



## . MODELAGEM DE ÓLEO | Bloco BM-J-2

RELATÓRIO

Para: Ecology & Environment do Brasil / Ecologus Engenharia Consultiva

jan-06

<b>. ÍNDICE</b>	
<b>I_ INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>II_ METODOLOGIA .....</b>	<b>3</b>
<b>II_1. Modo Determinístico .....</b>	<b>3</b>
<b>II_2. Processos De Intemperismo .....</b>	<b>3</b>
II_2.1 EVAPORAÇÃO .....	3
II_2.2 ENTRANHAMENTO (OU DISPERSÃO) .....	3
<b>II_3. Modo Probabilístico .....</b>	<b>3</b>
<b>II_4. Características da Simulação .....</b>	<b>3</b>
II_4.1 FORÇANTES .....	3
II_4.2 CARACTERÍSTICAS DOS VAZAMENTOS .....	3
<b>III_ RESULTADOS .....</b>	<b>3</b>
<b>III_1. SIMULAÇÃO PROBABILÍSTICA – Vazamento Instantâneo .....</b>	<b>3</b>
III_1.1 VERÃO .....	3
III_1.2 INVERNO .....	3
III_1.3 RESULTADO INTEGRADO .....	3
<b>III_2. SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS – Vazamento Instantâneo .....</b>	<b>3</b>
III_2.1 VERÃO .....	3
III_2.2 INVERNO .....	3
<b>III_3. BALANÇO DE MASSA .....</b>	<b>3</b>
<b>IV_ CONCLUSÕES .....</b>	<b>3</b>
<b>V_ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>3</b>

Modelagem de Óleo | BM-J-2



## I\_ INTRODUÇÃO

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica do transporte de óleo equivalente no mar para um cenário acidental de *blowout* e conseqüente vazamento por 30 dias no poço localizado nas coordenadas 15° 29' 27,4" S e 38° 43' 02" W, no bloco BM-J-2, na Bacia do Jequitinhonha, litoral sul da Bahia.

Para contextualizar a questão, uma descrição da metodologia aplicada, dos modelos e dos dados utilizados será também apresentada.

## II\_ METODOLOGIA

As simulações numéricas apresentadas nesse estudo foram feitas com o STROLL, modelo desenvolvido pela PROOCEANO para estudos do 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 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 métodos, bem como dos processos de intemperismo será apresentada a seguir.

### II\_1. MODO DETERMINÍSTICO

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



Modelagem de Óleo | BM-J-2



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

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:

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

onde

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

$$\frac{d^2 p_t}{dt^2} = \frac{d\bar{u}_i}{dt} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad \text{a aceleração} \quad (\text{II-4})$$

para  $i = x, y$ . Os valores de velocidade utilizados são normalmente fornecidos por um modelo hidrodinâmico externo (detalhes no Relatório de Modelagem Hidrodinâmica).

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

A espessura do óleo associada a cada elemento é dada por

$$esp_{e,x,y,t} = \frac{q_e}{2\pi[\sigma(t)]^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-p_{x,e}(t)}{\sigma(t)}\right)^2 + \left(\frac{y-p_{y,e}(t)}{\sigma(t)}\right)^2\right]\right\} \quad (\text{II-5})$$



Modelagem de Óleo | BM-J-2



onde  $q_e$  é 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  $\sigma_l^2(t)$  é a variância da distribuição, relacionado à turbulência local através da equação:

$$D = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2(t)}{dt} \quad (II-6)$$

Onde  $D$  é a difusividade turbulenta isotrópica horizontalmente, parametrizada pelo modelo hidrodinâmico POM segundo a formulação de Smagorinsky:

$$D = C \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (II-7)$$

Onde  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são os intervalos de discretização da grade e  $C$  é a constante de Smagorinsky, cujos valores para o oceano variam da ordem de 0,1 a 0,2 (Oey et al., 1985a e b).

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

$$ESP(x, y, t) = \sum_{e=1}^{n_e} esp_e(x, y, t) \quad (II-8)$$

## II\_2. PROCESSOS DE INTEMPERISMO

### II\_2.1 EVAPORAÇÃO

O STROLL utiliza-se da relação de Mackay & Matsugu (1973), que expressa a quantidade de massa evaporada em um passo de tempo:

$$dm = (K_2 \cdot P_{vp} \cdot \frac{A}{R \cdot T}) \cdot f \cdot MW \cdot \Delta t \quad (II-9)$$





Modelagem de Óleo | BM-J-2

onde  $dm$  é a massa evaporada;  $K_2$  é o coeficiente de transferência de massa;  $P_{vp}$  é a pressão de vapor;  $A$  é a área da mancha;  $R$  é a constante universal dos gases;  $T$  é a temperatura;  $f$  é a fração evaporável do constituinte; e  $MW$ , o peso molecular desta fração.

O coeficiente  $K_2$  pode ser parametrizado da seguinte forma:

$$K_2 = 0.029 \cdot W^{0.78} \cdot d^{-0.11} \cdot S_c^{-0.67} \cdot \sqrt{\frac{(MW + 29)}{MW}} \quad (II-10)$$

sendo  $W$  é a velocidade do vento;  $d$  é o diâmetro da mancha e  $S_c$  é o número de Schmidt ( $S_c = 2,7$ , segundo Mackay et. al, 1980).

O volume evaporado corresponde à relação entre a massa evaporada  $dm$  e a densidade do constituinte  $\rho_o$ .

$$Ev = \frac{dm}{\rho_o(t)} \quad (II-11)$$

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 a seguir:

$$\rho_o(t) = Wc * \rho_{\text{água}} + (1 - Wc) \rho_0 \left[ 1 - c_1 (T - T_{\text{água}}) (1 - c_2 \cdot frac_{evap}) \right] \quad (II-12)$$

Onde  $\rho_o$  é a densidade do óleo,  $\rho_0$  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,  $frac_{evap}$  a fração de óleo evaporada, e  $c_1$  e  $c_2$  as constantes empíricas específicas para cada tipo de óleo.

## II\_2.2 ENTRANHAMENTO (OU DISPERSÃO)

Reed (1989) utiliza a seguinte parametrização para calcular a fração da superfície do mar sujeita ao entranhamento (dispersão) por hora:



Modelagem de Óleo | BM-J-2



$$D_a = 0.11 \cdot (W + 1)^2 \quad (\text{II-13})$$

Onde  $W$  é a velocidade do vento.

Sendo o volume de constituinte entranhado:

$$En = D_a \cdot [1 + 50 \cdot (\mu)^{1/2} \cdot h \cdot S_i]^{-1} \quad (\text{II-14})$$

Onde  $h$  é a espessura da mancha e  $S_i$ , a tensão na interface entre a água e o poluente.

A viscosidade do constituinte  $\mu$  varia ao longo de sua trajetória, sendo parametrizada por Mackay *et al.* (1982) *apud* Reed (1989).

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{C_4 \cdot F_{evap}} \quad (\text{II-15})$$

onde  $\mu_0$  é a viscosidade inicial do constituinte,  $C_4$  é uma constante empírica intrínseca a cada tipo de constituinte e  $F_{evap}$  é a fração do constituinte evaporada.

O volume de cada elemento é então atualizado seguindo a equação:

$$q_{e,j} = q_{e,j-1} - (Ev + En) \quad (\text{II-16})$$

### II\_3. MODO PROBABILÍSTICO

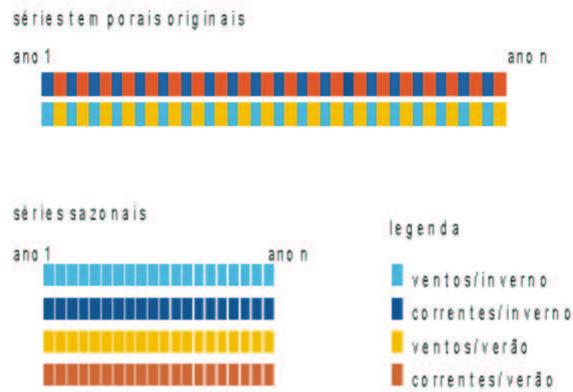
Na abordagem probabilística utilizada são realizadas diversas simulações determinísticas, considerando-se todos os processos citados nos itens anteriores, em diferentes cenários meteorológico-oceanográficos. Este módulo do STROLL tem por objetivo verificar a probabilidade de presença do constituinte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





Modelagem de Óleo | BM-J-2

De acordo com os cenários apontados na caracterização meteo-oceanográfica do diagnóstico de meio físico, as séries temporais de vento e corrente são repartidas. Esta divisão resulta 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 o maior número possível de cenários (Figura 2).



Modelagem de Óleo | BM-J-2



exemplo: probabilístico de verão

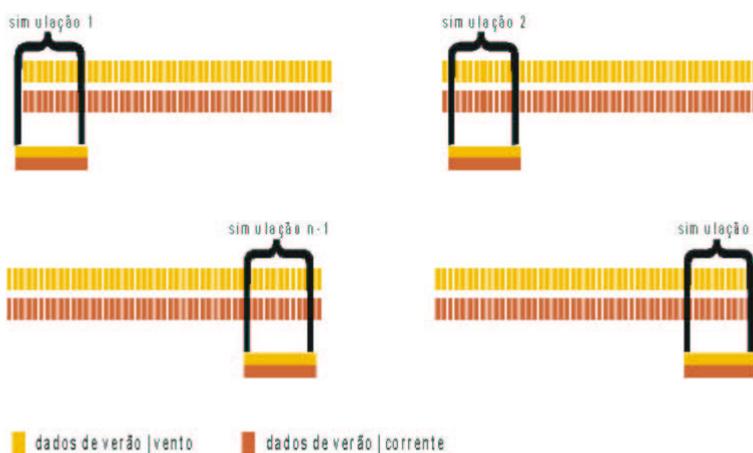


Figura 2: Representação esquemática da combinação dos dados de vento e corrente para a simulação probabilística.

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 a, b, c e d):

$$I(x, y) = 1 \quad \text{se } ESP(x, y, t) \geq \text{lim} \quad (\text{II-17})$$

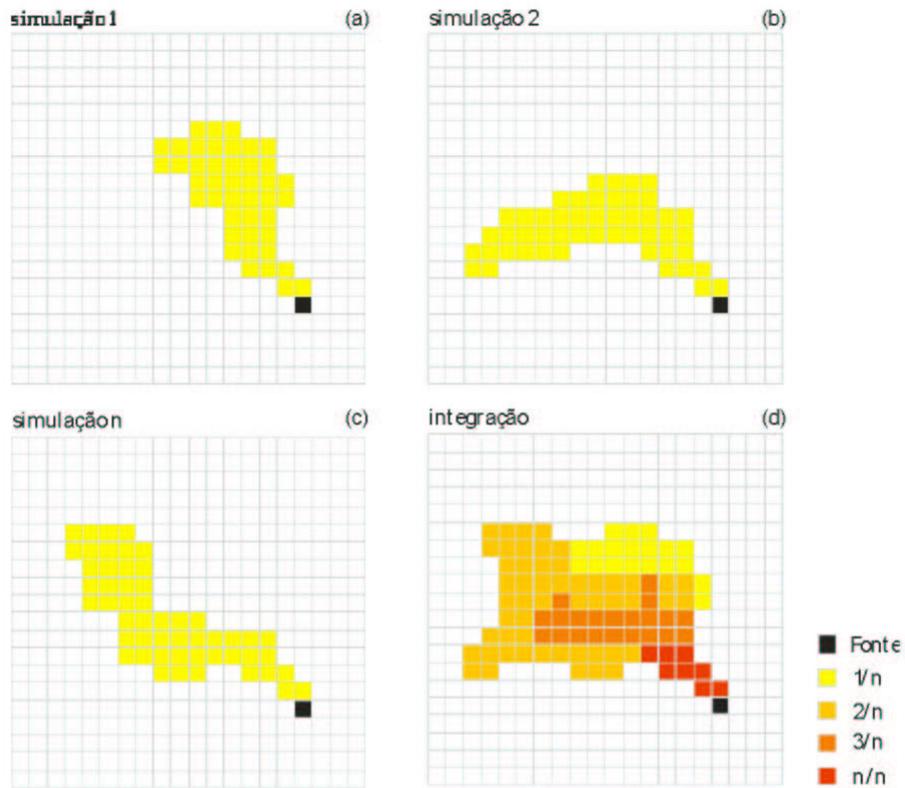
$$I(x, y) = 0 \quad \text{se } ESP(x, y, t) < \text{lim} \quad (\text{II-18})$$

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):

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^{n_{com}} \left( \frac{I(x, y)}{n_{com}} \right) \quad (\text{II-19})$$



Modelagem de Óleo | BM-J-2



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

Quanto maior a extensão da série temporal, maior será o número de simulações e, conseqüentemente, maior o número de cenários contemplados.

Além da probabilidade de presença do constituinte, o módulo probabilístico do STROLL fornece também o menor tempo de chegada da mancha em cada ponto de grade do domínio. Com base nestas duas informações o cenário de pior caso é identificado e apresentado em maior detalhamento na simulação determinística.



Modelagem de Óleo | BM-J-2



## II\_4. CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO

Neste estudo foram realizadas 2 simulações probabilísticas considerando períodos de *verão* e *inverno*, conforme detalhado no item subsequente.

No que se refere ao limiar de detecção, as simulações foram realizadas com um critério que considera a existência de óleo nas regiões onde este apresenta espessura maior ou igual ao limiar de  $3 \times 10^{-7}$  metros, de acordo com os critérios sugeridos pelo ELPN – IBAMA no documento Diretrizes Técnicas para Modelagem de Óleo no Mar (IBAMA/ANP, 2002).

### II\_4.1 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 2,5 graus de resolução espacial cobrindo todo o globo e disponível gratuitamente na internet (<http://www.ncep.noaa.gov>).

Para este estudo foram tratados 31 anos de dados (1974 a 2004) com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia).

A análise desses dados possibilitou a caracterização de dois períodos bem marcados, com condições de inverno e verão, como pode ser observado na Figura 4. O primeiro indo de outubro a abril é caracterizado por condições típicas de verão, com ventos predominantemente variando de norte a nordeste, com alguma ocorrência de ventos de leste-sudeste.

O período de maio a setembro é caracterizado pela predominância dos ventos de nordeste, porém com grande incidência dos ventos de leste e sudeste. Nessa estação ocorre também uma maior incidência de passagens de sistemas frontais na região.

Os dados de corrente utilizados foram obtidos da base de dados da PROOCEANO, abrangendo um período amostral de 6 meses (3 para cada cenário sazonal). Uma descrição detalhada dos mesmos encontra-se no Relatório de Modelagem Hidrodinâmica.



Modelagem de Óleo | BM-J-2

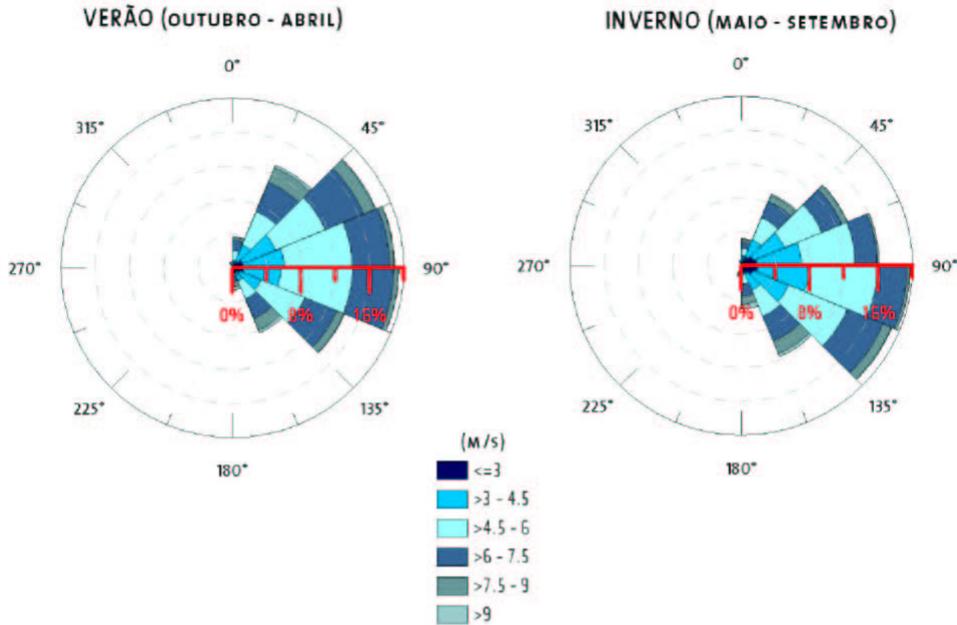


Figura 4: Rosa dos ventos para os períodos de verão e inverno, na região do BM-J-2.

#### II\_4.2 CARACTERÍSTICAS DOS VAZAMENTOS

Foi considerado em ambas as simulações (probabilísticas e determinísticas), um vazamento contínuo por 30 dias, totalizando um volume de 5760 m<sup>3</sup>.

As características do óleo são descritas nas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1: Características do óleo utilizadas na simulação.

Parâmetro	Valor	Unidade
API	45	
Densidade (a 90° C)	0.83	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade Cinemática Inicial (a 65° C)	0,8	cP



Modelagem de Óleo | BM-J-2



Tabela 2: Características do Vazamento.

Longitude	38° 43' 02" W
Latitude	15° 29' 27,4" S
Volume	5.760 m <sup>3</sup>

### III\_ RESULTADOS

A seguir são apresentados os mapas de probabilidade de presença, tempo mínimo de chegada e de regiões de costa com probabilidade de toque de óleo, resultantes das simulações probabilísticas. Para a obtenção destes resultados foram realizadas 500 diferentes simulações para cada período analisado (verão e inverno).

Com base nestes resultados serão definidos os piores casos e apresentadas suas simulações determinísticas.

#### III\_1. SIMULAÇÃO PROBABILÍSTICA – VAZAMENTO INSTANTÂNEO

##### III\_1.1 VERÃO

O mapa de probabilidade de presença de óleo para o caso de vazamento contínuo de 5.760 m<sup>3</sup> encontra-se na Figura 5.

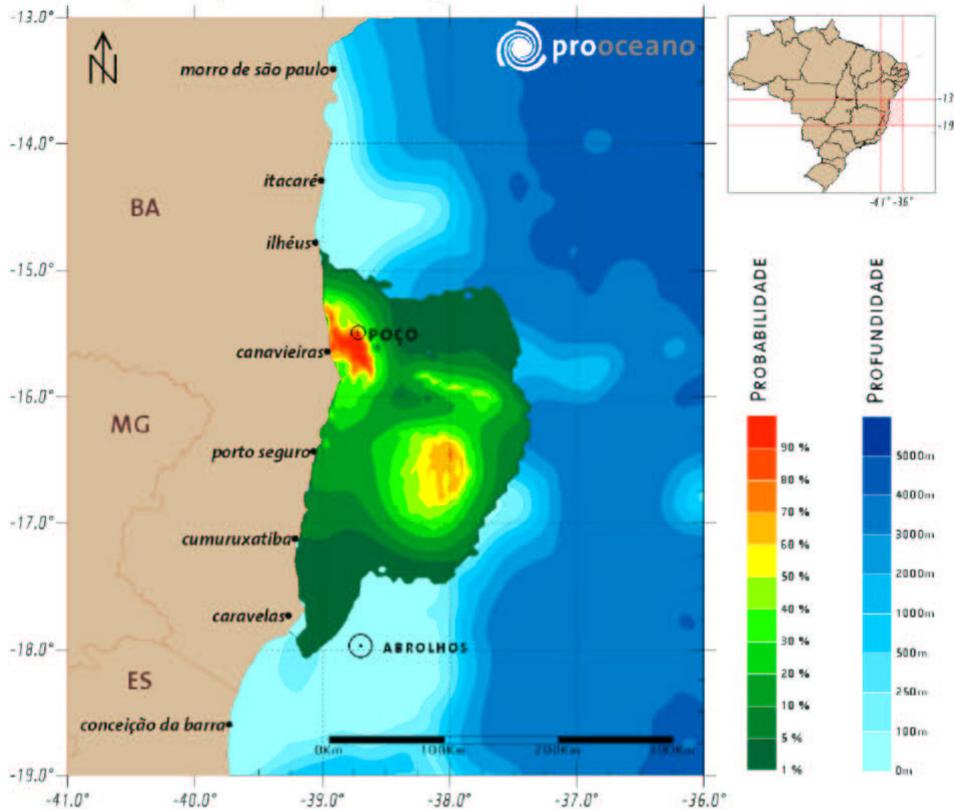


Modelagem de Óleo | BM-J-2



**STROLL - MODO PROBABILÍSTICO**

verão | 5760 m<sup>3</sup> | 720 horas | 500 simulações



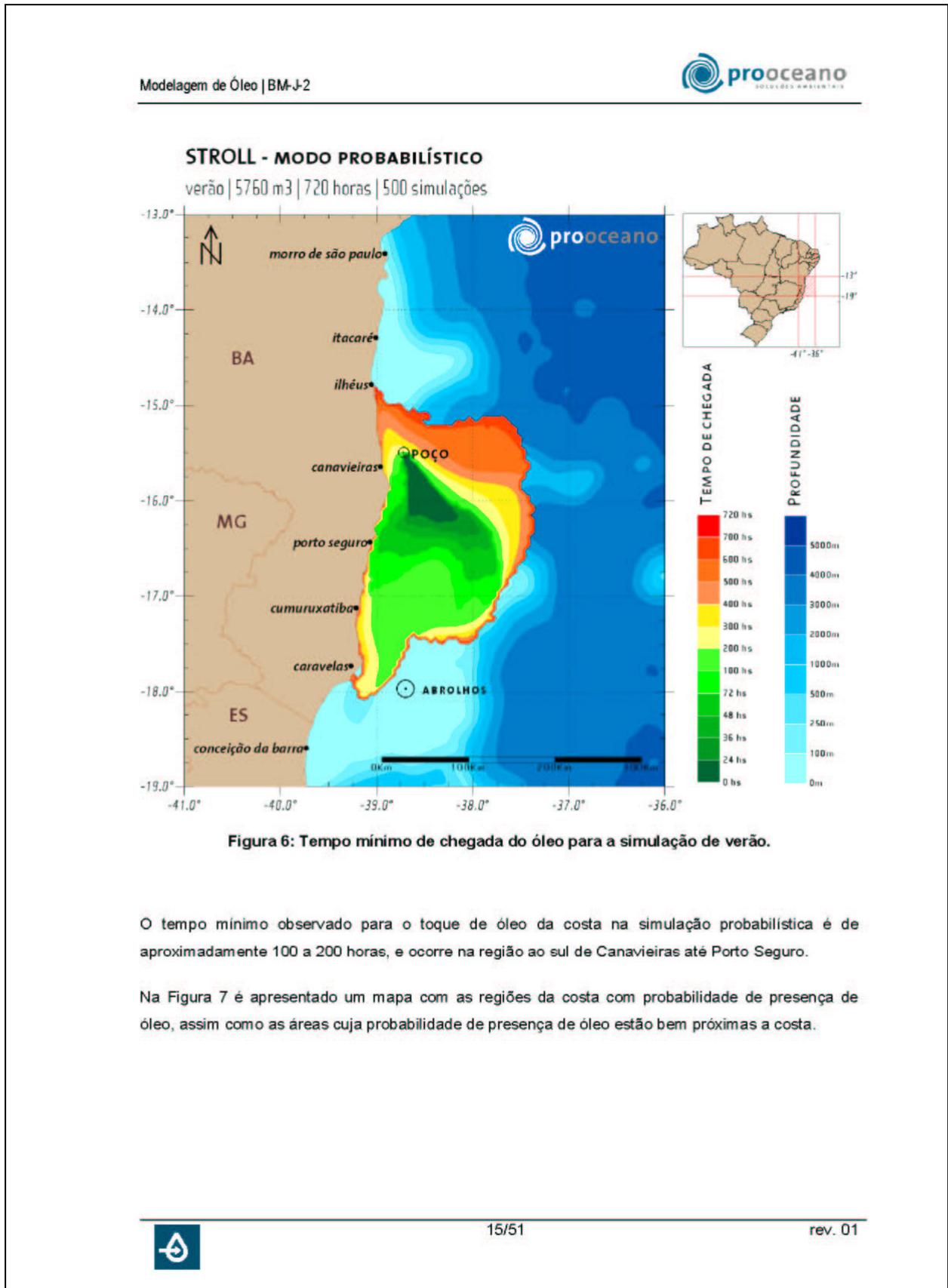
**Figura 5: Probabilidade de presença do óleo para a simulação de verão.**

Pode-se observar que a deriva preferencial do óleo no verão, ocorre rumo ao sul, espalhando-se à leste e sudeste do poço, considerando um limiar de 1% de probabilidade.

Nesse cenário, destaca-se duas regiões com maiores probabilidades de presença de óleo, a primeira, próxima e a oeste do poço, em direção à costa, com probabilidades superiores a 90% e a segunda, a sudeste do poço, entre as latitudes de 16° e 17° S.

O mapa de tempo mínimo de chegada do óleo é apresentado na Figura 6.





Modelagem de Óleo | BM-J-2



### STROLL - MODO PROBABILÍSTICO

verão | 5760 m<sup>3</sup> | 720 horas | 500 simulações

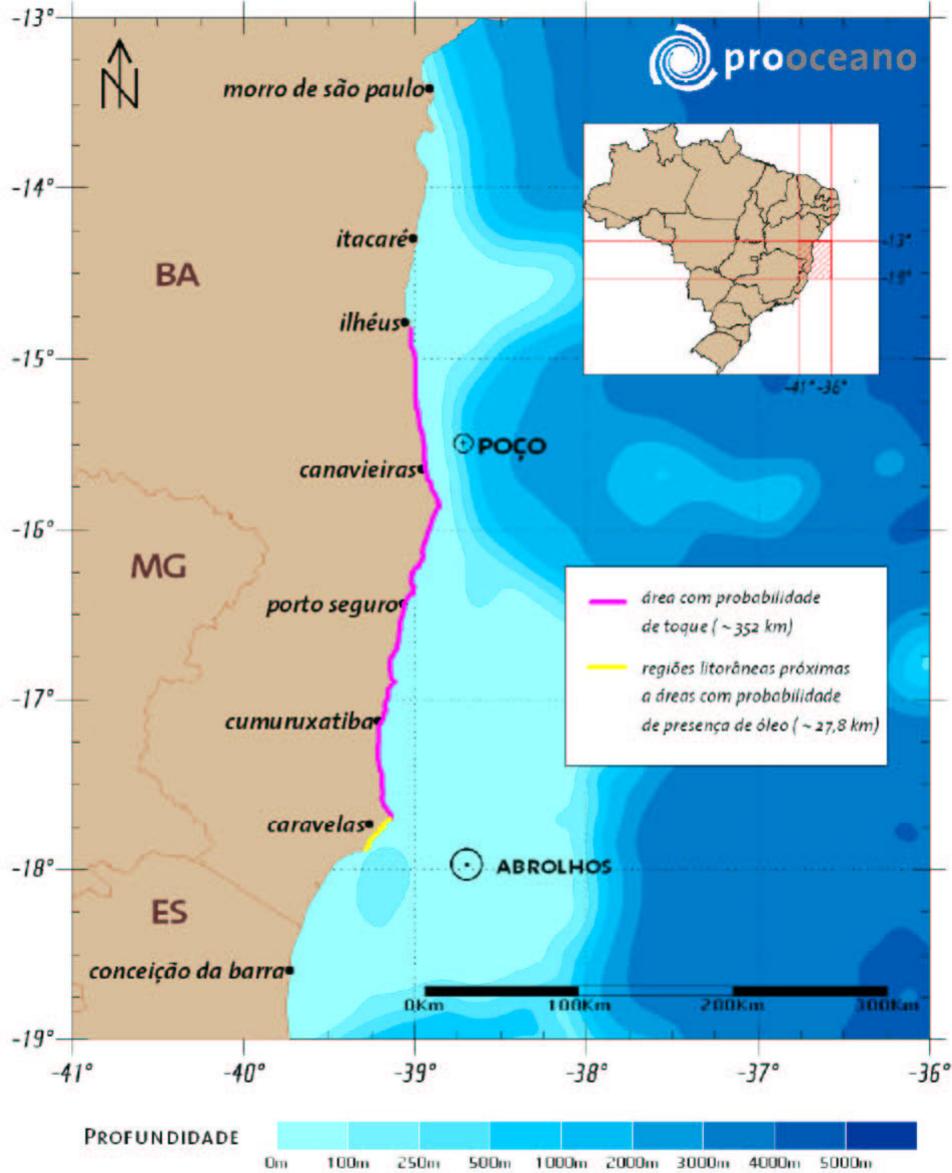


Figura 7: Perímetro de costa com probabilidade de toque de óleo, resultante da simulação de verão.



Modelagem de Óleo | BM-J-2



Considerando o cenário ambiental de verão, pode-se considerar toda a extensão da costa entre Ilhéus e Caravelas (352 Km) com probabilidade de chegada de óleo acima de 1%, no caso de um *blowout* acidental e consequente vazamento de óleo.

III\_1.2 INVERNO

Na Figura 8 encontra-se o mapa de probabilidade de presença de óleo calculado para a situação de inverno. Observa-se que embora as maiores probabilidades de presença de óleo estejam localizadas ao sul do poço, assim como no cenário de verão, existe um extensa área ao norte, com chance de chegada de óleo, no caso de um vazamento nessa época do ano.

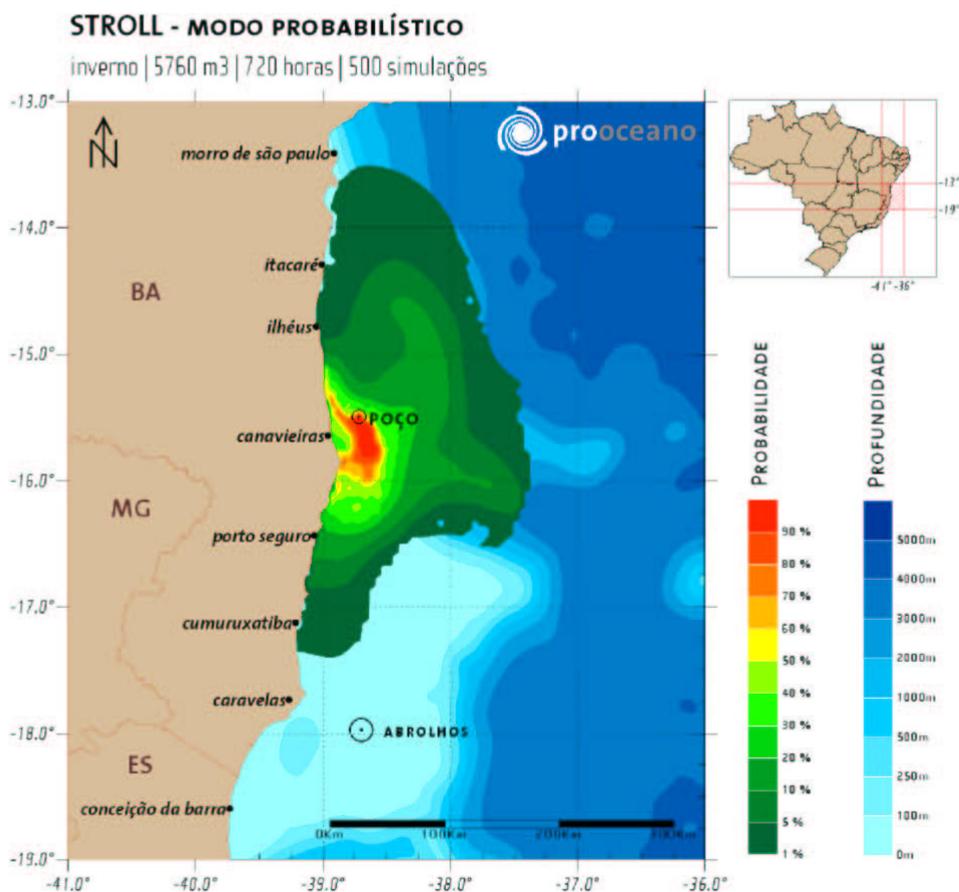


Figura 8: Probabilidade de presença do óleo para a simulação de inverno.



Modelagem de Óleo | BM-J-2



Na Figura 9 são apresentados os tempos mínimos de chegada de óleo, calculados para o cenário de inverno.

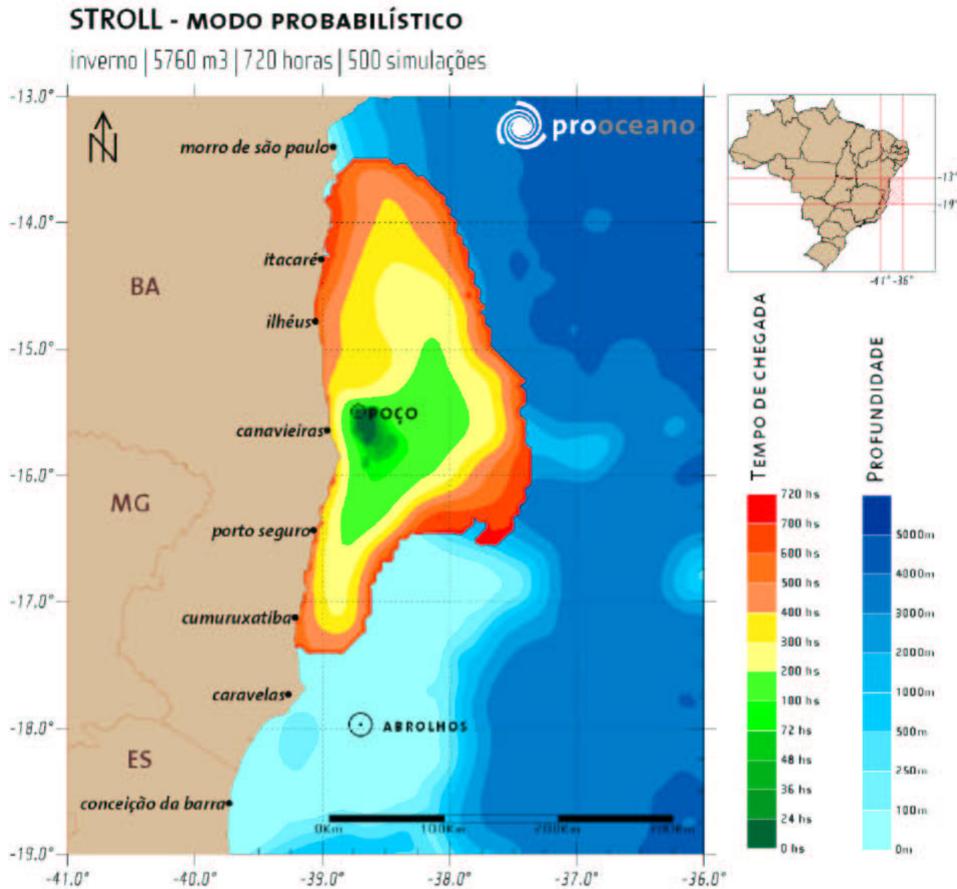


Figura 9: Tempo mínimo de chegada do óleo para a simulação de inverno.

Nota-se que na simulação de inverno, o menor tempo de toque, considerando 1% de probabilidade é de aproximadamente 200 a 300 horas, ocorrendo também na região ao sul de Canavieiras e ao norte de Porto Seguro.

Na Figura 10 é apresentado um mapa com as regiões na costa com probabilidade de toque ou proximidade de regiões com presença de óleo.



Modelagem de Óleo | BM-J-2



### STROLL - MODO PROBABILÍSTICO

inverno | 5760 m<sup>3</sup> | 720 horas | 500 simulações

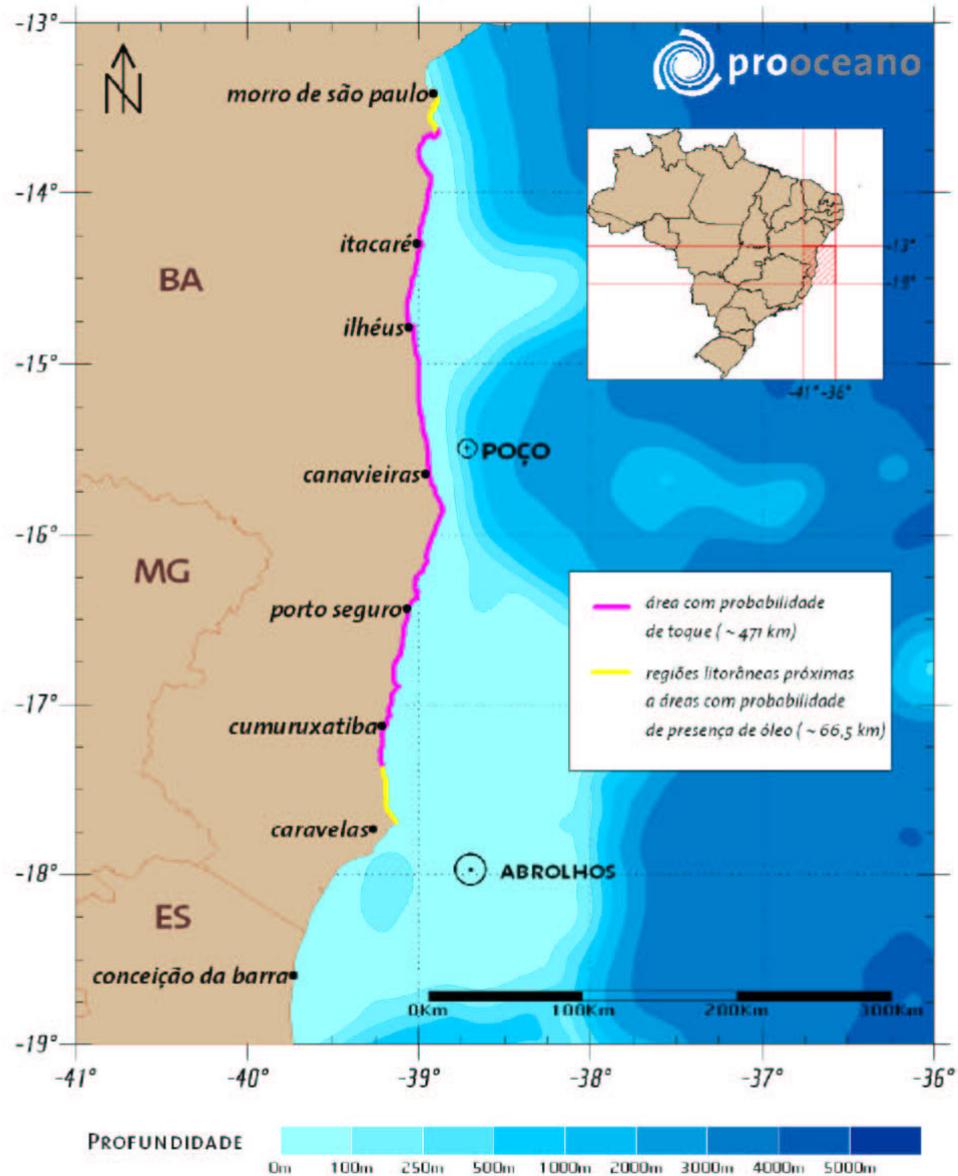


Figura 10: Perímetro de costa com probabilidade de toque de óleo, resultante da simulação de inverno.



Modelagem de Óleo | BM-J-2



Observa-se que no cenário de inverno o perímetro de costa com probabilidade superior a 1% de chance de chegada de óleo estende-se por aproximadamente 471 Km de costa, entre o sul de Morro de São Paulo, até o sul de Cumuruxatiba. Considerando as regiões próximas o perímetro é ligeiramente estendido, indo de Caravelas a Morro de São Paulo.

*III\_1.3      RESULTADO INTEGRADO*

Na Figura 11 é apresentado o resultado integrado para as simulações de verão e inverno, para as regiões na costa com probabilidade de toque e áreas cuja probabilidade de presença de óleo estão bem próximas a costa.



Modelagem de Óleo | BM-J-2



### STROLL - MODO PROBABILÍSTICO

integrado | 5760 m<sup>3</sup> | 720 horas | 500 simulações

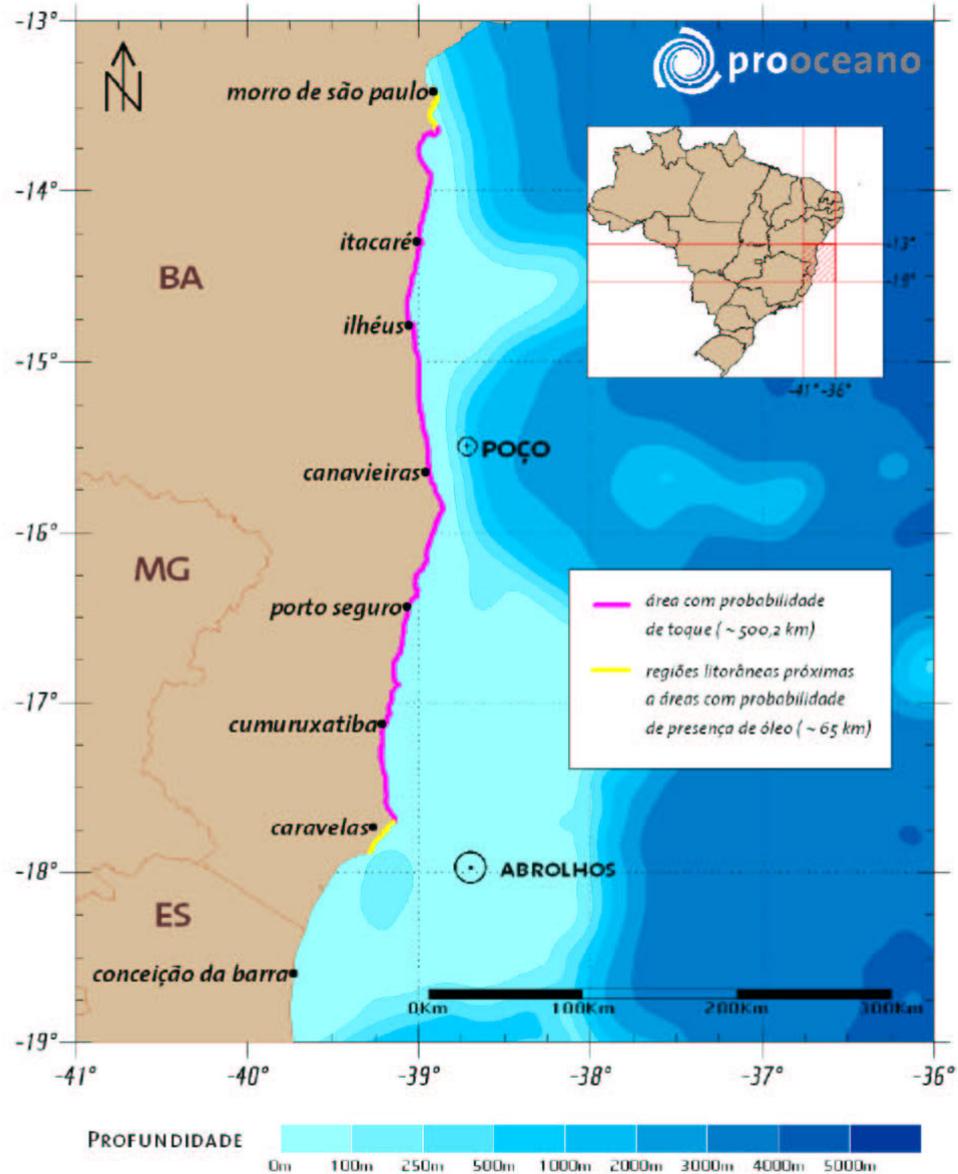


Figura 11: Perímetro de costa com probabilidade de toque de óleo, resultado integrado com as simulações de verão e inverno.



Modelagem de Óleo | BM-J-2



Pode-se indentificar na análise integrada dos mapas de probabilidade, a existência de uma região contínua com mais de 1% de probabilidade de toque de óleo na costa, indo do Sul de Morro de São Paulo até Caralelas, por aproximadamente 500 Km.

Observa-se que o perímetro suscetível a toque de óleo na costa no cenário de verão é menor (~352 Km) do que o mesmo para o inverno (~471 Km).

### **III\_2. SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS – VAZAMENTO INSTANTÂNEO**

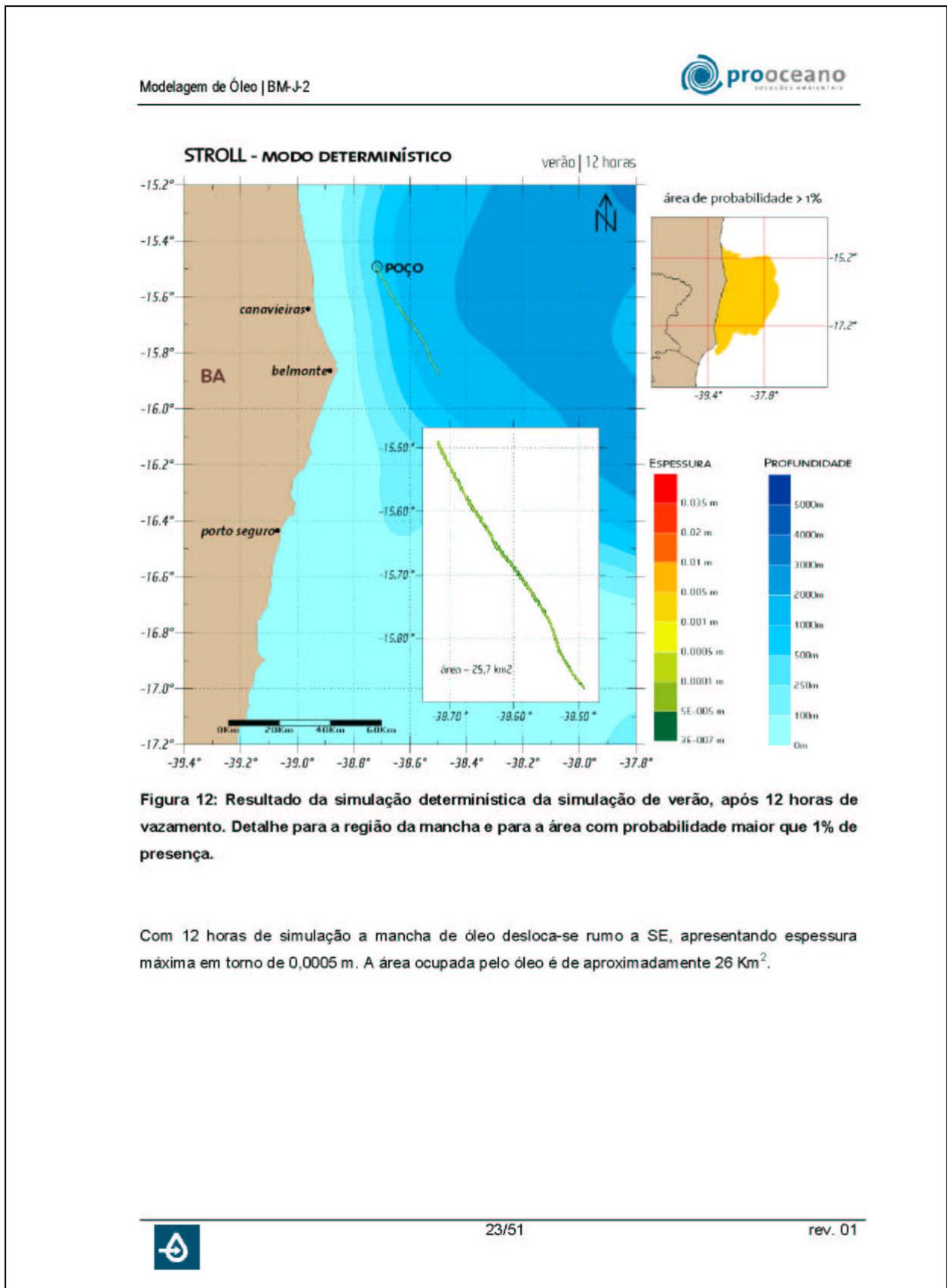
Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas, foram identificadas 2 situações determinísticas críticas para serem simuladas, abrangendo os cenários de verão e inverno.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações determinísticas. Nessas figuras, as manchas de óleo são representadas em vários instantes de tempo, sendo que o instante sob análise é destacado com *zoom* e sua distribuição de espessura é mostrada.

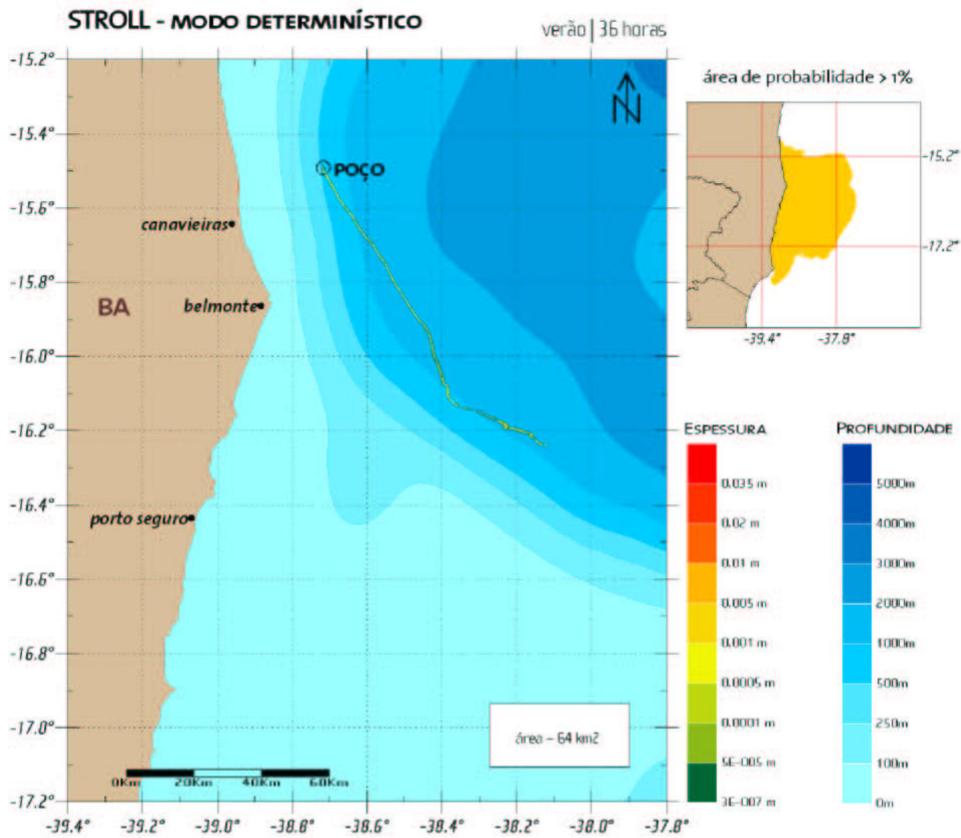
#### **III\_2.1 VERÃO**

Nas Figura 13 a Figura 22 são apresentados os resultados da simulação determinística realizada para o cenário de verão.





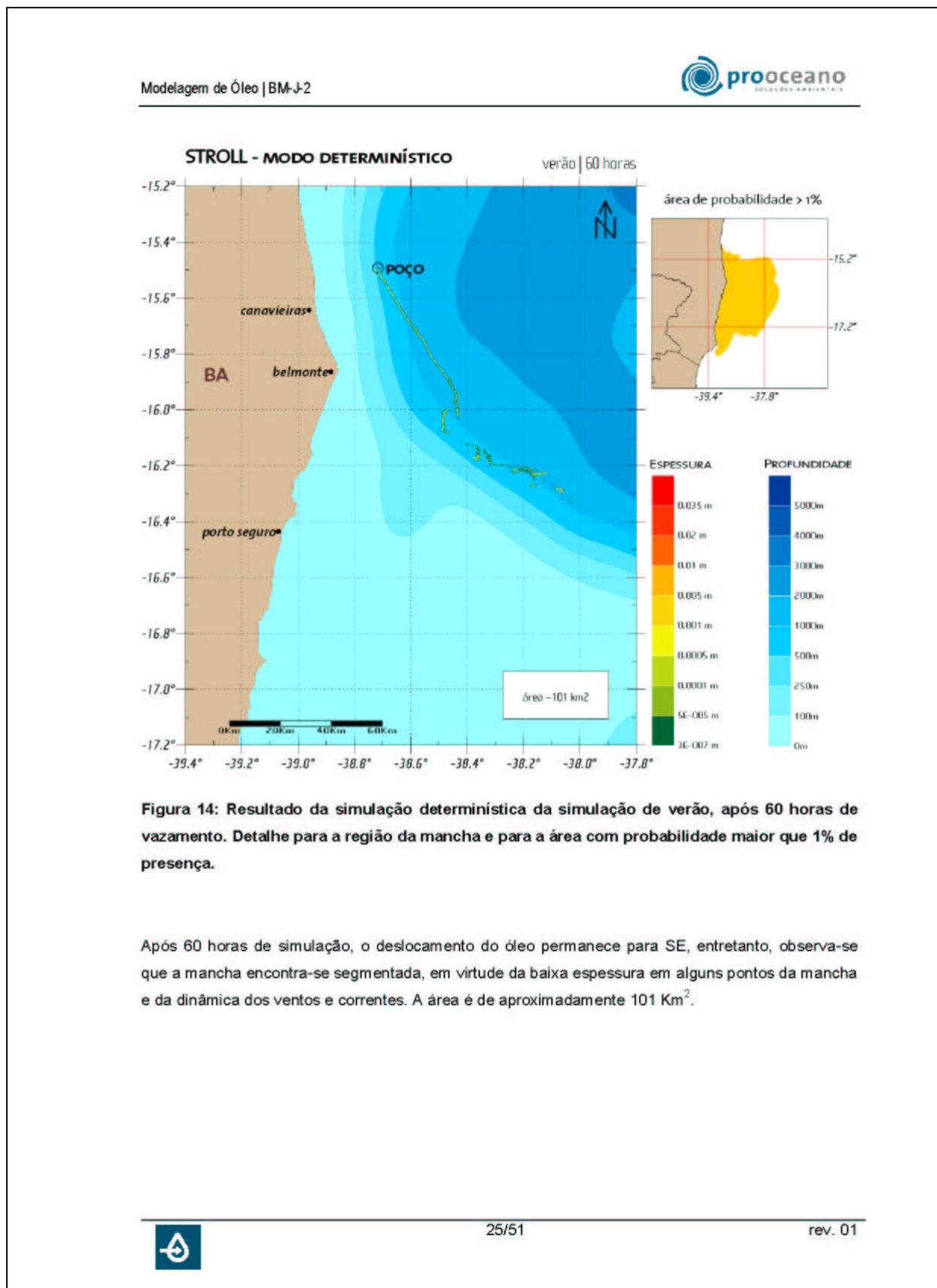
Modelagem de Óleo | BM-J-2



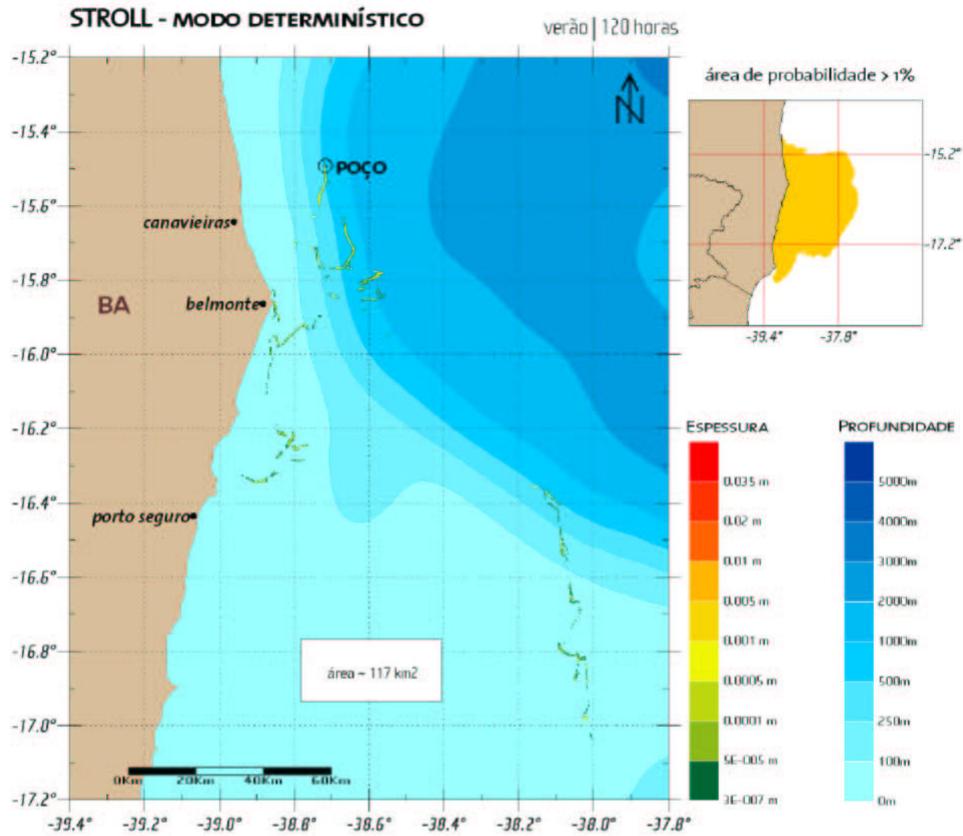
**Figura 13: Resultado da simulação determinística da simulação de verão, após 36 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha e para a área com probabilidade maior que 1% de presença.**

Após 36 horas de simulação a mancha de óleo ainda apresenta deslocamento rumo SE, com espessura máxima de 0,0005 m e aproximadamente 64 Km<sup>2</sup> de área.





Modelagem de Óleo | BM-J-2

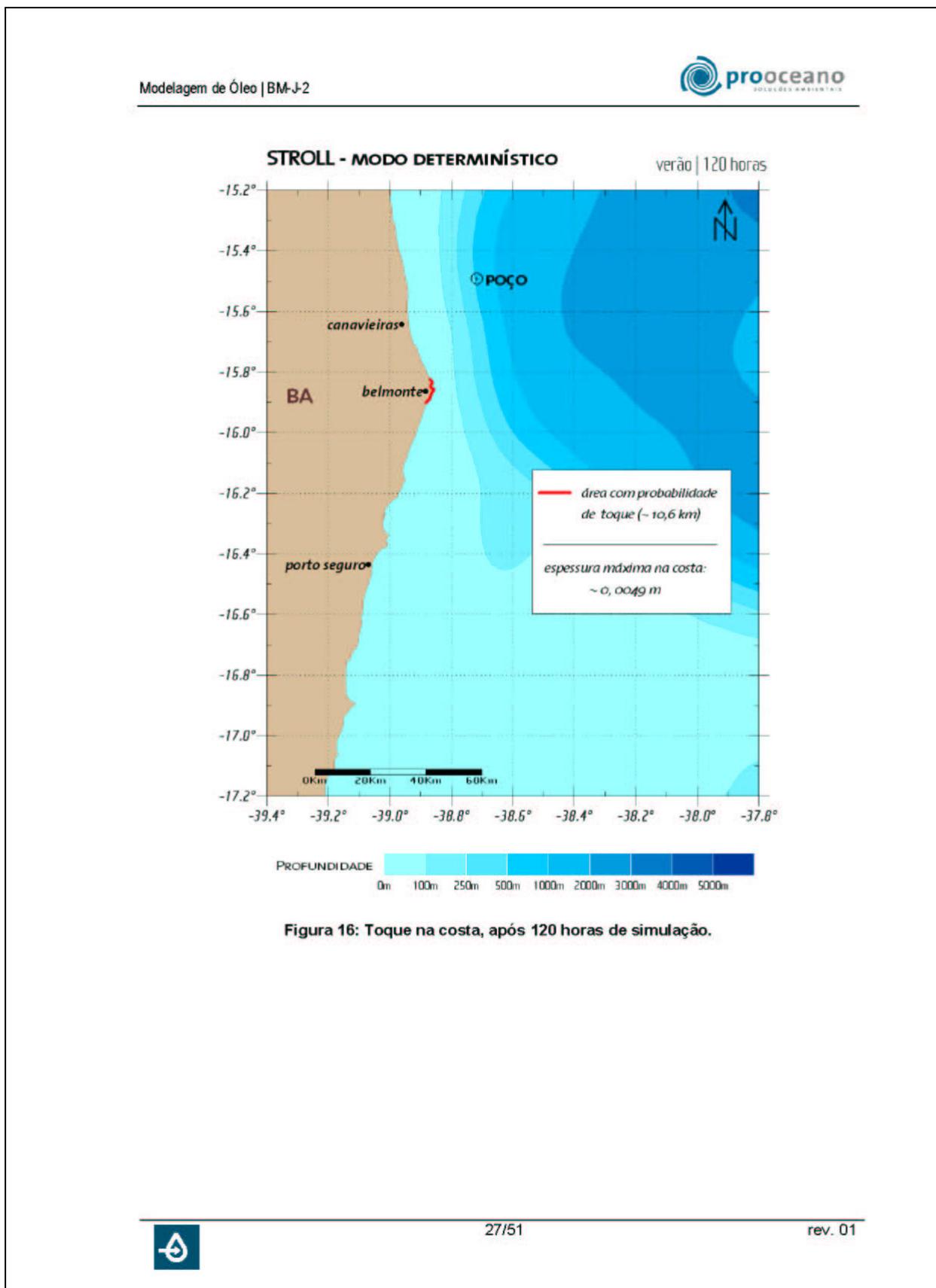


**Figura 15: Resultado da simulação determinística da simulação de verão, após 120 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha e para a área com probabilidade maior que 1% de presença.**

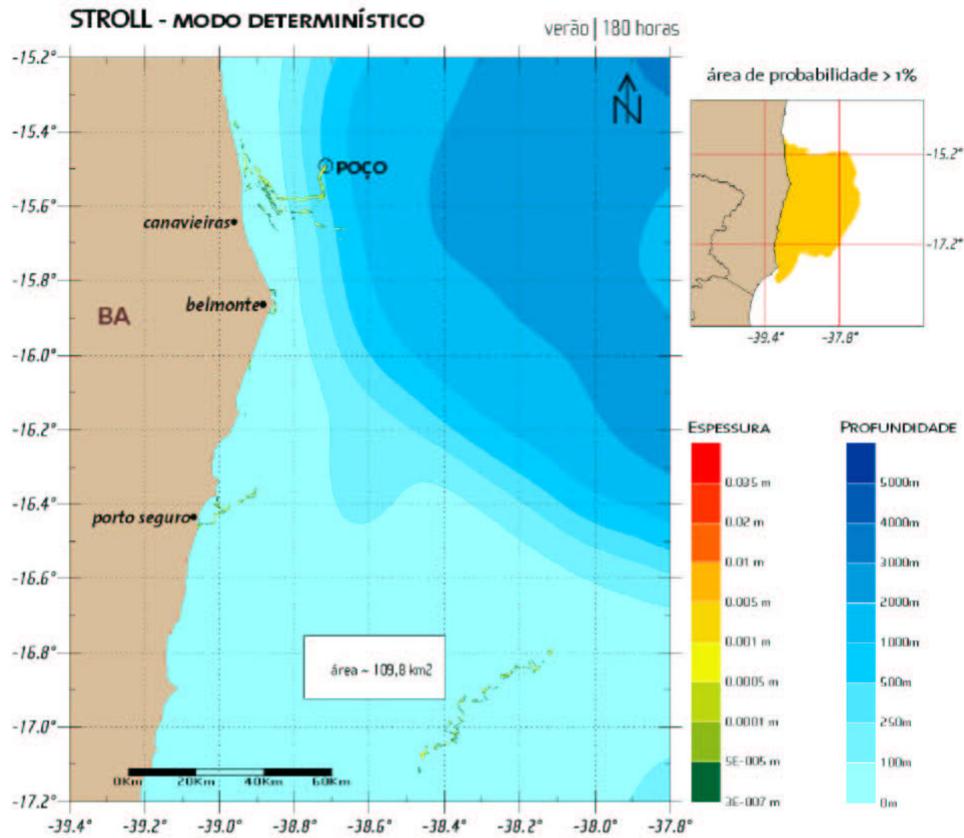
Com 120 horas de simulação a mancha, já bastante segmentada ruma para oeste, em direção ao continente. Observa-se que o óleo, nesse instante, atinge a costa na região de Belmonte, apresentando espessura máxima de 0,0049 m e área total de aproximadamente 117 Km<sup>2</sup>.

Na Figura 16 observa-se que o perímetro de costa atingida por óleo, após 120 horas de simulação é de aproximadamente 10,6 Km.





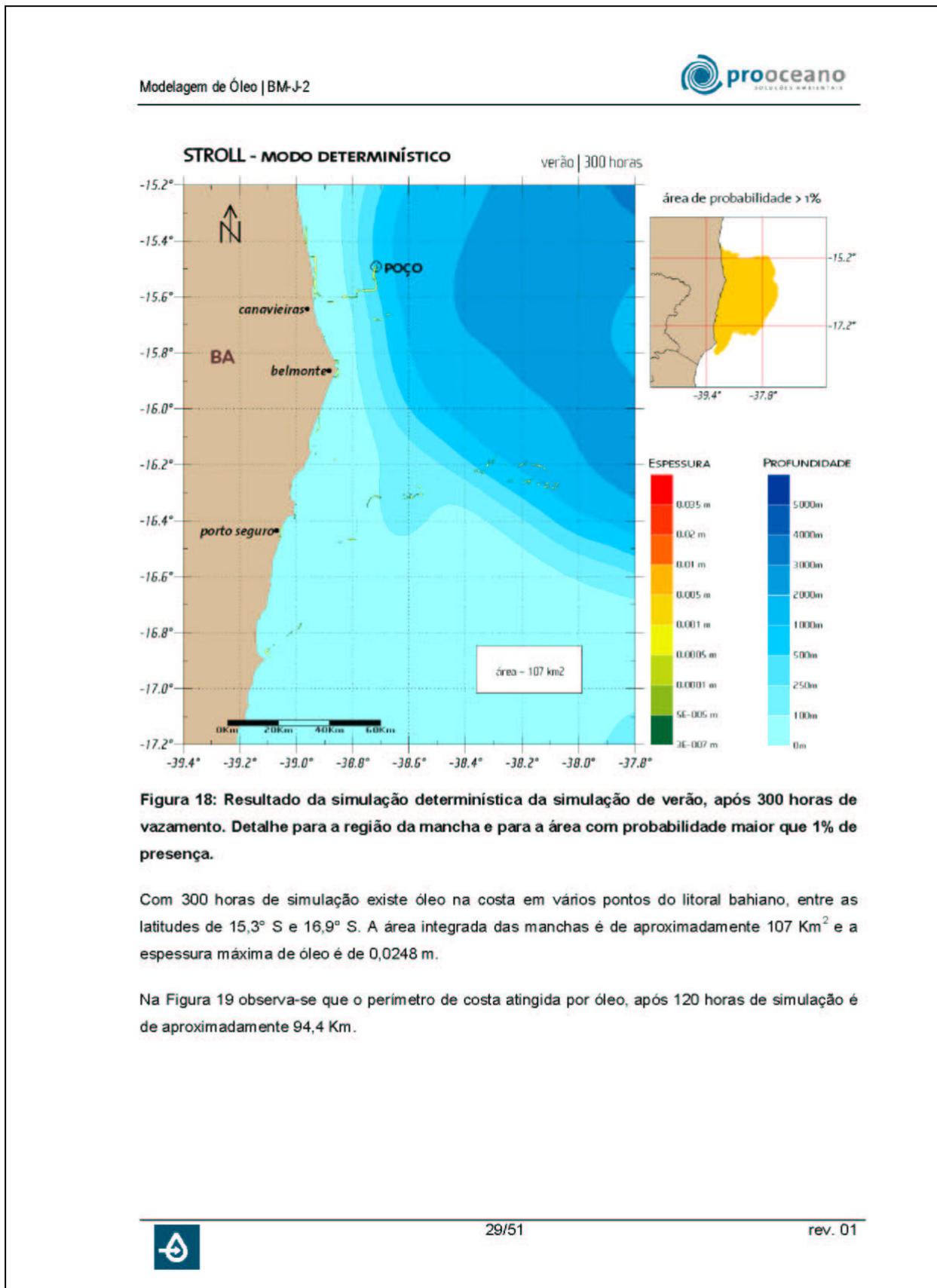
Modelagem de Óleo | BM-J-2



**Figura 17: Resultado da simulação determinística da simulação de verão, após 180 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha e para a área com probabilidade maior que 1% de presença.**

Após 180 horas do início do vazamento existe óleo na costa, na região ao norte de Canavieiras e na região compreendida entre Belmonte e Porto Seguro, espalhado em alguns pontos. A dinâmica dos ventos e das correntes faz com que nesse instante existam algumas manchas de óleo espalhadas, totalizando uma área de aproximadamente 110,8 Km<sup>2</sup> e apresentando espessura máxima de 0,0094 m.





Modelagem de Óleo | BM-J-2

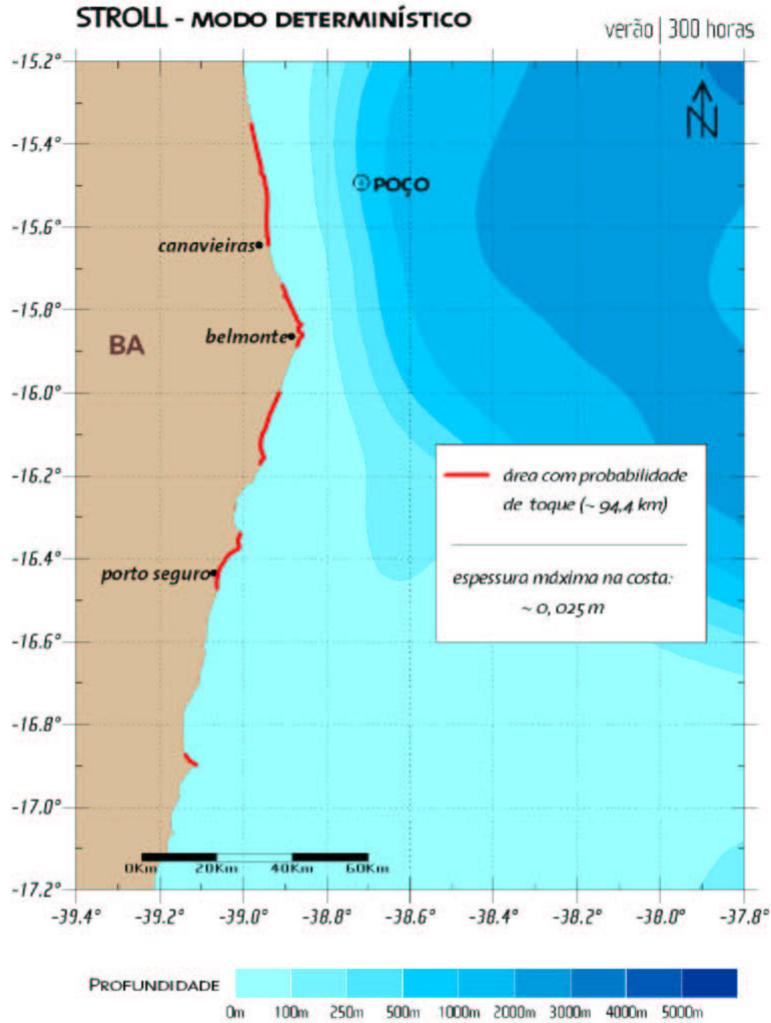
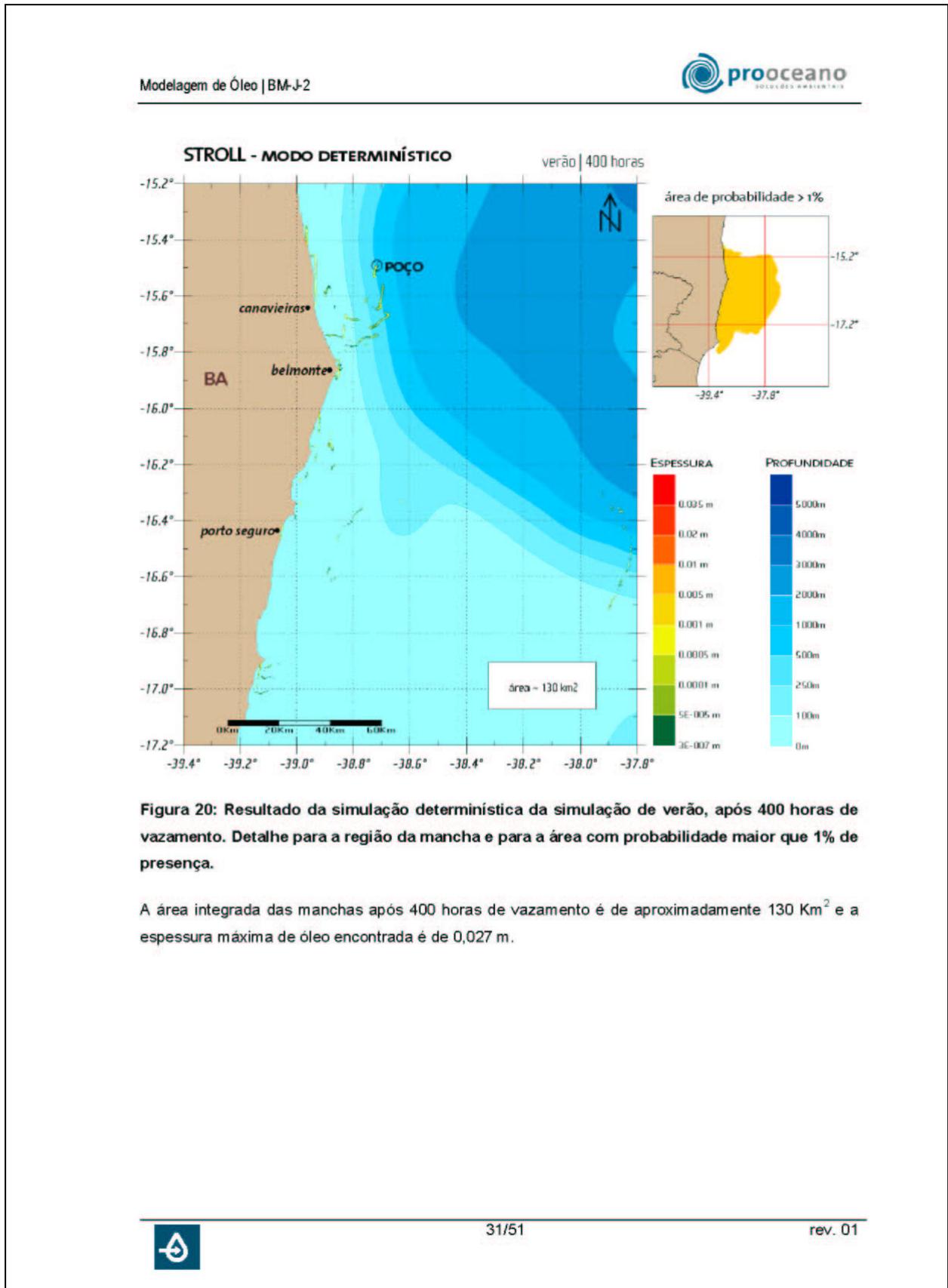
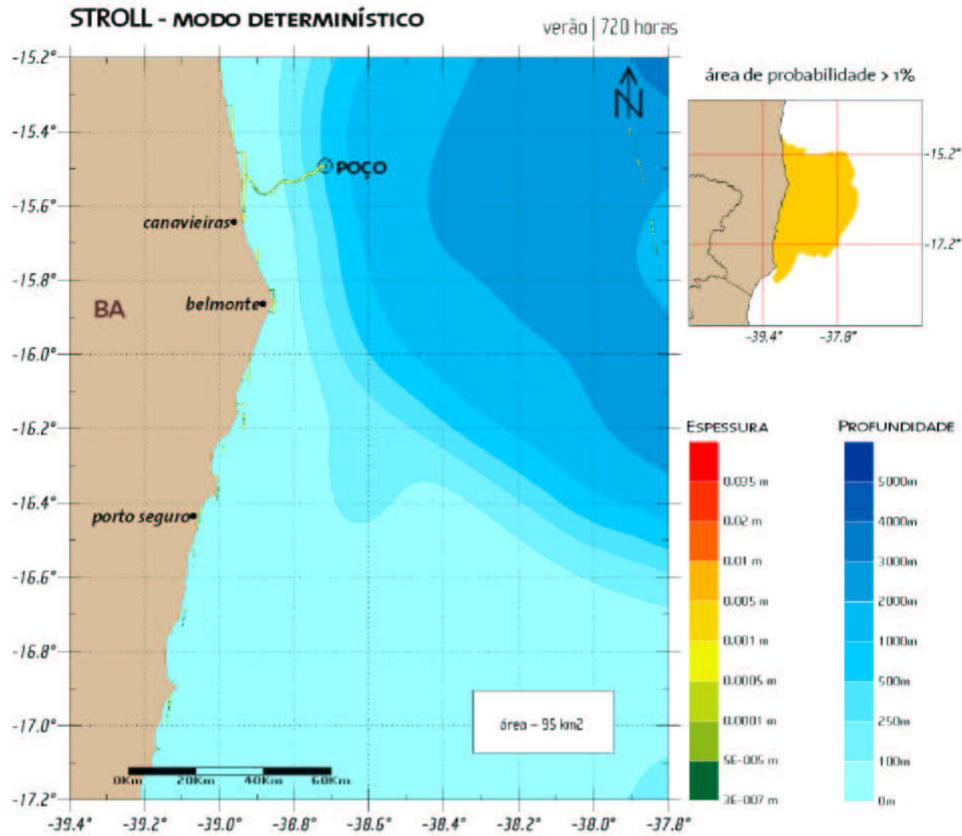


Figura 19: Toque na costa, após 300 horas de simulação.





Modelagem de Óleo | BM-J-2



**Figura 21: Resultado da simulação determinística da simulação de verão, após 720 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha e para a área com probabilidade maior que 1% de presença.**

Ao final das 720 horas de simulação, a deriva da mancha é orientada para oeste, em direção a costa. O óleo encontra-se espalhado ao longo da costa entre 15,3° S e 17° S. A área integrada das manchas é de aproximadamente 95 Km<sup>2</sup> e a espessura máxima de óleo é de 0,035 m.

Na Figura 22 observa-se que o perímetro de costa atingida por óleo, após 600 e 720 horas de simulação é de aproximadamente 136,1 Km.



Modelagem de Óleo | BM-J-2

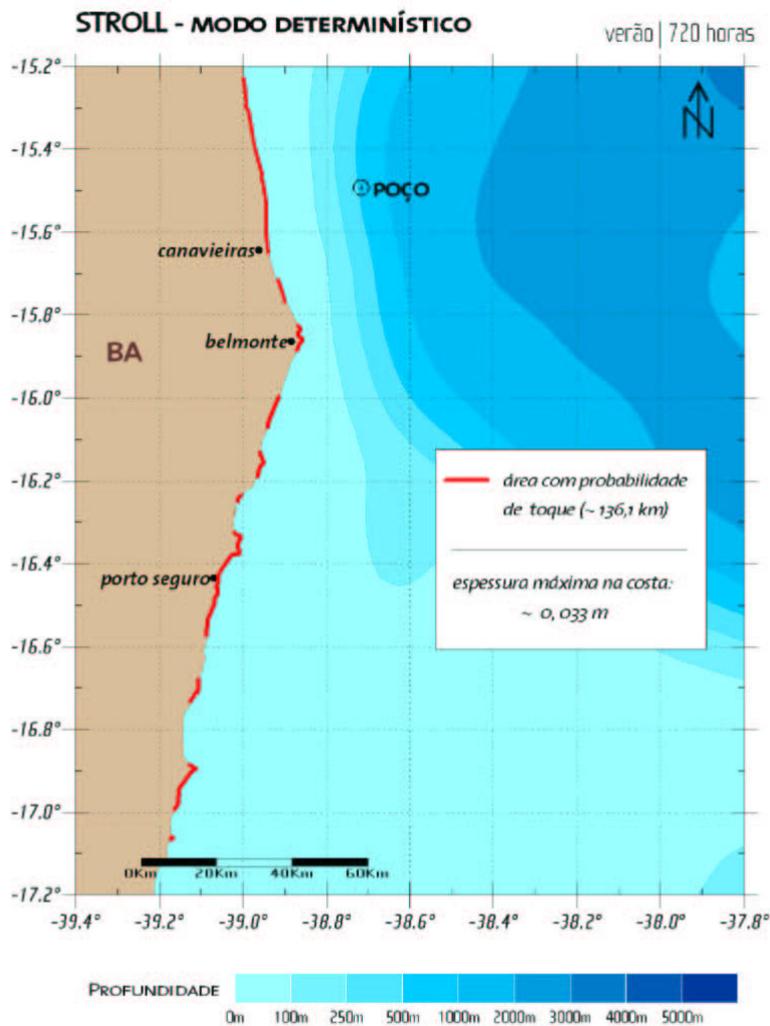


Figura 22: Toque na costa, após 720 horas de simulação.



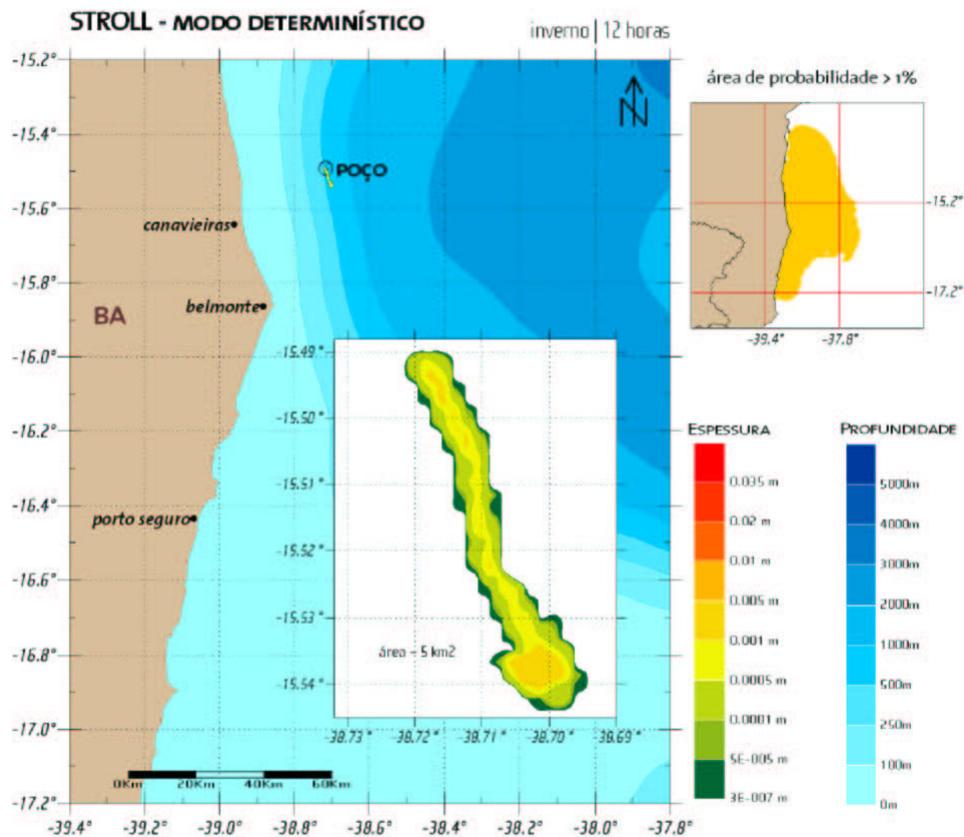


Modelagem de Óleo | BM-J-2

### III\_2.2 INVERNO

Nesse item serão apresentados os resultados obtidos para a primeira simulação realizada para o cenário ambiental de inverno.

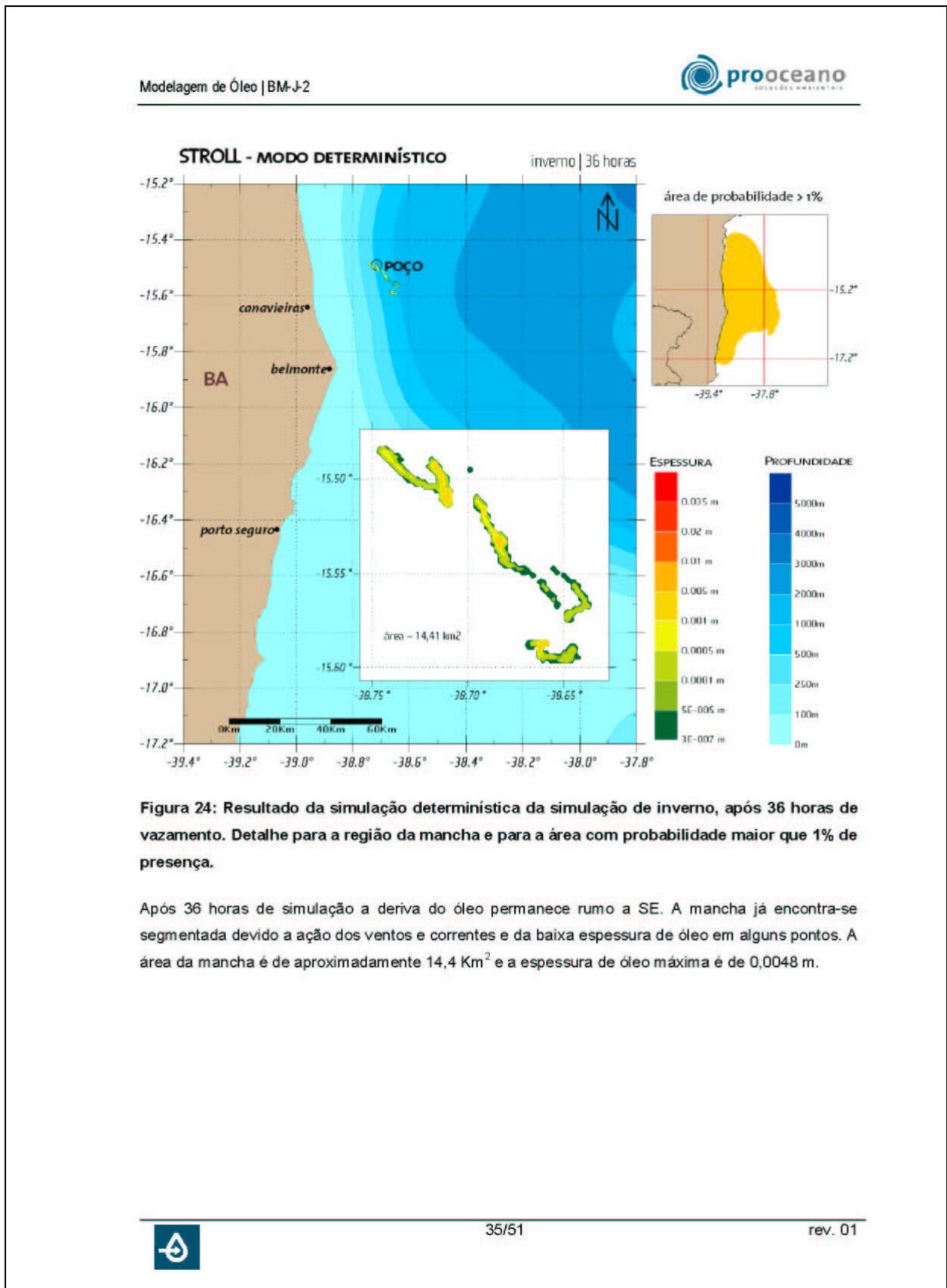
Os resultados obtidos nessa simulação são apresentados da Figura 23 a Figura 32.



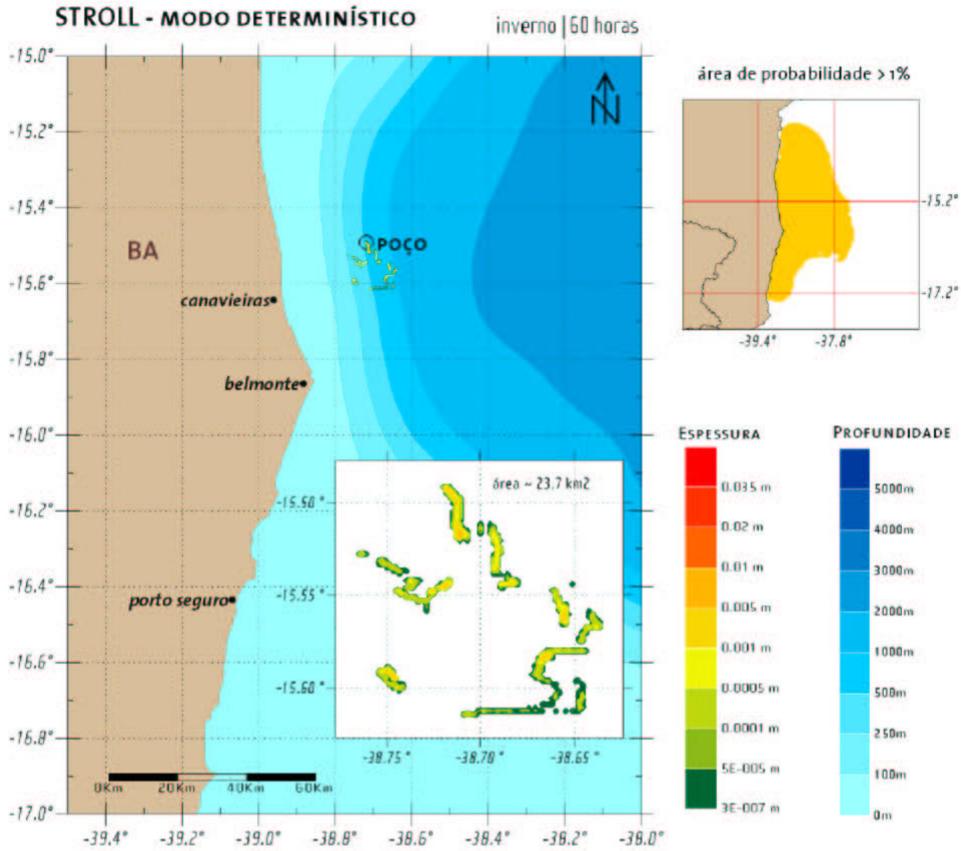
**Figura 23: Resultado da simulação determinística da simulação de inverno, após 12 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha e para a área com probabilidade maior que 1% de presença.**

Observa-se uma trajetória inicial da mancha rumo a SE, após 12 horas do vazamento. Nesse instante a espessura máxima de óleo é de 0,0033 m e a área da mancha totaliza aproximadamente 5 Km<sup>2</sup>.





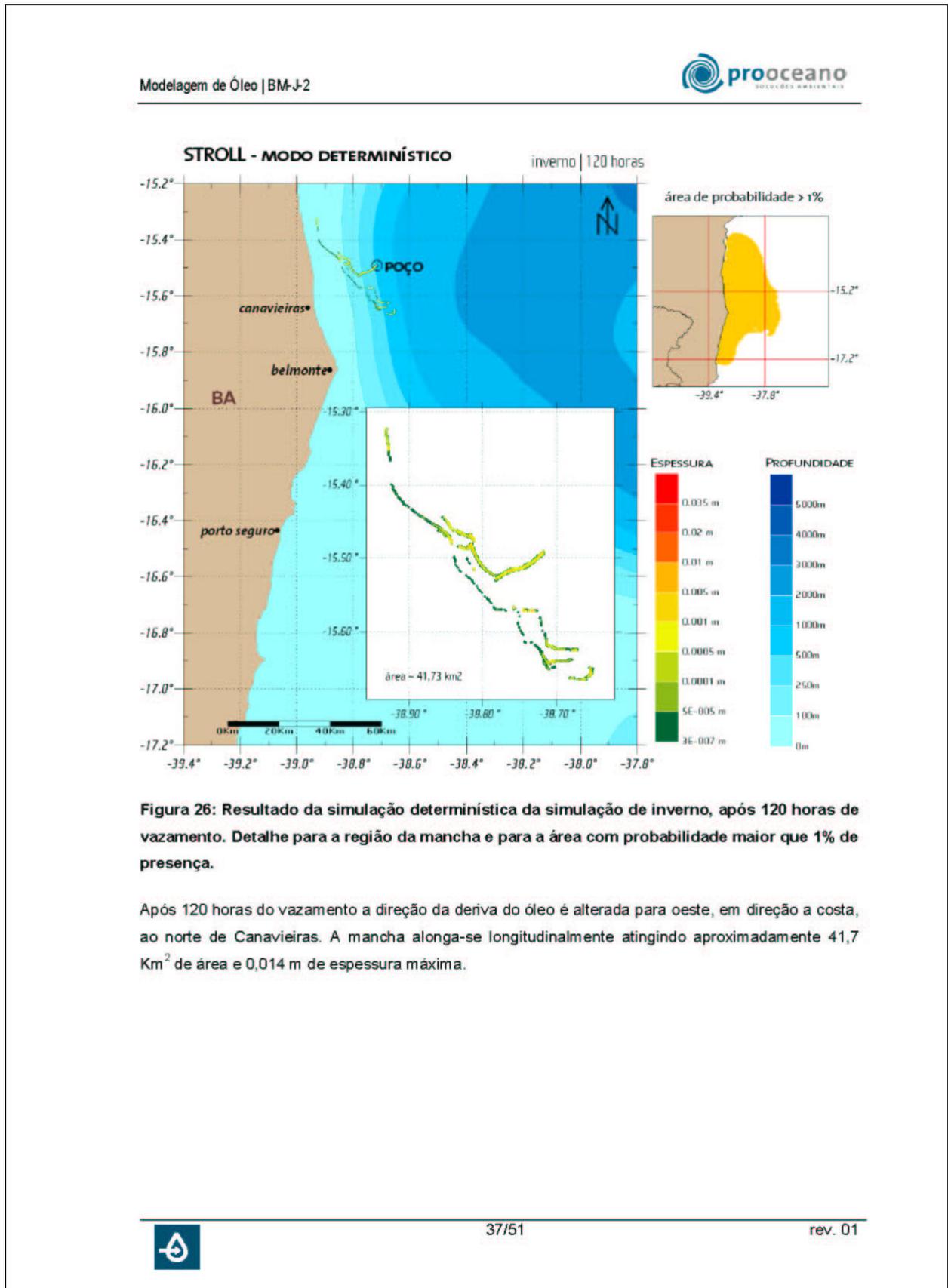
Modelagem de Óleo | BM-J-2



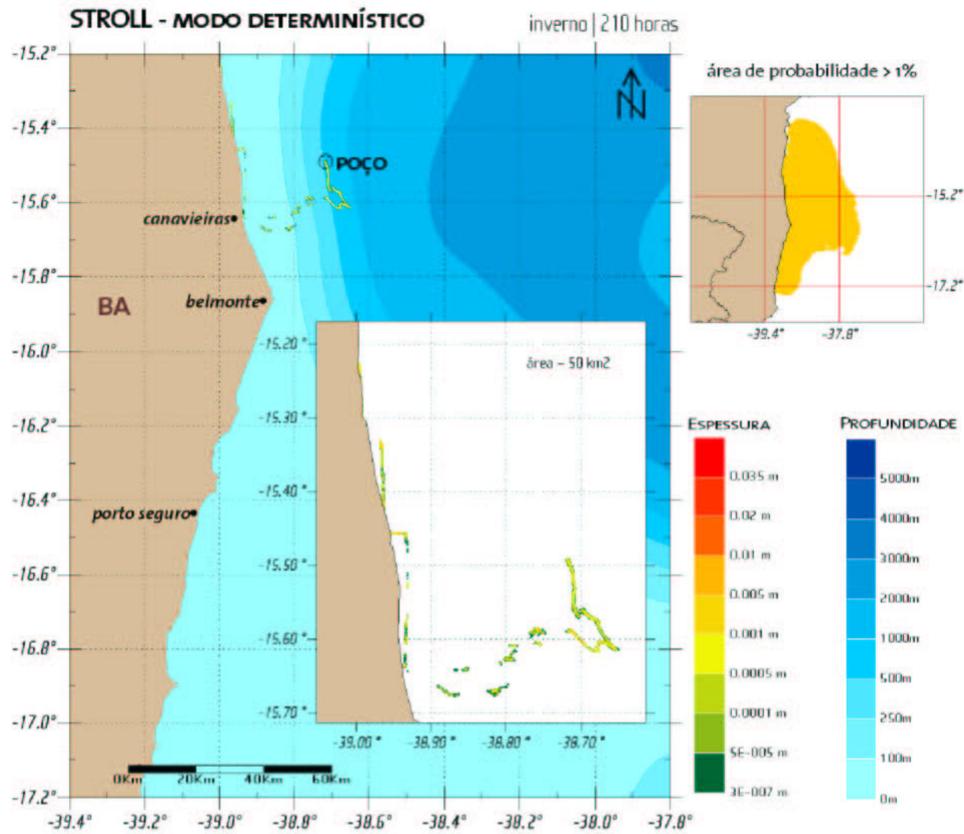
**Figura 25: Resultado da simulação determinística da simulação de inverno, após 60 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha e para a área com probabilidade maior que 1% de presença.**

Com 60 horas de simulação a mancha encontra-se ainda bem próxima ao poço, espalha-se por uma área de 23,7 Km<sup>2</sup>, apresentando espessura máxima de 0,0091 m.





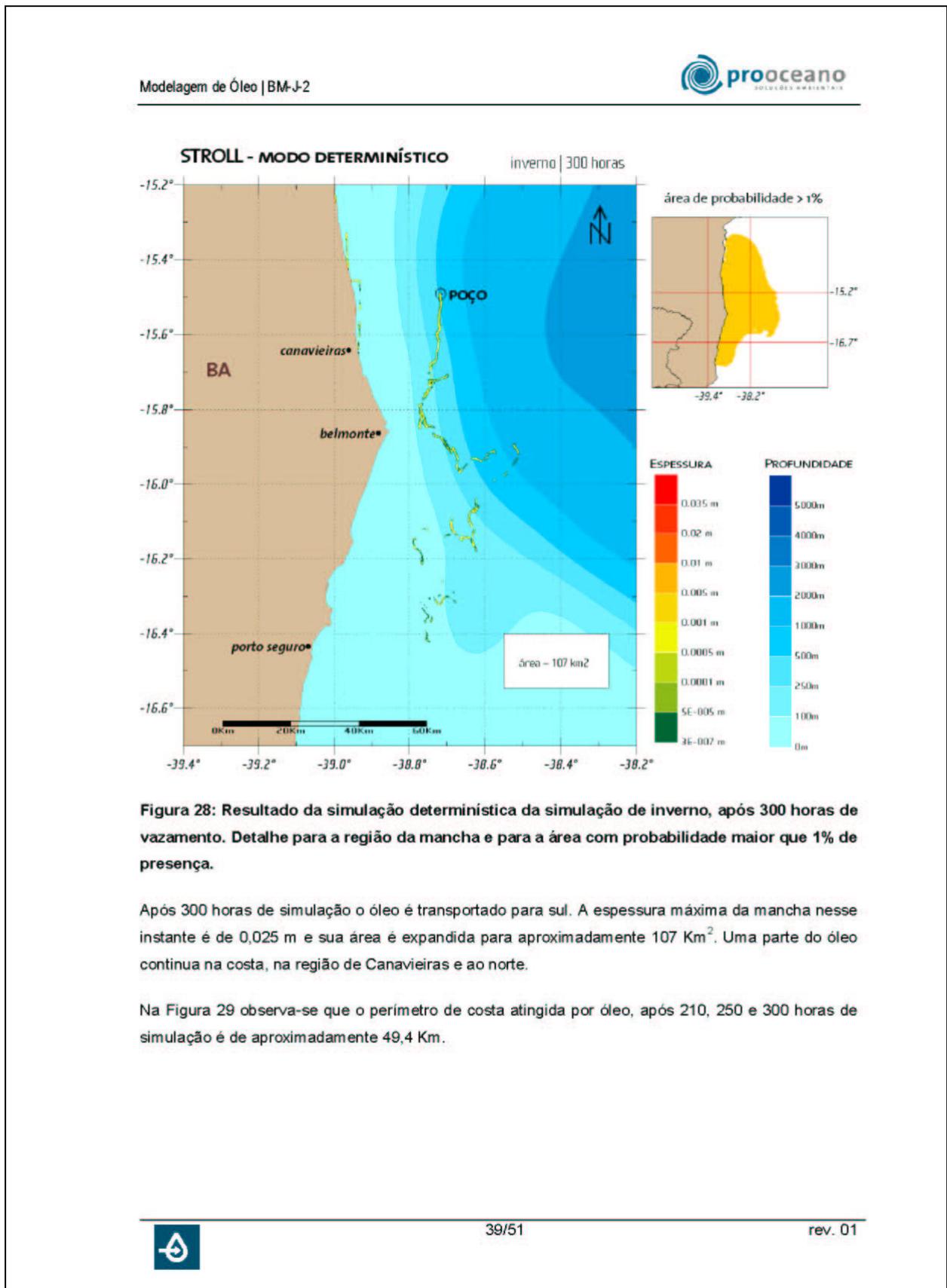
Modelagem de Óleo | BM-J-2



**Figura 27: Resultado da simulação determinística da simulação de inverno, após 210 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha e para a área com probabilidade maior que 1% de presença.**

Com 210 horas de simulação ocorre o primeiro toque de óleo na costa, na região de Canavieiras e ao norte até a latitude de 15,3° S. A espessura máxima encontrada nesse instante é de 0,026 m e a área total é de aproximadamente 50 Km<sup>2</sup>.





Modelagem de Óleo | BM-J-2



**STROLL - MODO DETERMINÍSTICO**

inverno | 210 horas | 300 horas

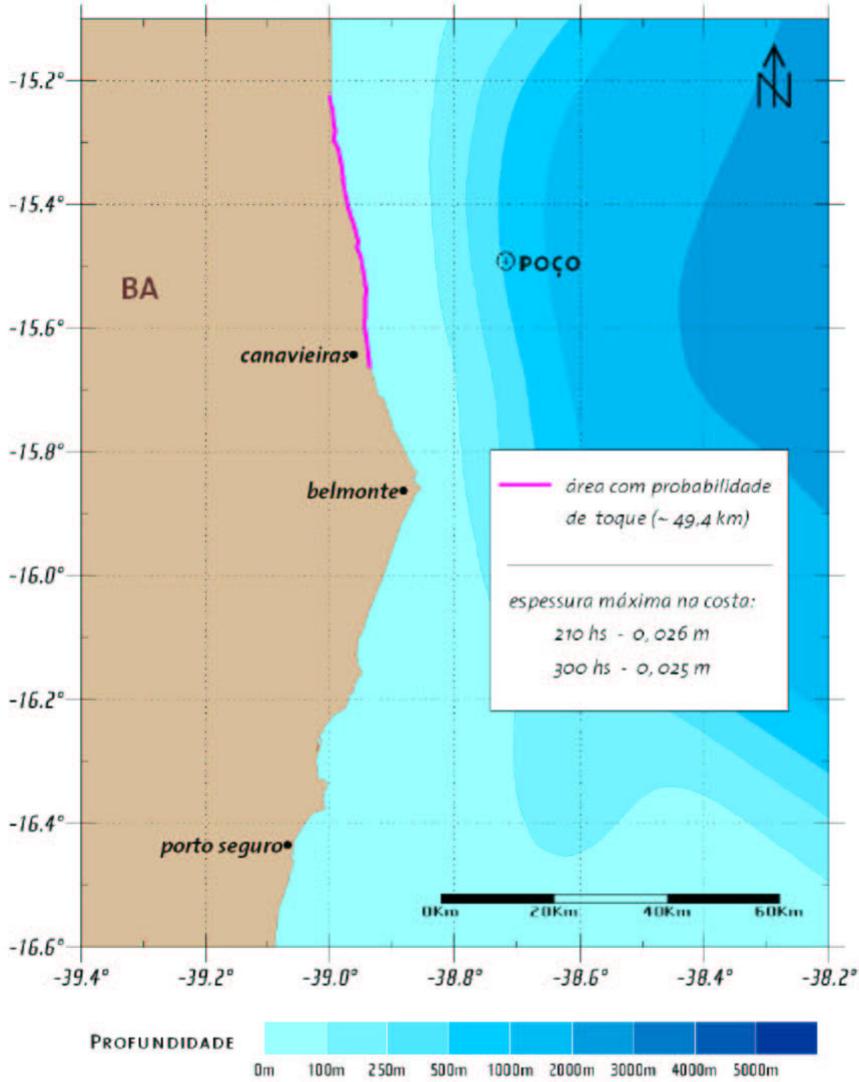
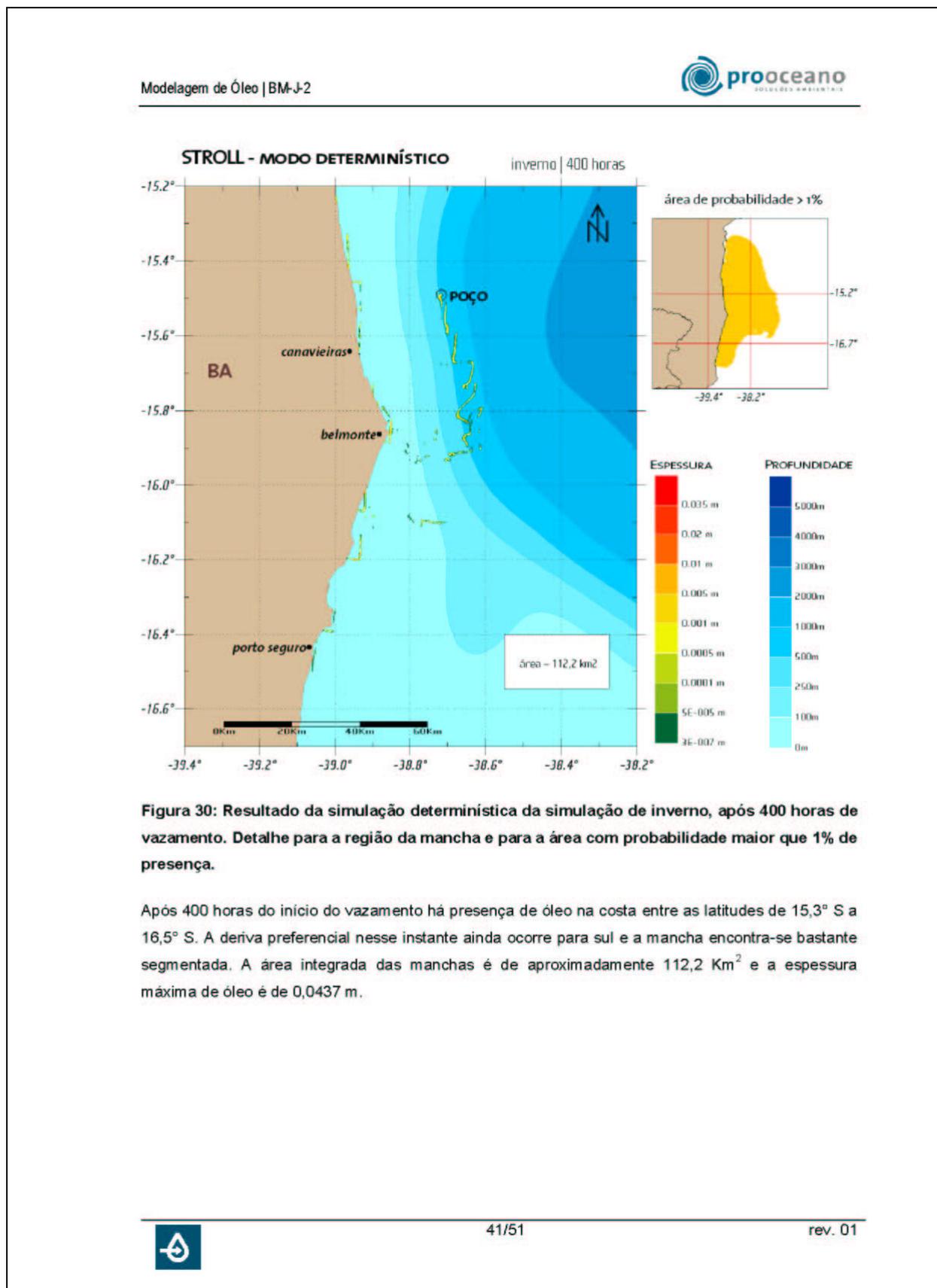
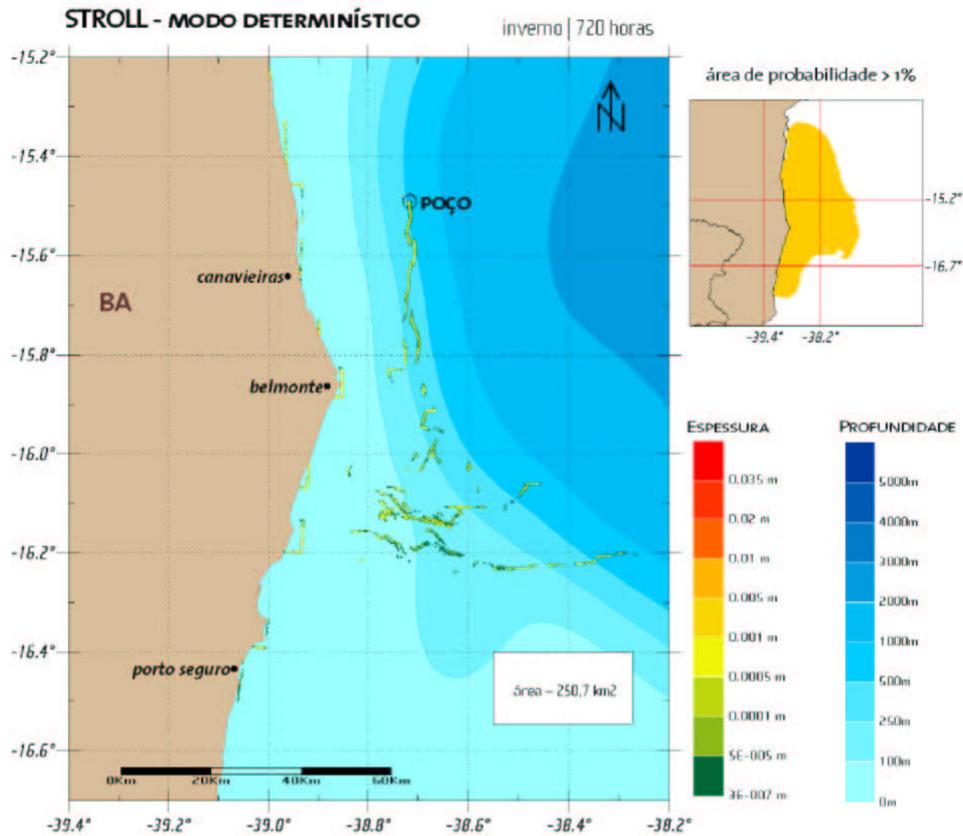


Figura 29: Toque na costa, após 210 e 300 horas de simulação.





Modelagem de Óleo | BM-J-2

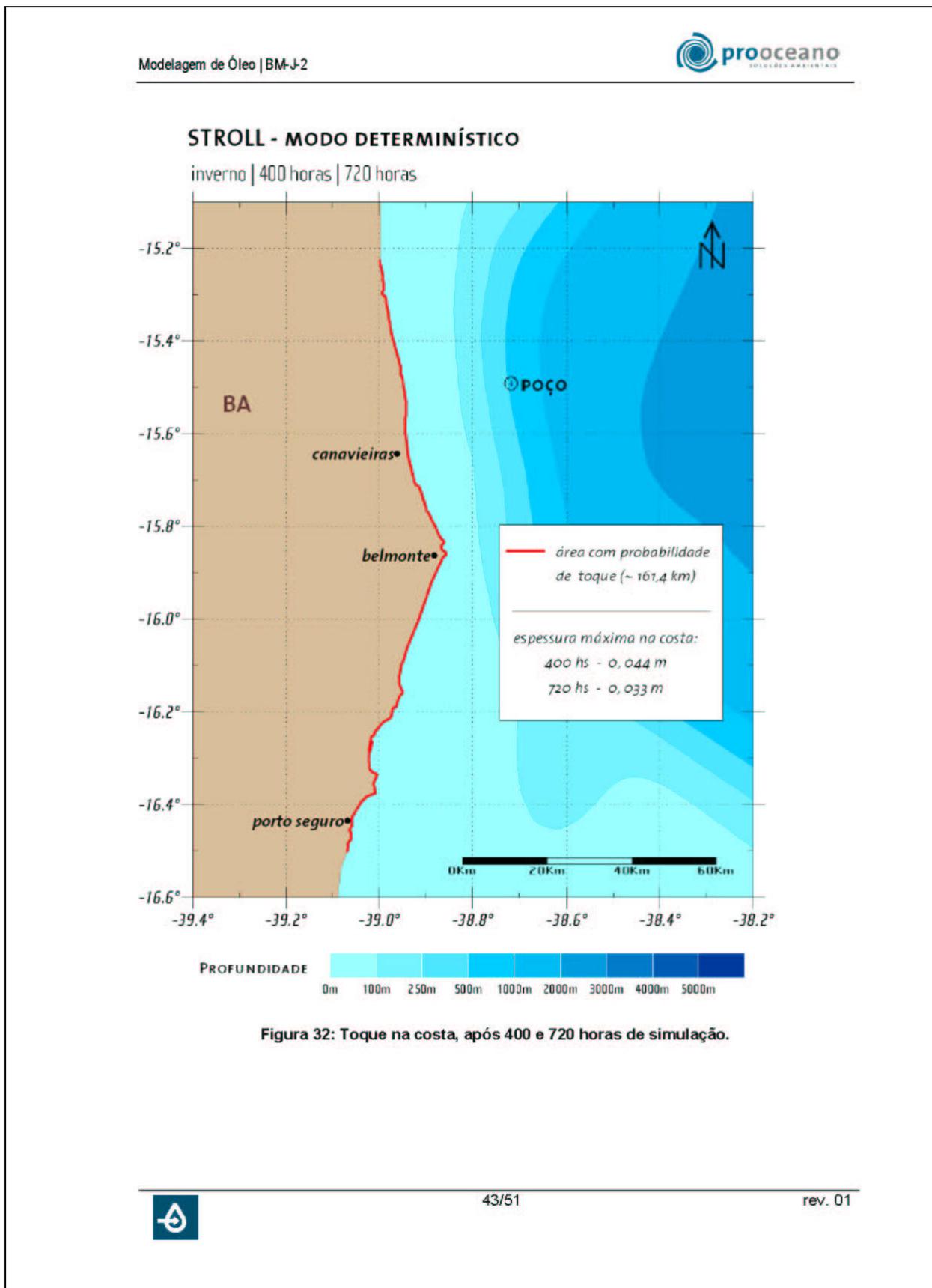


**Figura 31: Resultado da simulação determinística da simulação de inverno, após 720 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha e para a área com probabilidade maior que 1% de presença.**

Ao final das 720 horas de simulação, a deriva preferencial do óleo ainda ocorre rumo a sul, porém com um prolongamento da mancha para leste, próximo a latitude de 16,2° S. O toque de óleo na costa ocorre entre as latitudes de 15,3° S e 16,5° S. A espessura máxima encontrada foi de 0,0333 m e a área integrada das manchas é de aproximadamente 250,7 Km<sup>2</sup>.

Na Figura 32 observa-se que o perímetro de costa atingida por óleo, após 400, 600 e 720 horas de simulação é de aproximadamente 161,4 Km.





Modelagem de Óleo | BM-J-2



### III\_3. BALANÇO DE MASSA

Os resultados obtidos com relação ao intemperismo do óleo equivalente, simulado nesse estudo são apresentados nas Figura 33 a Figura 41.

A evaporação foi o principal responsável pela perda de massa ao longo das simulações, totalizando 73,9 % da massa perdida. Esse processo ocorre de forma efetiva até aproximadamente 120 horas de simulação.

Todo o percentual perdido na coluna d'água é atingido nas primeiras 12 horas após o vazamento, representando 17% da perda total de massa ao longo da simulação.

A ação conjunta dos processos de intemperismo consome aproximadamente 90,9 % do total do óleo equivalente disponibilizado na água.

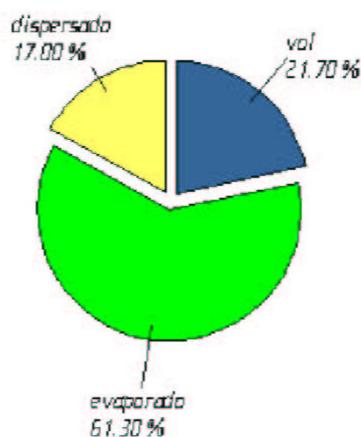


Figura 33: Percentual de massa após 12 horas de vazamento.



Modelagem de Óleo | BM-J-2

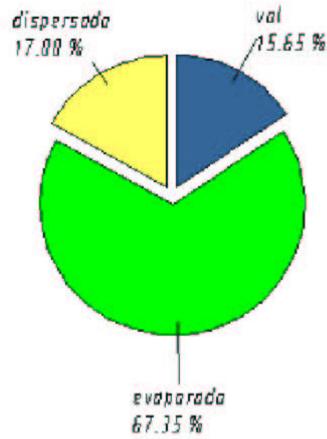


Figura 34: Percentual de massa após 36 horas de vazamento.

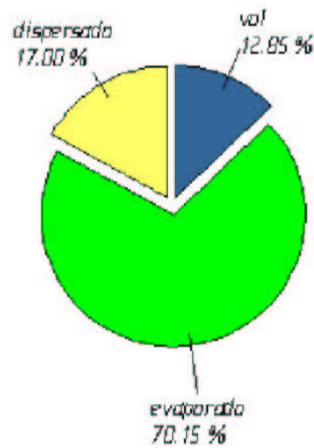


Figura 35: Percentual de massa após 60 horas de vazamento.



Modelagem de Óleo | BM-J-2



Figura 36: Percentual de massa após 120 horas de vazamento.



Figura 37: Percentual de massa após 180 horas de vazamento.



Modelagem de Óleo | BM-J-2

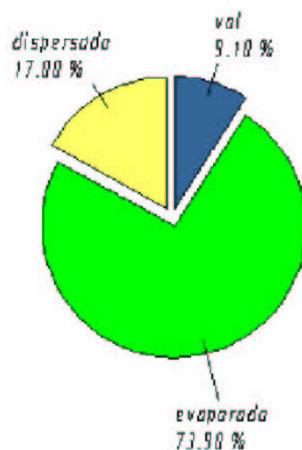


Figura 38: Percentual de massa após 210 horas de vazamento.



Figura 39: Percentual de massa após 300 horas de vazamento.



Modelagem de Óleo | BM-J-2

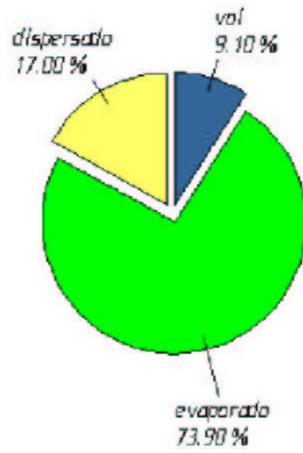


Figura 40: Percentual de massa após 400 horas de vazamento.

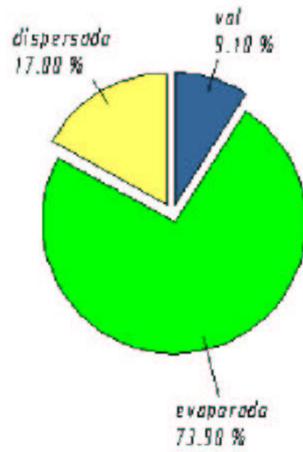


Figura 41: Percentual de massa após 720 horas de vazamento.



Modelagem de Óleo | BM-J-2



#### IV\_ CONCLUSÕES

Nesse estudo foram realizadas 500 simulações para cada cenário ambiental (inverno e verão), totalizando 1000 diferentes situações ambientais para um possível *blowout* de 30 dias na região do bloco BM-J-2.

No cenário de verão foi identificada uma extensão de costa de aproximadamente 352 km, na qual há probabilidade maior que 1% de de toque de óleo. Para o período de inverno o perímetro suscetível ao toque foi de 471 Km.

Os resultados probabilísticos mostraram que no cenário de verão há uma maior probabilidade do óleo de atingir áreas ao sul do poço, chegando até a região costeira de Caravelas. A deriva para sul também está presente no cenário de inverno, entretanto, nessa situação a maior região com probabilidade de presença de óleo encontra-se ao norte do poço, estendendo-se até Morro de São Paulo.

A integração dos cenários mostrou possibilidade de chegada de óleo em regiões costeiras desde o sul de Caravelas até Morro de São Paulo, totalizando aproximadamente 500 Km de costa suscetíveis.

A partir dos resultados probabilísticos, foram identificadas 2 diferentes situações de deriva para serem simuladas no modo determinístico, considerando os critérios de menor tempo de chegada nas diferentes regiões com possibilidades de toque.

As simulações determinísticas mostraram que no cenário de verão, o menor tempo de toque na região de Canavieiras ocorre após 120 horas de simulação. Na simulação de inverno, observa-se que após 210 horas, há toque de óleo na costa, também na região de Canavieiras e ao norte.

Os resultados do balanço de massa mostraram que aproximadamente 90% do volume de *blowout* é consumido pelos processos de intemperismo, entretanto, os mesmos são efetivos até, no máximo, 120 horas após a disponibilização do óleo na água.



## V\_ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMPOS, E.J.D. Estudos da circulação oceânica no Atlântico tropical e na região oeste do Atlântico subtropical sul. Tese de Livre-Docência. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 1995. 114p.
- CSANADY, G. T., 1972. Turbulent Diffusion in the Environment. Geophysics and Astrophysics Monographs, Vol.3, 247 pp., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht: Holland.
- GAETA, S.A., LORENZETTI, J.A., MIRANDA, L.B., SUSINI-RIBEIRO, S.M.M., POMPEU, M., DE ARAÚJO, C.E.S., 1999. "The Vitória Eddy and its relation to the phytoplankton biomass and primary productivity during the austral fall of 1995." Arch. Fish. Mar. Res. 47 (2/3), pp. 253-270.
- IBAMA/ANP, 2002: Diretrizes técnicas para modelagem de derramamento de óleo no mar.
- 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.
- 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.
- MASCARENHAS Jr., A. DS., MIRANDA, L. B., y ROCK, N. J., 1971, "A study of the oceanographic conditions in the region of Cabo Frio." Fertility in the Sea, Gordon & Breach, vol. 1, pp. 285-308.
- OHEY, 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.
- OHEY, 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.
- REED, M., 1989.: The Physical Fates Component of The Natural Resource Damage Assessment Model System. Oil & Chemical Pollution. Elsevier Science Publishers Ltd. England.

Modelagem de Óleo | BM-J-2



SCHMID, C., G. SIEDLER and W. ZENK (2000): "Dynamics of Intermediate Water Circulation in the Subtropical South Atlantic." J. Phys. Oceanogr., 30 (12), pp. 3191-3211.

SIGNORINI, S. R., 1978, "On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between São Tomé and Guanabara Bay", Deep-Sea Research, 25, pp. 481-490.



