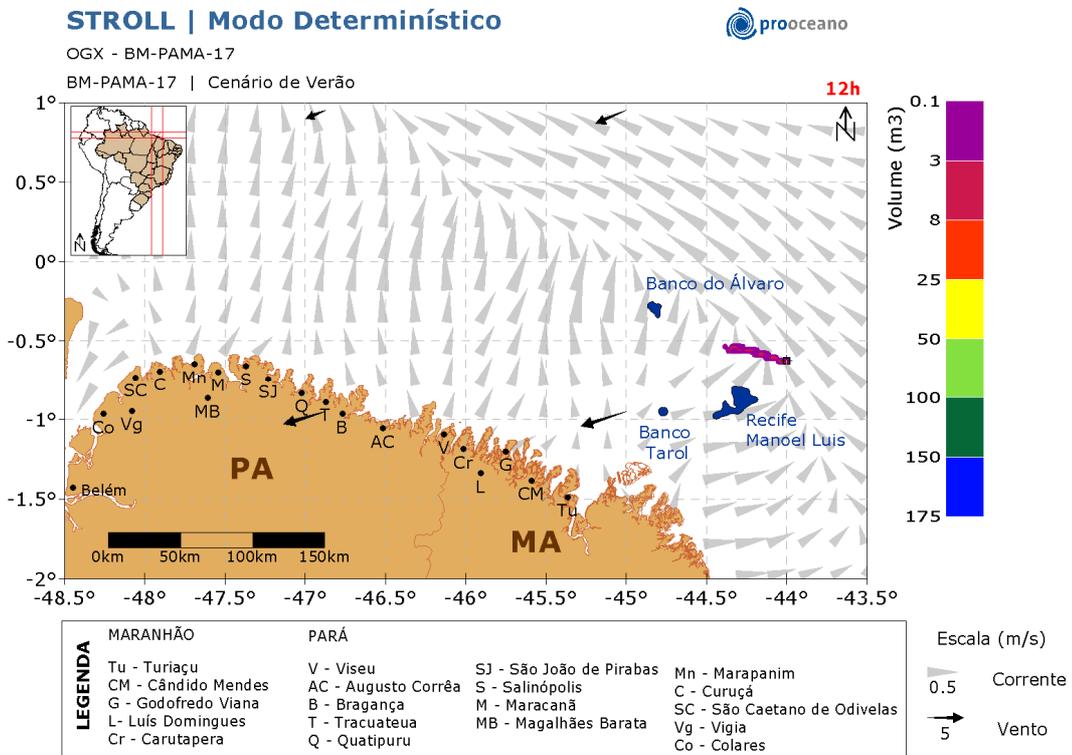


Figura 38: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 12 horas de simulação.

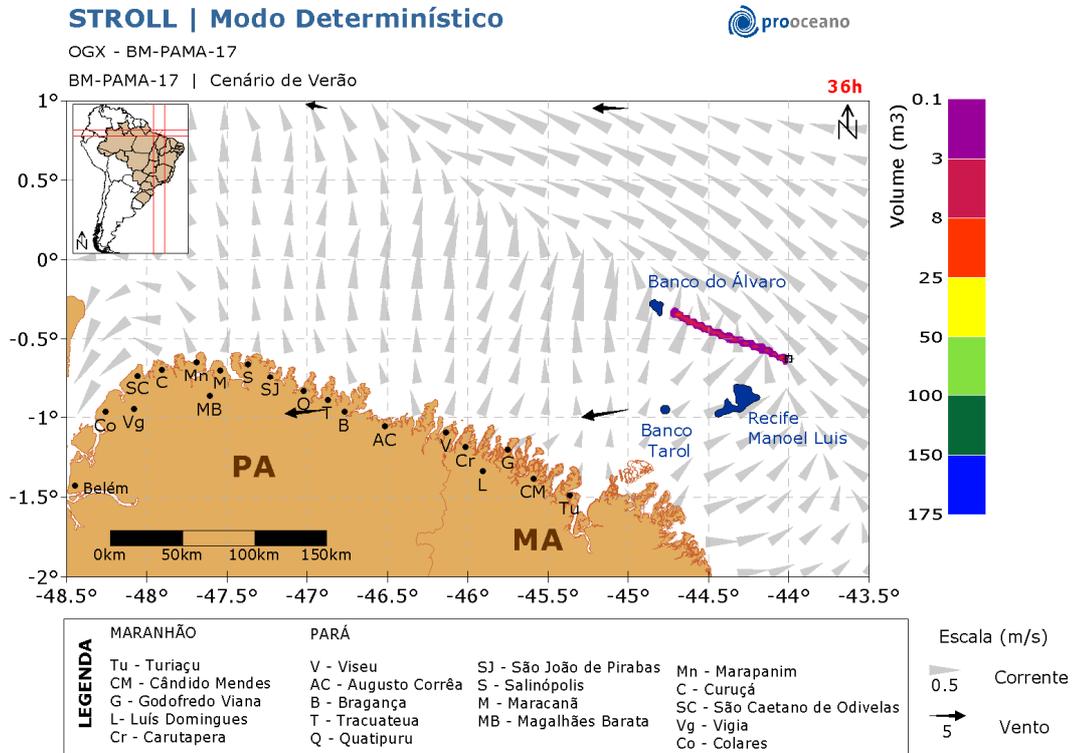


Figura 39: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 36 horas de simulação.

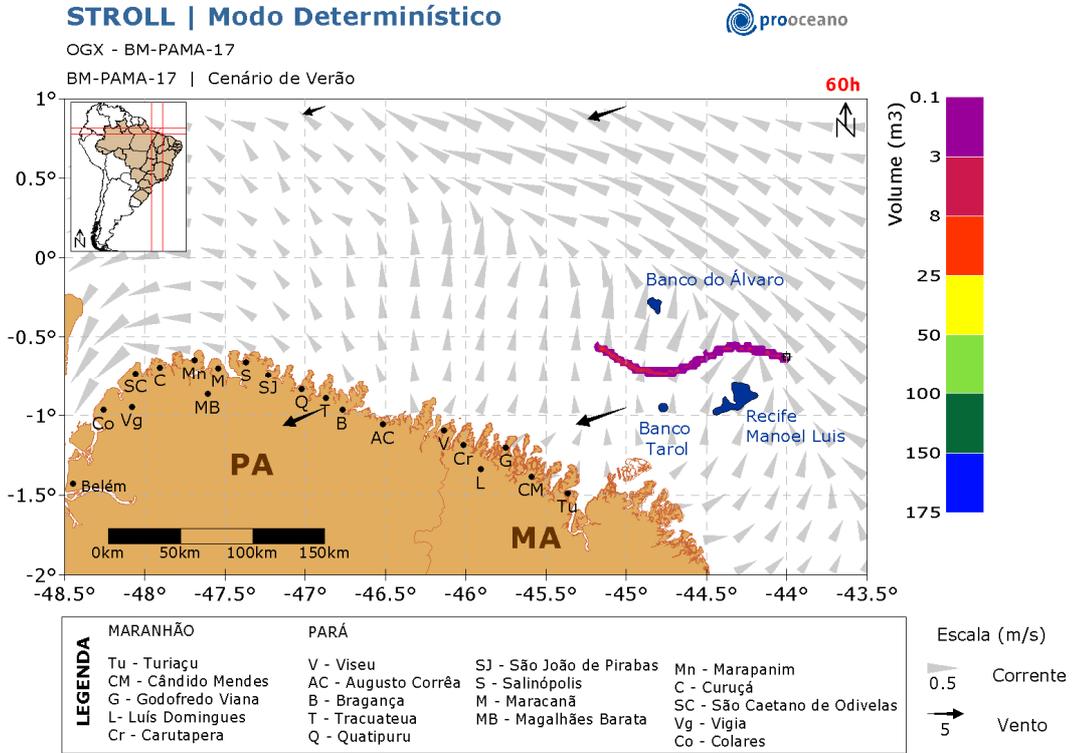


Figura 40: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 60 horas de simulação.

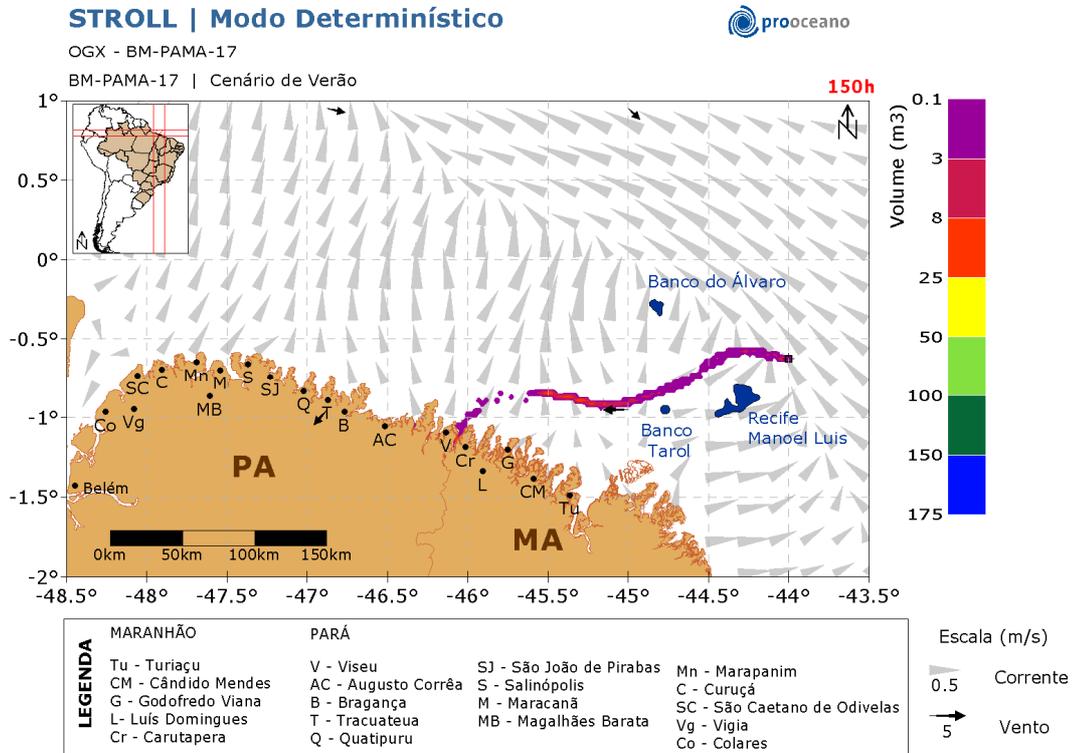


Figura 41: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 150 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Verão

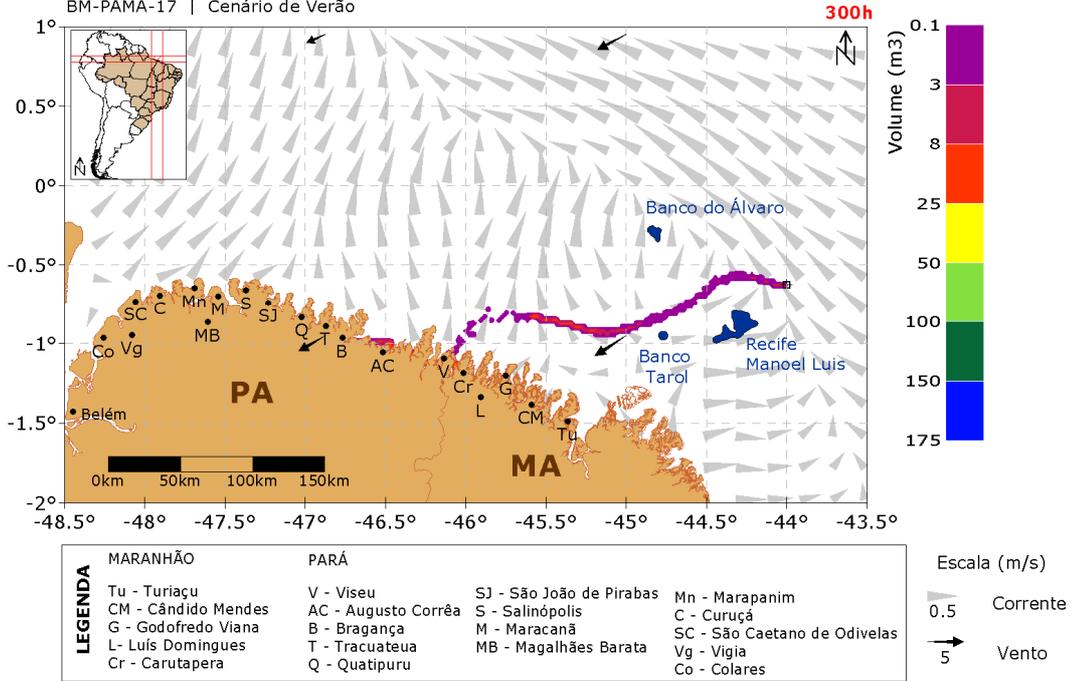


Figura 42: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 300 horas de simulação.

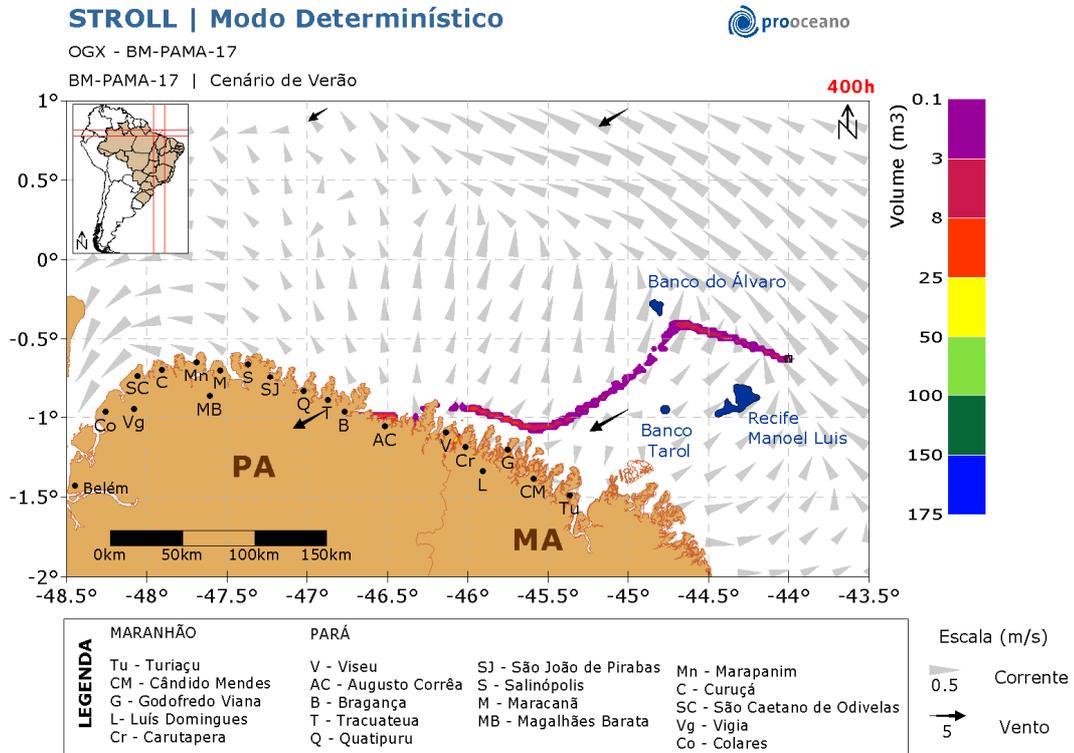


Figura 43: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 400 horas de simulação.

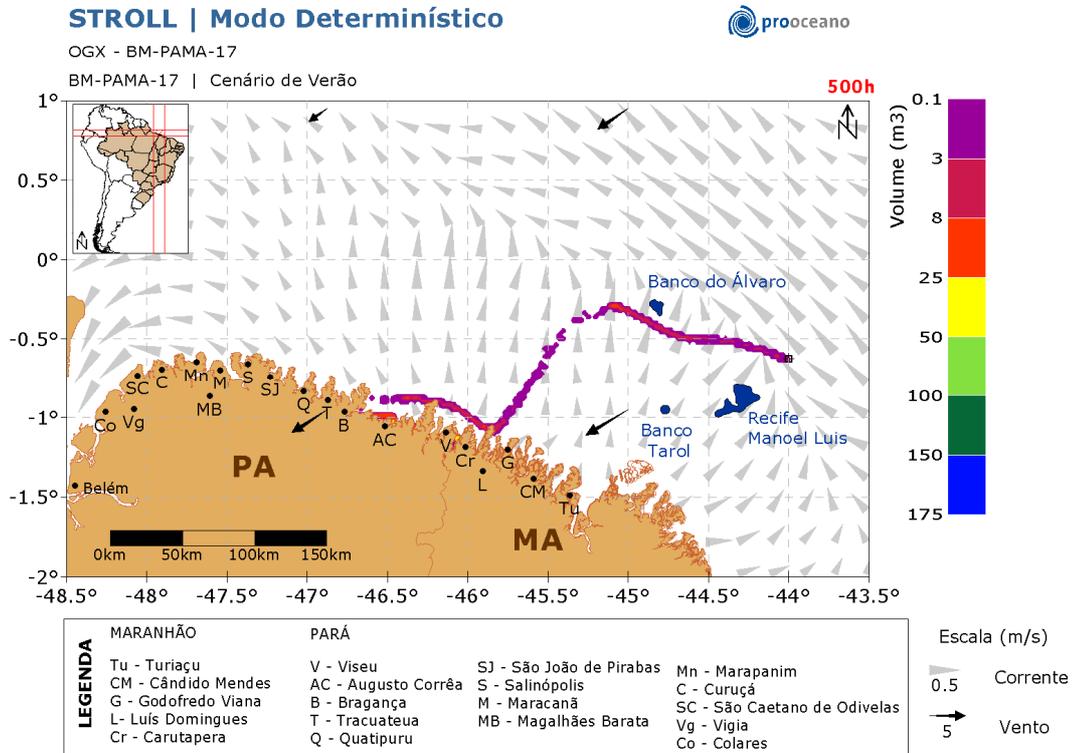


Figura 44: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 500 horas de simulação.

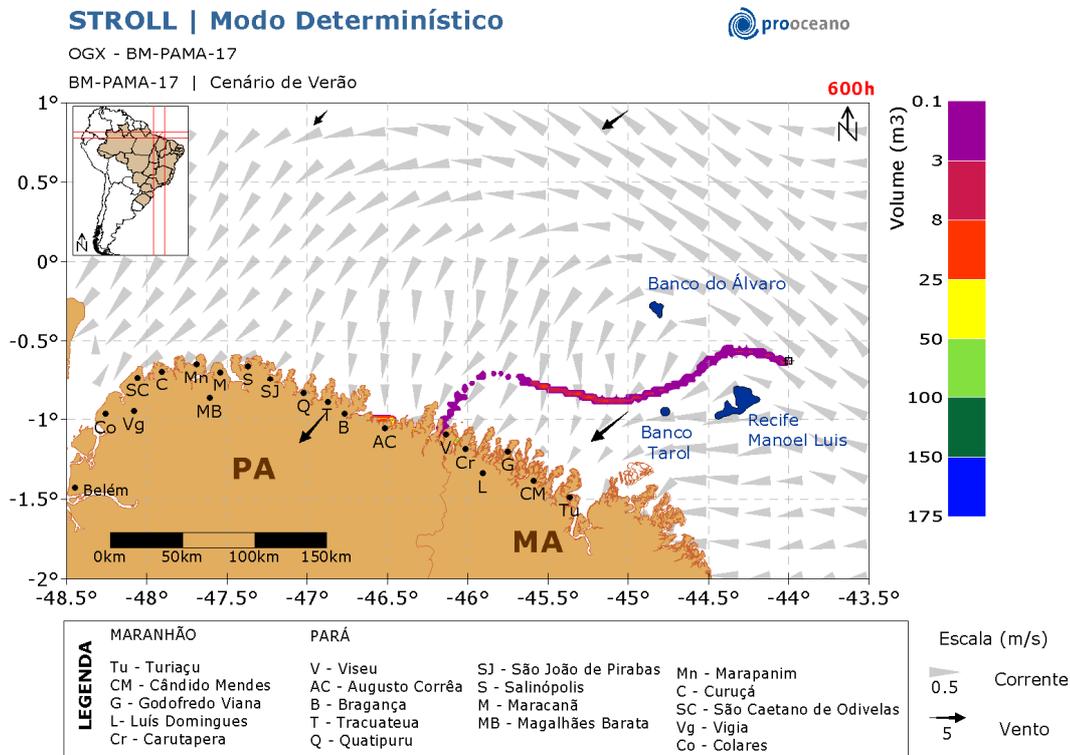


Figura 45: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 600 horas de simulação.

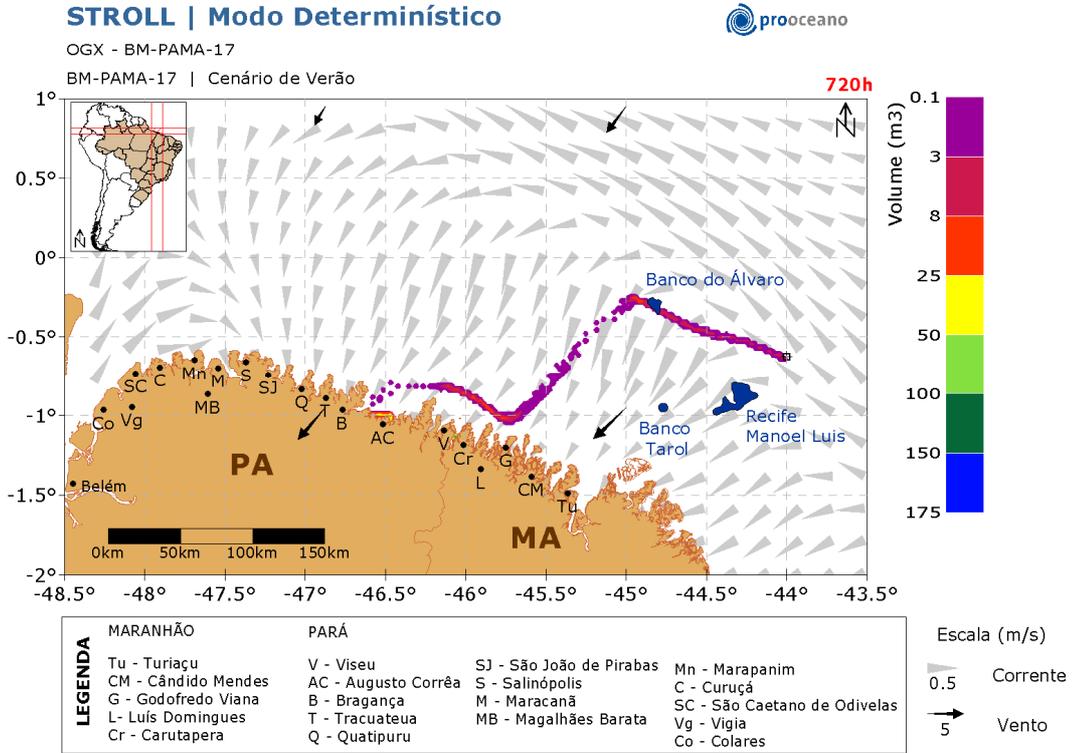


Figura 46: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 720 horas de simulação.

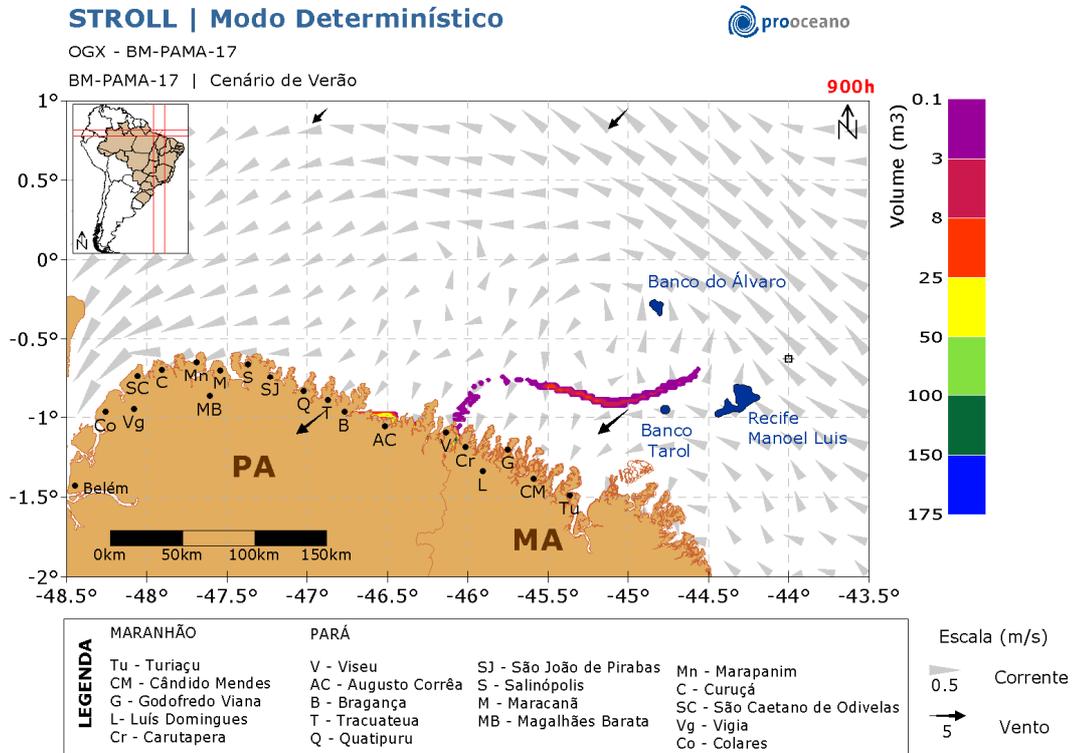


Figura 47: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 900 horas de simulação.

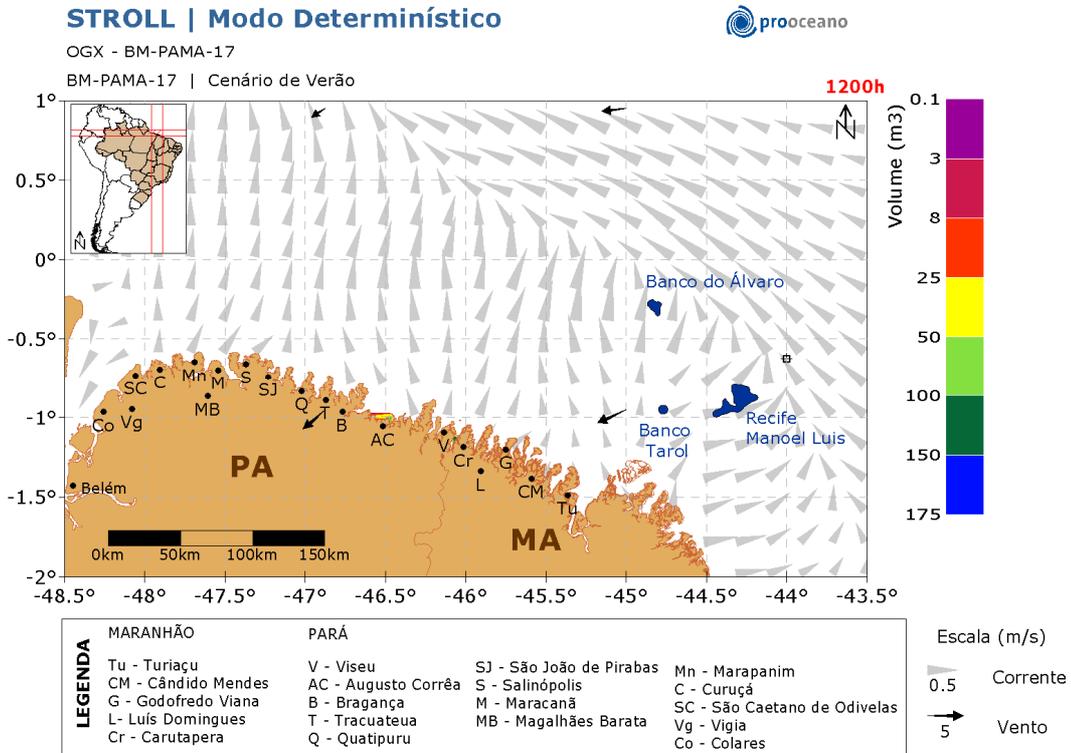


Figura 48: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 1200 horas de simulação.

A deriva do óleo ocorreu rumo a oeste do poço, com o toque na costa ocorrendo 150 horas após o início do vazamento, na região da divisa entre os estados do Pará e Maranhão. Em 1200 horas o óleo atingiu desde Luis Domingues - MA até Tracuateua - PA.

No gráfico (Figura 49), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo dessa simulação.

Observa-se que, após a chegada da primeira parcela de óleo à costa (150 horas), o volume acumulado aumenta seguindo a variação de maré, principal forçante sobre a plataforma nesta região. Após 980 horas, o óleo remanescente encontra-se na costa em sua totalidade (3.664 m³).

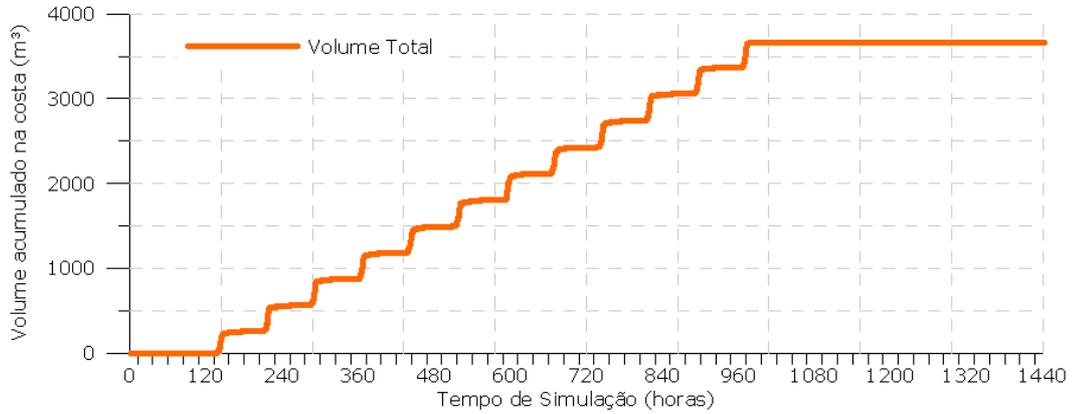


Figura 49: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória de pior caso no cenário de verão.

Na Figura 50 à Figura 62 serão apresentados os resultados do modo determinístico para o cenário de verão de condições meteo-oceanográficas frequentes.

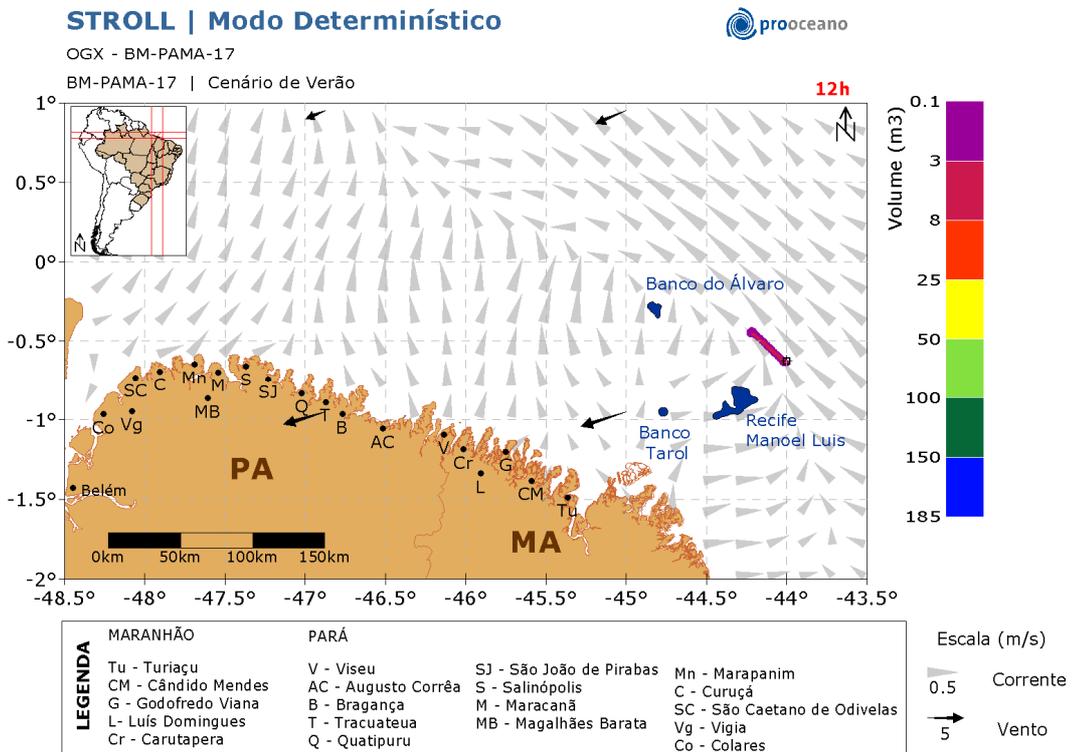


Figura 50: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 12 horas de simulação.

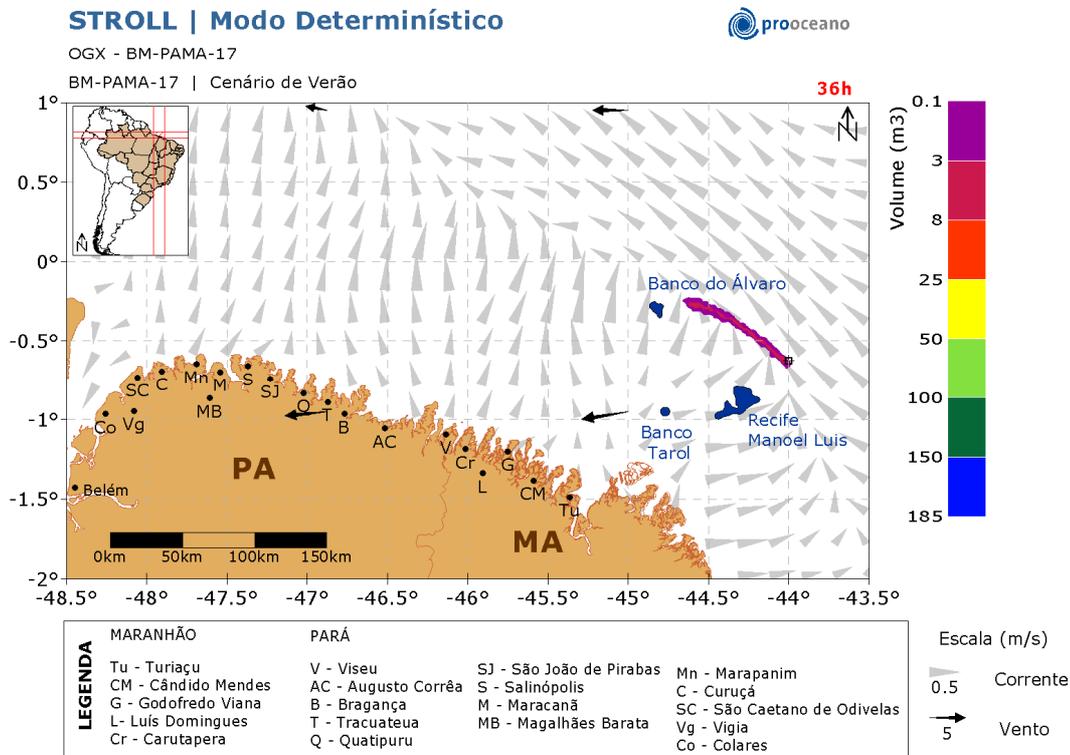


Figura 51: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 36 horas de simulação.

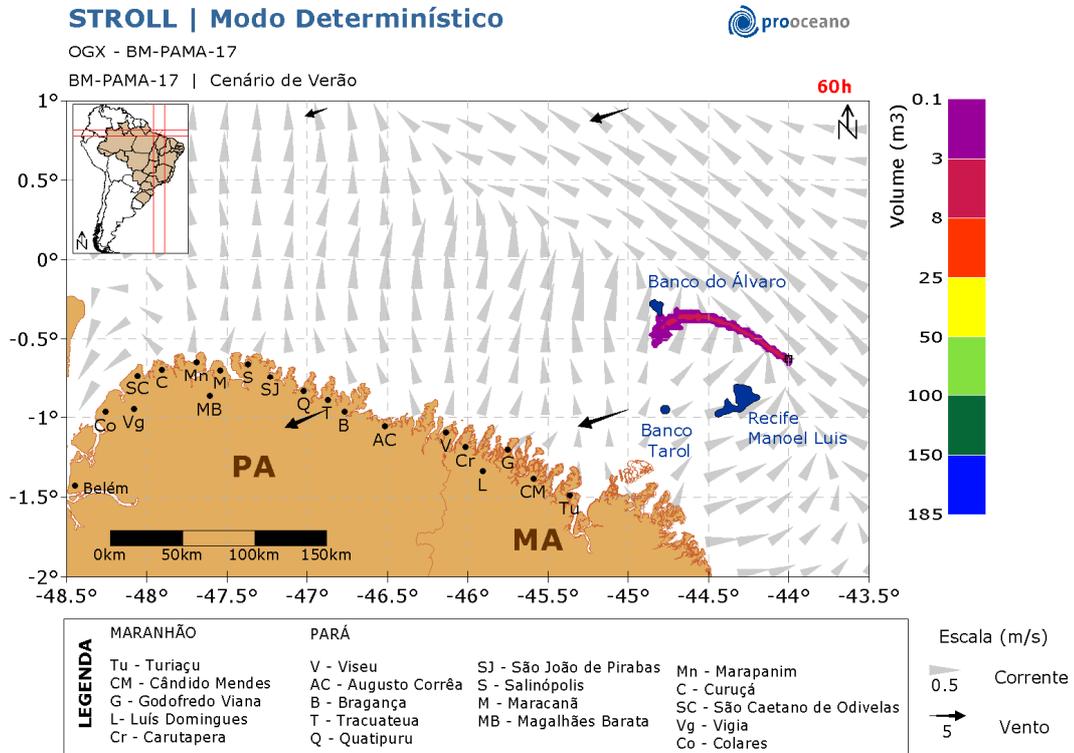


Figura 52: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 60 horas de simulação.

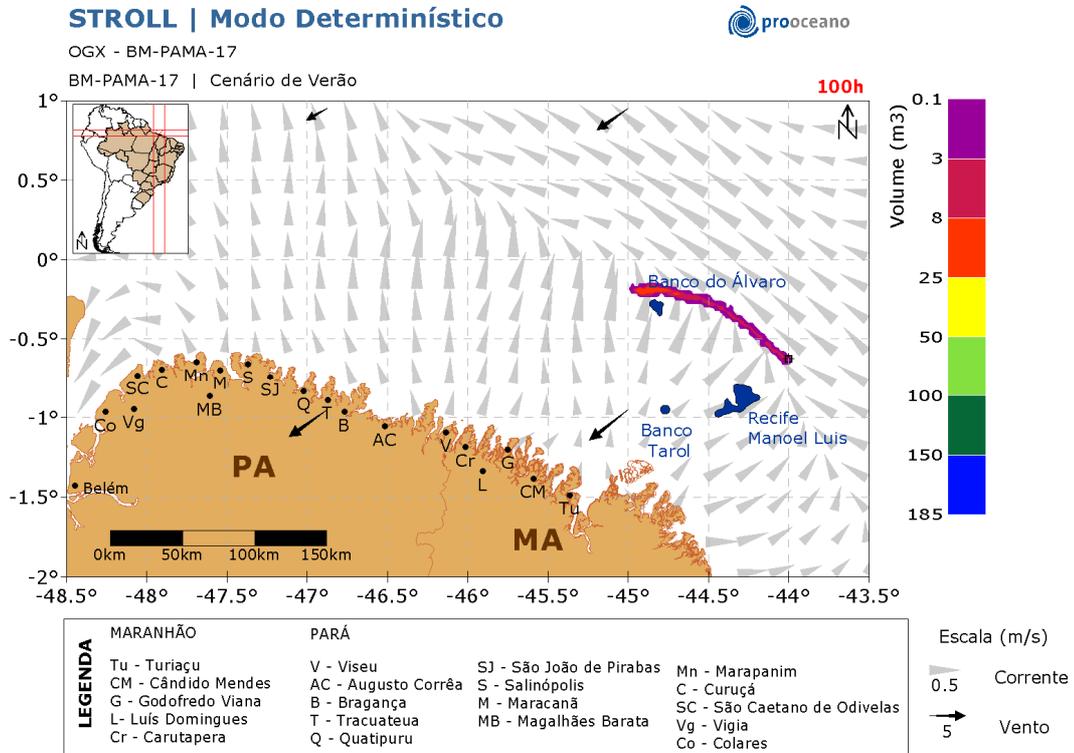


Figura 53: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 100 horas de simulação.

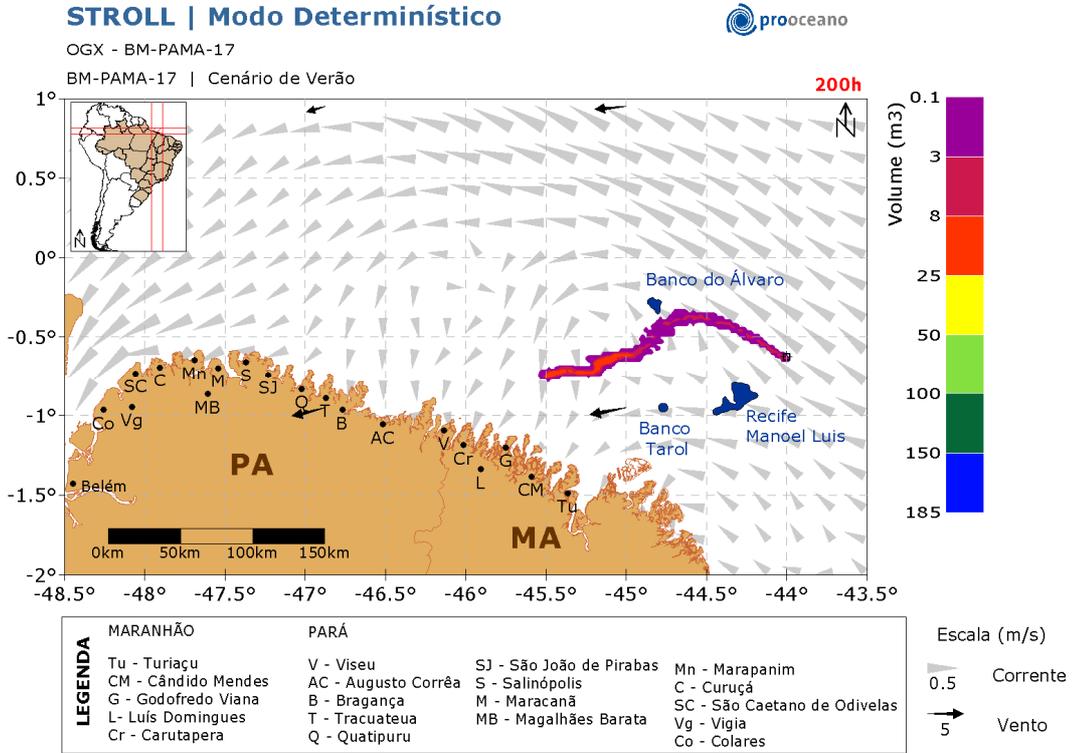


Figura 54: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 200 horas de simulação.

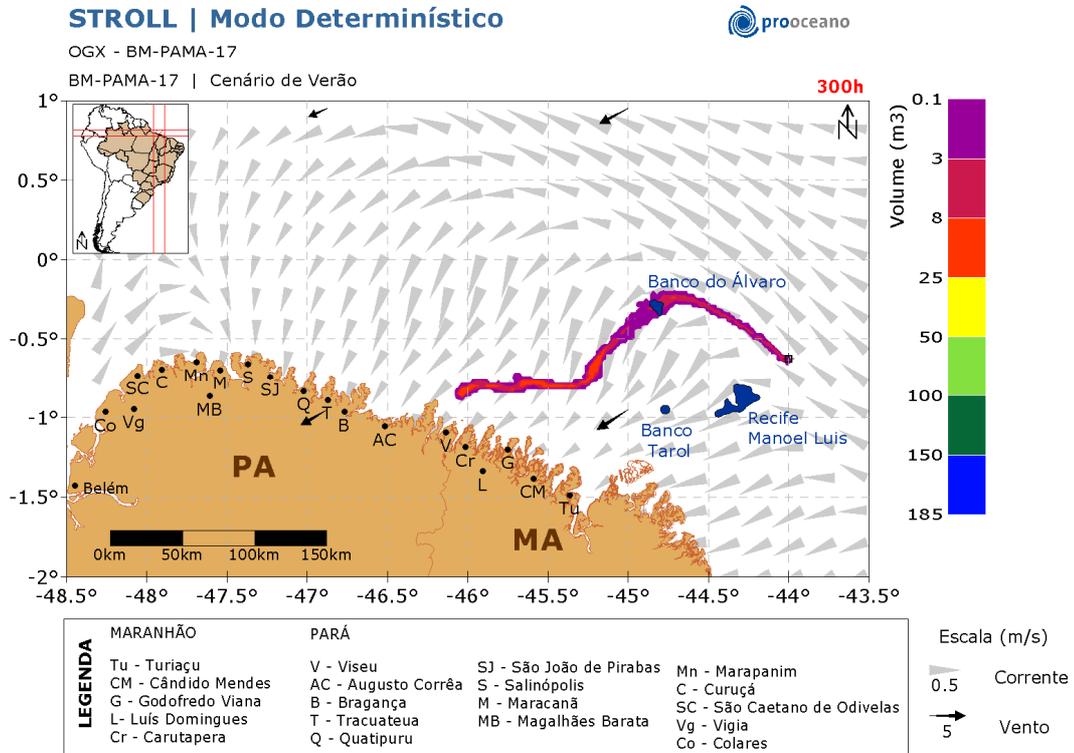


Figura 55: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 300 horas de simulação.

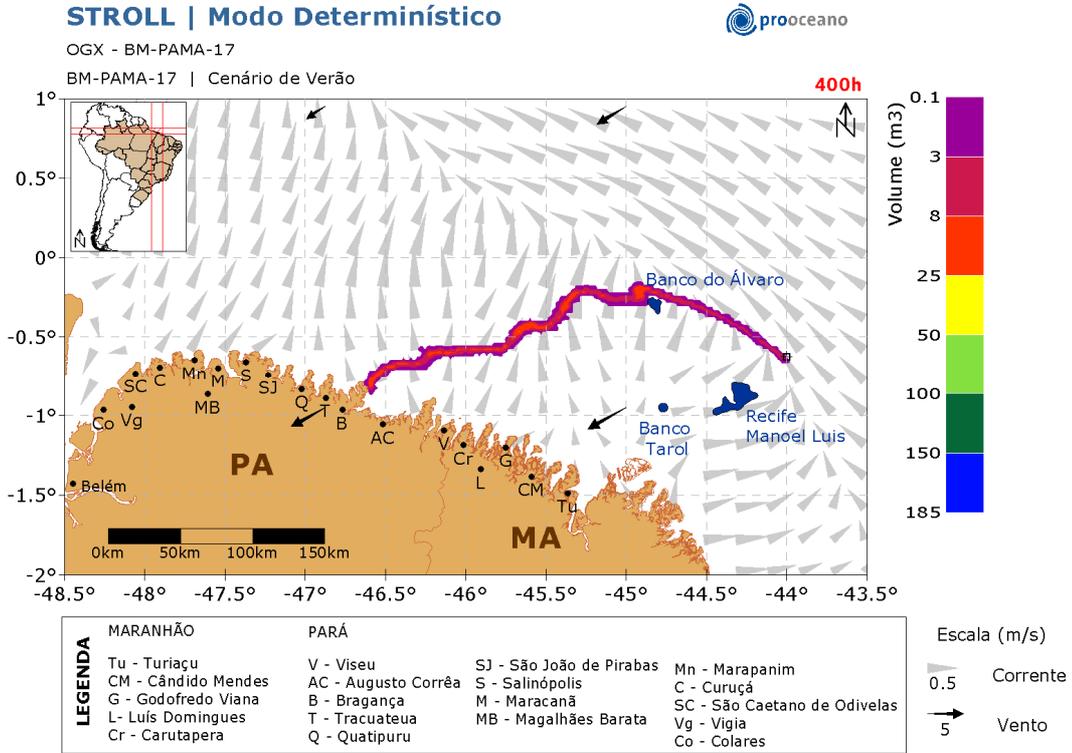


Figura 56: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 400 horas de simulação.

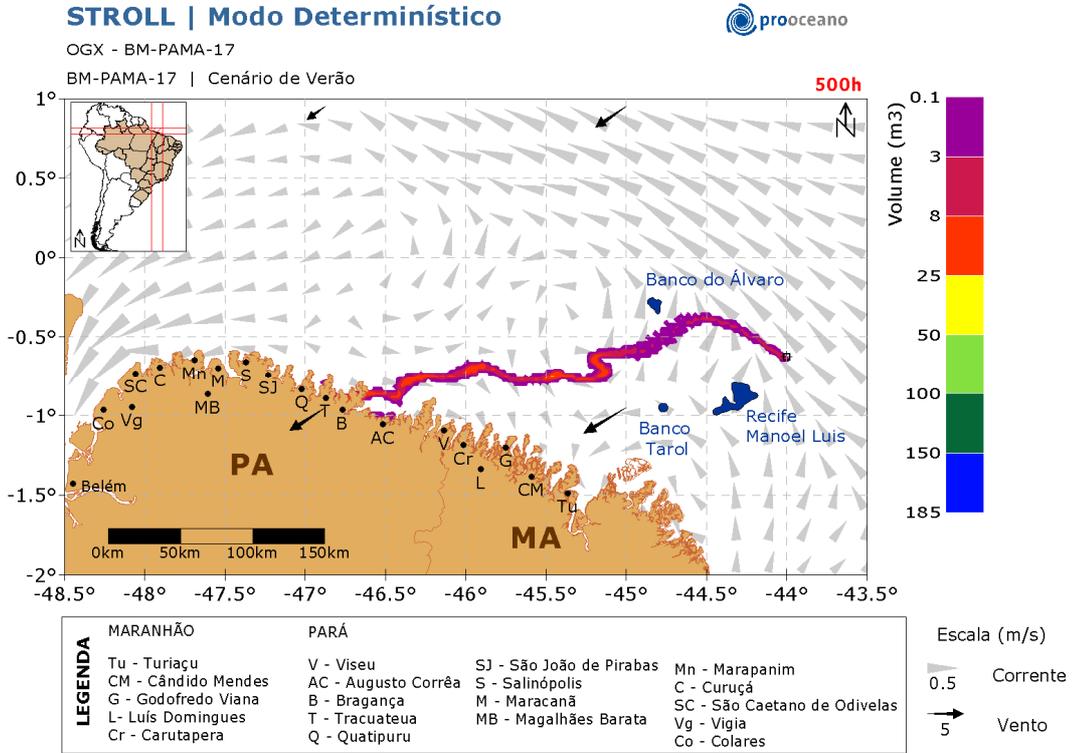


Figura 57: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 500 horas de simulação.

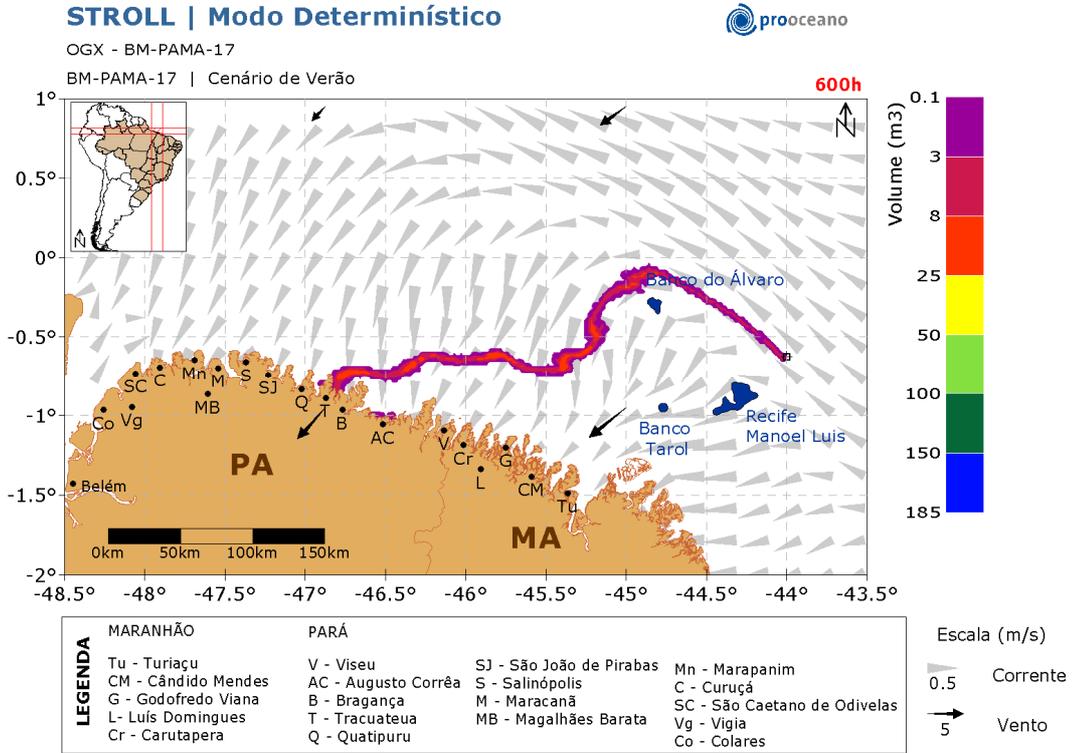


Figura 58: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 600 horas de simulação.

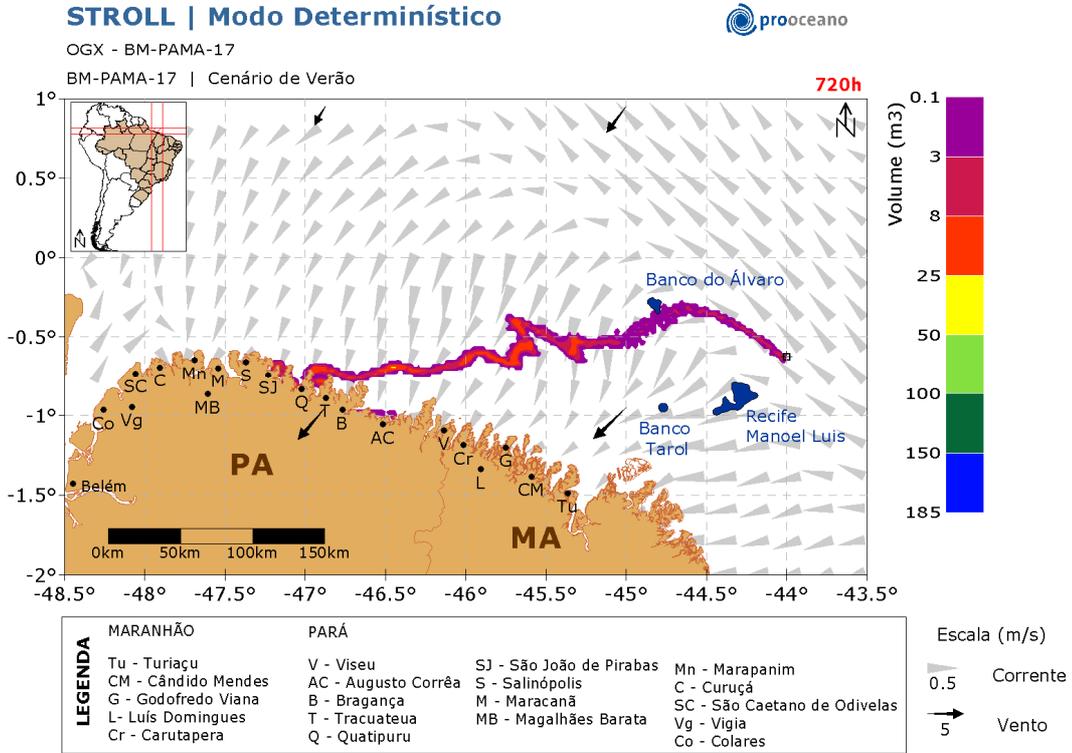


Figura 59: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 720 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Verão

900h

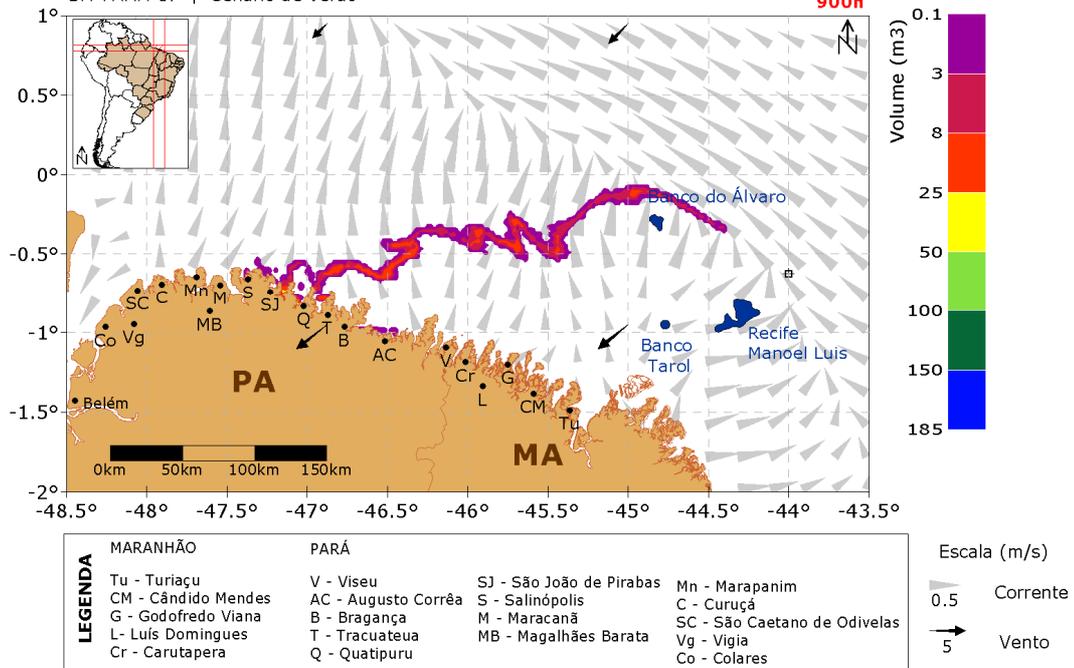


Figura 60: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 900 horas de simulação.

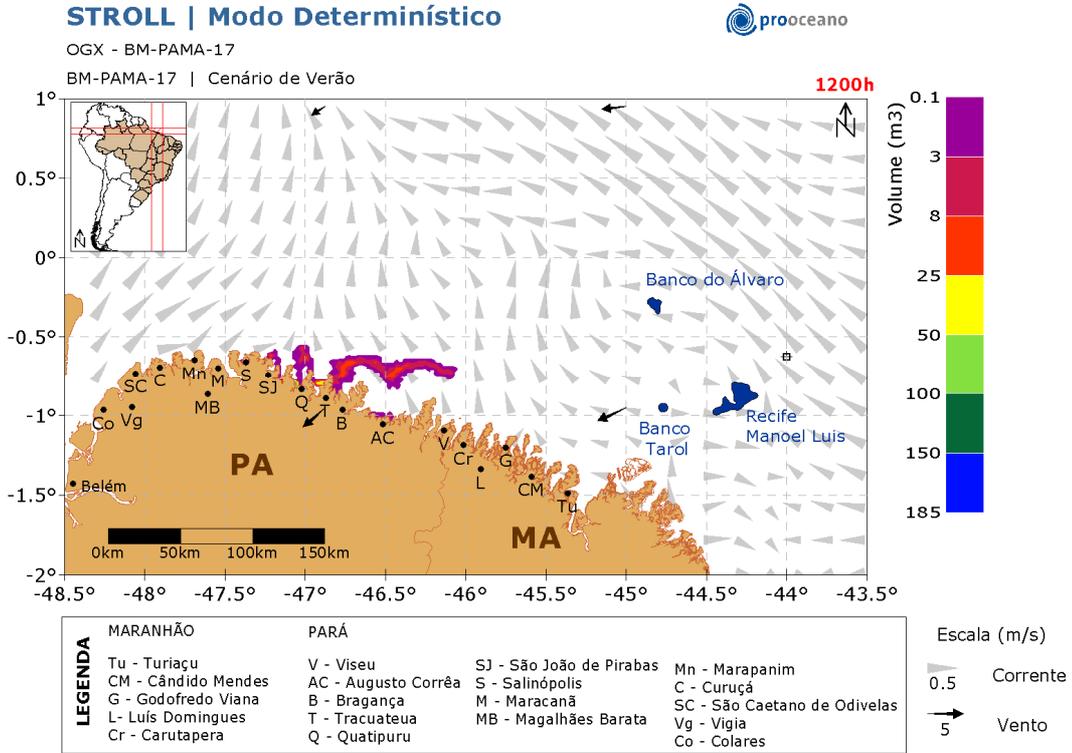


Figura 61: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 1200 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Verão

1440h

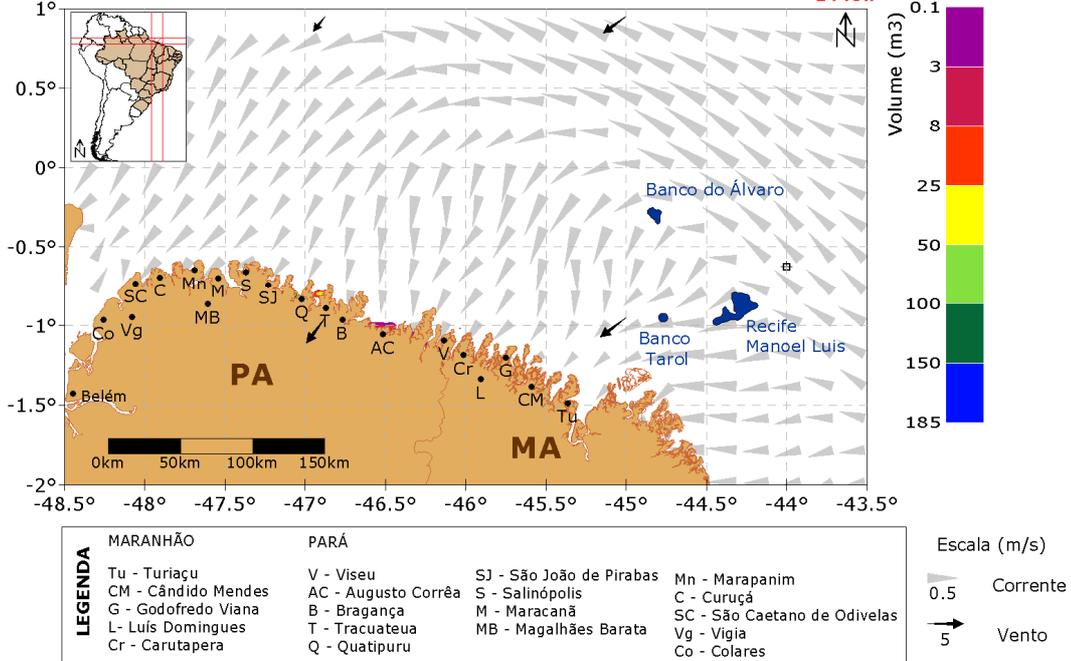


Figura 62: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de verão, após 1440 horas de simulação.

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 óleo começa a atingir a costa am 470 horas, e que todo o óleo remanescente encontra-se na costa aproximadamente 1320 horas após o início da simulação.

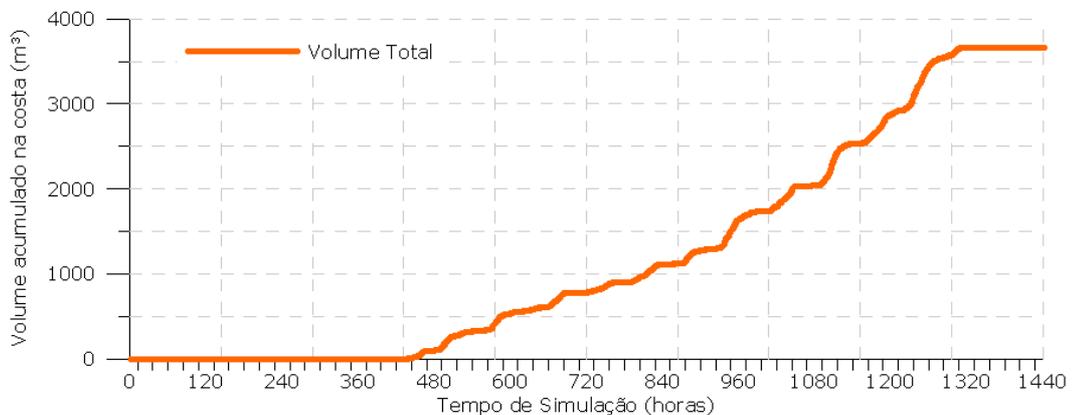


Figura 63: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas freqüentes no cenário de verão.

VI.2.2. Inverno

Na Figura 64 à Figura 74 serão apresentados os resultados do modo determinístico para o cenário de inverno de pior caso.

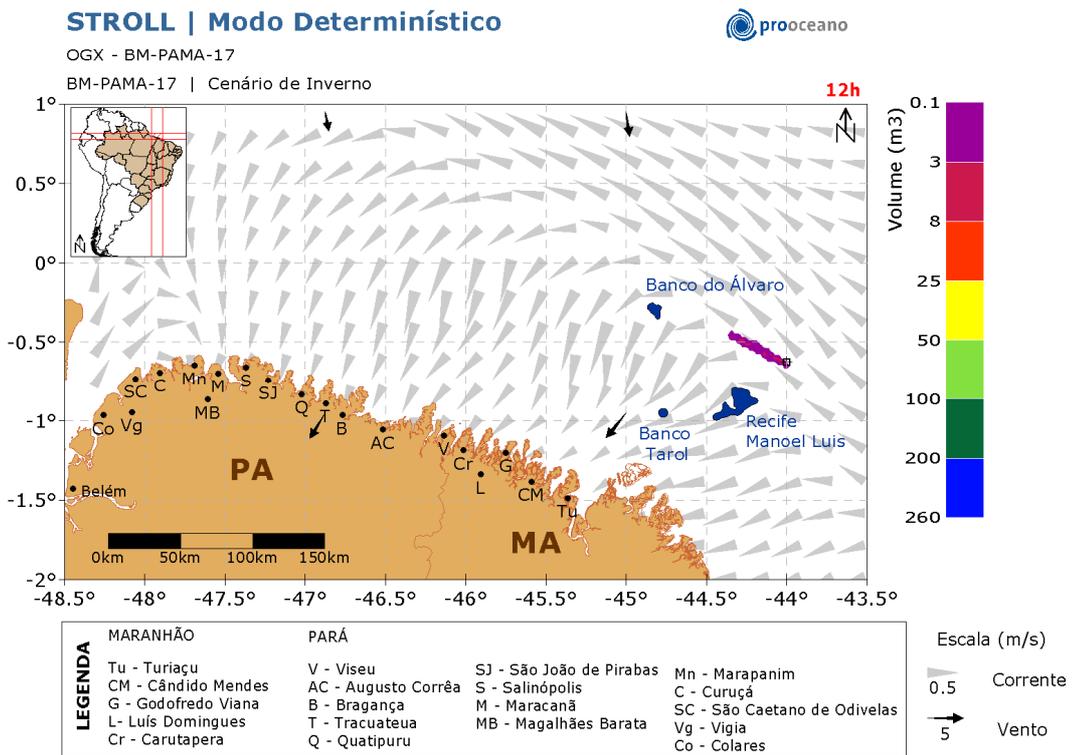


Figura 64: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.

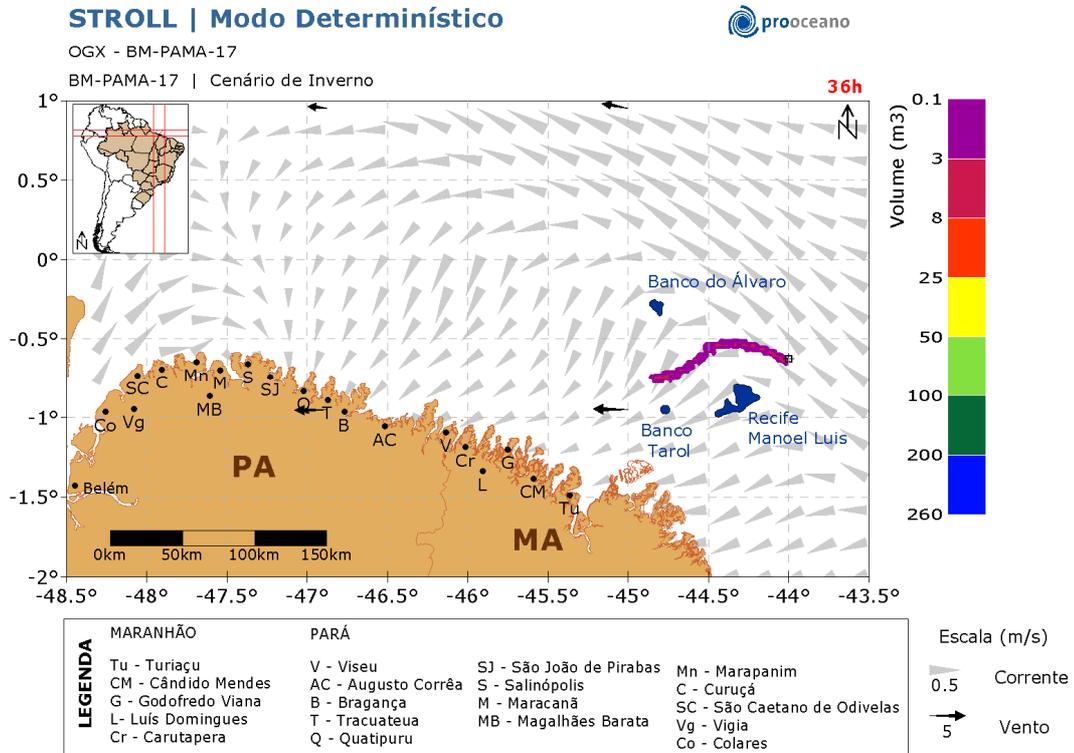


Figura 65: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

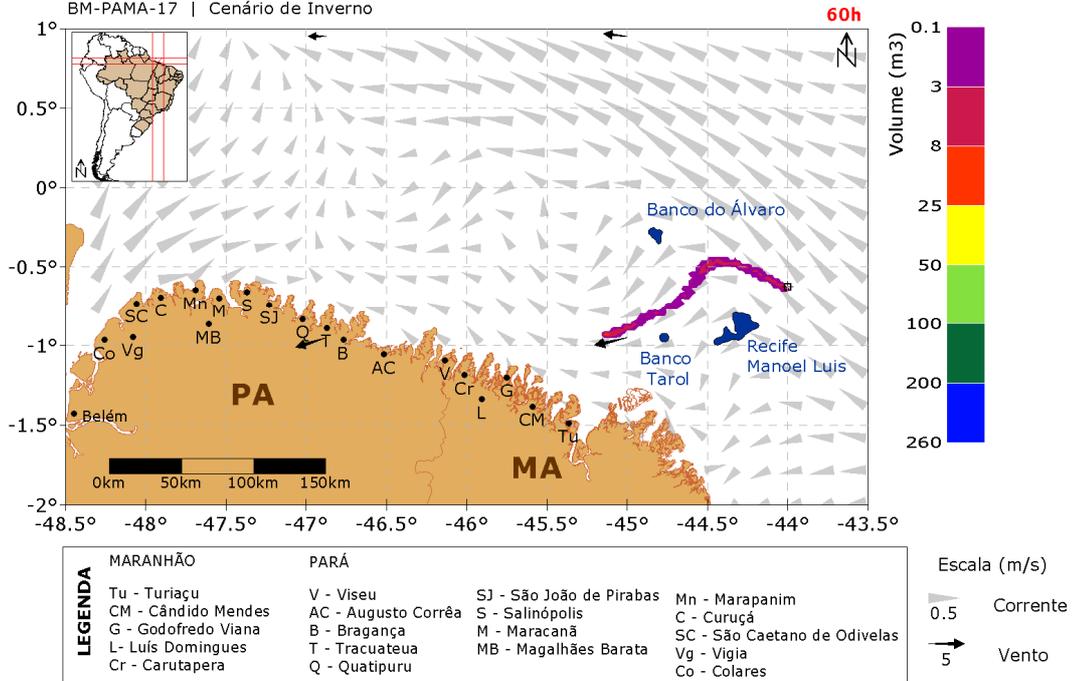


Figura 66: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.

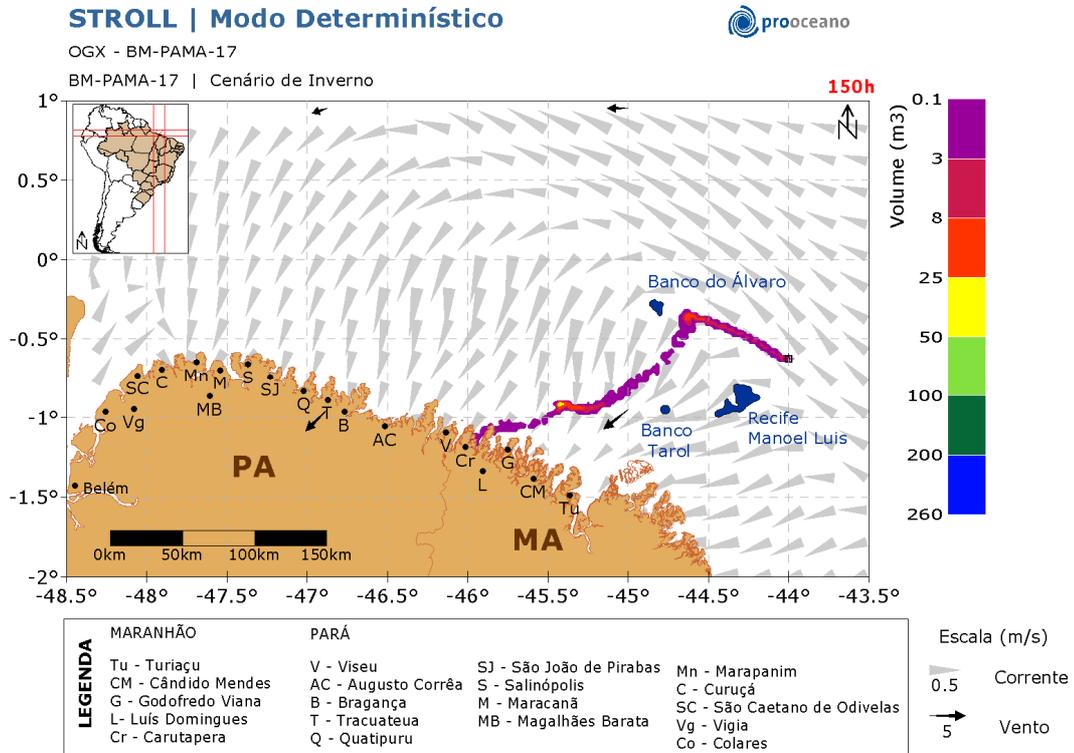


Figura 67: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 150 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

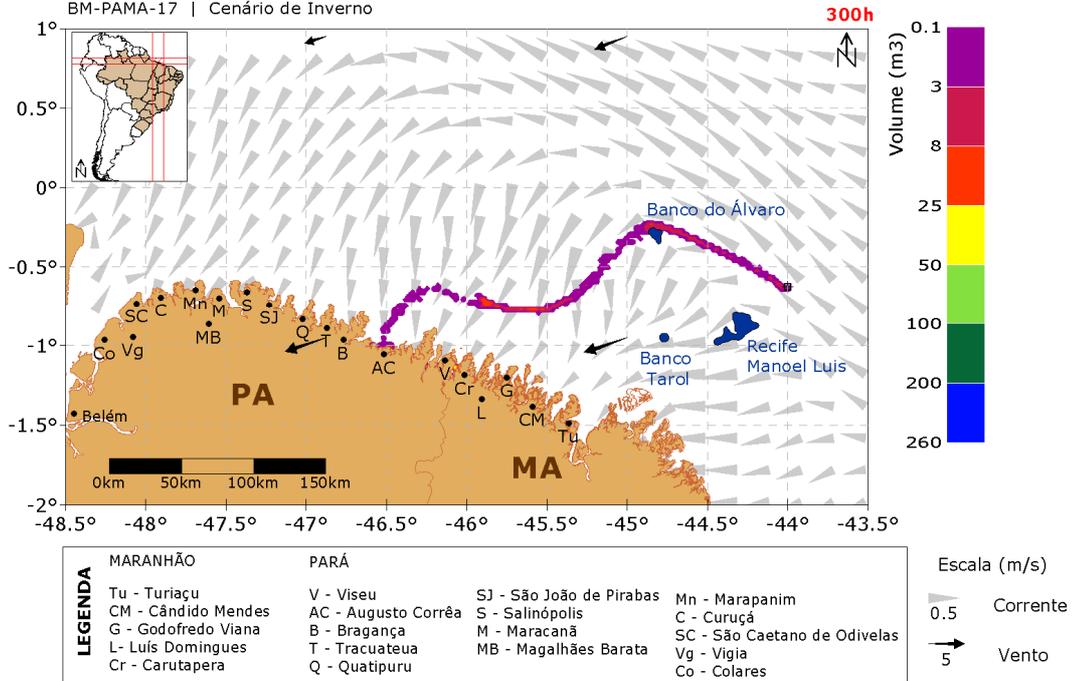


Figura 68: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 300 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

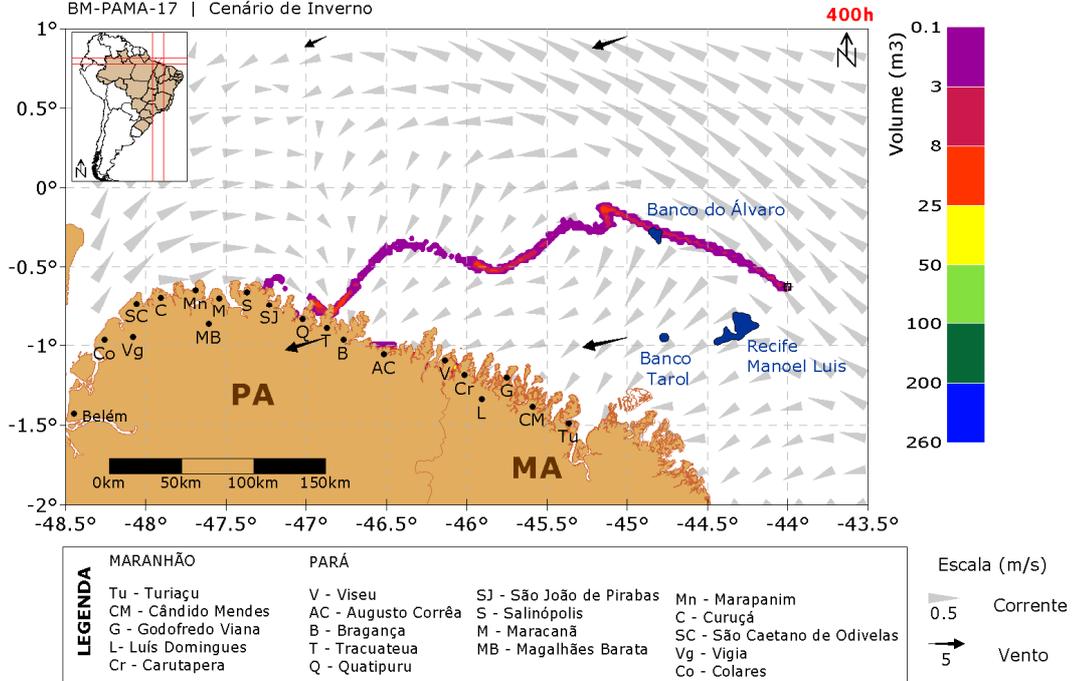


Figura 69: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 400 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

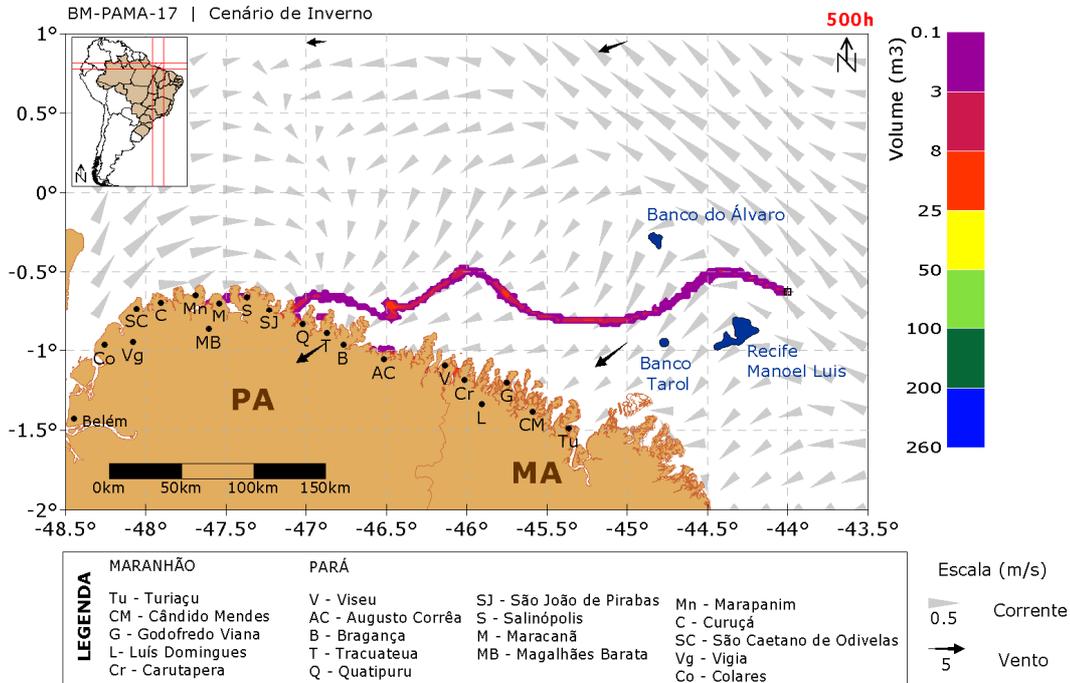


Figura 70: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 500 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

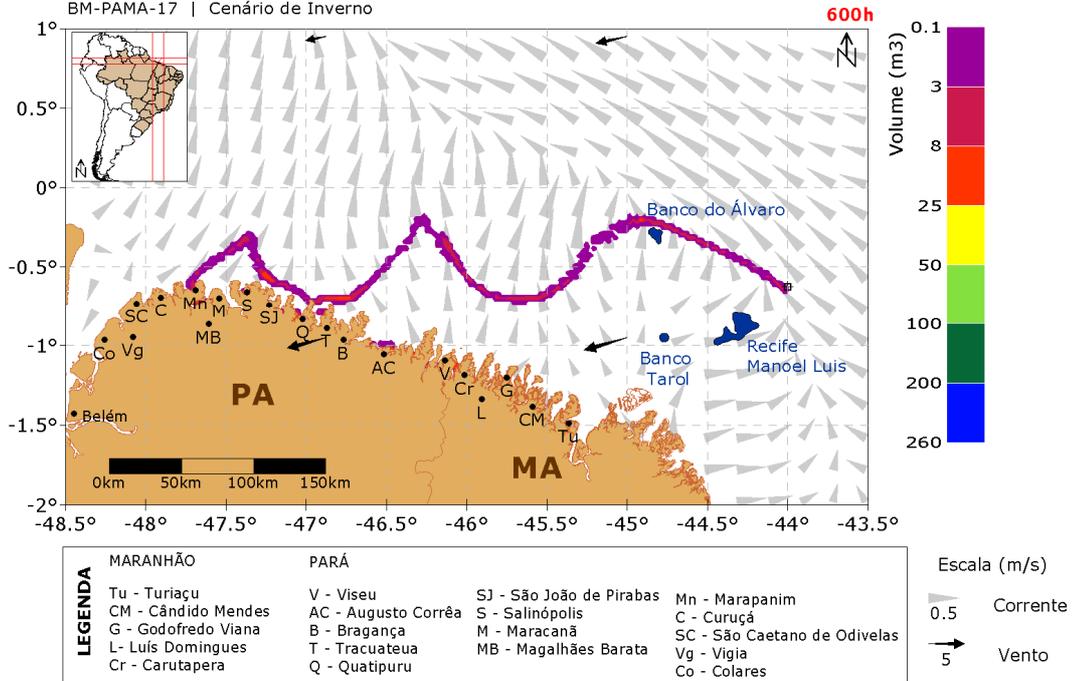


Figura 71: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 600 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

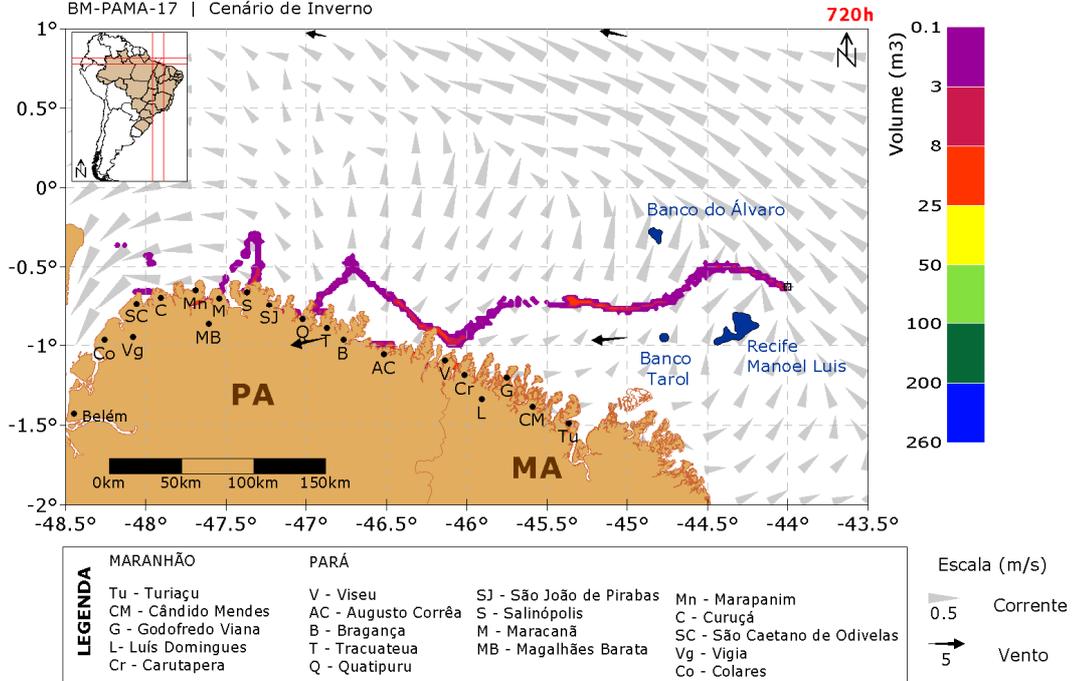


Figura 72: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 720 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

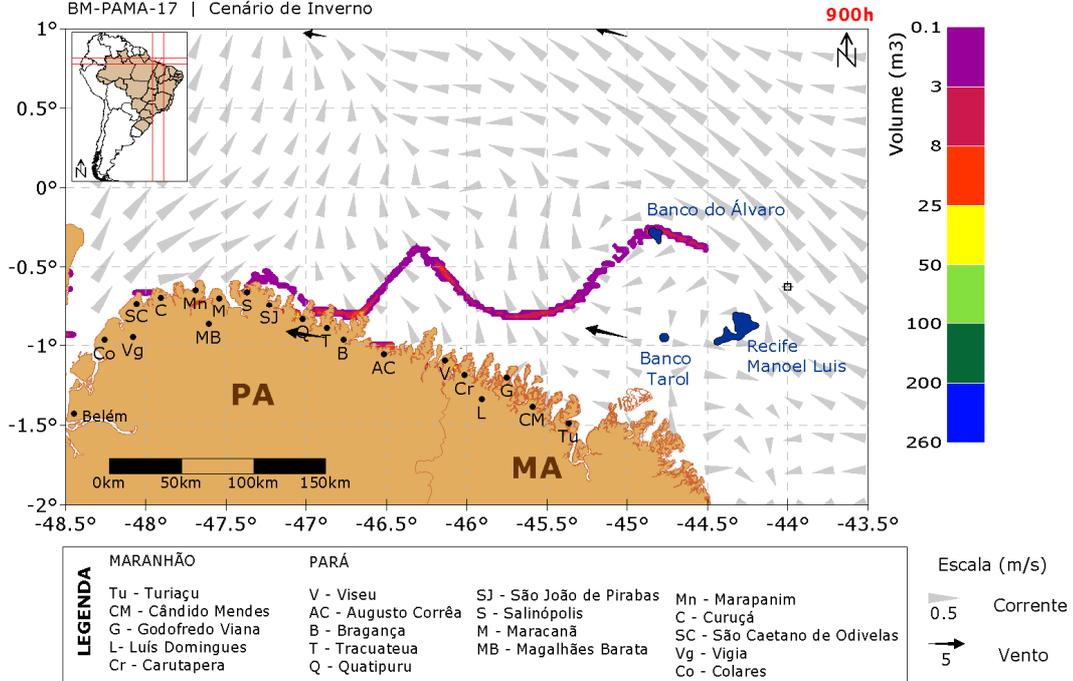


Figura 73: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 900 horas de simulação.

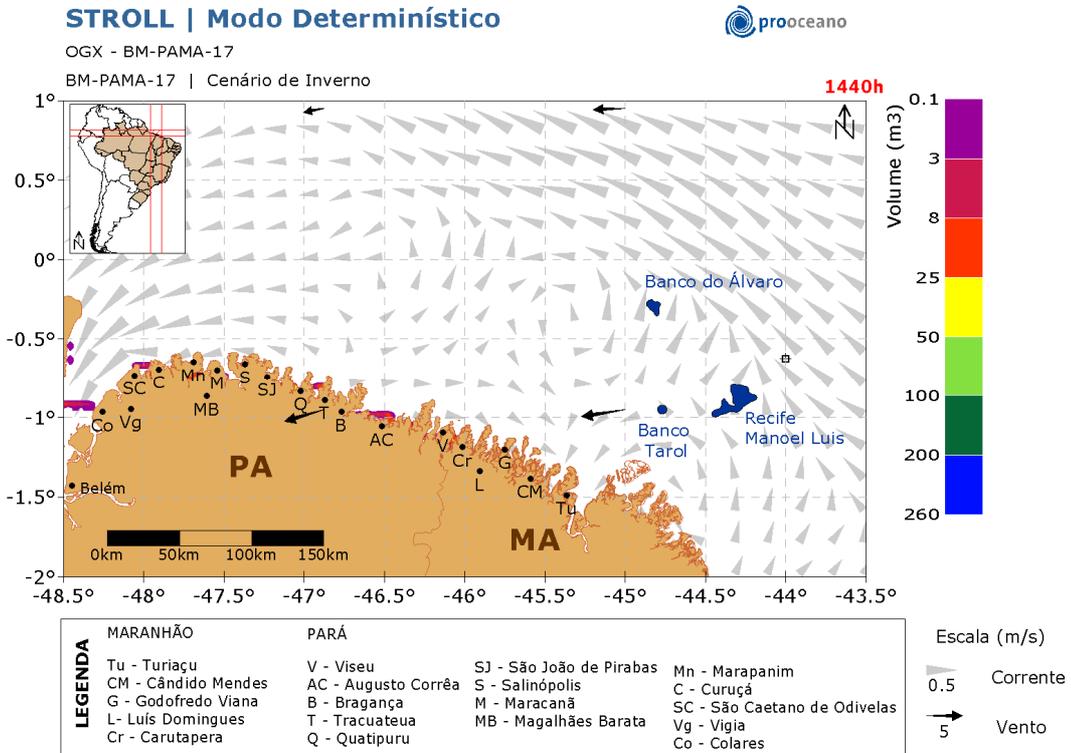


Figura 74: Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 1440 horas de simulação.

O óleo derivou sempre rumo a oeste do poço, em 150 horas já houve toque nos municípios de Luis Domingues e Carutapera, estado do Maranhão. Em 1200 horas o óleo atingiu desde a Ilha de Marajó até Luis Domingues no estado do Maranhão.

No gráfico (Figura 75), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo da simulação.

Observa-se que com 120 horas de vazamento o óleo começa a chegar na costa, e que o volume de óleo acumulado na costa atinge seu valor máximo próximo a 1.070 horas.

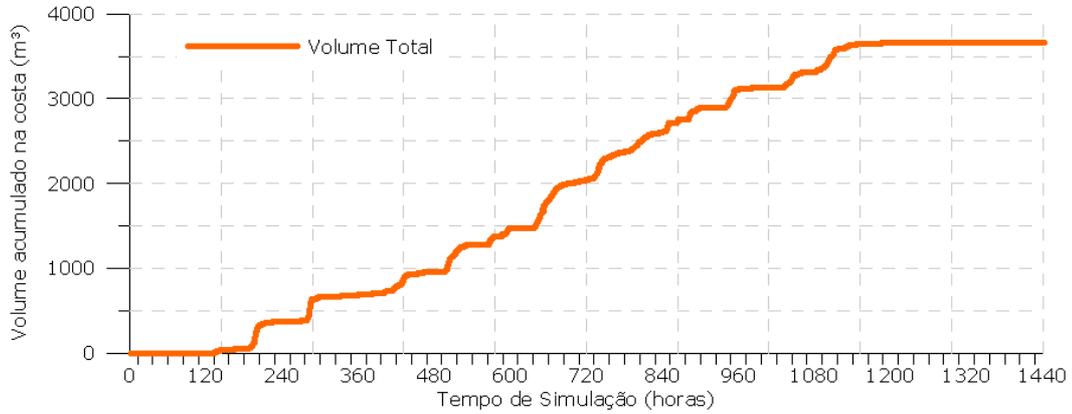


Figura 75: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória de pior caso no cenário de inverno.

Na Figura 76 à Figura 88 serão apresentados os resultados do modo determinístico, para o cenário de inverno, em condições meteo-oceanográficas frequentes.

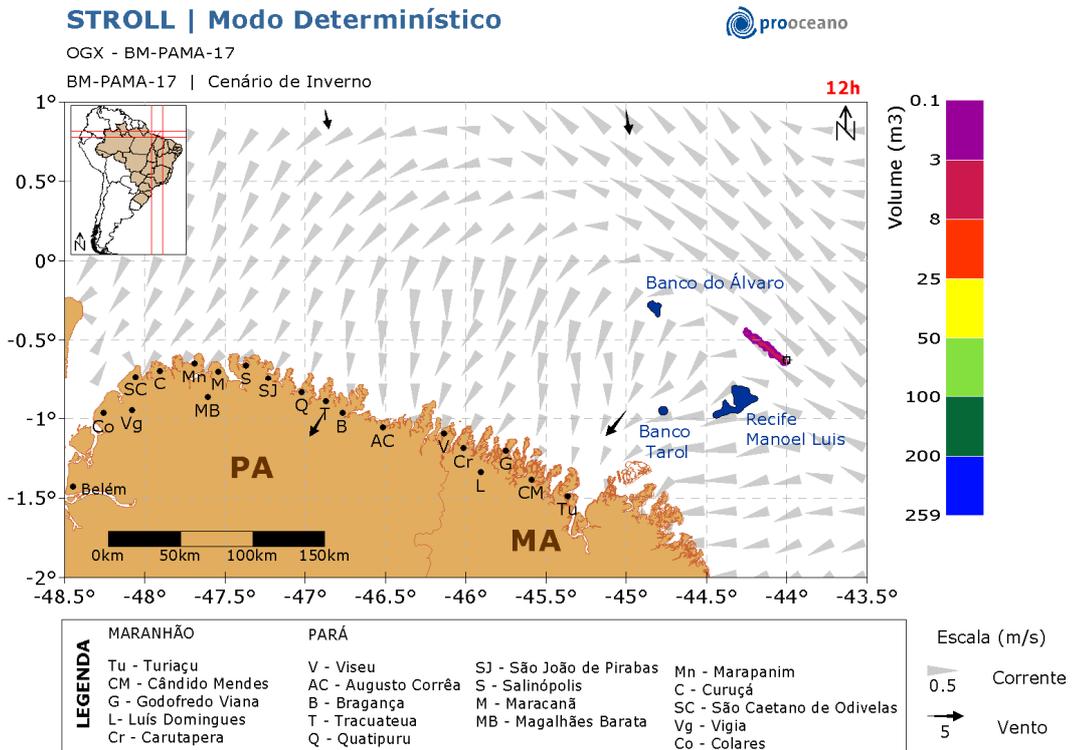


Figura 76: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

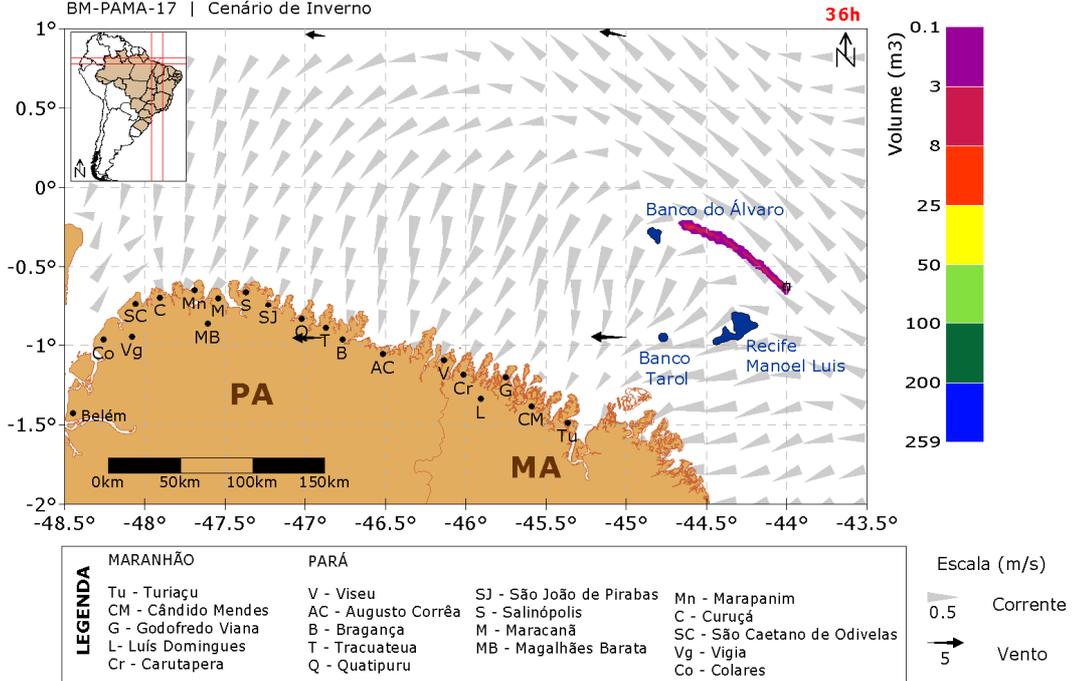


Figura 77: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.

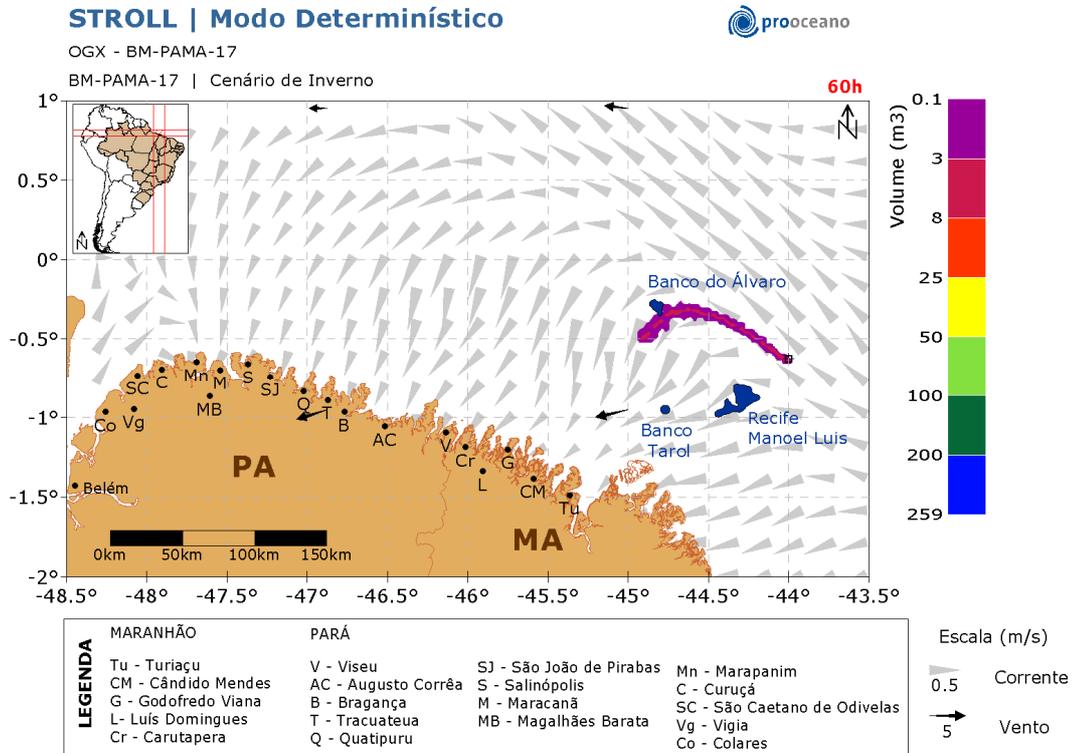


Figura 78: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.

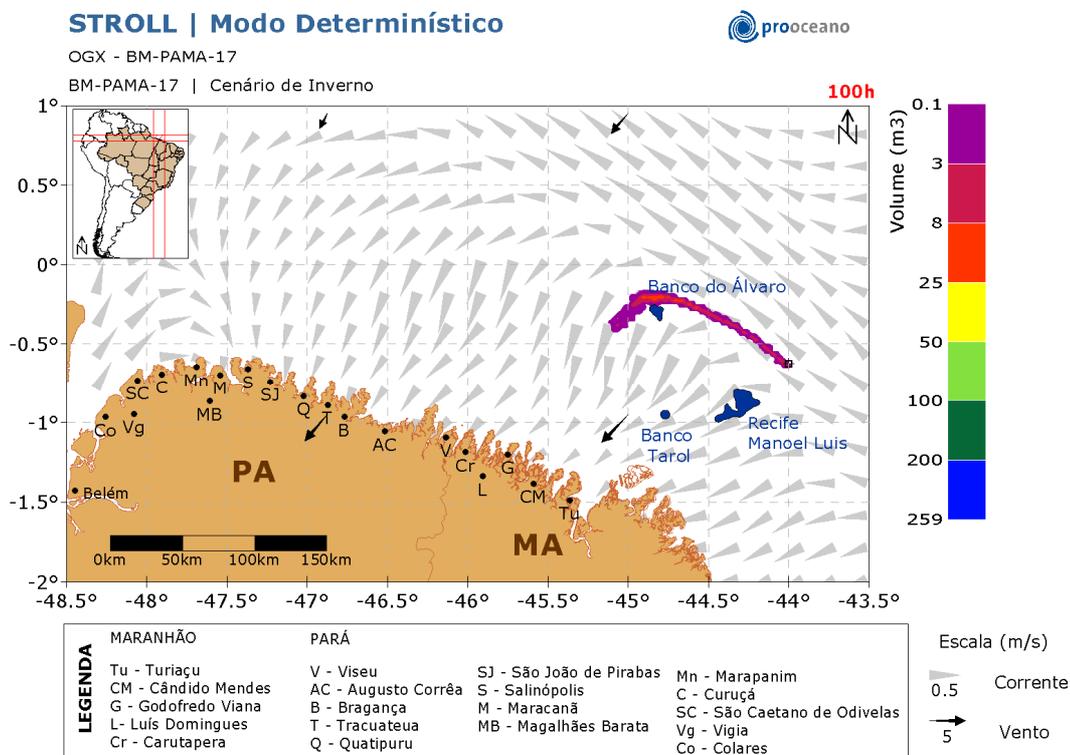


Figura 79: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 100 horas de simulação.

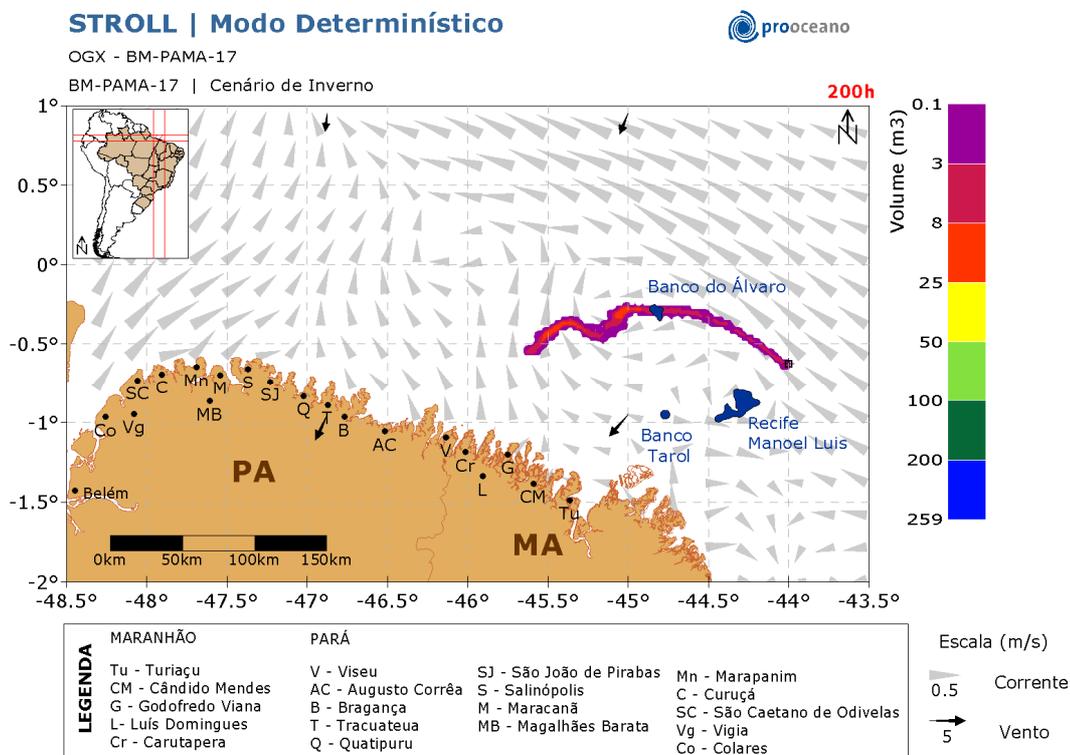


Figura 80: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 200 horas de simulação.

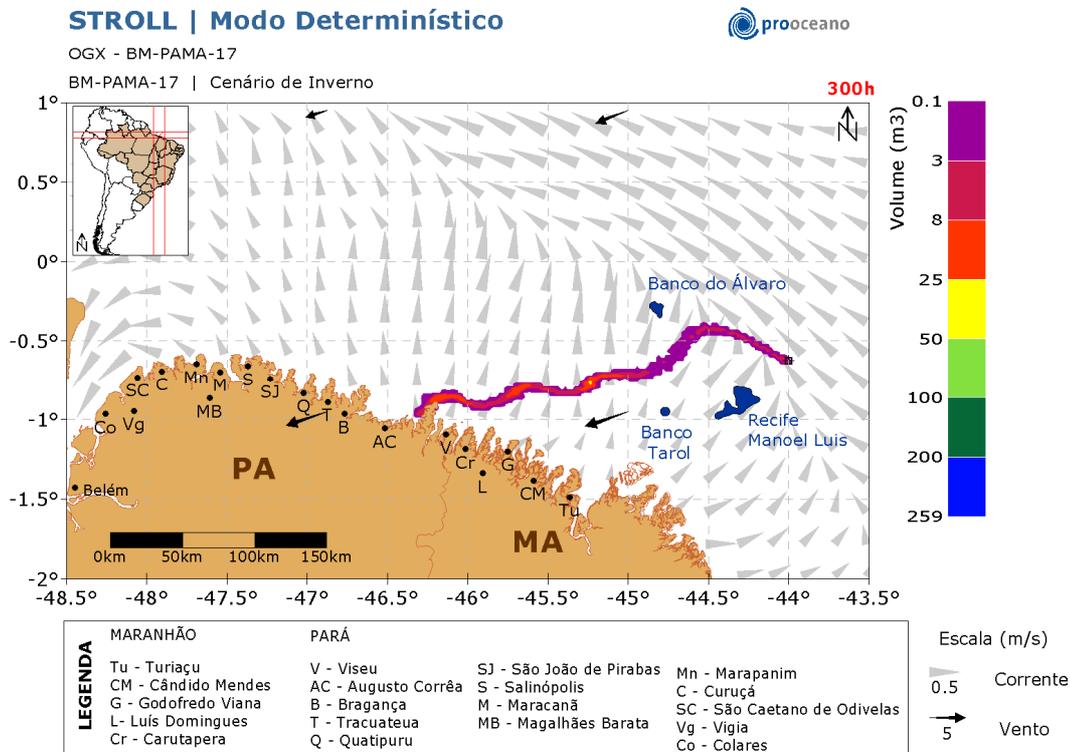


Figura 81: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 300 horas de simulação.

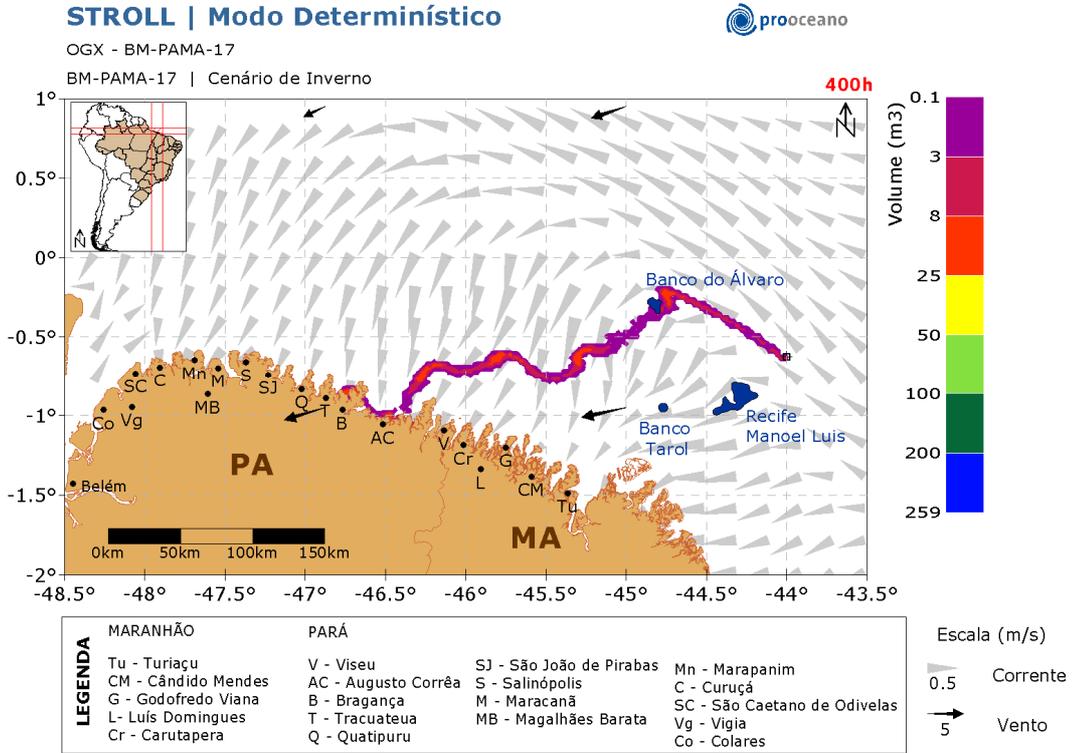


Figura 82: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 400 horas de simulação.

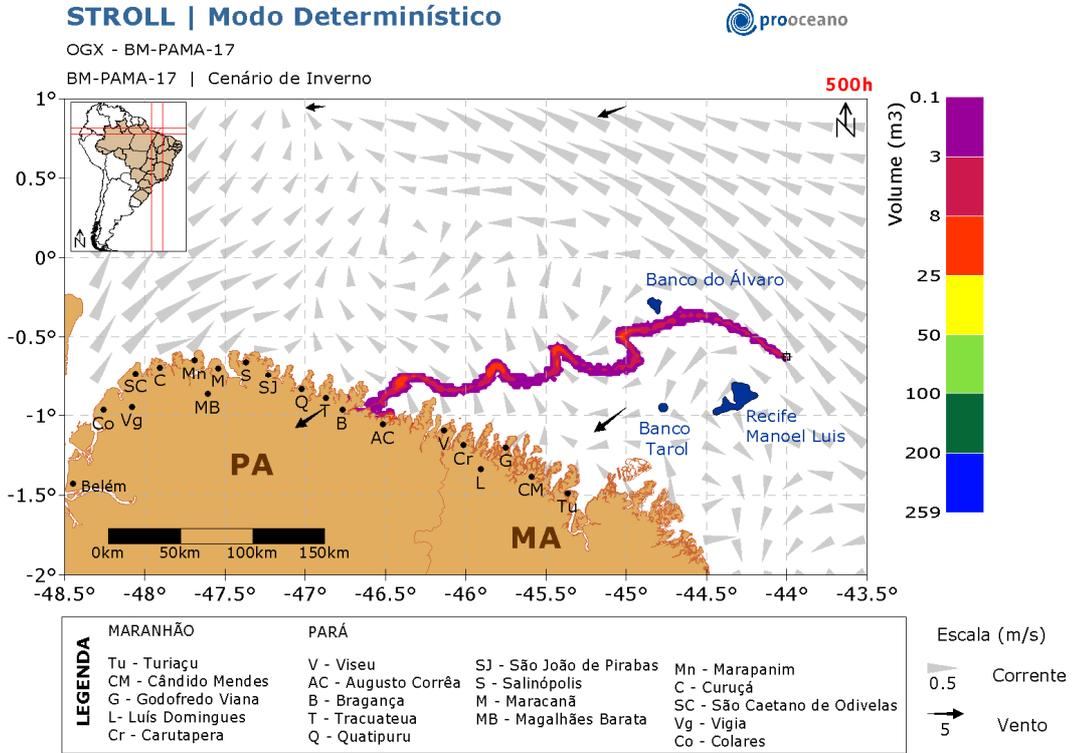


Figura 83: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 500 horas de simulação.

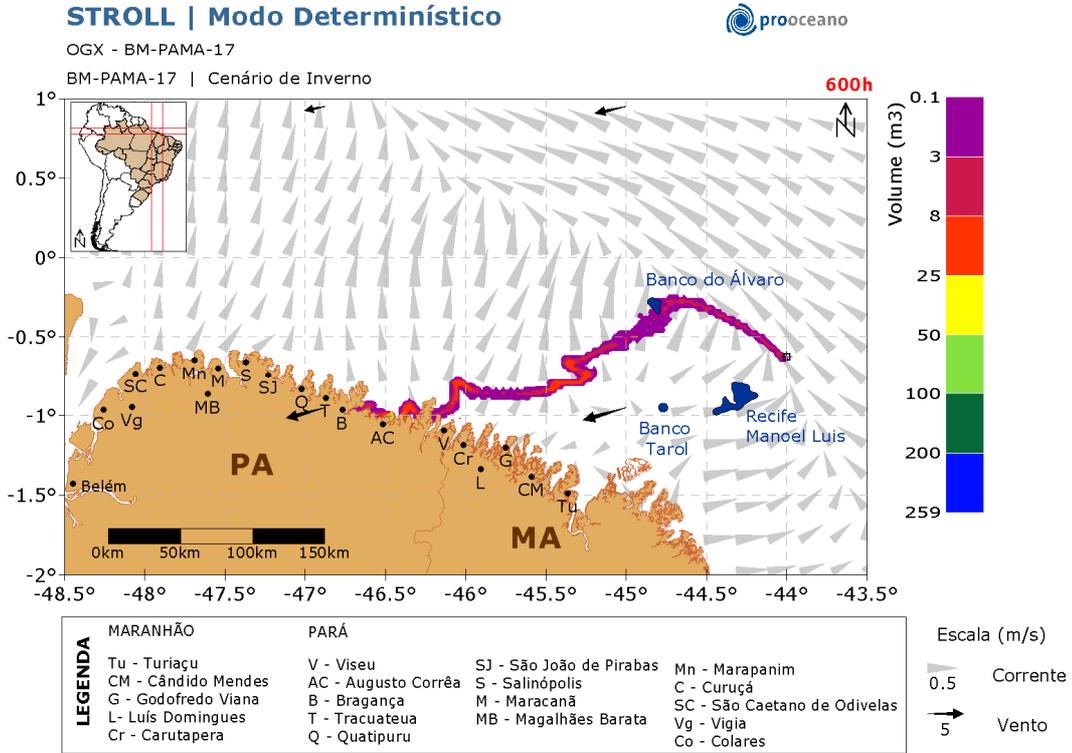


Figura 84: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 600 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

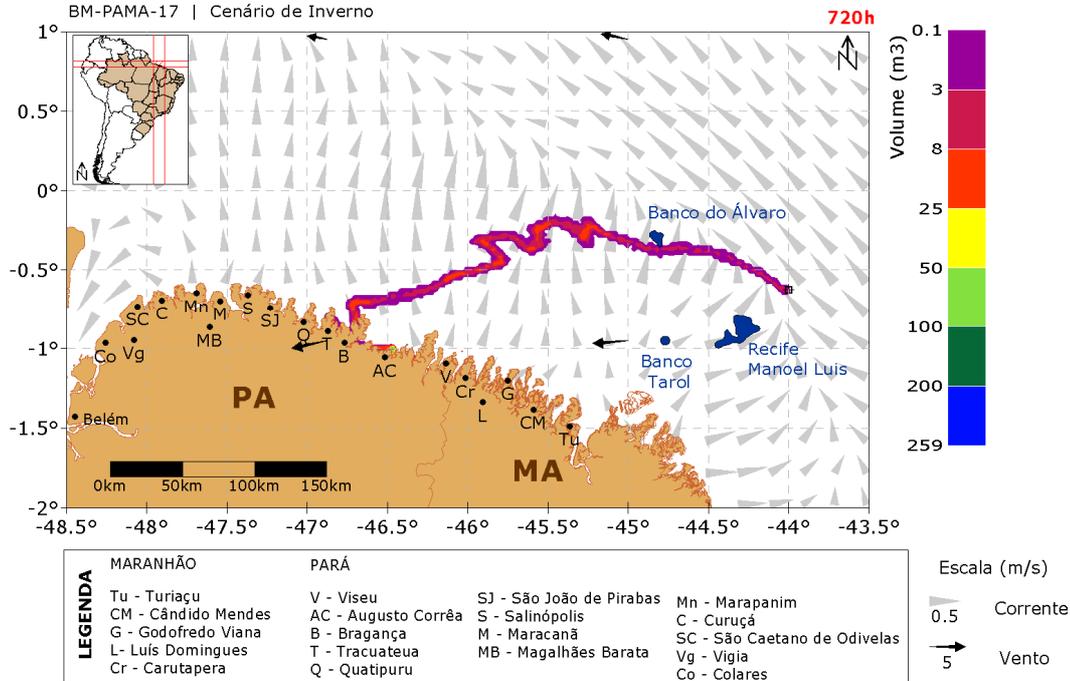


Figura 85: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 720 horas de simulação.

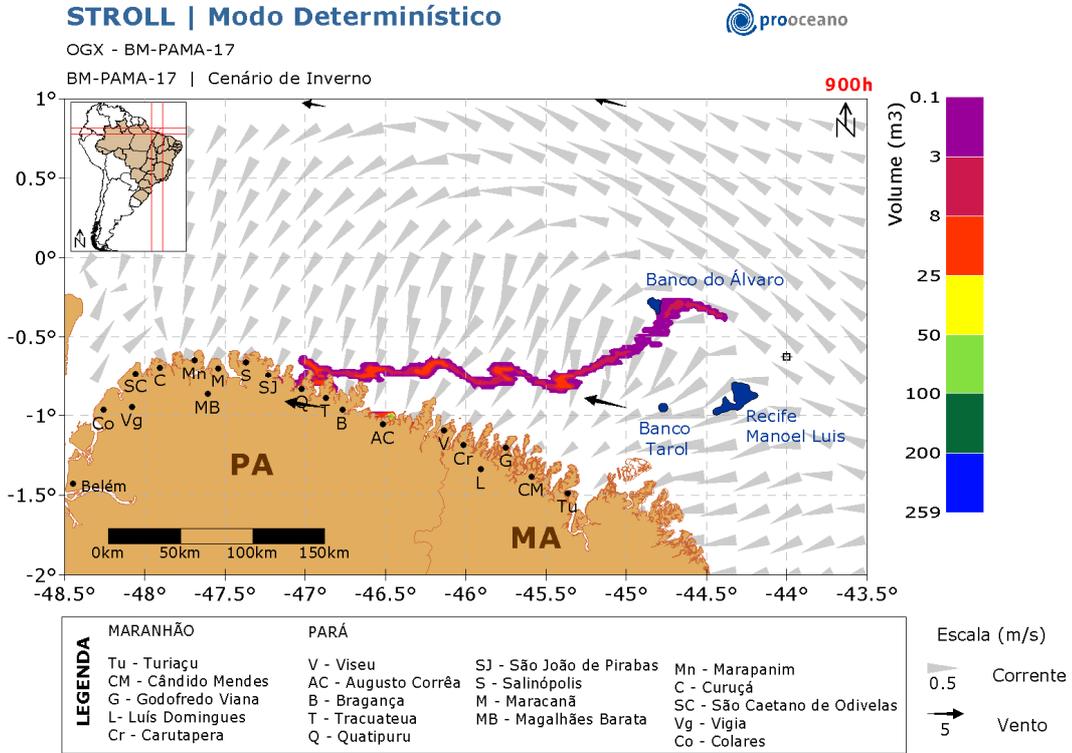


Figura 86: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 900 horas de simulação.

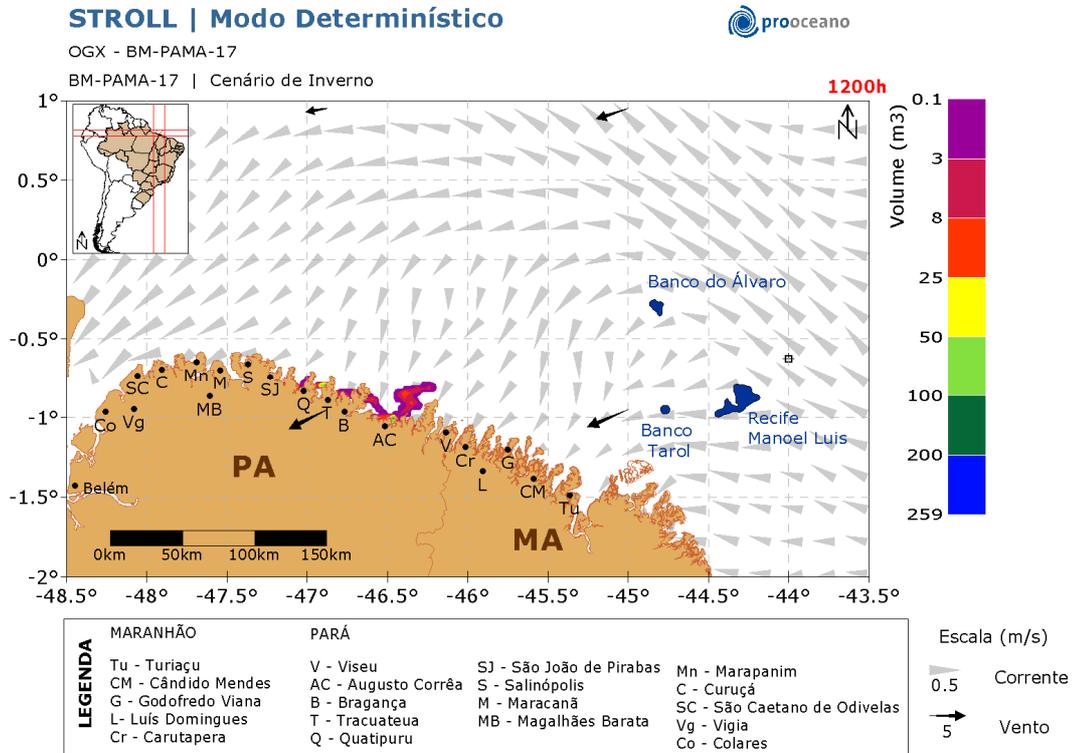


Figura 87: Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas freqüentes, cenário de inverno, após 1200 horas de simulação.

STROLL | Modo Determinístico



OGX - BM-PAMA-17

BM-PAMA-17 | Cenário de Inverno

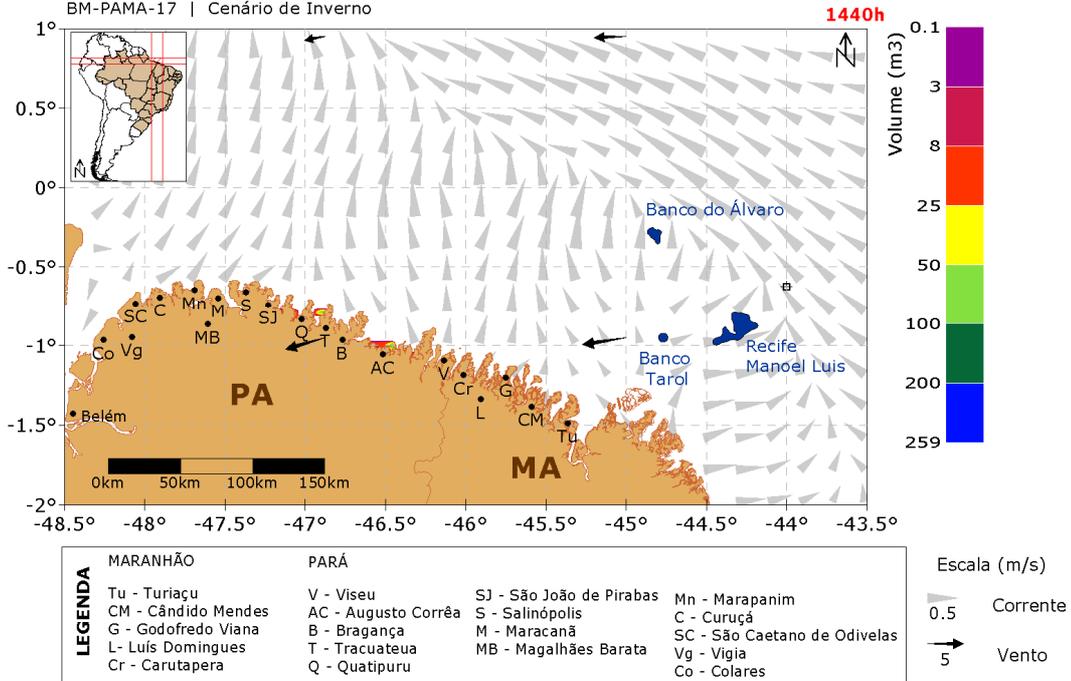


Figura 88: Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 1440 horas de simulação.

No gráfico (Figura 89), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo da simulação.

Observa-se que o óleo começa a chegar na costa com aproximadamente 360 horas de vazamento, e encontra-se em sua totalidade na costa após aproximadamente 1.300 horas.

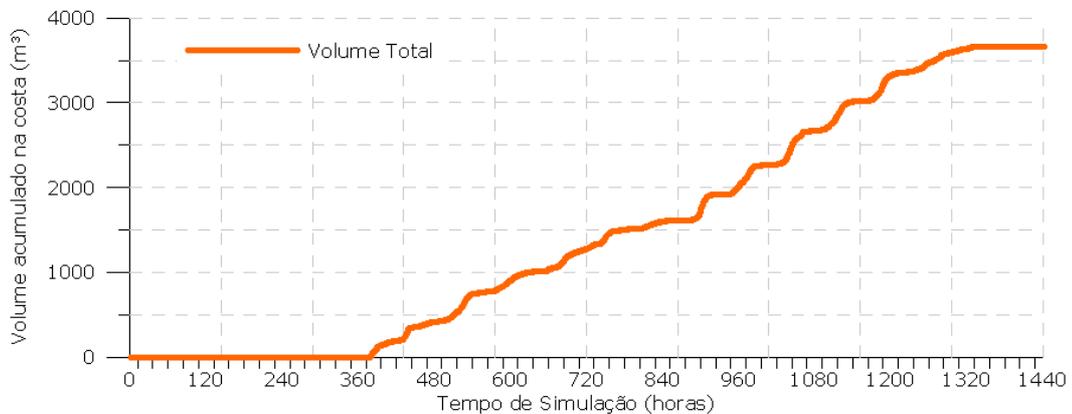


Figura 89: Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória em condições meteorológicas frequentes no cenário de inverno.

VI.3. Balanços de Massa (ou Processos do Intemperismo)

A evolução temporal do balanço de massa obtido nas simulações é apresentada na Figura 90.

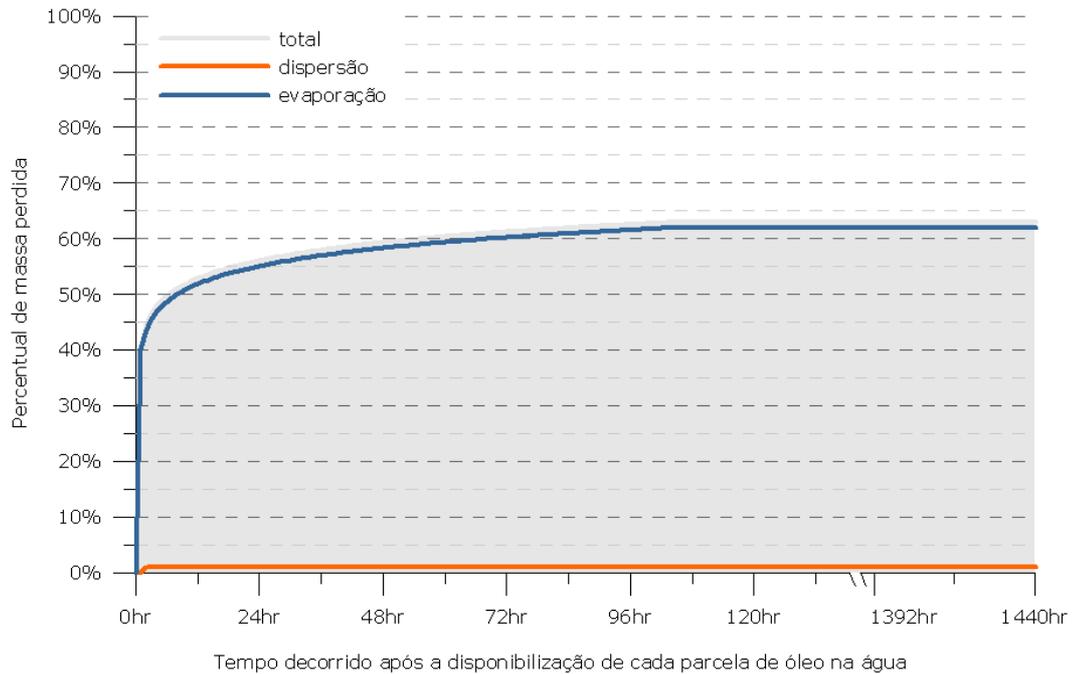


Figura 90: Evolução Temporal do Balanço de Massa ao longo da Simulação.

Ao longo da simulação a massa total de óleo perdida foi de 63%, sendo que esse valor é alcançado em até 105 horas após a disponibilização do óleo na água.

A perda total por evaporação foi o processo mais efetivo ao longo da simulação, consumindo 62% da massa, sendo essa porcentagem alcançada 105 horas após o início do vazamento.

A perda de massa pela dispersão consumiu 1% do óleo vazado em 12 horas. O balanço de massa ao longo do tempo pode ser observado nas Figura 91 a Figura 96.

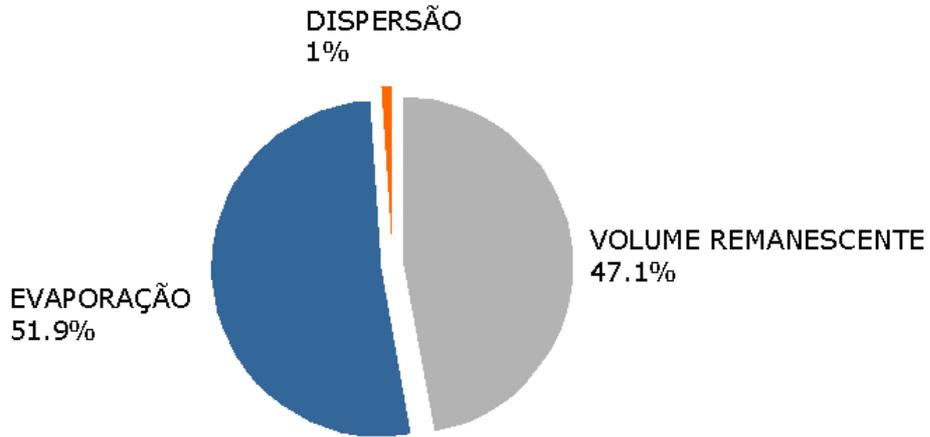


Figura 91: Balanço de Massa, após 12 horas de simulação.

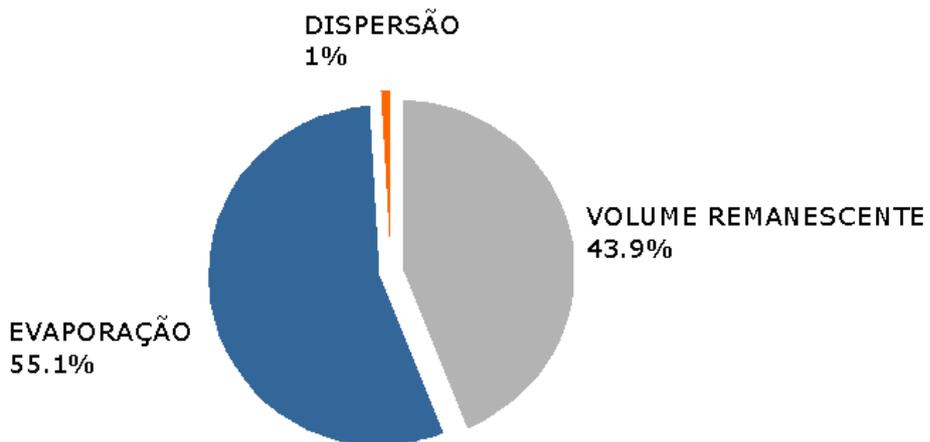


Figura 92: Balanço de Massa, após 24 horas de simulação.

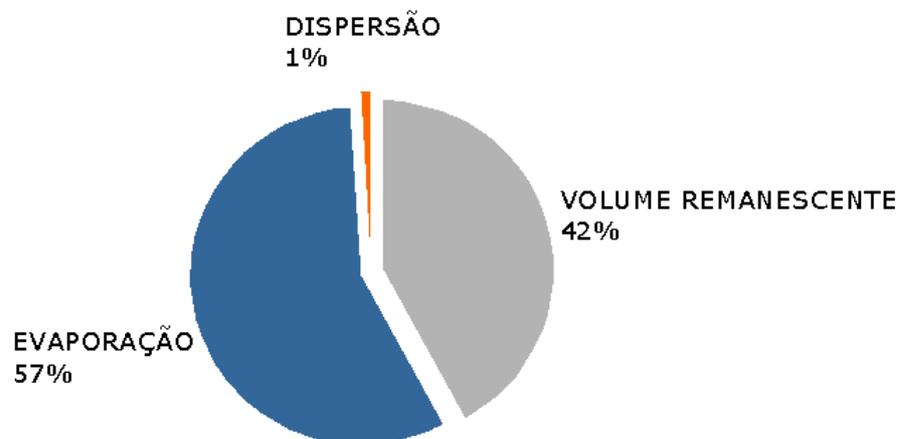


Figura 93: Balanço de Massa, após 36 horas de simulação.

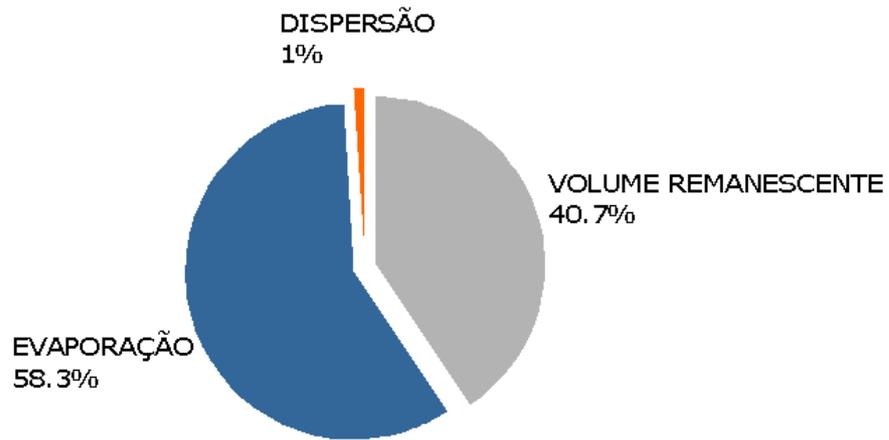


Figura 94: Balanço de Massa, após 48 horas de simulação.

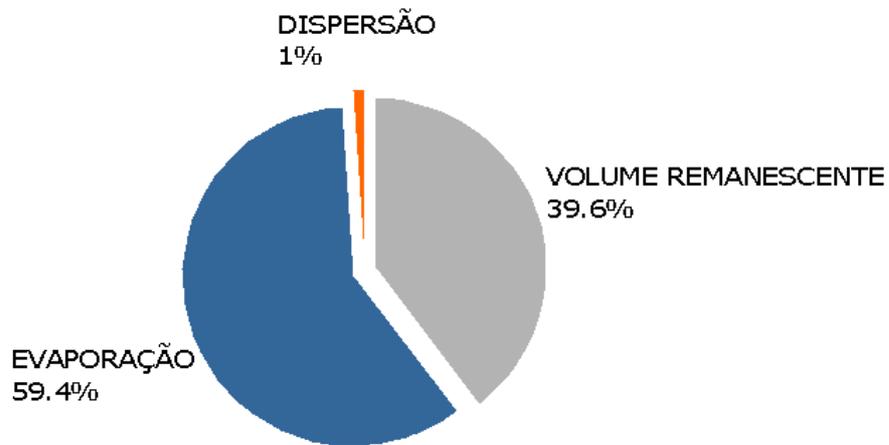


Figura 95: Balanço de Massa, após 60 horas de simulação.

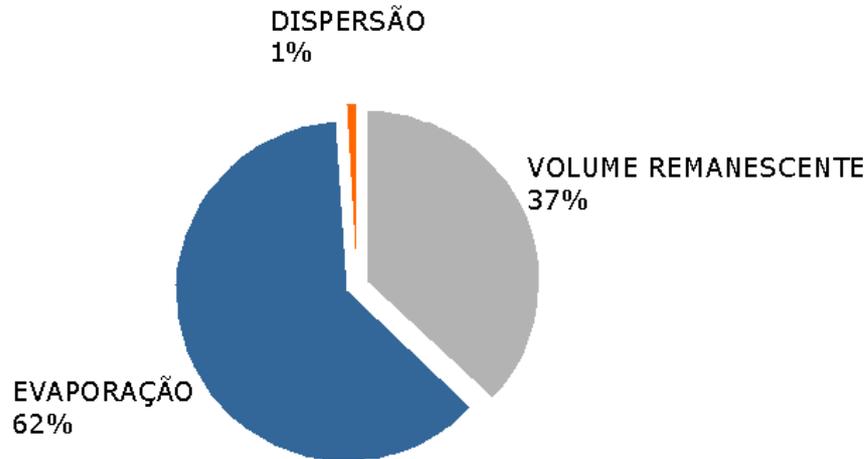


Figura 96: Balanço de Massa, após 105 horas de simulação.

VI.4. Comparação dos Resultados Numéricos com Dados Medidos

Previamente aos estudos numéricos de dispersão de óleo, foi desenhada e realizada uma campanha de medição de dados de deriva superficial, corrente e temperatura da superfície do mar, Projeto MONDONorte. Esse projeto foi desenvolvido e executado para que se possa obter dados medidos sobre a deriva superficial e sobre as correntes marinhas em superfície, focando mais especificamente em alguns parâmetros, como, trajetórias, distâncias e tempos transcorridos entre o Bloco BM-PAMA-17 e pontos de interesse, como o Parcel Manuel Luís, e os Bancos do Álvaro e do Tarol e o litoral. Para tal, durante o mês de dezembro de 2008, foram lançados 36 derivadores de dois vértices do Bloco BM-PAMA-17, na plataforma continental do Maranhão. Foram utilizados dois tipos de derivadores, o i-Sphere (30 unidades) para obter medidas da deriva superficial (correntes + vento) e o SVP-IRIDIUM (6 unidades) para obter medidas da corrente marinha em superfície (0 a 20m).

Os derivadores i-Sphere foram lançados em grupos de cinco derivadores, sendo realizados seis lançamentos (em média um lançamento a cada quatro dias). Detalhes a respeito dessa campanha podem ser obtidos no Relatório de Monitoramento da Deriva, Corrente Superficial e Temperatura da Superfície do Mar, anexo a esse EIA.

Os resultados numéricos e medidos foram comparados, considerando principalmente as regiões atingidas e os tempos de chegada. A Figura 97 mostra a comparação entre o resultado numérico probabilístico de inverno/seca (mesma estação na qual foram lançados os derivadores) e as trajetórias dos derivadores.

Pode-se notar que, na grande maioria do tempo, os derivadores percorrem regiões nas quais o modelo numérico previu uma probabilidade de presença de óleo entre 75% e 100%, a não ser pelas primeiras horas, quando o modelo prevê uma trajetória mais a nordeste do que o percorrido pelos derivadores. Porém, após esse período, as trajetórias

estão quase sempre na região maior que 90% de probabilidade, segundo o modelo numérico. Isso mostra-se também nas regiões costeiras nas quais os derivadores chegaram (Figura 98), que abrangem a costa do Pará entre as cidades de Augusto Correa e São João de Pirabas, perfazendo aproximadamente 70 km de costa em linha reta. O modelo numérico prevê uma região de toque (com menores probabilidades) muito mais abrangente, o que já era de se esperar, uma vez que no modelo probabilístico contempla um espectro de cenários ambientais muito maior, com 30 anos de dados de vento, por exemplo. Porém, as regiões nos quais os derivadores chegaram à costa são as que possuem maior probabilidade, segundo o modelo numérico (75% a 100%), o que é mostra uma excelente habilidade do modelo numérico em representar o observado. Em relação aos tempos de chegada, os resultados do modelo também mostraram-se bastante coerentes com os medidos pelos derivadores. A Tabela 7 reproduz os resultados obtidos pelo modelo numérico já mostrados na Tabela 6, porém incluindo os valores medidos pelos derivadores para facilitar a comparação. Pode-se observar que os resultados numéricos são muito similares aos obtidos pelos derivadores. A única exceção foi o tempo de chegada prevista para o Município de São João de Pirabas, que foi maior que 300 horas, enquanto os derivadores chegaram em 246 horas. Porém em todas as outras localidades os resultados numéricos mostraram-se precisos.

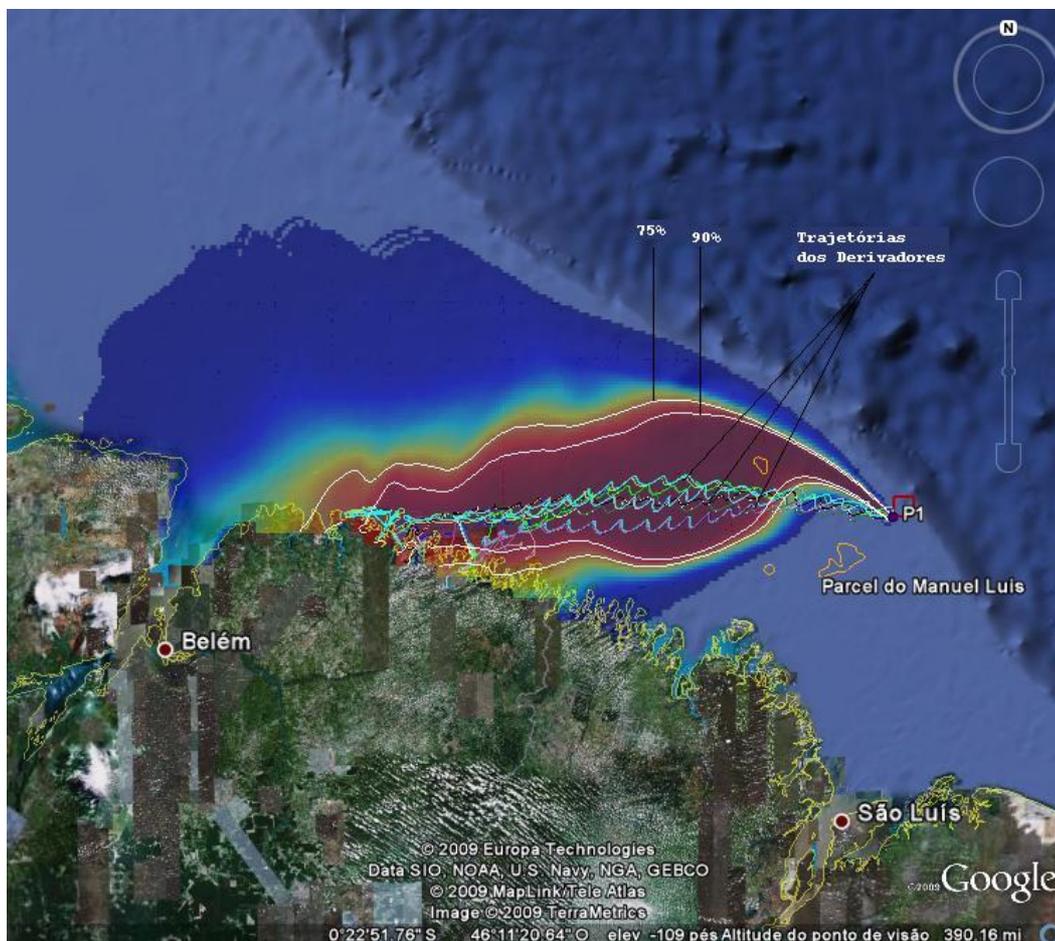


Figura 97: Comparação entre os resultados numéricos probabilísticos e os dados medidos pelos derivadores oceânicos. As linhas brancas indicam os contornos de 75% e 90% de probabilidade de presença de óleo, segundo a modelagem numérica.

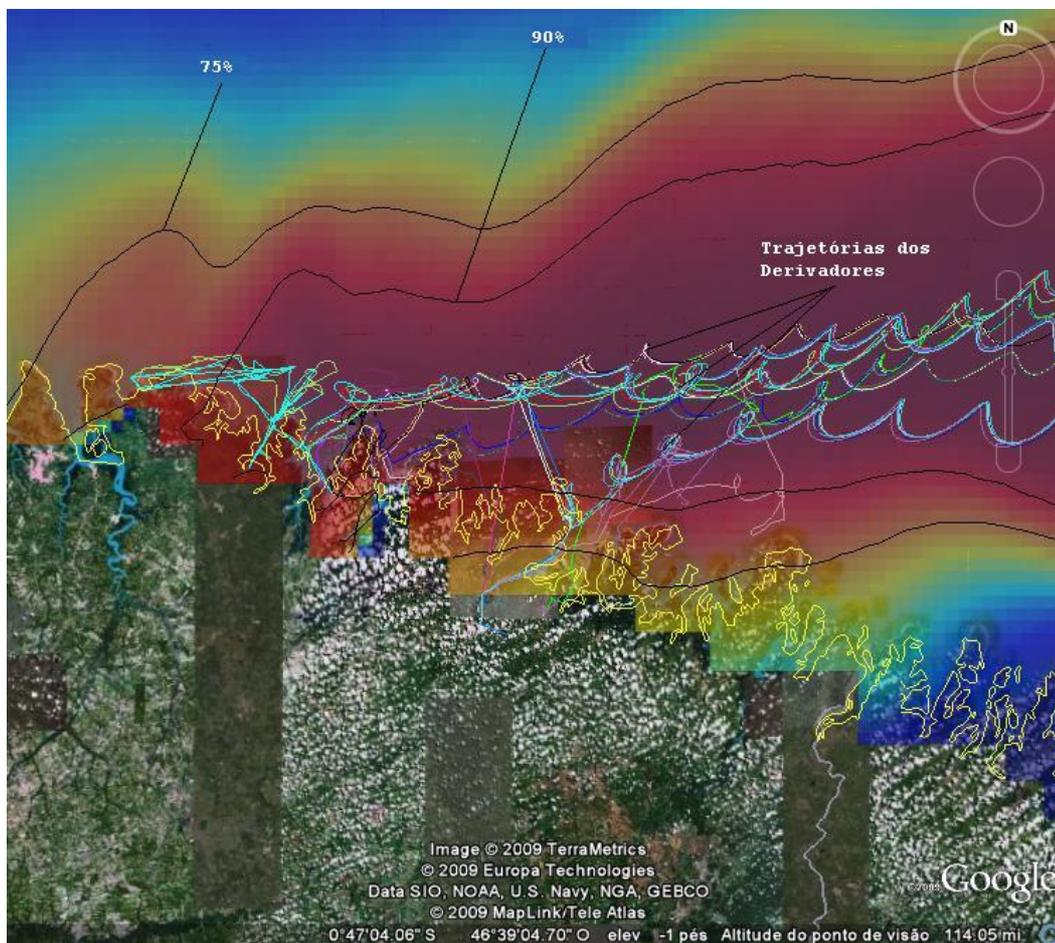


Figura 98: Detalhe na região costeira da comparação entre os resultados numéricos probabilísticos e os dados medidos pelos derivadores oceânicos.

Tabela 7: Reprodução da Tabela 6 com a inclusão dos dados medidos pelos derivadores para comparação.

| | MUNICÍPIOS | Volume máximo (m3) | | Probabilidade de Presença (%) | | Tempo Mínimo (h) | | Dados Medidos - Tempo de Chegada (h) |
|-----------------|-------------------------|--------------------|----------|-------------------------------|-----------|------------------|-----------|--------------------------------------|
| | | VERÃO | INVERNO | VERÃO | INVERNO | VERÃO | INVERNO | |
| PARÁ | Chaves | 24,881 | 28,336 | 5 - 0 | 5 - 0 | 720 - 900 | 720 - 900 | - |
| | Soure | 53,217 | 321,38 | 10-5 | 30-20 | 500-600 | 500 - 600 | - |
| | Salvaterra | 412,61 | 692,51 | 10-5 | 40-30 | 500-600 | 500 - 600 | - |
| | Colares | 201,12 | 284,06 | 20 - 10 | 40 - 30 | 600 - 720 | 500 - 600 | - |
| | Vigia | 33,865 | 49,761 | 10 - 5 | 30 - 20 | 600 - 720 | 600 - 720 | - |
| | São Caetano de Odivelas | 892,24 | 158,27 | 20 - 10 | 50 - 40 | 500 - 600 | 500 - 600 | - |
| | Curuçá | 394,64 | 825,89 | 30-20 | 70 - 60 | 400-500 | 300 - 400 | - |
| | Marapanim | 289,58 | 476,19 | 30 - 20 | 80 - 70 | 400 - 500 | 300 - 400 | - |
| | Magalhães Barata | 264,01 | 253,65 | 40-30 | 80 - 70 | 400-500 | 300 - 400 | - |
| | Maracanã | 242,59 | 341,42 | 40 - 30 | 90 - 80 | 400 - 500 | 300 - 400 | - |
| | Salinópolis | 319,3 | 379,43 | 60 - 50 | 90 - 80 | 400 - 500 | 300 - 400 | - |
| | São João de Pirabas | 345,57 | 320 | 80 - 70 | 100 - 90 | 300 - 400 | 300 - 400 | 246 |
| | Quatipuru | 345,57 | 249,5 | 90 - 80 | 100 - 90 | 300 - 400 | 200 - 300 | 228 |
| | Tracuateua | 326,91 | 580,54 | 90 - 80 | 100 - 90 | 300 - 400 | 200 - 300 | 244 |
| | Bragança | 232,22 | 230,84 | 100 - 90 | 100 - 90 | 200 - 300 | 200 - 300 | 230 |
| Augusto Corrêa | 242,59 | 239,13 | 100 - 90 | 80 - 70 | 200 - 300 | 200 - 300 | 214 | |
| Viseu | 528,02 | 337,27 | 100 - 90 | 90 - 80 | 100 - 200 | 100 - 200 | - | |
| MARANHÃO | Carutapera | 436,1 | 322,07 | 90 - 80 | 60 - 50 | 100 - 200 | 100 - 200 | - |
| | Luís Domingues | 192,13 | 86,392 | 60 - 50 | 20 - 10 | 100 - 200 | 100 - 200 | - |
| | Godofredo Viana | 80,862 | 55,291 | 50 - 40 | 10 - 5 | 100 - 200 | 100 - 200 | - |
| | Cândido Mendes | 107,13 | 51,835 | 30 - 20 | 5 - 0 | 100 - 200 | 200 - 300 | - |
| | Turialvo | 71,187 | - | 5 - 0 | - | 100 - 200 | - | - |
| Áreas Sensíveis | Banco do Álvaro | - | - | 100 - 90 | 100 - 90 | 36-60 | 12-36 | - |
| | Recife Manoel Luis | - | - | - | - | - | - | - |
| | Banco Tarol | - | - | 5 - 0 | - | 60-100 | - | - |

VII. CONCLUSÃO

Em todas as simulações probabilísticas, pequeno e médio volume, além do *blow-out*, a deriva preferencial do óleo foi para oeste do poço.

No vazamento de pequeno volume (8 m^3), nos cenários de verão e inverno, houve probabilidade do óleo chegar à costa, sendo a máxima probabilidade e o tempo mínimo de chegada de óleo, 10-5% e 100-200 horas, respectivamente.

No vazamento de médio volume (200 m^3), nos cenários de verão e inverno, também houve probabilidade do óleo chegar à costa. A probabilidade máxima na costa registrada em ambos os cenários foi 20-10% e o tempo mínimo 100-200 horas.

Os resultados obtidos na simulação de *blow-out* mostraram que a extensão de costa com probabilidade de presença de óleo nos dois cenários foi bem semelhante, podendo atingir desde Chaves – PA até Cândido Mendes – MA. No verão, o município de Turiaçu – MA também apresentou probabilidade. Além disso, nos dois cenários houve probabilidade de 100-90% na costa, no estado do Pará.

O tempo mínimo de chegada do óleo na costa foi igual em ambos os cenários, 100-200 horas.

As probabilidades por faixa de volume de óleo mostraram, em ambos os cenários, probabilidades na costa mais elevadas na classe 1 (menor que 8 m^3) para os mapas de volume médio e na classe 2 ($8\text{-}200 \text{ m}^3$) nos mapas de volume máximo.

Com base nos resultados do modo probabilístico foi definido um cenário crítico no verão e no inverno. O critério escolhido para definição da situação foi a da trajetória que mais rapidamente alcançou à costa.

Nas trajetórias de pior caso o toque na costa ocorreu 150 horas após o início do vazamento, enquanto que nas trajetórias de condições meteo-oceanográficas frequentes o toque ocorreu em 400 e 300 horas, nos cenários de verão e inverno, respectivamente.

Os resultados obtidos em relação ao intemperismo do óleo mostraram que após 105 horas da disponibilização de cada parcela de óleo na água, os processos não mais atuam. A massa total de óleo perdida foi de 63%, sendo que a evaporação consumiu 62% desse total.

Na calibração dos parâmetros turbulentos do modelo de transporte notou-se que os valores estavam anteriormente subestimados e que, com o uso de um parâmetro de dispersão de 0,35 o coeficiente de difusividade aproxima-se daquele obtido com os derivadores lançados e da descrição teórica da lei de 4/3.

Os resultados do modelo numérico de dispersão de óleo foram comparados com dados medidos obtidos pelo Projeto mondoNORTE, especialmente desenhado para possibilitar a calibração e avaliação do modelo numérico. Trata-se de uma abordagem inovadora, pois as campanhas de medição foram realizadas previamente às simulações numéricas e os resultados das medições fornecem informações diretas sobre a deriva de objetos na superfície daquela região. É portanto a medida mais próxima possível do que aconteceria em caso de um vazamento de óleo nessa região. As comparações mostraram

uma excelente habilidade do modelo numérico probabilístico em reproduzir as observações, o que referenda os resultados numéricos obtidos.

VIII. BIBLIOGRAFIA

BRANDSMA, M., & SMITH, J., 1999. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model Report and User Guide. ExxonMobil Upstream Research Co.

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.

HENTSCHEL, H. G. E. & PROCACCIA, I. Relative diffusion in turbulent media: The fractal dimension of clouds. Phys. Rev. A, 29:1461, (1984).

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.

LACORATA, G., AURELL, E. & VULPIANI, A. Drifter dispersion in the Adriatic Sea: Lagrangian data and chaotic model. Annales Geophysicae (2001) vol. 19 pp. 121-129

LACASCE, J. H. Statistics from Lagrangian observations. Progress In Oceanography (2008) vol. 77 (1) pp. 1-29

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.