

## **MODELAGEM DA DISPERSÃO DE ÓLEO**

A presente seção visa modelar a dispersão de óleo e efluentes através de simulações probabilísticas e determinísticas realizadas para o Campo de Siri, poço 1-RNS-140, empregando o modelo hidrodinâmico POM (Princeton Ocean Model) e o modelo de dispersão de óleo OSCAR (Oil Spill Contingency and Response). Cabe salientar que a presente seção considerou apenas a modelagem de condensado, tendo em vista o pequeno volume de água de produção a ser gerado a partir de 2010 tendo seu escoamento juntamente com os demais componentes para a UTPF em Guamaré.

A Resolução CONAMA nº 293/01 define 3 (três) classes de derramamento: pequeno, com um volume de 8 m<sup>3</sup>; médio com até 200 m<sup>3</sup> e de pior caso, decorrente da perda de controle do poço (*blowout*) por 30 dias. Sendo assim, foram conduzidas simulações probabilísticas, a fim de determinar a área de influência da mancha de óleo na região de interesse sob diferentes condições meteo-oceanográficas, em períodos de verão e inverno, considerando derramamentos instantâneos de 8 m<sup>3</sup> e 200 m<sup>3</sup>, e contínuo de 20 m<sup>3</sup>/dia ao longo de 30 dias.

A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram realizadas simulações determinísticas reproduzindo os cenários de pior caso, no qual o óleo chega mais rapidamente à costa, para condições de verão e inverno.

### **A) Modelagem Hidrodinâmica**

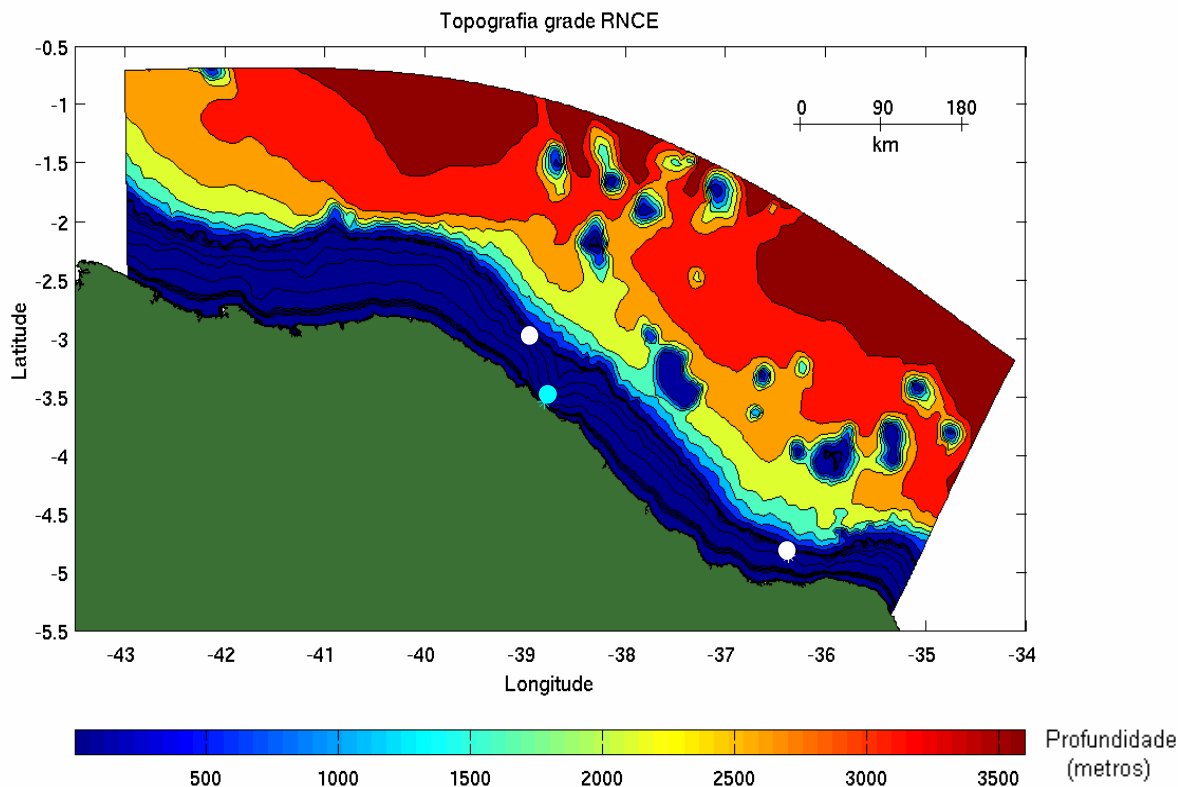
Para modelagem hidrodinâmica foi selecionada uma área que englobasse por completo as Bacias do Ceará e Potiguar, até o estado do Maranhão. A área de interesse e sua batimetria encontram-se na Figura 1. O estudo foi realizado para dois períodos de 30 dias, o primeiro em janeiro de 1997 e o segundo em maio de 2002, representando períodos de verão e inverno respectivamente.

Os resultados do experimento de janeiro de 1997 foram calibrados contra uma série de correntometria coletada no litoral do Ceará, e os resultados de maio de 2002 foram calibrados contra uma série coletada no litoral do Rio Grande do Norte. Os pontos onde foram coletadas as séries de correntometria usadas para

calibração aparecem na Figura 1 marcados em branco. Ambos os experimentos também foram calibrados em termos de nível, sendo que nos dois períodos a série de nível foi obtida na Ponta de Pecém, a qual aparece na Figura 1 marcada em azul claro.

Pode-se dizer, então, que uma abordagem completa da circulação ao largo dos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará só é possível se os experimentos numéricos contemplarem as correntes de maré, as correntes geradas localmente pelo vento e a Corrente Norte do Brasil. Dessa forma, o estudo aqui apresentado foi realizado com as cinco principais componentes de maré (M2, S2, N2, O1 e K1), dados horários de vento e dados de nível médio do mar, temperatura e salinidade que reproduzem a Corrente Norte do Brasil.

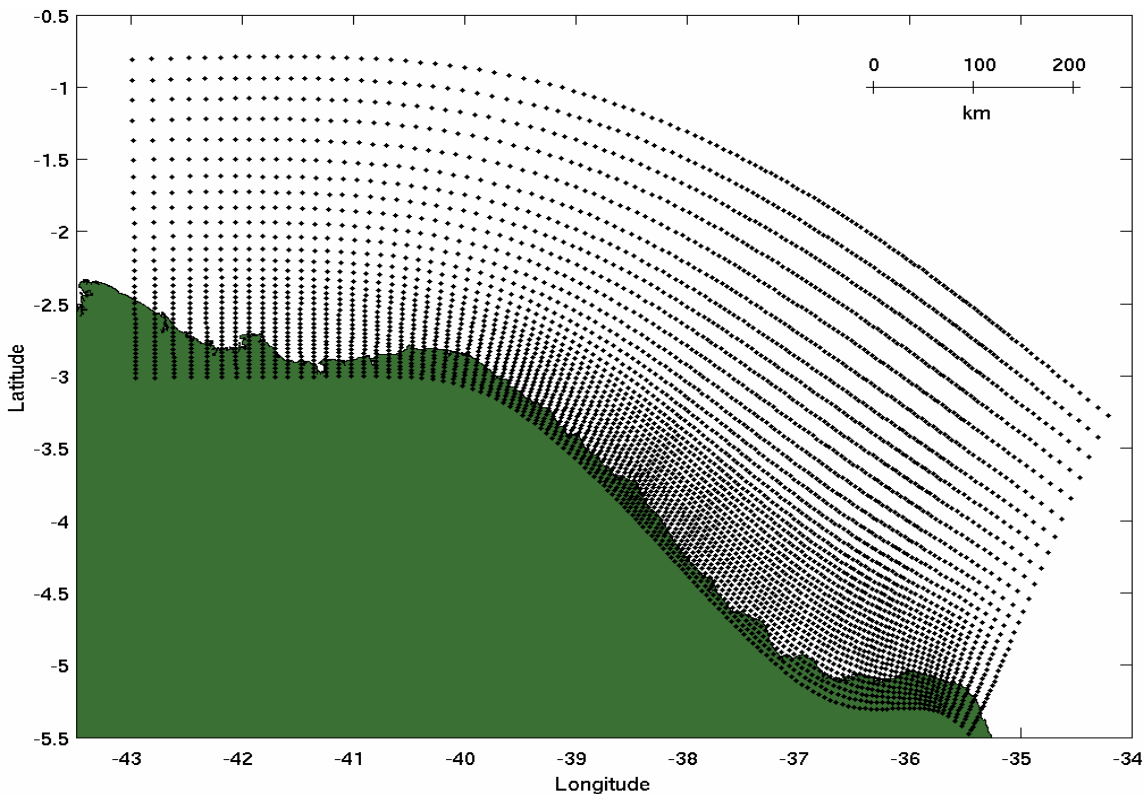
Para calibração do modelo hidrodinâmico foram utilizados dados de vento medidos entre 01 de janeiro de 1997 e 31 de janeiro de 1997, para o período de verão, por um anemômetro localizado nas coordenadas 2°58'18,8"S e 38°58'18"W. Para o período de inverno utilizaram-se dados entre 3 de maio de 2002 e 3 de junho de 2002 nas coordenadas 5°44,8'S e 35°11,5' W.



**Figura 1:** Batimetria da área modelada. Em branco estão marcados os pontos de coleta de dados de corrente e vento e em azul claro o ponto de coleta dos dados de nível

### A.1) Descrição da Grade Numérica

A Figura 2 apresenta a grade numérica utilizada na simulação hidrodinâmica. Essa grade estende-se até o estado do Maranhão, no entanto apresenta maior resolução nas Bacias do Ceará e Potiguar. Nessa figura não foram plotados todos os pontos da grade, mas apenas de 3 em 3 pontos, para facilitar a visualização. O tamanho dos elementos varia entre aproximadamente 900 x 1.500 m, nas áreas de alta resolução, até 8.000 x 14.000 m nas áreas mais afastadas da costa. A grade foi elaborada com 16 níveis sigma, com alta resolução vertical próximo à superfície e próximo ao fundo, para que se possa reproduzir a camada de Ekman da superfície, essencial para simulação da circulação dirigida pelo vento, e a camada de Ekman do fundo, essencial para reprodução das correntes de maré.



**Figura 2:** Pontos da grade numérica utilizada na simulação hidrodinâmica (estão representados de 3 em 3 pontos).

## A.2) Descrição do modelo

O modelo hidrodinâmico utilizado é o Princeton Ocean Model (POM). O POM é um modelo tri-dimensional de diferenças finitas, que incorpora um esquema de fechamento turbulento para resolução da mistura turbulenta nas camadas de contorno, e que permite a realização de simulações prognósticas. Para uma descrição mais detalhada consultar os trabalhos de Blumberg & Mellor (1987) e Mellor (1998).

O modelo utiliza-se das aproximações de Boussinesq e hidrostática. A mistura turbulenta vertical é resolvida separadamente em um sub-modelo interno, conhecido como o esquema de fechamento turbulento, o qual foi desenvolvido por Mellor & Yamada (1982).

O POM adota soluções largamente utilizadas na literatura, tais como gradeamento do tipo *C* de *Arakawa*, possibilidade de implementação de grades curvilíneas e possibilidade de implementação da aproximação do plano Beta.

As equações utilizadas pelo modelo são a equação da continuidade (equação da conservação da massa para fluidos incompressíveis), as equações primitivas do movimento e as equações para conservação de salinidade, temperatura, energia cinética turbulenta e a escala da energia cinética, todas colocadas no sistema de coordenadas *sigma*. Para uma descrição detalhada da derivação dessas equações recomenda-se a leitura do trabalho de Blumberg & Mellor (1980).

### **A.3) Descrição do experimento numérico**

Os experimentos numéricos com o modelo POM na área de interesse foram executados com as forçantes: vento local, maré, temperatura e salinidade. Os períodos simulados foram 31 dias do mês de janeiro de 1997 e o período de 30 dias compreendido entre 3 de maio de 2002 e 3 de junho de 2002. Os dados utilizados como forçantes dos experimentos são descritos a seguir.

#### *Dados de Maré*

Amplitude e fase das componentes M2, S2, N2, O1 e K1 foram obtidas do modelo global de Grenoble, França, conhecido como FES95.2 (Finite Element Solution 95.2) e desenvolvido por Le Provost *et al.* (1994). O modelo FES95.2 é um modelo de elementos finitos, baseado nas equações primitivas do movimento que cobre todo o globo, desde a Antártica até o Ártico, e que assimila dados *in situ* e dados dos altímetros Topex/Poseidon. O uso de elementos finitos permite resolução variada, com alta resolução nas áreas rasas, podendo chegar a 10 km de resolução espacial em alguns lugares. Essa propriedade do modelo permite a simulação com qualidade da onda de maré sobre a plataforma continental. Oito componentes são simuladas: M2, S2, N2, K2, 2N2, K1, O1, Q1. Os dados de amplitude e fase dessas componentes, calculados na grade irregular de elementos finitos, são projetados sobre uma grade regular com espaçamento de

0,5° x 0,5°, e interpolados para os pontos da grade das bacias do Ceará e Potiguar.

### *Dados de Temperatura e Salinidade*

A circulação termohalina foi contemplada através de condições de contorno aplicadas nos contornos laterais abertos e na superfície da grade numérica. Dados de temperatura e salinidade obtidos do modelo global OCCAM (Ocean Circulation and Climate Advanced Model) são prescritos nos contornos laterais, e o fluxo de calor estimado a partir da temperatura superficial do OCCAM é prescrito na superfície. Os dados de temperatura, salinidade e elevação da superfície do mar foram interpolados para os pontos das grades da área de interesse (Gwilliam, 1995).

O OCCAM foi desenvolvido dentro de um programa de pesquisa resultante da cooperação entre o Southampton Oceanography Centre (SOC) e as universidades de East Anglia e Edinburgo, no Reino Unido. É um modelo global baseado nas equações primitivas do movimento que usa uma grade Arakawa B na horizontal e coordenadas cartesianas na vertical, e que foi derivado do modelo de Bryan-Cox-Semtner (Bryan, 1969; Semtner, 1974; Cox, 1984).

O uso desses dados de temperatura e salinidade é essencial para o experimento aqui descrito por dois motivos: 1) somente com dados de salinidade e temperatura que apresentem gradientes espaciais realistas é possível forçar a componente baroclínica da Corrente Norte do Brasil; e 2) a estratificação vertical de densidade contida nesses dados afeta a circulação induzida pelo vento.

### *Dados de vento*

Duas séries de vento horário (uma para cada período modelado) foram fornecidas pela PETROBRAS para forçar o modelo hidrodinâmico POM utilizado aqui. A primeira série foi obtida em uma localidade no litoral do Ceará, e a outra foi no Rio Grande do Norte. Os locais de medida das séries de vento são os mesmos locais de medição das séries de corrente estando representados na

Figura 1. Os dados de vento foram fornecidos em termos de intensidade do vento e direção em graus, relativa ao norte.

O vento é imposto na superfície como *stress*, que é calculado a partir das componentes de velocidade U e V.

#### **A.4) Resultados da Modelagem Hidrodinâmica**

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos em simulações prognósticas com o POM, tendo como condições iniciais os campos de salinidade e temperatura do OCCAM, e sendo forçados pelo *stress* do vento na superfície, e valores prescritos nos contornos abertos, os quais são basicamente os seguintes:

A elevação da superfície (?) prescrita nos contornos abertos é composta pela soma dos níveis médios do OCCAM com a altura de maré, a qual é calculada a cada passo de tempo do modelo a partir das amplitudes e fases obtidas do modelo FES95.2;

A temperatura e salinidade prescrita nos contornos abertos são também aquelas obtidas do modelo OCCAM.

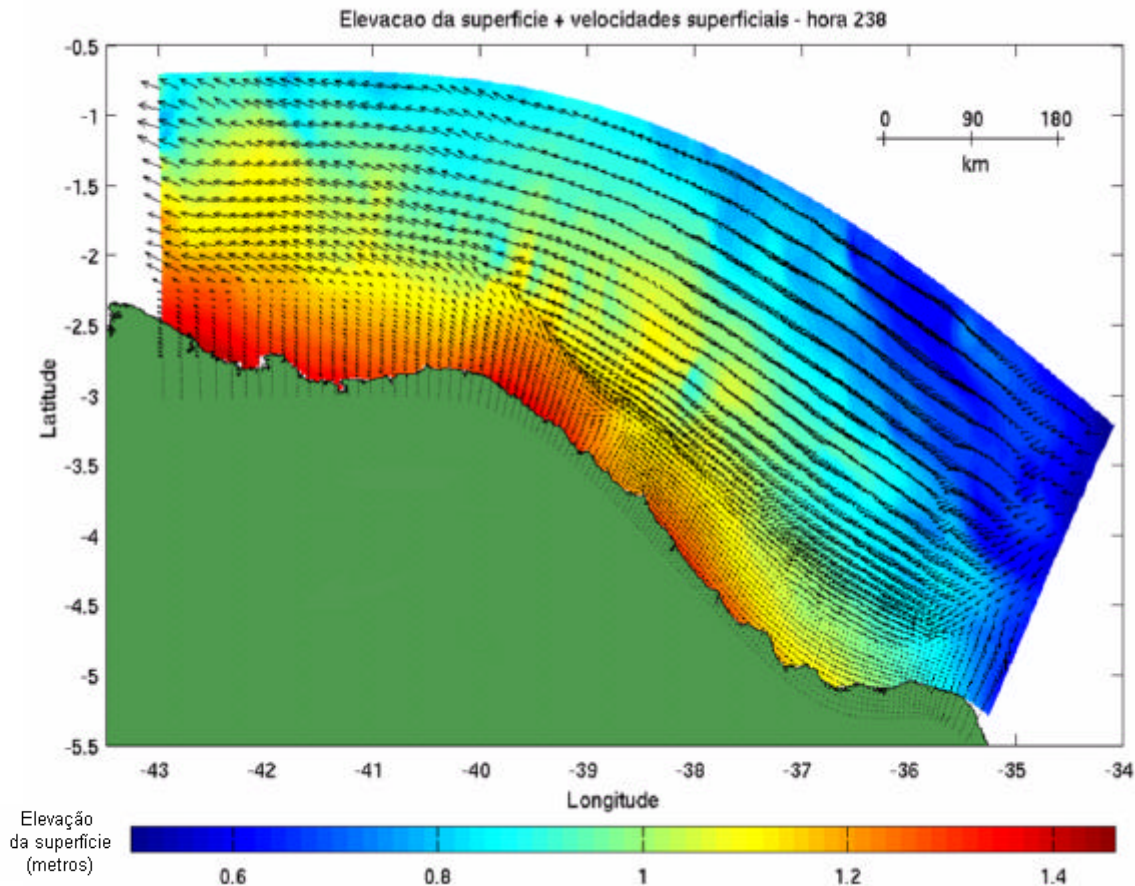
Um passo de tempo de 3 segundos foi adotado para o modo externo do modelo e de 90 segundos para o modo interno, mantendo um quociente de 30 entre os passos de tempo dos modos interno e externo, o que está de acordo com o recomendado na literatura (Mellor, 1998).

Nos resultados apresentados a seguir, aparecem os vetores de velocidade superficial sobrepostos a campos de elevação do nível do mar.

#### *Experimento de janeiro de 1997*

O vento na região de estudo não apresentou muitas variações durante o mês de janeiro, soprando predominantemente na direção de leste. Na Figura 3 são apresentadas as correntes do primeiro nível sigma sobrepostas ao campo de elevação da superfície do mar no instante  $t = 238$  horas do experimento de janeiro de 1997. Nesse instante, a maré encontrava-se em enchente e, portanto toda a região estava com o nível acima do nível médio. As maiores elevações foram

observadas nas proximidades da costa, na porção central da grade, onde a maré atingiu 1,5 m.

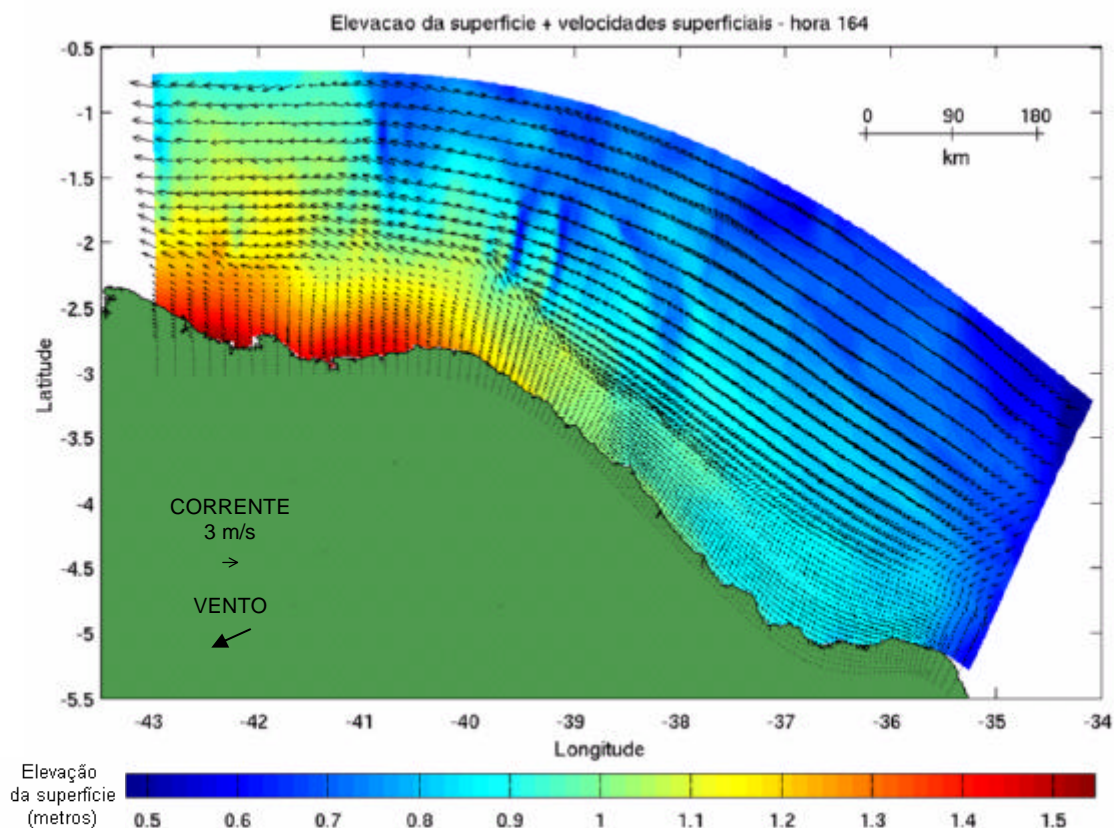


**Figura 3:** Velocidade de superfície sobreposta à elevação do nível do mar – hora 238.

#### *Experimento de maio de 2002*

Durante o mês de maio de 2002, o vento na região apresentou forte oscilação no período diurno, caracterizando uma influência significativa da brisa marinha. No entanto, a componente na direção de leste foi dominante, de modo que o vento oscilou entre NE e SE durante todo o período simulado. Na Figura 4 apresenta-se o instante  $t = 164$  horas, em que a maré estava em vazante na maioria do domínio.





**Figura 4:** Velocidade de superfície sobreposta à elevação do nível do mar – hora 164

### A.5) Calibração

Os resultados do modelo foram calibrados contra séries de tempo de correntometria fornecidas pela PETROBRAS. Durante a execução de cada simulação, séries das componentes de velocidade (U e V) foram armazenadas com intervalo de 1 hora no ponto de grade correspondente ao ponto de coleta dos dados de correntometria. Aqui também as velocidades U e V foram medidas para o ponto central dos elementos da grade e rotacionadas para o sistema de eixos norte/sul e leste/oeste, de acordo com a transformada de coordenadas mencionada acima. As simulações duraram 720 horas (30 dias), mas os melhores resultados, em todos os casos, foram obtidos após as 100 primeiras horas de simulação. Isso se deve basicamente ao tempo de ajuste da condição de contorno de Blumberg & Kantha (1985). Por essa razão, as séries apresentadas

correspondem ao período entre 100 e 700 horas da simulação, sendo que o cálculo do erro de ajuste (calibração) foi feito para um período de 1 semana (168 horas).

Para a calibração de nível foram utilizadas as constantes harmônicas fornecidas pela DHN para a Ponta do Pecém, localizada no estado do Ceará no ponto de coordenadas 03° 32,8' S e 38° 48,7' W. Com base na amplitude e fase das constituintes, reconstituiu-se uma série de nível para cada período estudado. As séries de nível dessa forma reconstituídas contêm, portanto, somente o efeito da maré, e por essa razão os resultados do modelo foram filtrados com um filtro do tipo “passa alta”, que elimina as oscilações com frequência subtidais, antes de se efetuar os cálculos de calibração. O filtro utilizado foi um filtro de Fourier.

O coeficiente de ajuste entre as séries modeladas e observada é calculado como a razão entre o desvio médio (*DM*) do “erro” e o dobro do desvio médio do dado observado, sendo o “erro” definido como a diferença entre a série observada e a série modelada.

$$\text{Erro} = |x_{\text{obs}} - x_{\text{mod}}|$$

Onde as barras verticais indicam o valor absoluto da diferença.

O desvio médio é definido como:

$$DM = \left( \sum_0^N |x_n - \bar{x}| \right) / N$$

Onde  $x_n$  é o valor observado, ou modelado, e  $\bar{x}$  indica o valor médio das observações, ou valores modelados.  $N$  é o número total de observações da série.

Dessa forma, o coeficiente de ajuste entre as séries (ou erro percentual) é definido de acordo com a fórmula dada por Spiegel (1975):

$$C = DM(\text{erro}) / 2 * DM(\text{obs})$$

*Janeiro de 1997*

As séries modeladas e medidas durante o período compreendido entre 100 e 700 horas da simulação de janeiro de 1997 são apresentadas na Figura 5, estando a componente U (L-O) da corrente na parte superior dessa figura e a componente V (N-S) na parte inferior. As séries modeladas são apresentadas em azul e as séries medidas em vermelho.

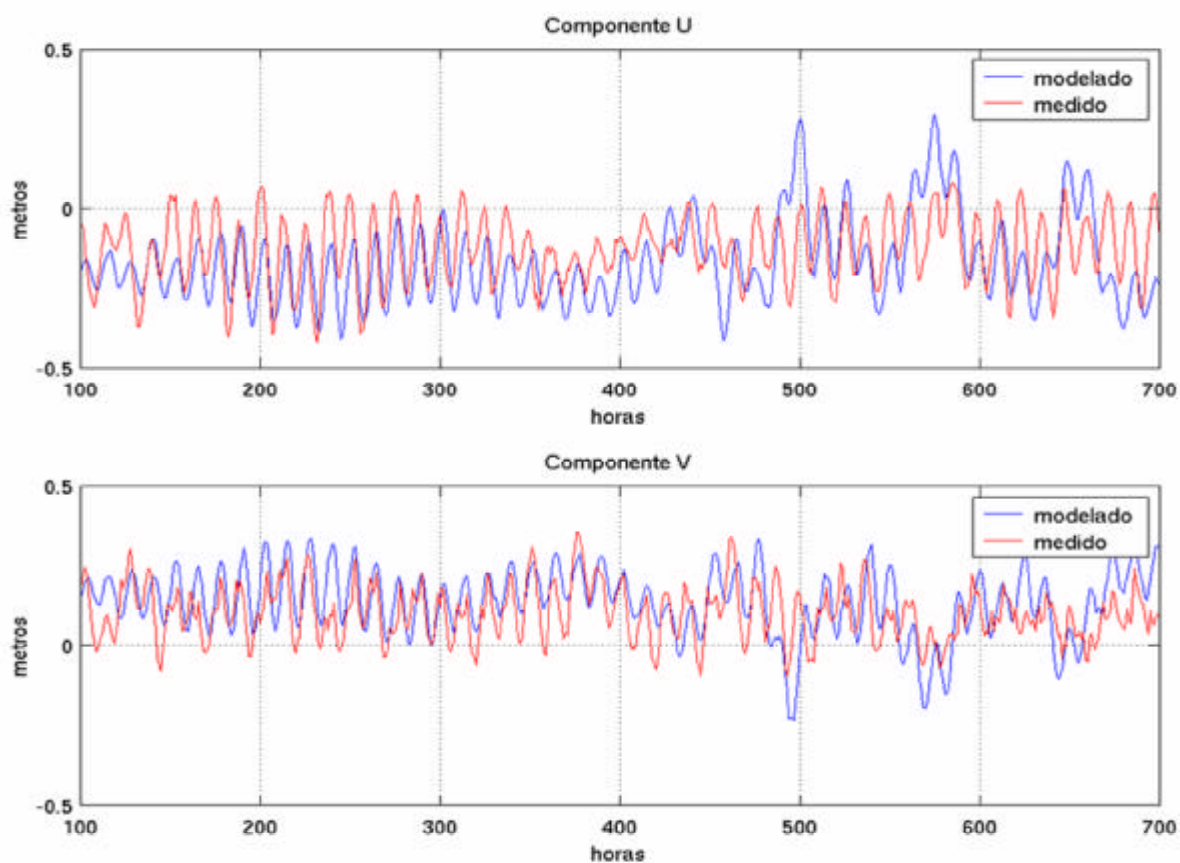
Observa-se que, de uma maneira geral, o modelo tende a reproduzir as oscilações de corrente da região, mantendo as mesmas tendências observadas nas séries medidas *in situ*. No entanto, em alguns pontos as variações da corrente modelada são superiores àquelas da corrente medida. Essa diferença pode ter sido causada pelo fato do vento usado para a modelagem ter sido coletado em um único ponto do domínio, e uma vez que o domínio é amplo, podem ocorrer variações no campo de vento.

Pode-se inferir então que, em algumas situações, as correntes na plataforma interna estão respondendo a um vento não local, e isso não pode ser reproduzido na modelagem, pois se utilizou apenas o vento local.

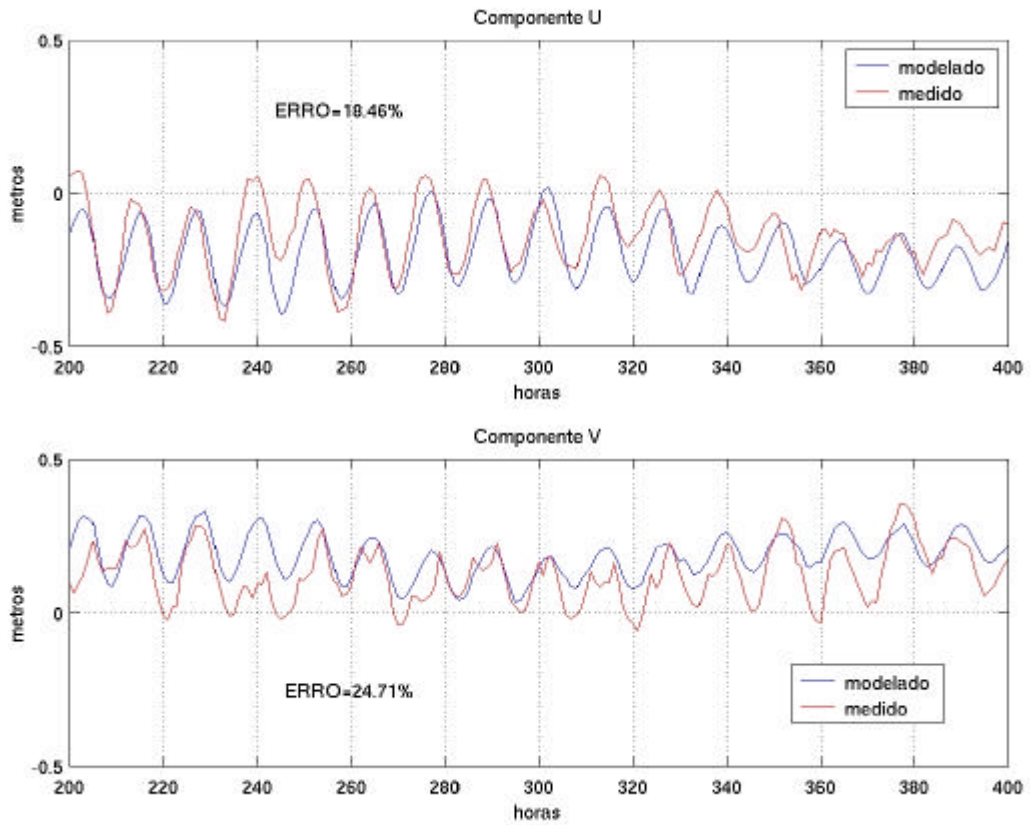
Foram escolhidas sub-séries com comprimento de aproximadamente 1 semana (168 horas) de cada série para calcular o coeficiente de ajuste. As sub-séries são apresentadas na Figura 6.

O melhor coeficiente C calculado para as séries modeladas foi obtido no período de 1 semana compreendido entre as horas 200 e 400, para as duas componentes (U e V). O coeficiente de ajuste ou “erro” durante esses períodos foi de 18,46 % para a componente U e 24,71 % para a componente V.

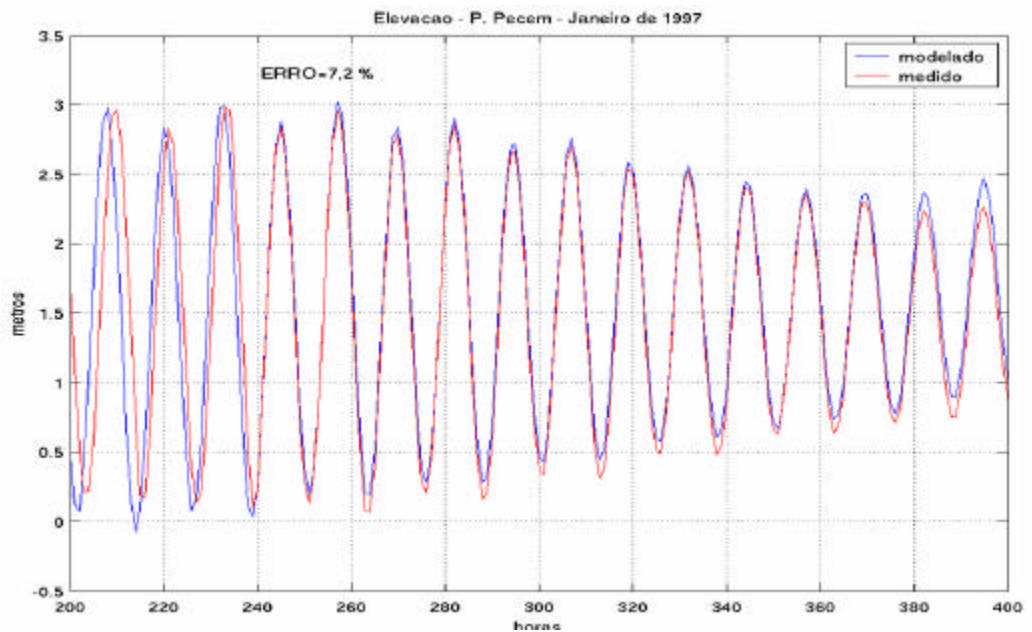
A série de nível é apresentada na Figura 7. O erro de calibração para o caso de nível foi de 7,2%.



**Figura 5:** Séries de corrente medida e modelada. Período de janeiro de 1997.



**Figura 6:** Sub-séries usadas para calibração. Período de janeiro de 1997.

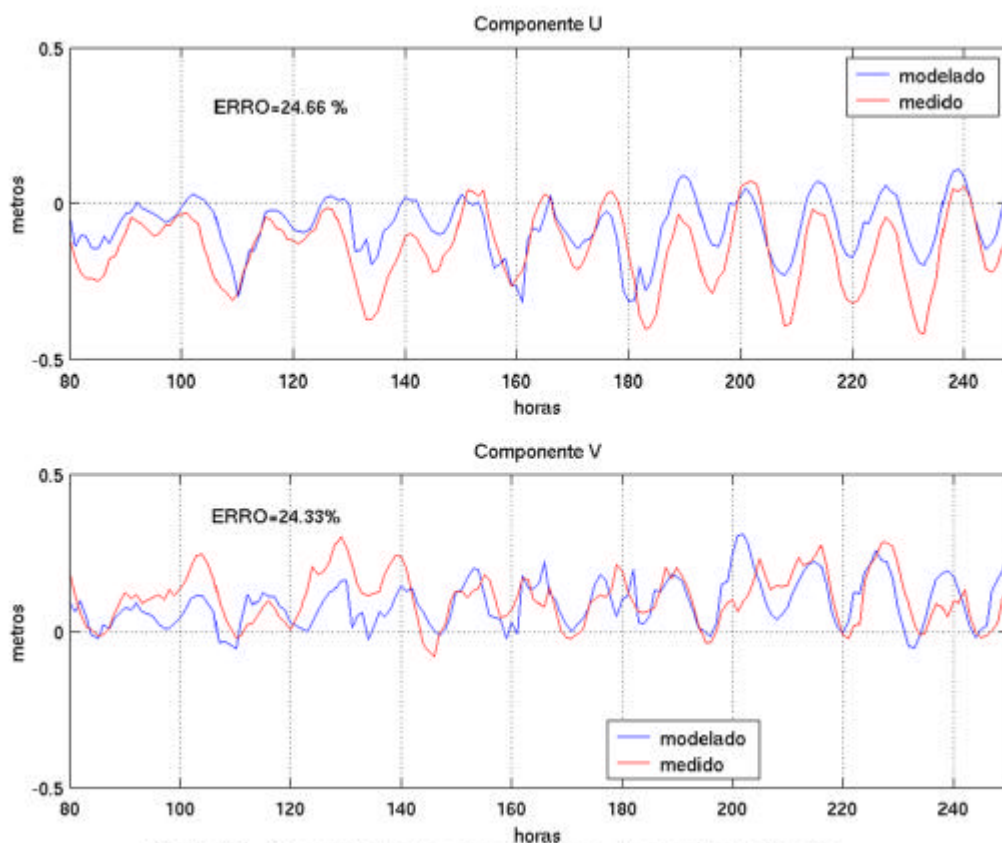


**Figura 7:** Série de nível usada para calibração. Período de janeiro de 1997.

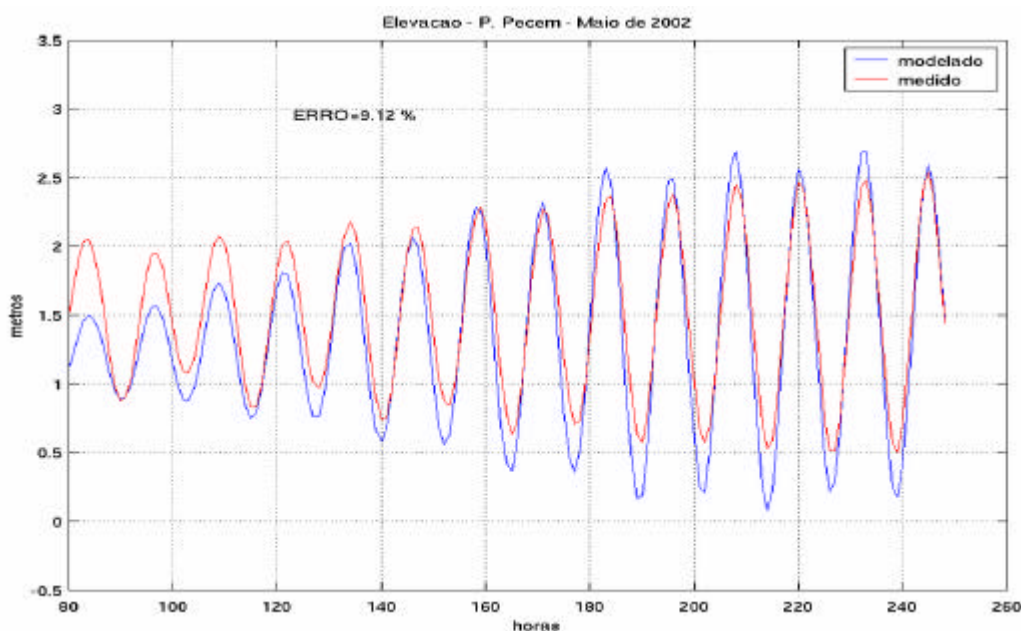
## Maio de 2002

A calibração para maio de 2002 foi feita para o período de 168 horas (1 semana) compreendido entres as horas 80 e 248, para as duas componentes da velocidade. O erro foi de 24,66 % para a componente U e 24,33 % para a componente V. As series de 1 semana de U e V são apresentadas na Figura 8, estando a componente U no painel superior e a componente V no painel inferior. Também durante esse experimento os erros ficaram dentro do esperado.

A calibração para nível no período de maio de 2002 apresentou um erro de 9,12 %. As séries de nível são apresentadas na Figura 9.



**Figura 8:** Sub-séries usadas para calibração. Período de maio de 2002.



**Figura 9:** Série de nível usada para calibração no período de Maio de 2002.

#### **A.6) Discussão da Modelagem Hidrodinâmica**

O estudo realizado na área de interesse englobou as bacias do Ceará e Potiguar. Os resultados mostraram que o vento é a principal forçante das correntes, tanto através de seu efeito local, que induz uma corrente com direção preferencial para oeste, como através de seu efeito não local, o qual se dá basicamente pela influência da Corrente Norte do Brasil, uma corrente que é parte da circulação de larga escala dirigida pelo vento. Apesar da forte influência da maré, essa se faz presente principalmente na componente da velocidade normal à costa, enquanto que a componente paralela à costa tende a manter-se sempre na direção do vento dominante, ou seja, fluindo em direção a oeste.

No período de maio existe uma forte influência da brisa marinha, a qual faz a componente do vento normal à costa mudar de direção com período de 12 horas, fechando um ciclo completo em 24 horas. A brisa induz um sinal de 24 horas na componente da velocidade normal à costa, que é somada à maré diurna. No entanto, a componente paralela à costa se mantém fluindo em direção a oeste, forçada pelo vento. Esses resultados estão de acordo com aqueles apresentados

por Signorini & Miranda (1983), os quais citam um forte sinal de brisa marinha induzindo correntes na banda de frequência correspondente à maré diurna. Esses autores também citam a dominância das correntes direcionadas para noroeste, o que também está de acordo com os resultados aqui obtidos.

Na parte externa do domínio, nota-se grande influência da Corrente Norte do Brasil (CNB). As correntes simuladas pelo POM na parte externa do domínio estão coerentes com aquelas apresentadas por Johns *et al.* (1998) tanto em termos de orientação e valores médios, como em termos do ponto de separação da costa. Sabe-se que a CNB apresenta uma retroflexão que, segundo Johns *et al.* (1998) e Fratantoni *et al.* (1995), apresenta certa variabilidade sazonal, mas tende sempre a ocorrer entre 6 e 8 graus de latitude norte. Esta retroflexão está relacionada com o ponto de separação da costa, que ocorre perto do ponto onde a linha de costa muda de orientação, entre as longitudes de 40° e 43° W (Jonhs *et al.*, 1998). Os resultados aqui obtidos estão de acordo com aqueles apresentados por esses autores, de que há uma corrente fluindo paralela à costa e que tende a defletir para Norte nas proximidades da latitude de 42° W.

A modelagem das correntes marinhas superficiais nas bacias do Ceará e Potiguar foi realizada com níveis de erro baixos e campos vetoriais de correntes em duas dimensões próximos do real esperado para a área de estudo. Os resultados demonstram ainda que o modelo demora cerca de 100 horas para reproduzir as correntes observadas. Isso se deve em parte ao uso de uma rampa nas forçantes vento e maré e, em parte ao uso da condição de contorno de Blumberg & Kantha (1985), a qual, apesar de demonstrar-se bastante eficiente na reprodução da maré, exige um tempo de ajuste.

A partir das 100 horas iniciais, o modelo POM demonstrou ser eficiente e robusto, constituindo-se uma importante ferramenta na predição das correntes no litoral do Ceará e Rio Grande do Norte. A base numérica produzida por este modelo é considerada robusta o suficiente para ser assimilada no modelo de dispersão e transporte de óleo descrito neste relatório para a região das bacias do Ceará e Potiguar. A metodologia utilizada para incorporar os dados dos modelos OCCAM e FES95.2 ao POM mostrou-se adequada para a região de estudo.



## **B) Modelagem da Dispersão de Óleo**

Para a modelagem de óleo foi utilizado o modelo OSCAR (Oil Spill Contingency and Response), desenvolvido pela SINTEF Applied Chemistry (<http://www.sintef.no>) com a finalidade de dar suporte a planos de contingência de óleo e respaldo a tomada de decisões (Daling & Strom, 1999; Reed *et al.*, 1996).

### **B.1) Caracterização do ambiente físico e comportamento do óleo no OSCAR**

Com a finalidade de representar o óleo e seus produtos de degradação, o OSCAR combina um grande número de componentes individuais, pseudo-componentes, ou metabólitos.

Diversos testes em campo foram realizados para verificar a confiabilidade das previsões de intemperismo empregadas no OSCAR, evitando-se resultados irreais.

A seguir, serão detalhados os itens que caracterizam o ambiente físico necessário para a simulação da dispersão do óleo, seguido por itens que descrevem as características físico-químicas do óleo e seu comportamento no mar de acordo com o modelo OSCAR.

#### **B.1.1) Definição do Ambiente Físico**

Caracterizam o ambiente físico das simulações de dispersão do óleo, a batimetria e a linha de costa da região, assim como as condições de ventos, correntes e ondas para o período estudado. Estes últimos são descritos a seguir.

##### *Ventos*

São utilizados como dados de entrada, ventos medidos a 10m acima da superfície do mar. Caso a série de ventos seja definida para um único ponto, o modelo assume um campo de ventos espacialmente uniforme. Também é possível forçar o modelo com diferentes séries de vento, espaçadas

arbitrariamente, em um mesmo período, neste caso, um vetor de vento linearmente interpolado é aplicado.

### Correntes

O modelo considera campos de correntes tanto bi quanto tri-dimensionais. Campos bi-dimensionais podem ser estacionários ou variantes no tempo, fornecidos por modelos hidrodinâmicos ou estimados por usuários através de conhecimento local ou Atlas de correntes. Campos tri-dimensionais variantes no tempo obtidos por modelos hidrodinâmicos podem ser importados em formatos específicos. Uma interpolação linear espacial é aplicada para derivar o vetor de corrente a posições específicas. Nenhuma interpolação temporal é aplicada.

### Ondas

As equações a seguir são utilizadas para determinar a altura ( $H$ ) e o comprimento ( $T$ ) de onda em função da velocidade do vento ( $U$ ), profundidade da coluna d'água ( $d$ ), pista ( $F$ ), e aceleração gravitacional ( $g$ ). Essas equações são baseadas no manual da U.S. Army Corps of Engineers (1984).

$$\frac{gH}{U_A^2} = 0.283 \tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left\{ \frac{0.00565 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[ 0.530 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right\}$$

$$\frac{gT}{U_A} = 7.54 \tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \tanh \left\{ \frac{0.0379 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[ 0.833 \left( \frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\}$$

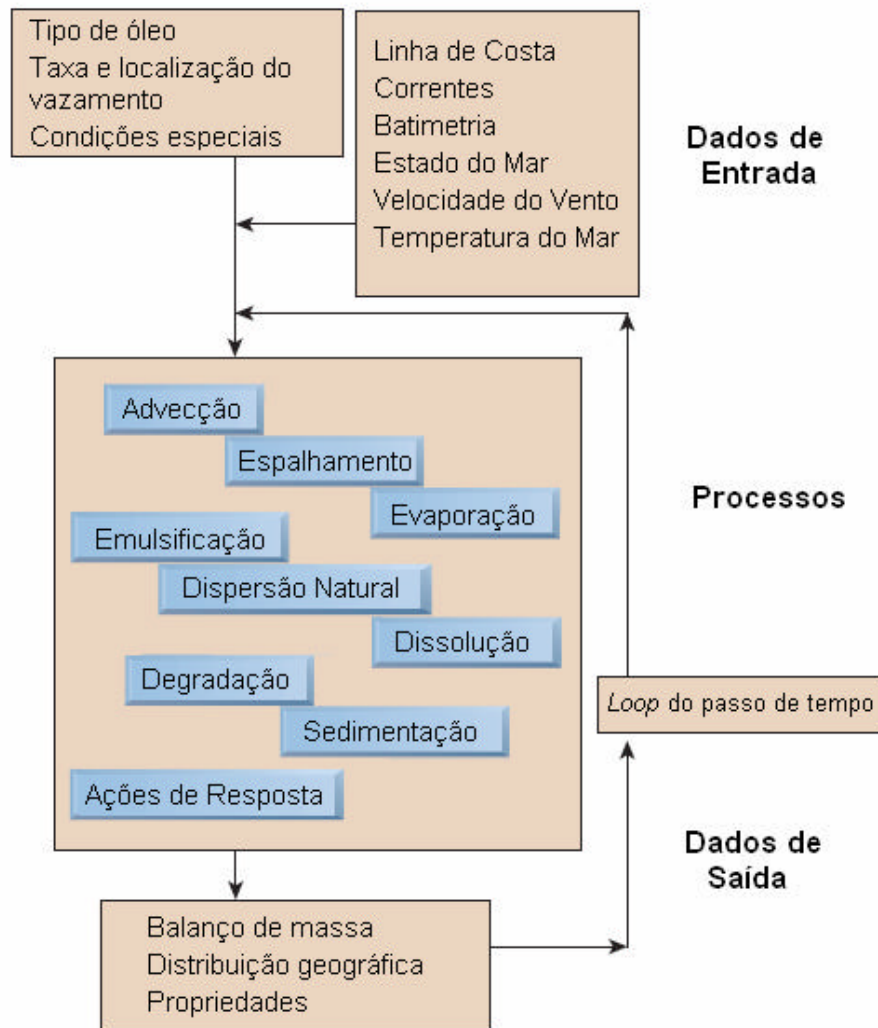
Profundidade local e pista são determinadas internamente no modelo a partir dos dados do grid. Em uma fronteira aberta do grid, uma pista de 100 km é assumida. Altura e período de onda também são determinados e inseridos em um

grid retangular. A cada mudança de velocidade e direção de vento, um novo par de altura e período de onda é calculado. Este procedimento permite variações na altura da onda devido a modificações na pista de vento, assim como “sombrias” a sotavento das ilhas são observadas. Entretanto, esta abordagem não inclui empinamento, difração, reflexão, ou interações entre ondas e correntes.

### **B.1.2) Características físico-químicas e comportamento do óleo no mar**

Os processos que governam o comportamento dos poluentes no modelo de dispersão de óleo OSCAR são apresentados na Figura 10. São empregados algoritmos de espalhamento superficial, advecção, entranhamento, emulsificação e evaporação para determinar o transporte e destino dos compostos. A turbulência vertical é função da velocidade dos ventos (altura de onda) e da profundidade, enquanto a turbulência horizontal é função da idade das partículas. A degradação na água e nos sedimentos é representada como um processo de decaimento de primeira ordem. Os algoritmos utilizados para simular os processos que controlam os destinos físicos das substâncias estão descritos em Aamo *et al.* (1993) e Reed *et al.* (1995), estando os principais processos descritos a seguir.

Para o óleo proveniente de vazamentos, processos como advecção, espalhamento, entranhamento e mistura vertical na coluna d’água não são diretamente dependentes da composição do óleo, embora exista uma tendência a estarem relacionados a macro-características como viscosidade e densidade. Outros processos como evaporação, dissolução, e degradação são diretamente dependentes da composição do óleo.



**Figura 10:** Esquema geral do modelo de dispersão de óleo OSCAR, indicando que os processos de intemperismo estão muito inter-relacionados; a saída de um processo de algoritmo influencia o comportamento dos outros.

### Advecção

A advecção é determinada através da superposição da velocidade média local interpolada no espaço e uma componente randômica que representa a turbulência no meio ambiente. A velocidade média local é, geralmente, a soma das componentes climatológicas, de maré e de vento, mais a componente de Stokes (forçada por onda). A componente turbulenta  $w'$  é computada como:

$$w' = \sqrt{6K/\Delta t},$$

para um coeficiente de dispersão turbulenta  $K$ , estimado para as direções verticais e horizontais apropriadas.

O coeficiente de dispersão horizontal pode ser aproximado utilizando-se dados sobre estudos de difusão de traçadores como os reportados por Okubo (1971, 1974) que foram revistos por Bowden (1983):

$$K_x = 0.0027 t^{1.34}$$

para  $K$  em  $\text{cm}^2/\text{s}$  e tempo  $t$  em segundos. Kullenberg (1982) sugere que os dados atingem um máximo em cerca de  $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ , ou  $100 \text{ m}^2/\text{dia}$ . Este máximo é aplicado aqui.

O coeficiente vertical de difusão turbulenta acima da pycnoclina está relacionado às condições das ondas segundo Ichiye (1967):

$$K_z = 0.028 \frac{H^2}{T} \exp(-2kz)$$

onde  $H$  é a altura da onda,  $T$  é o período de onda e  $k$  é o número da onda. Abaixo da profundidade da pycnoclina,  $K_z$ , assume-se que este coeficiente seja constante e igual a  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  (Kullenberg, 1982). Em condições onde não exista pycnoclina, a equação de Ichiye é aplicada da superfície ao fundo.

### Espalhamento

O espalhamento do óleo na superfície do mar envolve a interação de diversas forças e processos, como gravidade, momento e viscosidade. Neste caso, uma equação unidimensional é utilizada para se representar o espalhamento transversal de uma “mancha” em um vazamento contínuo, estando de acordo com Fay (1971) e Fannelop & Waldman (1972) *apud* Reed (2001).

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

onde:

$x_{LE}$  = largura da seção principal da mancha (m)

$g$  = aceleração gravitacional ( $m/s^2$ )

$\Delta \rho$  = diferença de densidade entre a água e o óleo ( $Kg/m^3$ )

$\rho_w$  = densidade da água ( $Kg/m^3$ )

$\mu_w$  = viscosidade do óleo (cP)

$m$  =  $1/2$  da taxa de liberação da massa / corrente superficial ( $Kg/m$ )

$C_o$  = constante de espalhamento

Essa equação representa o regime de gravidade-viscosidade no processo de espalhamento, e explica apenas o espalhamento quiescente da porção mais espessa da mancha. O espalhamento turbulento rapidamente ultrapassa esse espalhamento quiescente em importância. O espalhamento turbulento ocorre como resultado de cisalhamentos horizontais e verticais no campo de velocidade em uma mancha de óleo, combinado com o entranhamento e ressuspensão das gotículas de óleo. Como esses processos também estão incluídos, o modelo é capaz de produzir manchas menos espessas com o passar do tempo.

### Evaporação

A taxa de evaporação é controlada pela pressão de vapor dos componentes individuais, e por suas frações. A taxa de transferência da massa evaporada é usualmente computada de acordo com Thibodeaux (1979), Mackay *et al.* (1980), sendo:

$$dm_i / dt = K_e P_i A M_i F_i / (R T),$$

onde:

$m_i$  = massa associada com o  $i$ -ésimo componente no derramamento

$t$  = tempo (s)

$K_e$  = coeficiente de transferência de massa evaporada (m/s)

$T$  = temperatura ( $^{\circ}K$ )

$P_i$  = pressão de vapor para o  $i$ -ésimo componente (atm)

$A$  = área da superfície da mancha ( $m^2$ )

$M_i$  = peso molecular do componente i (grama / mol)

$F_i$  = fração molar do componente i restante na mancha

$R$  = a constante do gás,  $8.206 \times 10^{-5}$  atm-m<sup>3</sup> / mol-°K.

O coeficiente de transferência de massa,  $K_e$ , é calculado de acordo com Amoroso & DeVries (1980), sendo:

$$K_e = C_d U(t)$$

onde  $C_d$  é um coeficiente de arrasto ar/mar, e  $U(t)$  é a velocidade do vento (m/s).

O coeficiente de arrasto  $C_d$  é por sua vez, dependente da velocidade do vento.

$$C_d = \left( \frac{U^*}{U(t)} \right)^2 \quad \text{com,} \quad U^* = \begin{cases} CU(t) & \text{para } U(t) < u_1 \\ Cu_1 + (Du_2 - Cu_1) \frac{U(t) - u_1}{u_2 - u_1} & \text{para } u_1 \leq U(t) \leq u_2 \\ DU(t) & \text{para } U(t) > u_2 \end{cases}$$

onde C, D,  $u_1$  e  $u_2$  são constantes (0,0323, 0,0474, 7 e 20 respectivamente).

### *Dispersão natural*

O modelo utilizado para previsão do entranhamento do óleo a partir da superfície do mar é descrito em Reed & French (1992), sendo baseado na formulação empírica de Delvigne & Sweeney (1988):

$$Q_{di} = C^* D^{0.57} S F d_i^{0.7} \Delta d$$

onde:

$Q_{di}$  = é a taxa de entranhamento por unidade de área superficial de gotículas de óleo com diâmetros entre  $d_i - \Delta d$  e  $d_i + \Delta d$  (Kg/m<sup>2</sup>s)

$C^*$  = coeficiente de entranhamento derivado empiricamente

$D$  = energia de onda dissipada por unidade de área superficial (kg/s<sup>2</sup>)

$S$  = fração da superfície do mar coberta pelo óleo

$F$  = fração da superfície do mar coberta pela arrebatção de ondas por unidade de tempo (1/s)

$d_i$  = diâmetro médio das partículas na classe de tamanho  $i$  (m)

$\Delta d$  = intervalo de diâmetro da partícula (m)

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

$$C^* = 4450\nu^{-0.4}$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do óleo ( $m^2/s$ ). A energia da arrebentação da onda dissipada  $D$  é aproximada como:

$$D = 0.0034 \rho_w g H_b^2$$

onde  $\rho_w$  é densidade da água do mar ( $kg/m^3$ ),  $g$  é aceleração gravitacional ( $m/s^2$ ) e  $H_b$  é a altura da onda no momento da arrebentação (m). A fração  $F$  da superfície do mar coberta pela arrebentação das ondas por unidade de tempo é aproximada de acordo com Monahan & O'Muircheartaigh (1980) *apud* Reed (2001):

$$F = 3 \cdot 10^{-6} U(t)^{3.5}$$

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

$$d_o = \frac{C_o \nu^{0.34}}{\sqrt{e}}$$

onde:

$\nu$  = é a viscosidade cinemática

$e$  = é a taxa de dissipação da energia (escolhido como  $1000 J/m^3s$ )

$C_o$  = é aproximadamente 500 para o tamanho mínimo das partículas e 3400 para o tamanho máximo. As gotículas são divididas em intervalos de tamanho que vão do mínimo tamanho das partículas para o máximo.

### *Emulsificação e propriedades do óleo em superfície*

Os algoritmos para emulsificação e mudanças nas propriedades do óleo foram calibrados utilizando-se dados de intemperismo em laboratório, de acordo com procedimentos já publicados (Daling *et al.*, 1990, 1997).



A emulsificação ou  $W(t)$  é calculada como uma exponencial:

$$W(t + \Delta t) = W_m(t) - [W_m(t) - W(t)] 0.5^{\frac{\Delta t}{t_{1/2}}}$$

onde  $W_m(t)$  e  $t_{1/2}$  são derivados de estudo em laboratório que relacionam taxa de emulsificação e conteúdo máximo de água à fração evaporada, sendo:

$W_m(t)$  = é a quantidade máxima de água (%)

$\Delta t$  = passo de tempo do modelo (s)

$t_{1/2}$  = meia-vida para emulsificação dependente do vento (s)

Quatro propriedades do óleo são previstas no modelo: ponto de fluidez, ponto de fulgor, densidade e viscosidade do óleo sem água (Tabela 1). Essas propriedades variam de acordo com o ajuste da curva aos valores medidos em laboratório e a fração evaporada como apresentado a seguir (Johansen, 1991 *apud* Reed, 2001).

**Tabela 1:** Propriedades de óleo e suas equações.  $f$  é a fração evaporada (%) e  $a$  e  $b$  são fatores de regressão. Ao aplicar a perda por evaporação nestas equações são encontradas suas correspondentes funções no tempo.

| PROPRIEDADE           | EQUAÇÃO                         |
|-----------------------|---------------------------------|
| Ponto de fluidez (°C) | $P = e^{(a_p + b_p f)} - 273$   |
| Ponto de Fulgor (°C)  | $F = e^{(a_f + b_f f)} - 273$   |
| Densidade (g/l)       | $\rho_o = a_\rho + b_\rho f$    |
| Viscosidade (cP):     | $\mu_o = e^{(a_\mu + b_\mu f)}$ |

A densidade da emulsão  $\rho(t)$  é calculada como:

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

onde:  $W(t)$  = é a quantidade de água (%),  
 $r(t)$  = é a densidade da água do mar (g/l), e  
 $r_o(t)$  = densidade do óleo sem água.

A equação de Mooney (1951) *apud* Reed (2001) é usada para calcular a viscosidade de emulsão  $\mu(t)$ :

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

Onde a e b são constantes empíricas, escolhidas ou de acordo com Mackay *et al.* (1980) (a = 2,5 e b = 0,654) ou ajustando a equação com dados de laboratório. Nesse último caso, são encontrados melhores valores entre -10 e 5 para a, e entre -2 e 0,9 para b.

### Dissolução

A dissolução, assim como a evaporação, é dependente da fração molar de cada componente em uma gota ou em uma mancha na superfície. Assim, a concentração ambiente se torna importante.

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

Onde:

$K_d$  = coeficiente de dissolução (m/s)

$A$  = área superficial para uma gotícula ou mancha de superfície (m<sup>2</sup>)

$F_i$  = fração molar do componente i que permanece na gotícula ou mancha

$S_i$  = solubilidade do i-ésimo componente (gramas/m<sup>3</sup>; ppm)

$C_i$  = concentração ambiente do i-ésimo componente (gramas/m<sup>3</sup>)

Para uma mancha em superfície, a coeficiente de transferência de massa  $K_d$  é computado de acordo com Thibodeaux (1979), como:

$$K_d = Sh_i D_i / L$$

onde  $Sh_i$  é o número de Sherwood, onde, para manchas na superfície, utiliza-se:

$$Sh_i = 0.578 Re^{0.5} Sc_i^{0.33}$$

onde: Re = Número de Reynolds =  $U_{rel} L / \nu_w$

$Sc_i$  = Número de Schmidt =  $\nu_w / D_i$

$U_{rel}$  = velocidade relativa entre o óleo e a água (m/s)

$L$  = largura da mancha (m)

$\nu_w$  = viscosidade cinemática da água  $\sim 8,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  em 25°C

$D_i$  = difusividade molecular da componente i ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

No caso de gotículas utiliza-se a correlação de transferência de massa para esferas para determinar o Número de Sherwood:

$$Sh = 2 + 0.347 Re^{0.62} Sc_i^{0.31}$$

Estas são abordagens padrão em engenharia química (Thibodeaux, 1979).

### Óleo na costa

O OSCAR incorpora dinâmicas relativamente simples para simular interações entre a costa e o óleo. A partir de um modelo de derrame de óleo na zona costeira mais complexo (Reed, 1989), foram estimados grupos de capacidade máxima de retenção de óleo junto com um conjunto de taxas de remoção. As capacidades de retenção foram desenvolvidas com a finalidade de refletir tanto a inclinação da costa quanto sua permeabilidade, e em alguns casos, exposição ao vento e às ondas. Então, uma praia de cascalhos pode reter mais óleo leve por unidade de comprimento do que uma praia arenosa, devido à penetração do óleo no substrato, e as taxas de remoção na praia de cascalhos são mais baixas, pois a meia-vida do óleo nos sedimentos é mais longa. Quando uma mancha em superfície encontra a linha de costa, o volume máximo de óleo,  $V_{max}$  ( $\text{m}^3$ ), é determinado de acordo com as características do local. O óleo será depositado no segmento até atingir  $V_{max}$ . A partir daí, mais nenhum óleo será depositado, e a mancha continuará a ser transportada pelos ventos e correntes. A quantidade de óleo removida de um segmento i durante um passo de tempo  $\Delta t$  é portanto:

$$\Delta m = m_i (1 - \exp[-r_i \Delta t])$$

onde  $m_i$  é a massa de óleo no segmento  $i$  no começo do passo de tempo, e  $r_i$  é a taxa de remoção para o tipo de costa em questão.

### ***B.1.3) Parâmetros Utilizados nas Simulações***

A seguir serão descritos os parâmetros utilizados nos cenários de transporte e dispersão de óleo para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri, assim como as forçantes utilizadas no OSCAR.

#### *Grade do OSCAR*

Uma grade regular onde se pode caracterizar o tipo de costa e a profundidade local é utilizada pelo OSCAR para os cálculos de transporte e dispersão do óleo. A grade utilizada nas simulações de 30 dias apresentou uma resolução espacial de 850 x 820 metros, aproximadamente, enquanto que a grade utilizada nas demais simulações apresentou uma resolução de 460 x 380 metros.

#### *Correntes e Ventos*

Foram utilizados campos de corrente superficial, bi-dimensional, variando no tempo, gerados através de simulação hidrodinâmica tri-dimensional com o POM (Princeton Ocean Model). Para o vento, foram utilizadas séries temporais fornecidas pela PETROBRAS. Ambos os parâmetros foram descritos item A.

### ***Parâmetros da simulação***

Os volumes utilizados nas simulações foram definidos de acordo com a Resolução CONAMA nº 293/01, sendo:

- Pequeno: 8 m<sup>3</sup>
- Médio: 200 m<sup>3</sup>
- Pior caso: 20 m<sup>3</sup> por dia (0,83 m<sup>3</sup>/h)

A Tabela 2 apresenta as características do ponto simulado, a Tabela 3 apresenta os parâmetros e premissas utilizadas e a Tabela 4 apresenta as características do óleo RNS-140 – Zona Alagamar.

**Tabela 2:** Características do ponto simulado.

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Campo</b>               | Siri                                      |
| <b>poço</b>                | 1-RNS-140                                 |
| <b>Volume de Pior Caso</b> | 20 m3/ dia                                |
| <b>Latitude</b>            | 5° 00' 52,4" S                            |
| <b>Longitude</b>           | 36° 27' 17,08" W                          |
| <b>Projeção</b>            | Geográfica (Latitude/Longitude)<br>SAD-69 |

**Tabela 3:** Parâmetros e premissas utilizados na modelagem de óleo.

| PARÂMETRO                           | DESCRIÇÃO   | VALOR UTILIZADO                |
|-------------------------------------|---|--------------------------------|
| Número de simulações                | Quantas vezes o modelo realizou simulações com diferentes momentos iniciais, para o cálculo da grade de probabilidades. | 100                            |
| Tipo de óleo                        | Óleo utilizado na modelagem   | RNS-140 – Zona Alagamar        |
| Temperatura da superfície da água   | Temperatura média superficial da água do mar para o domínio simulado.   | 26°C – verão<br>24°C – inverno |
| Passo de tempo                      | Intervalo de tempo no qual o modelo executará os cálculos da posição e do intemperismo das “partículas” de óleo.        | 20 min                         |
| Número de partículas                | Quantidade de partículas utilizada para representar o vazamento   | 1000                           |
| Arrasto do vento sobre a superfície | Percentual da velocidade do vento a ser adicionado a deriva superficial   | 2,0 %                          |

**Tabela 4:** Características do óleo RNS-140 – Zona Alagamar (poço 1-RNS-140, Campo de Siri).

| CARACTERÍSTICA        | VALOR | UNIDADE |
|-----------------------|-------|---------|
| Densidade             | 33    | (° API) |
| Viscosidade (a 40 °C) | 15    | cp      |
| Viscosidade (a 50 °C) | 12    | cp      |
| Viscosidade (a 60 °C) | 10    | cp      |

Na Tabela 5 são listados os cenários realizados e os seus respectivos critérios de parada. Para realização das simulações foram considerados vazamentos instantâneos para os cenários de 1 a 6, e vazamentos contínuos para os demais cenários.

Para os cenários 1, 2, 5 e 6 foi utilizado o critério de parada de 20 mg/L, conforme PETROBRAS (2002). As características do óleo RNS-140 – Zona Alagamar fazem com que ele atinja a concentração de 20 mg/L após 37,39 horas para um vazamento de 8 m<sup>3</sup> e após 41,28 horas para 200 m<sup>3</sup>. Em ambos os casos, os vazamentos são considerados instantâneos.

**Tabela 5:** Cenários considerados para o poço 1-RNS-140, Campo de Siri. Os cenários de 1 a 6 representam vazamentos instantâneos enquanto os cenários de 7 a 14 representam vazamentos contínuos.

| CENÁRIO | PRODUTO  | VOLUME                 | ESTAÇÃO DO ANO | CRITÉRIO DE PARADA    |
|---------|----------|------------------------|----------------|-----------------------|
| 1       | Petróleo | 8 m <sup>3</sup>       | Verão          | 20 mg/L (37,39 horas) |
| 2       | Petróleo | 8 m <sup>3</sup>       | Inverno        | 20 mg/L (37,39 horas) |
| 3       | Petróleo | 200 m <sup>3</sup>     | Verão          | 6 horas               |
| 4       | Petróleo | 200 m <sup>3</sup>     | Inverno        | 6 horas               |
| 5       | Petróleo | 200 m <sup>3</sup>     | Verão          | 20 mg/L (41,28 horas) |
| 6       | Petróleo | 200 m <sup>3</sup>     | Inverno        | 20 mg/L (41,28 horas) |
| 7       | Petróleo | 0,83 m <sup>3</sup> /h | Verão          | 12 horas              |
| 8       | Petróleo | 0,83 m <sup>3</sup> /h | Inverno        | 12 horas              |
| 9       | Petróleo | 0,83 m <sup>3</sup> /h | Verão          | 36 horas              |
| 10      | Petróleo | 0,83 m <sup>3</sup> /h | Inverno        | 36 horas              |
| 11      | Petróleo | 0,83 m <sup>3</sup> /h | Verão          | 60 horas              |
| 12      | Petróleo | 0,83 m <sup>3</sup> /h | Inverno        | 60 horas              |
| 13      | Petróleo | 0,83 m <sup>3</sup> /h | Verão          | 30 dias               |
| 14      | Petróleo | 0,83 m <sup>3</sup> /h | Inverno        | 30 dias               |

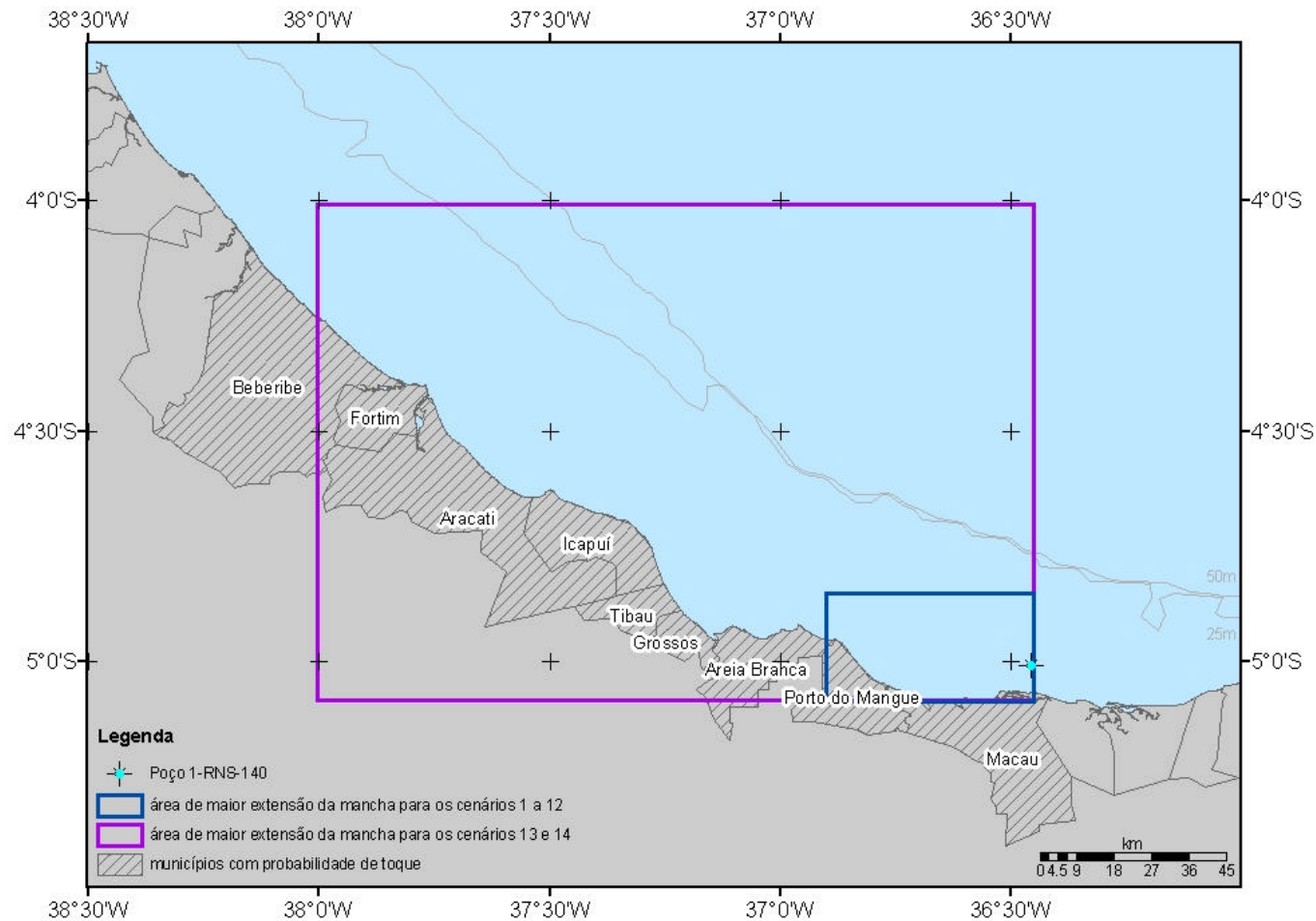
## **C) Resultados**

A seguir serão apresentados dois tipos de resultados: 1) simulações probabilísticas que representam os contornos de probabilidade de ocorrência de mancha ao considerar 100 simulações com diferentes combinações de forçantes, e 2) simulações determinísticas que indicam o caminho da mancha considerando uma combinação específica de forçantes para os cenários críticos.

### **C.1) Simulações Probabilísticas**

Na Figura 11 observam-se as áreas de maior extensão da mancha de óleo para os cenários 1 a 12 (em azul) e 13 a 14 (em magenta). Destaca-se também o poço 1-RNS-140 no Campo de Siri e os municípios que podem ser atingidos pelo óleo.

### Área da Modelagem Probabilística Poço 1-RNS-140 - Campo de Siri



**Figura 11:** Áreas de maior extensão da mancha de óleo para modelagem probabilística do poço 1-RNS-140 no Campo de Siri.



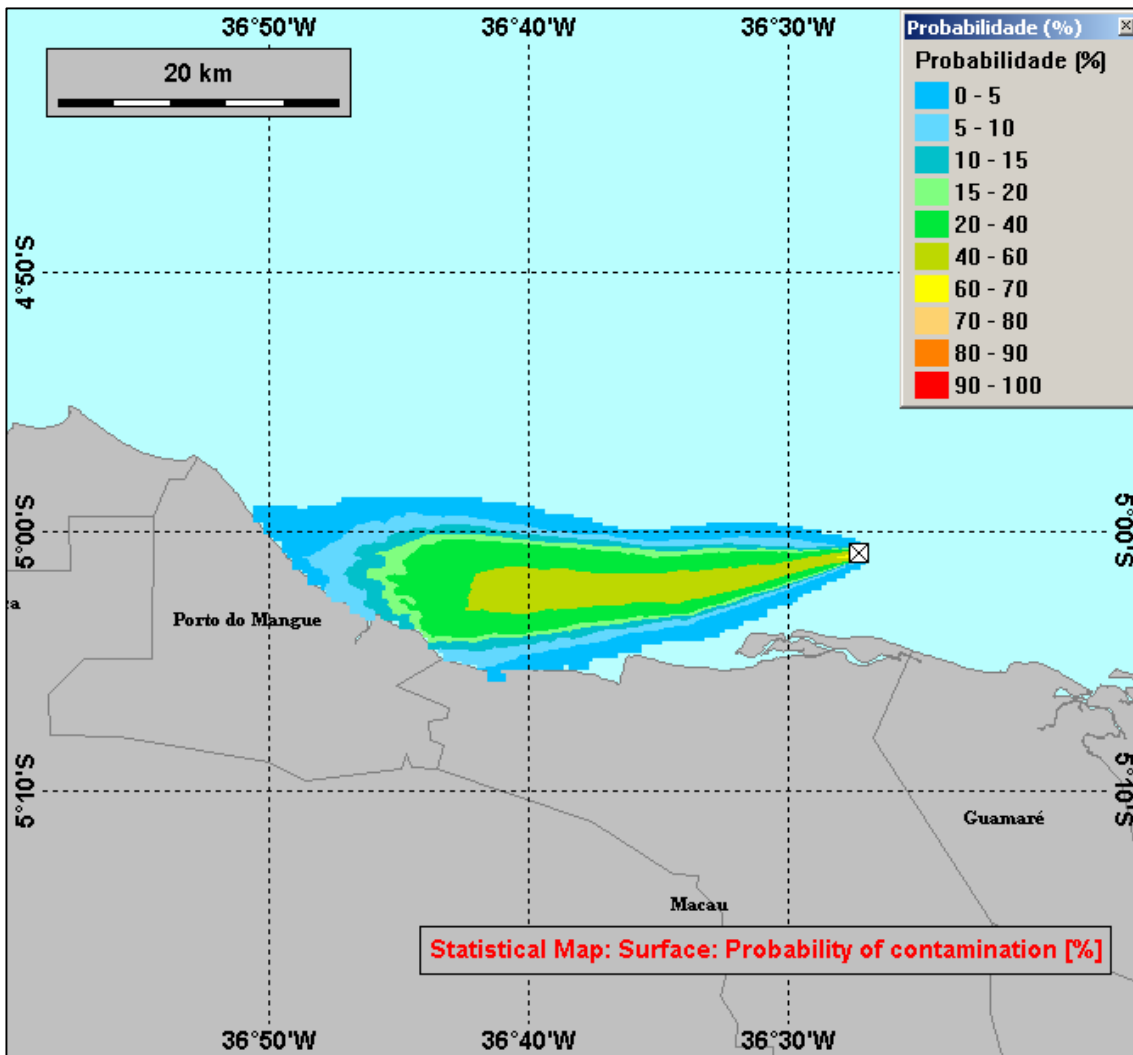
As Figuras 12 a 45 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri, conforme os cenários listados na Tabela 5. Nas classes de probabilidade apresentadas na legenda de cada figura, o limite inferior é aberto e o limite superior é fechado.

Nos cenários de verão, os vazamentos prevalecem no sentido E-W e nos cenários de inverno nos sentidos E-W a ESE-WNW.

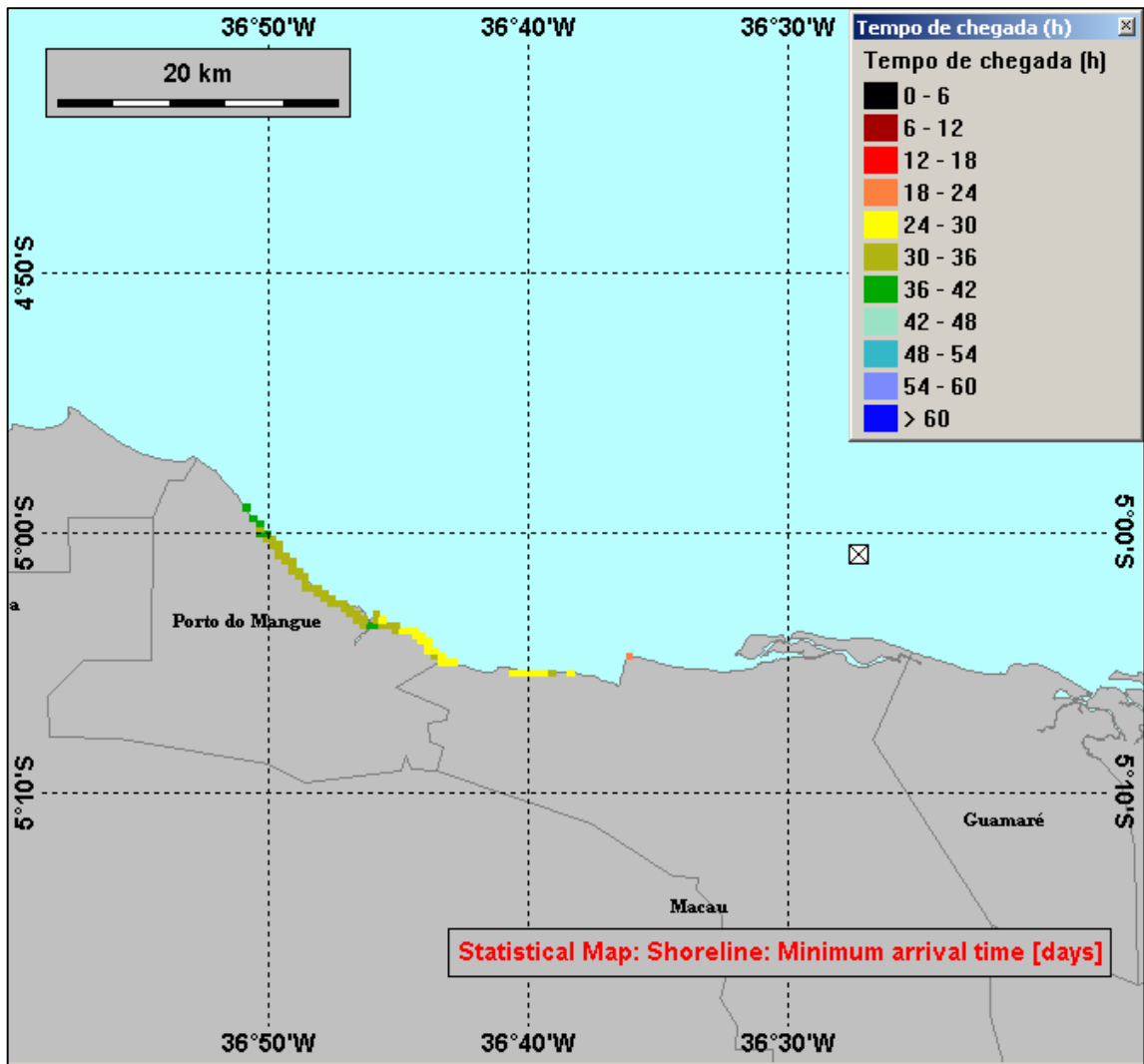
Na Tabela 6 são listadas as simulações probabilísticas onde houve toque na costa, determinando-se o tempo de toque crítico, ou seja, o menor tempo de toque para cada cenário.

**Tabela 6:** Período e tempo de toque crítico para as simulações probabilísticas com toque na costa.

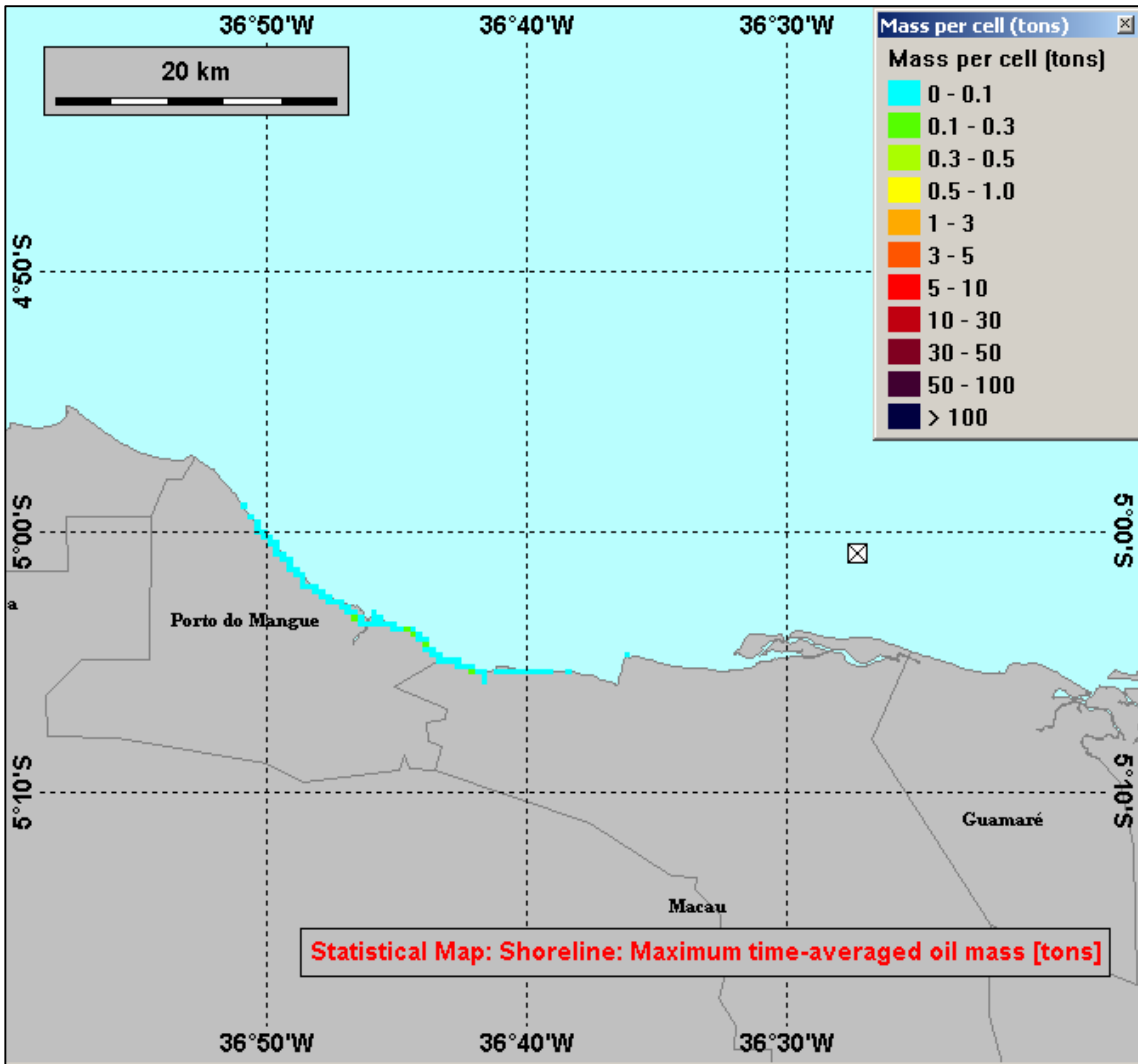
| CENÁRIO | PERÍODO | TEMPO DE TOQUE NA COSTA (h) |
|---------|---------|-----------------------------|
| 1       | Verão   | 20,4                        |
| 2       | Inverno | 18                          |
| 5       | Verão   | 22,3                        |
| 6       | Inverno | 27,4                        |
| 9       | Verão   | 24                          |
| 10      | Inverno | 16,6                        |
| 11      | Verão   | 23,0                        |
| 12      | Inverno | 16,1                        |
| 13      | Verão   | 17,8                        |
| 14      | Inverno | 59,8                        |



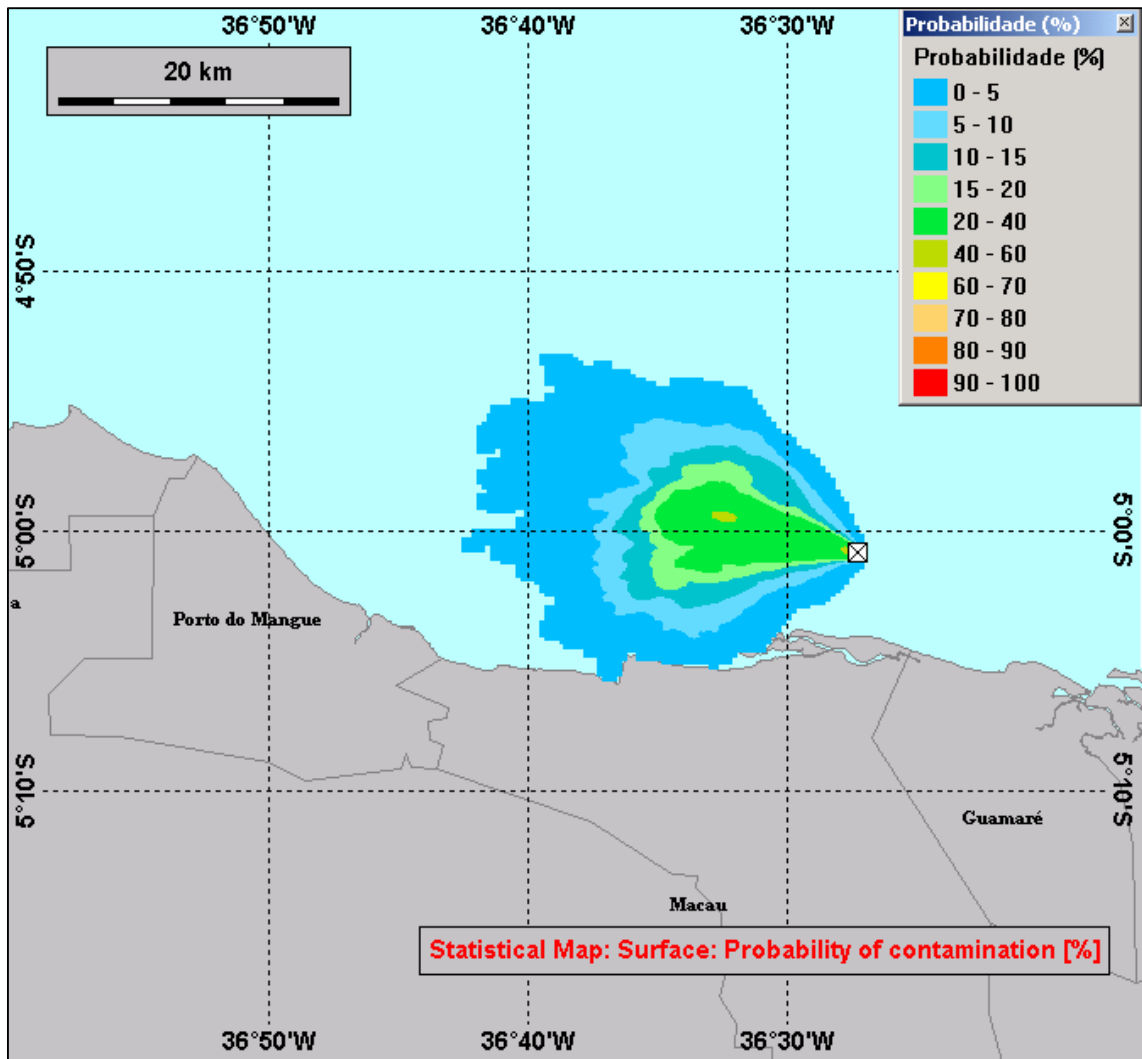
**Figura 12:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 1 (vazamento instantâneo de 8m<sup>3</sup>, verão, critério de parada –20 mg/L).



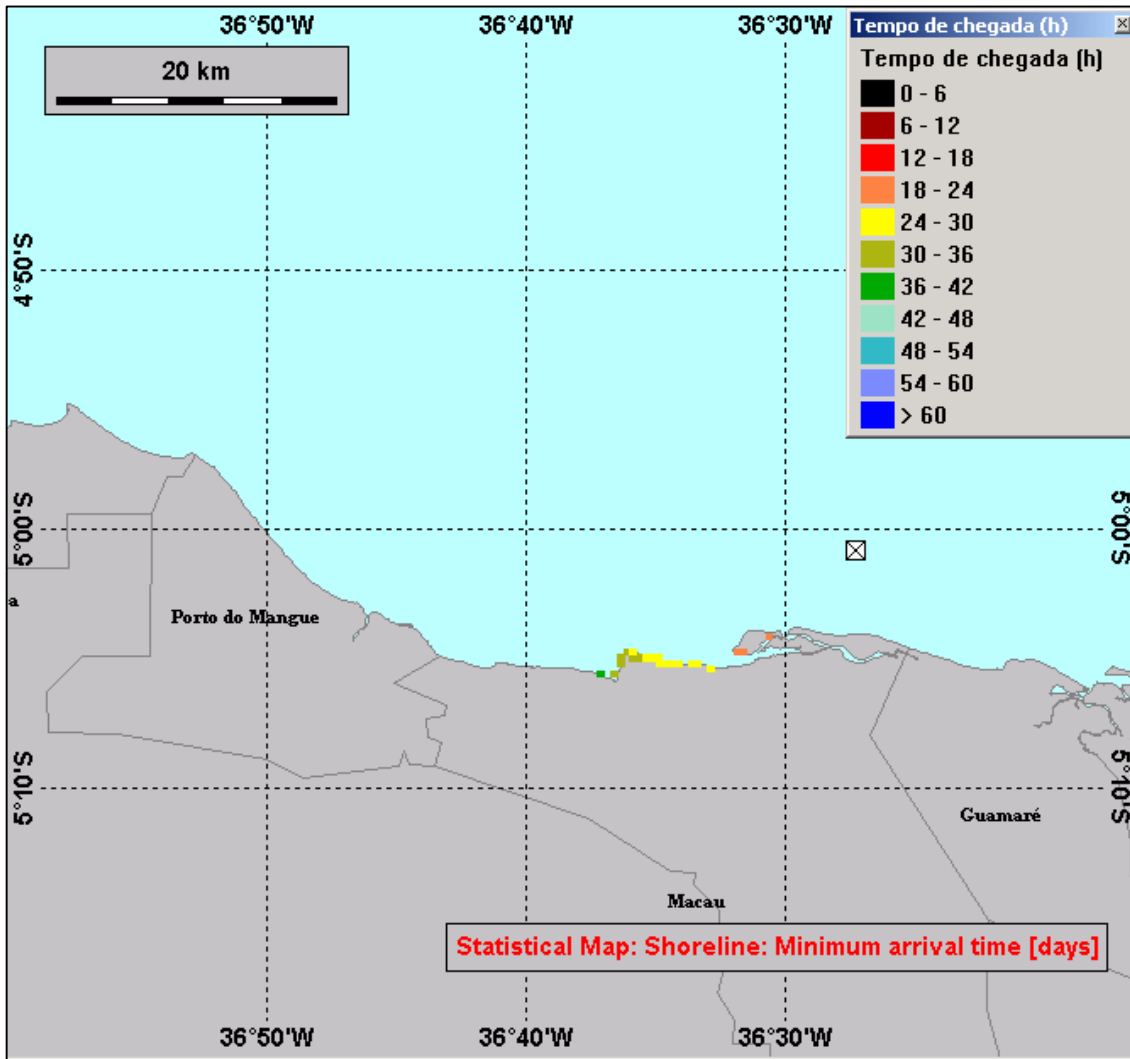
**Figura 13:** Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 1 (vazamento instantâneo de 8m<sup>3</sup>, verão, critério de parada – 20 mg/L).



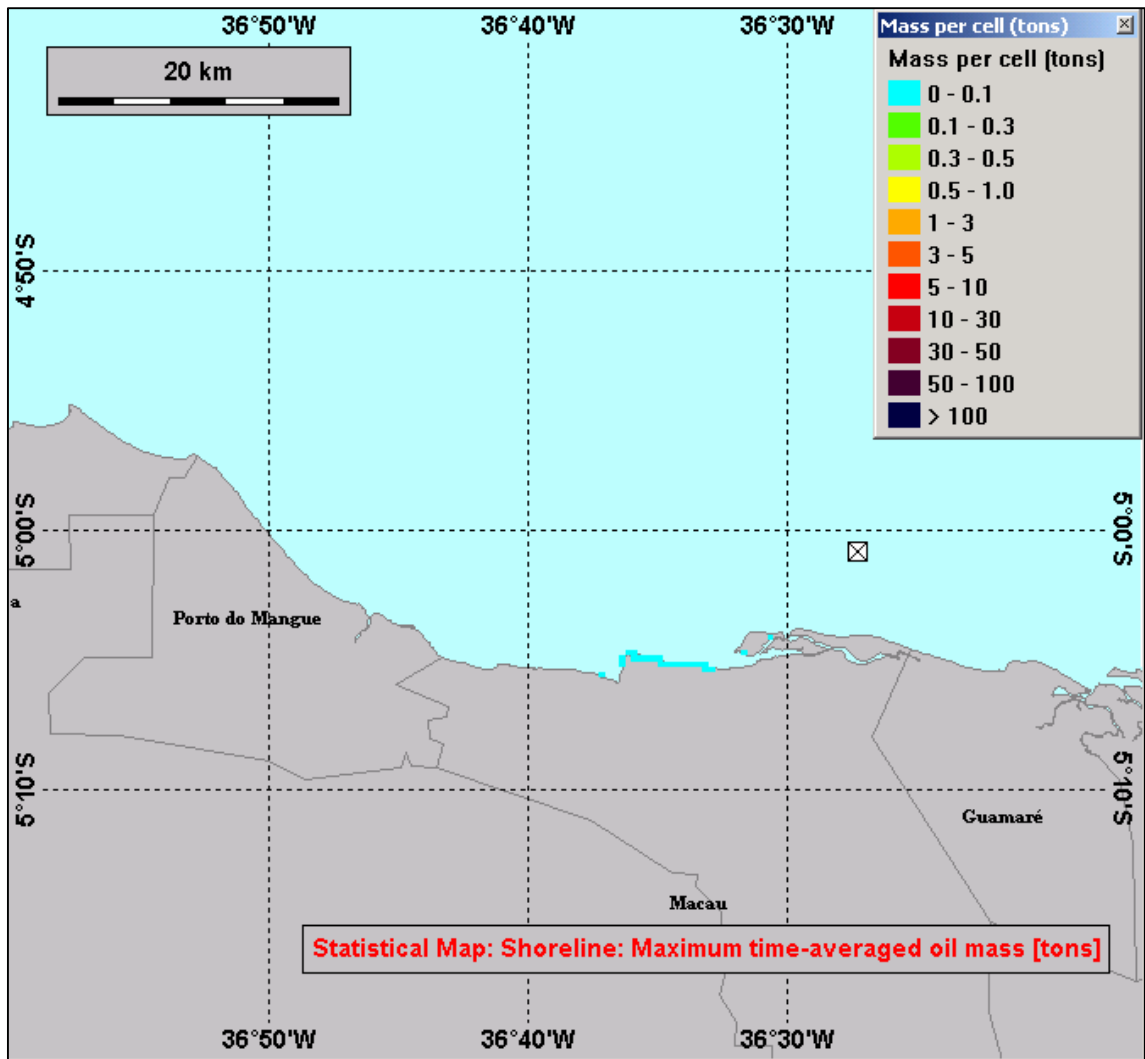
**Figura 14:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 1 (vazamento instantâneo de 8m<sup>3</sup>, verão, critério de parada – 20 mg/L).



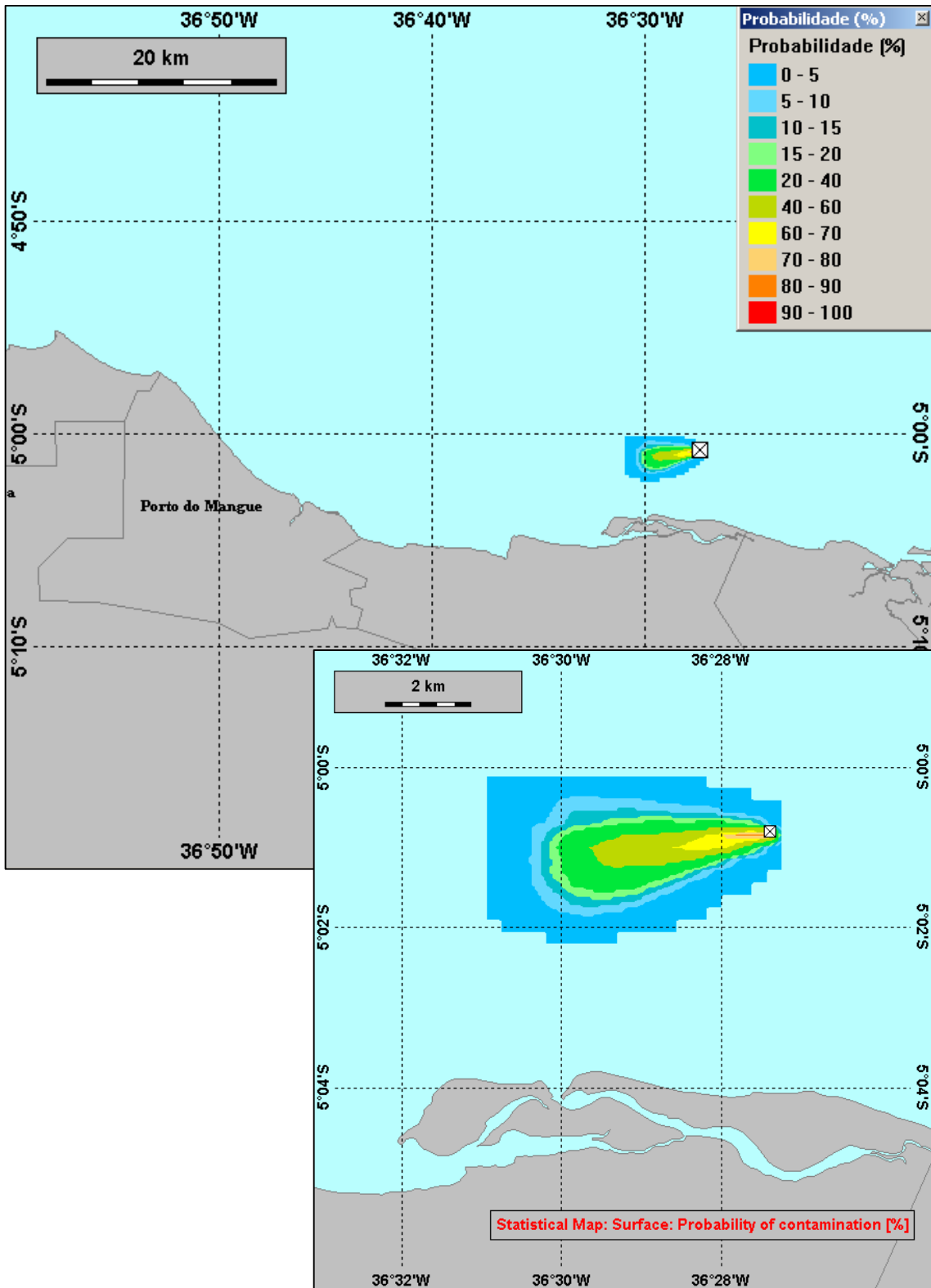
**Figura 15:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 2 (vazamento instantâneo de 8m<sup>3</sup>, inverno, critério de parada –20 mg/L).



**Figura 16:** Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 2 (vazamento instantâneo de 8m<sup>3</sup>, inverno, critério de parada – 20 mg/L).

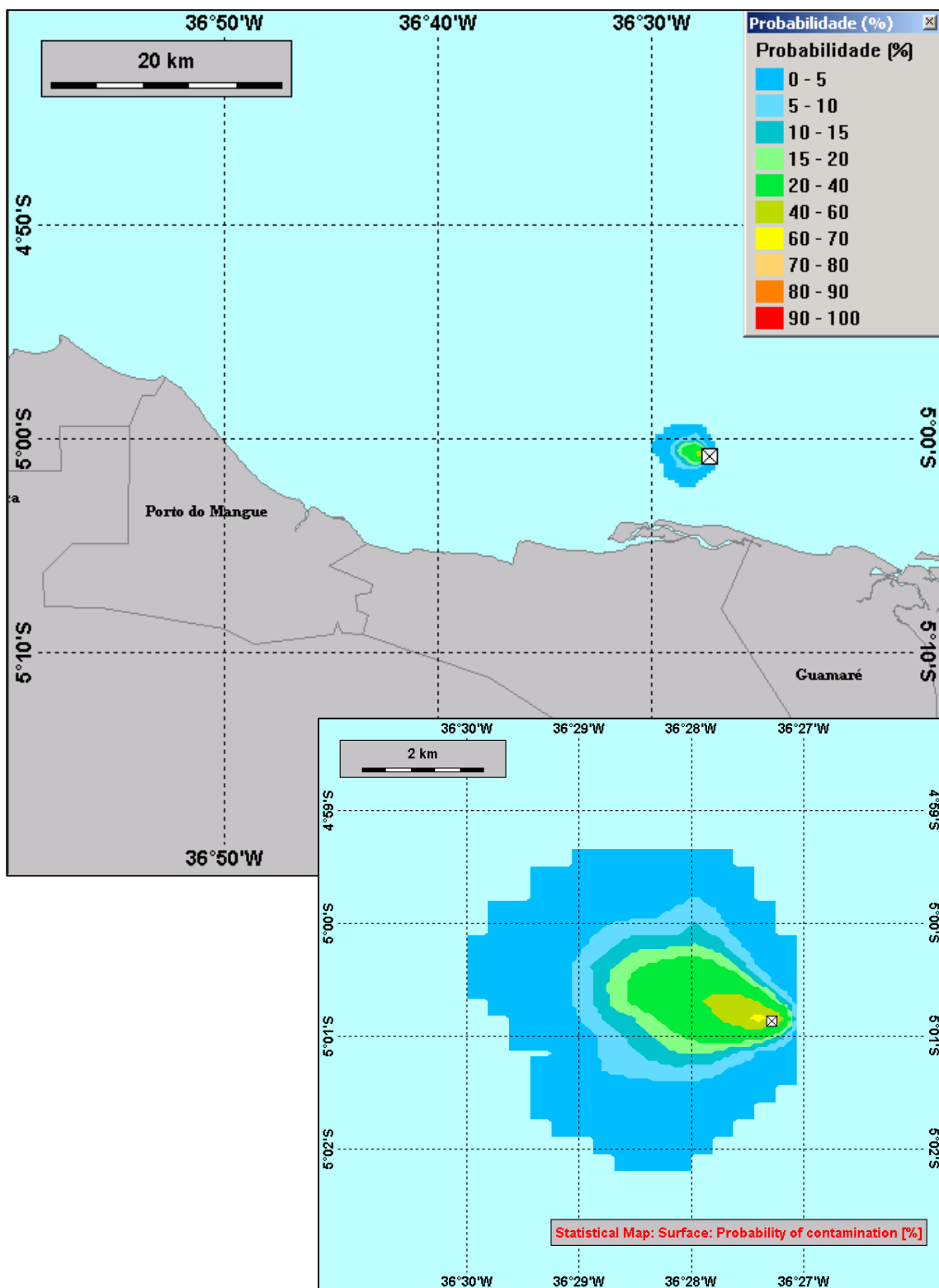


**Figura 17:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 2 (vazamento instantâneo de 8m<sup>3</sup>, inverno, critério de parada – 20 mg/L).

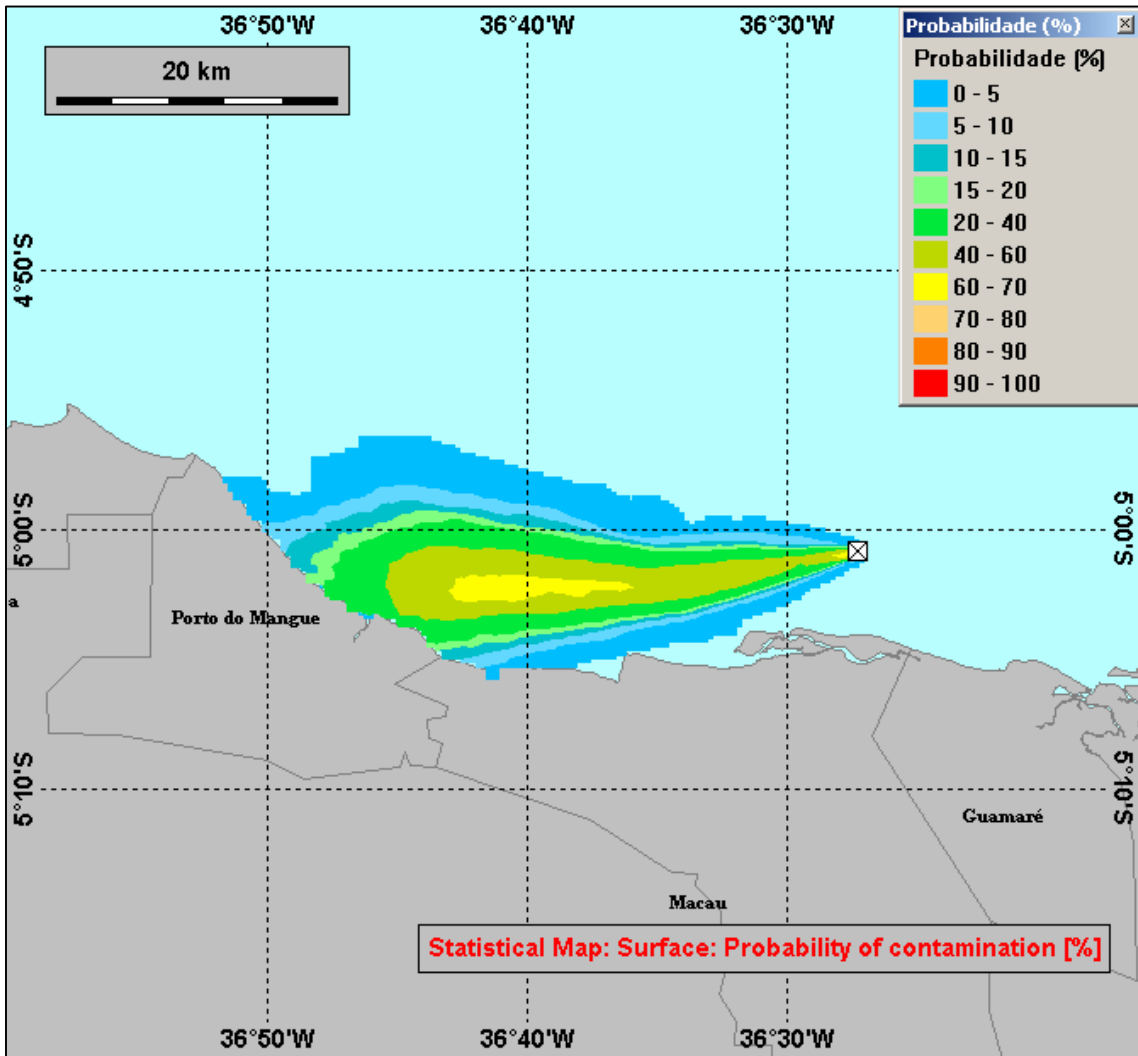


**Figura 18:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 3 (vazamento instantâneo de 200m<sup>3</sup>, verão, 6h) e zoom.

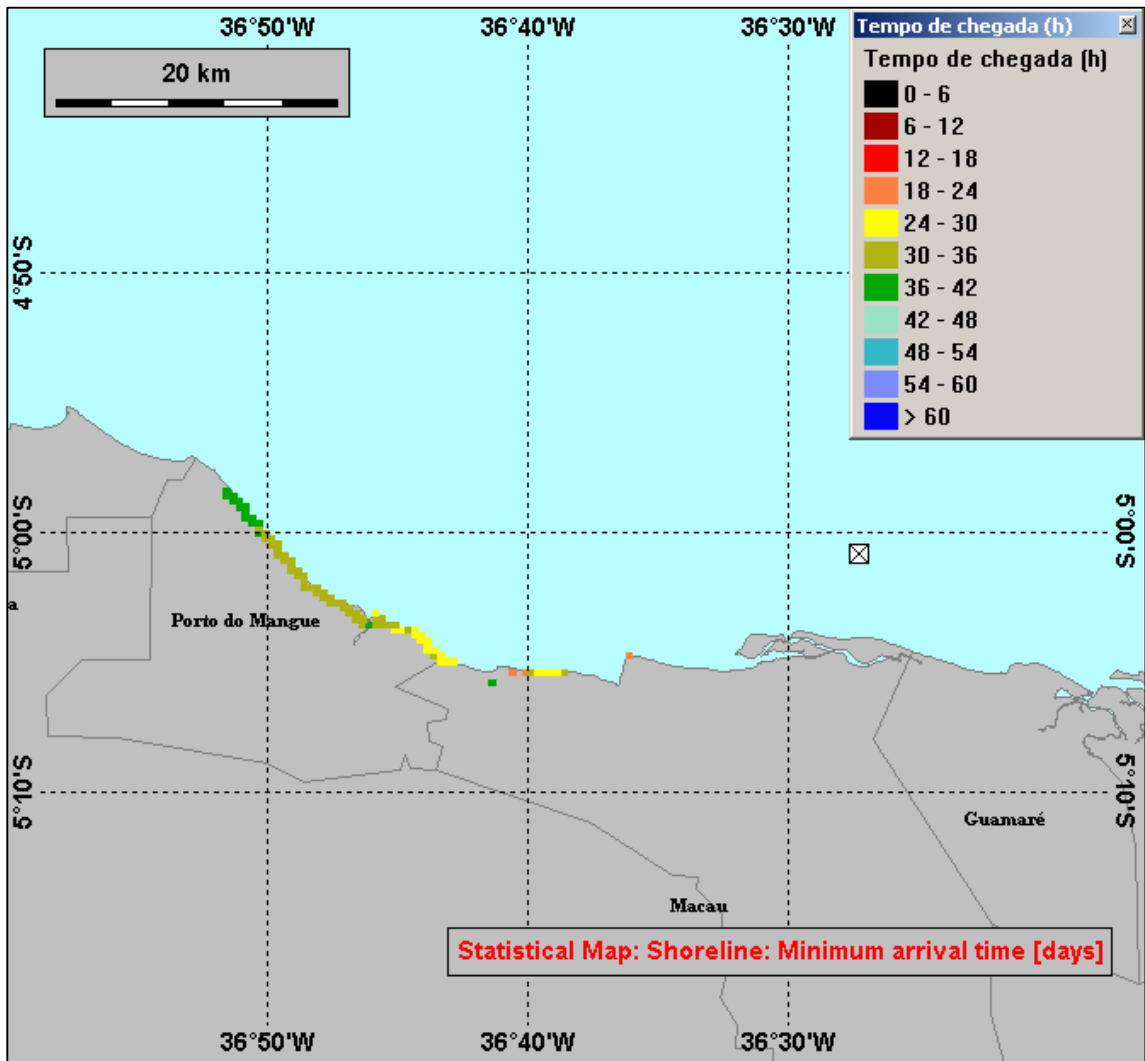




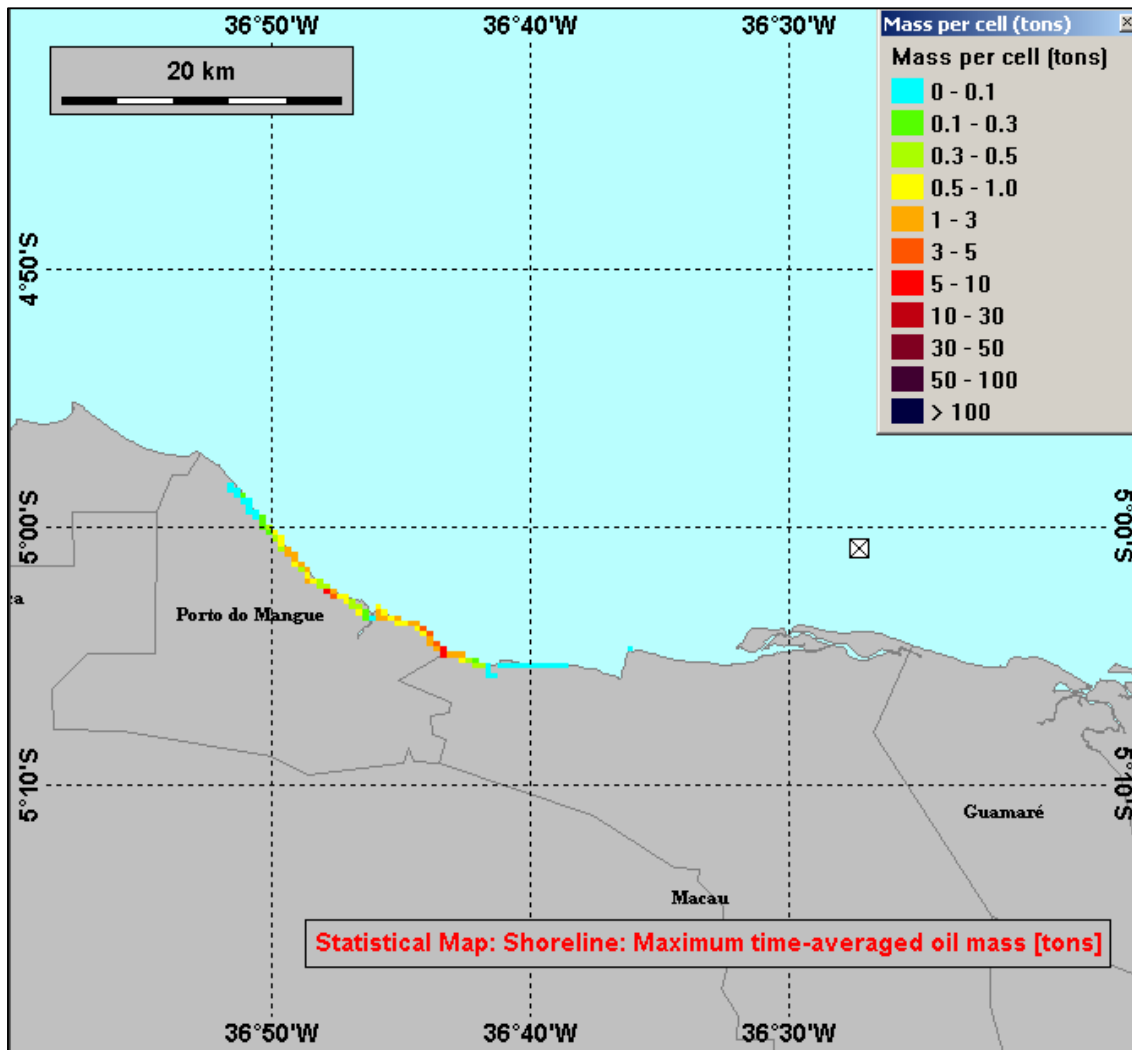
**Figura 19:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 4 (vazamento instantâneo de 200 m<sup>3</sup>, inverno, 6h) e zoom.



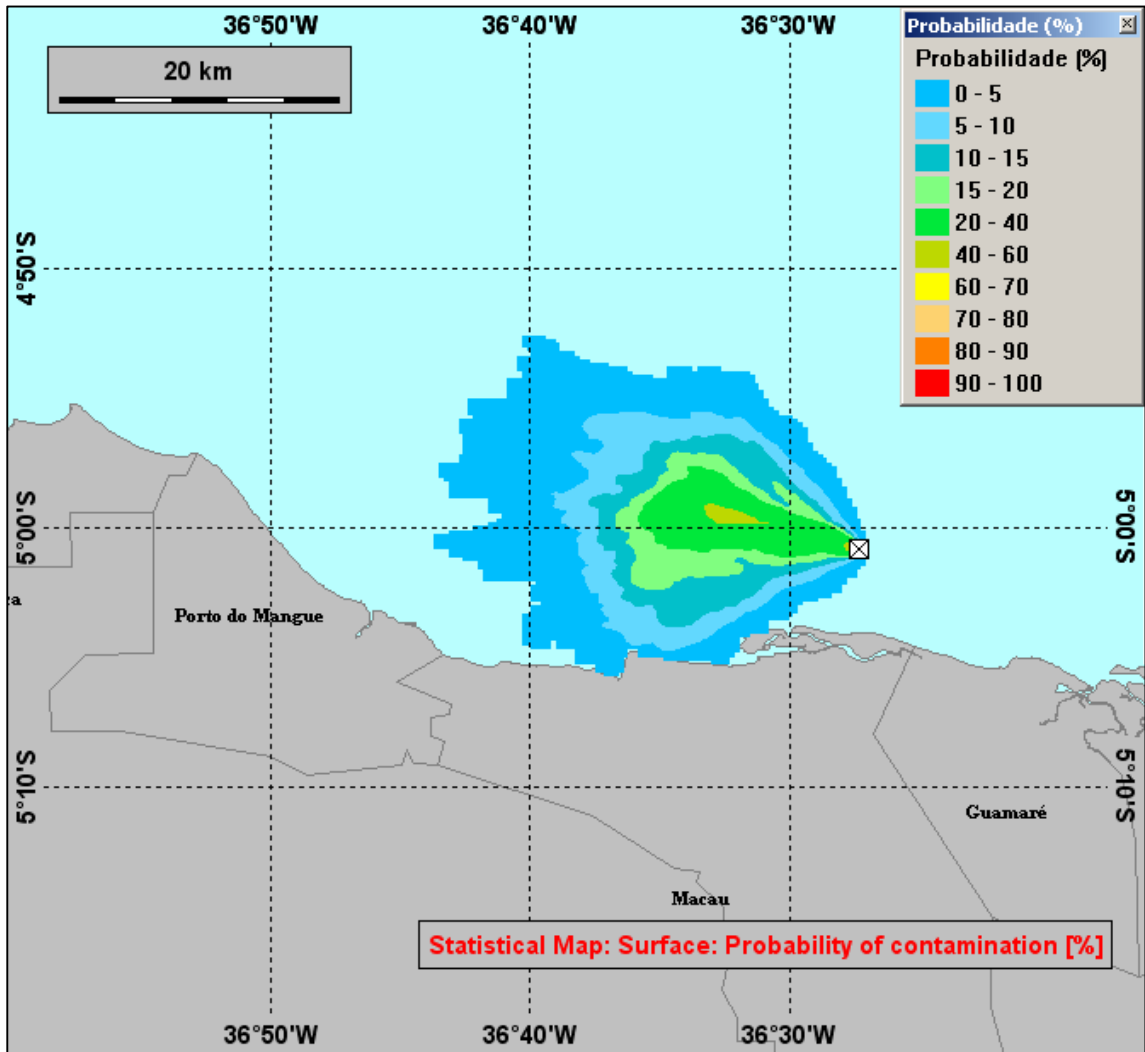
**Figura 20:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 5 (vazamento instantâneo de 200m<sup>3</sup>, verão, critério de parada – 20 mg/L).



**Figura 21:** Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 5 (vazamento instantâneo de 200m<sup>3</sup>, verão, critério de parada – 20 mg/L).



**Figura 22:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 5 (vazamento instantâneo de 200m<sup>3</sup>, verão, critério de parada – 20 mg/L).



**Figura 23:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 6 (vazamento instantâneo de 200m<sup>3</sup>, inverno, critério de parada – 20 mg/L).

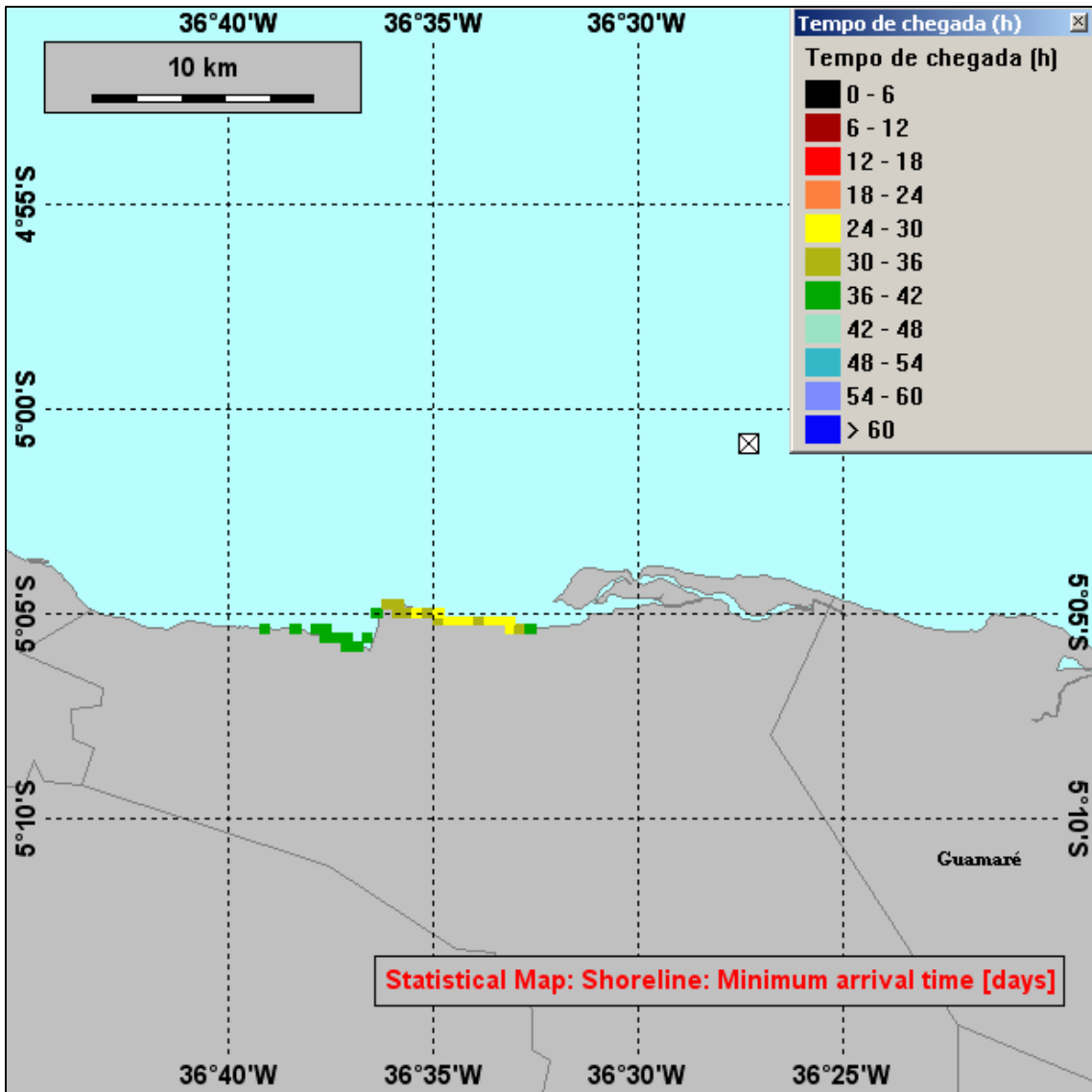
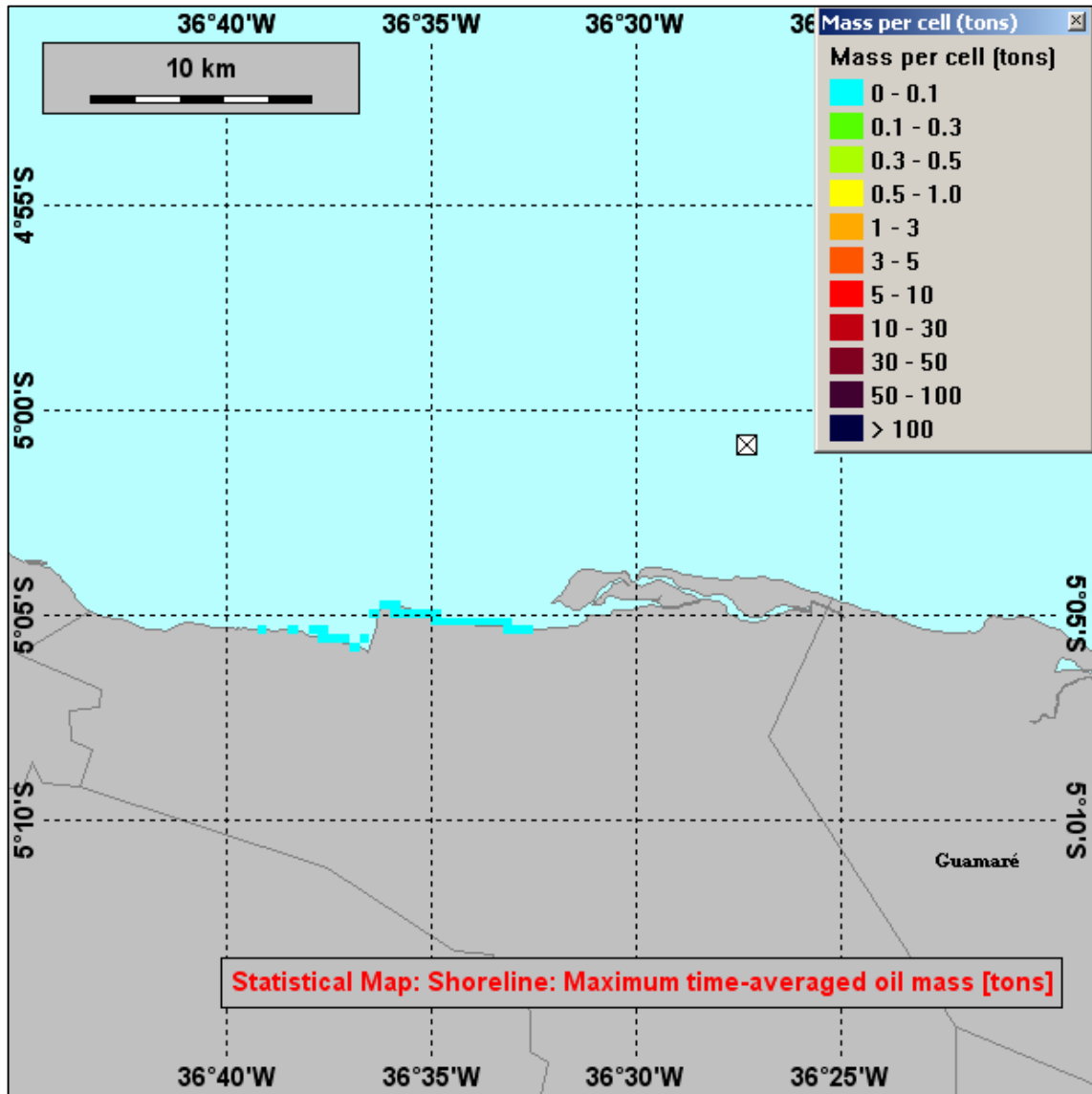
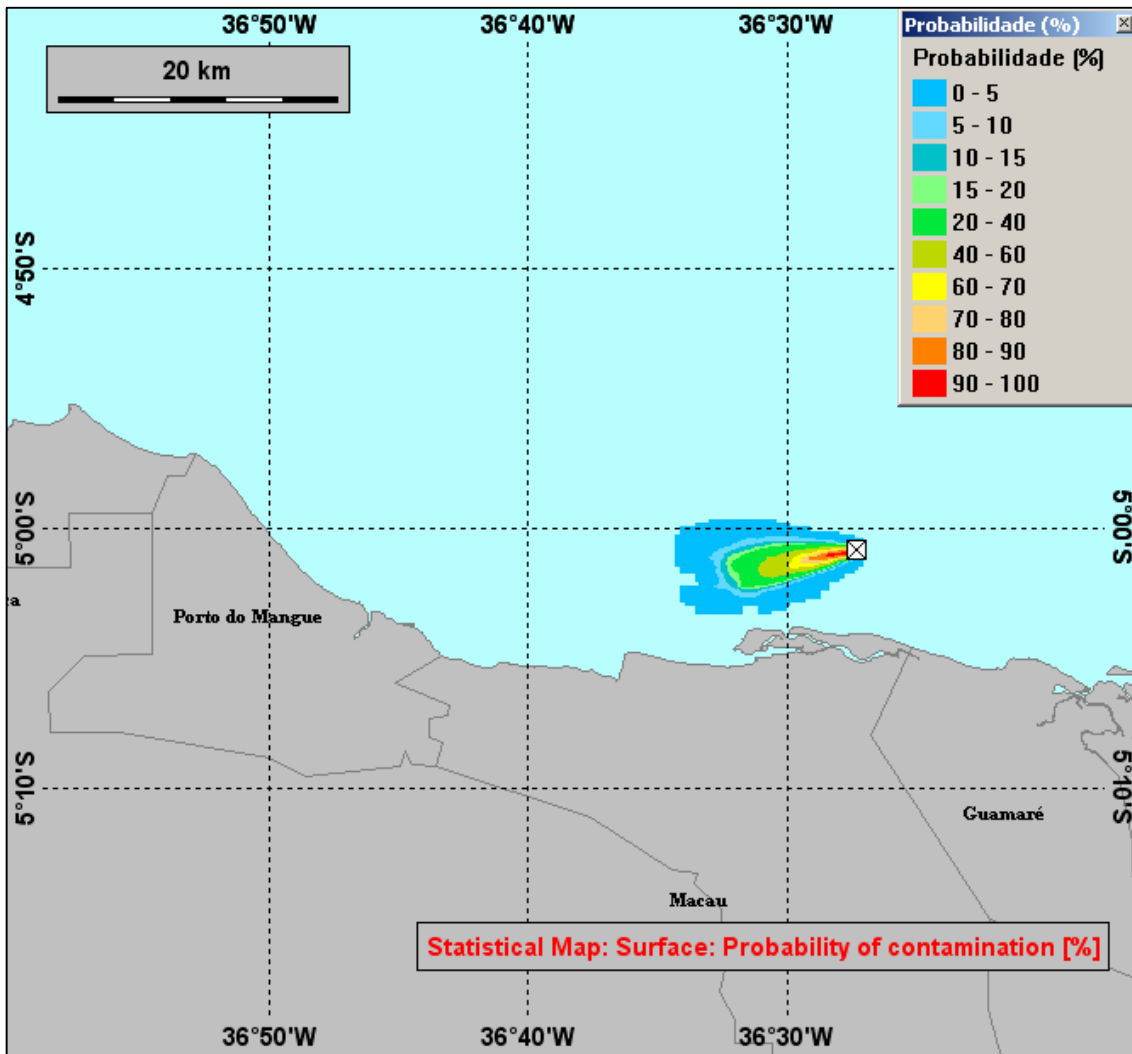


Figura 24: Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 6 (vazamento instantâneo de 200m<sup>3</sup>, inverno, critério de parada – 20 mg/L).

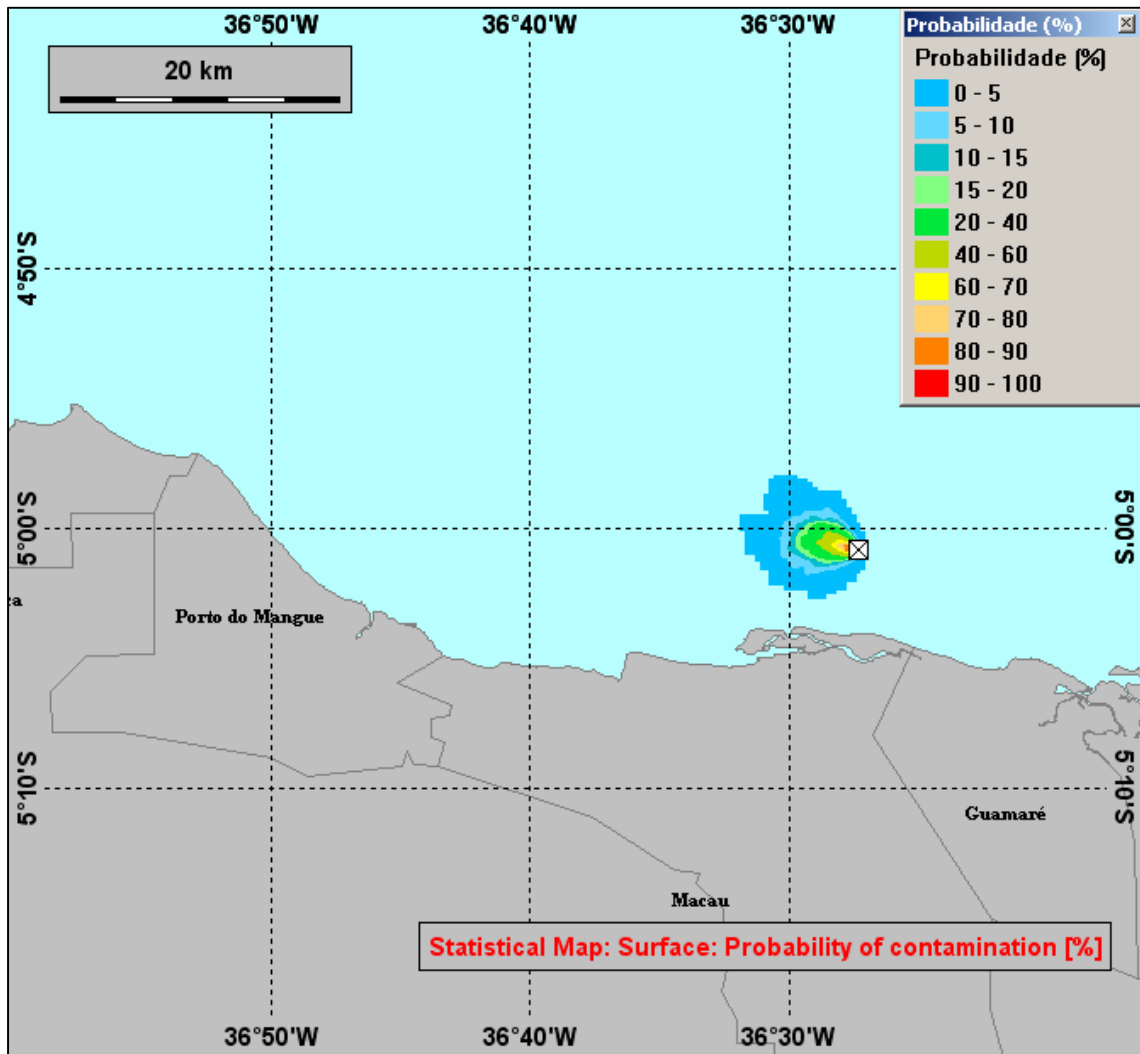


**Figura 25:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 6 (vazamento instantâneo de 200m<sup>3</sup>, inverno, critério de parada – 20 mg/L).

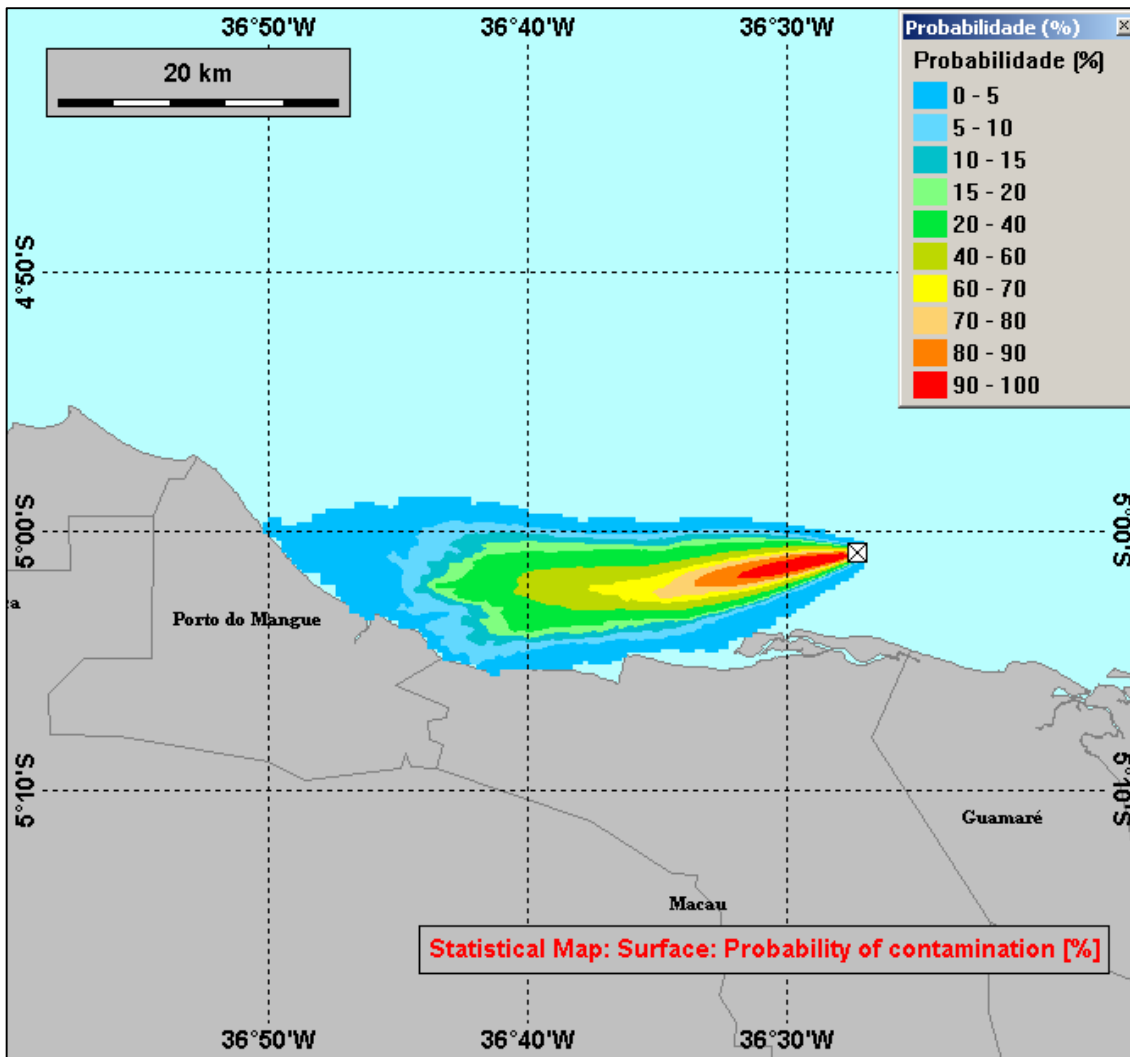


**Figura 26:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 7 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 12 horas).

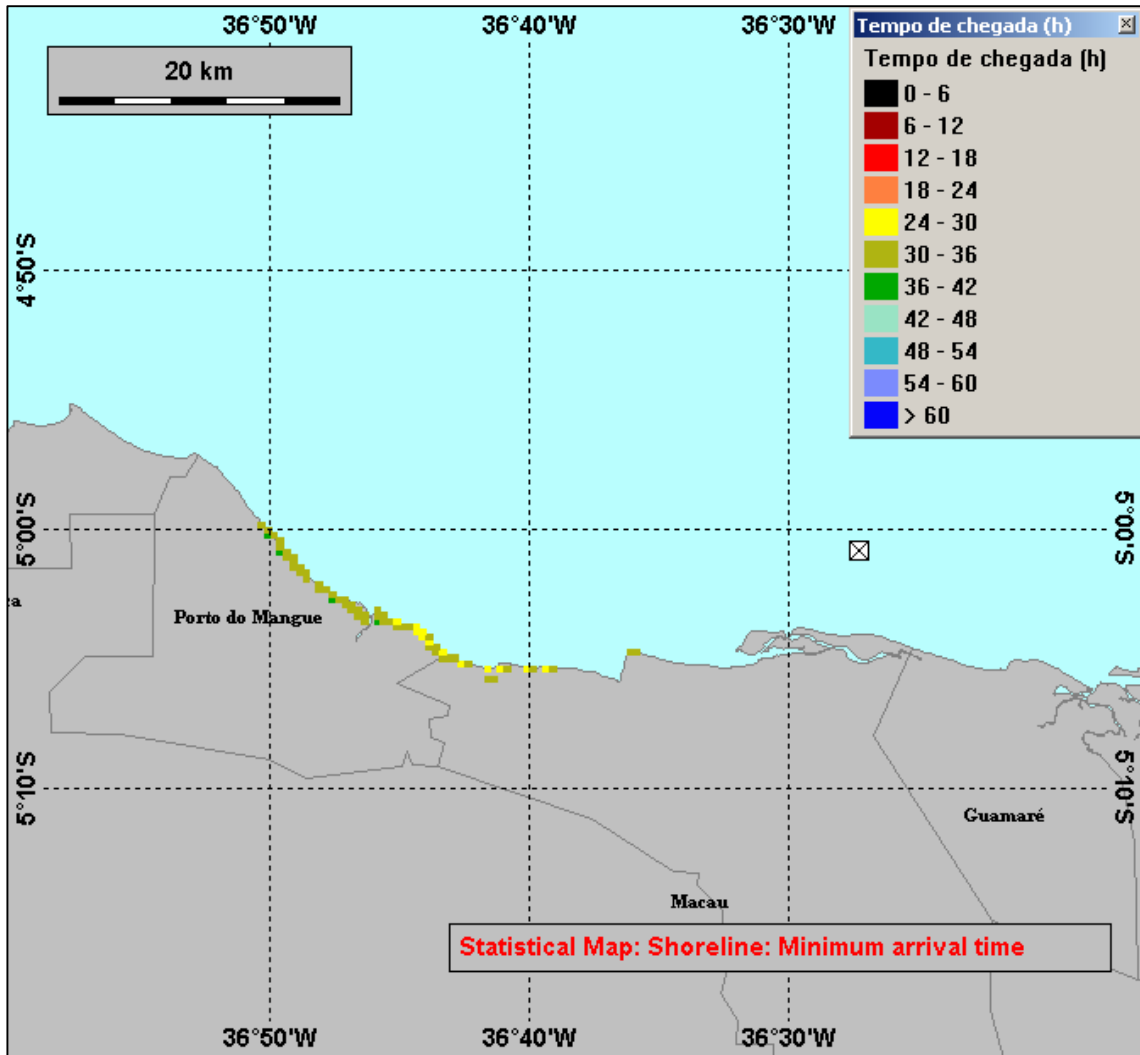




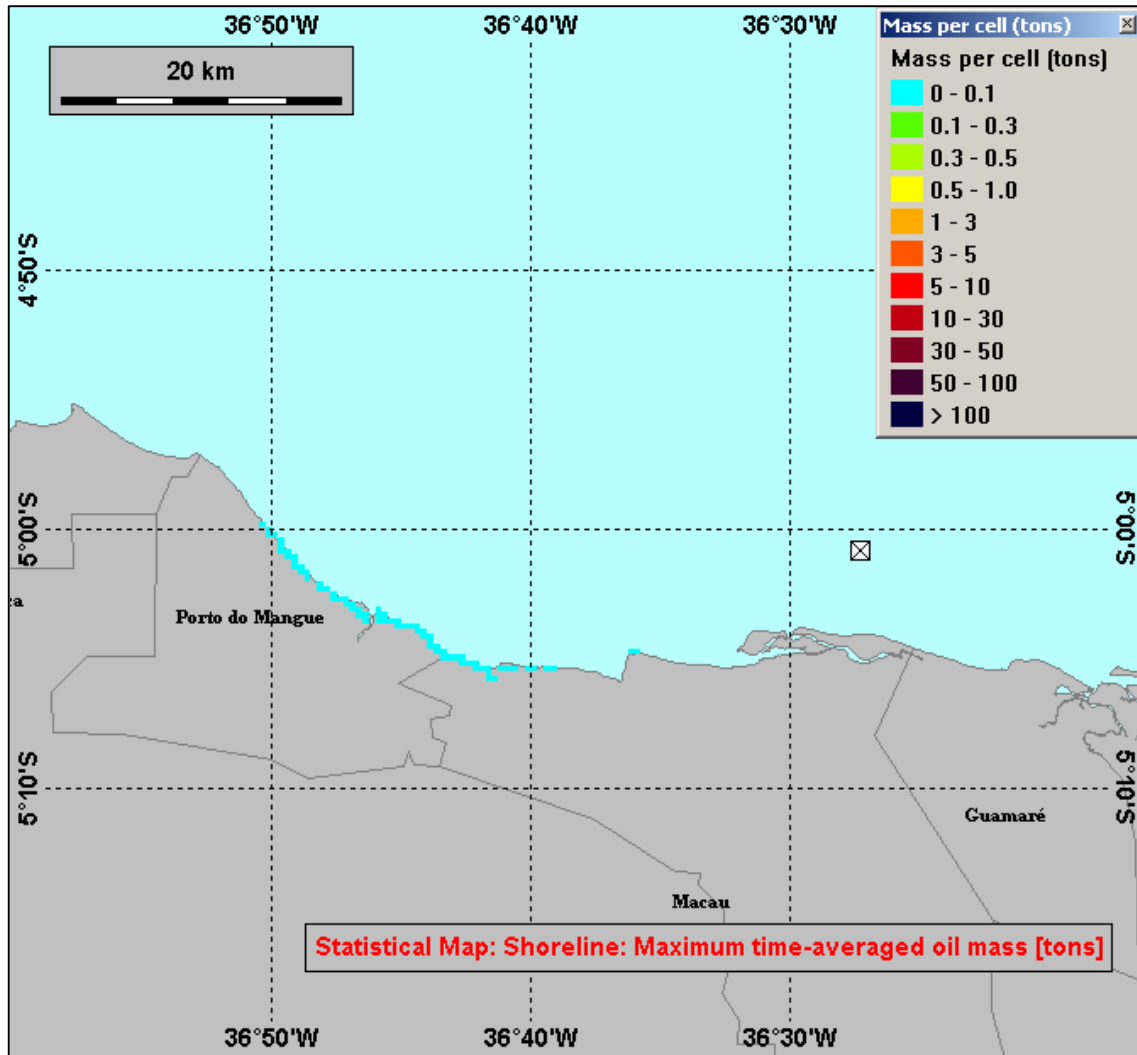
**Figura 27:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 8 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 12 horas).



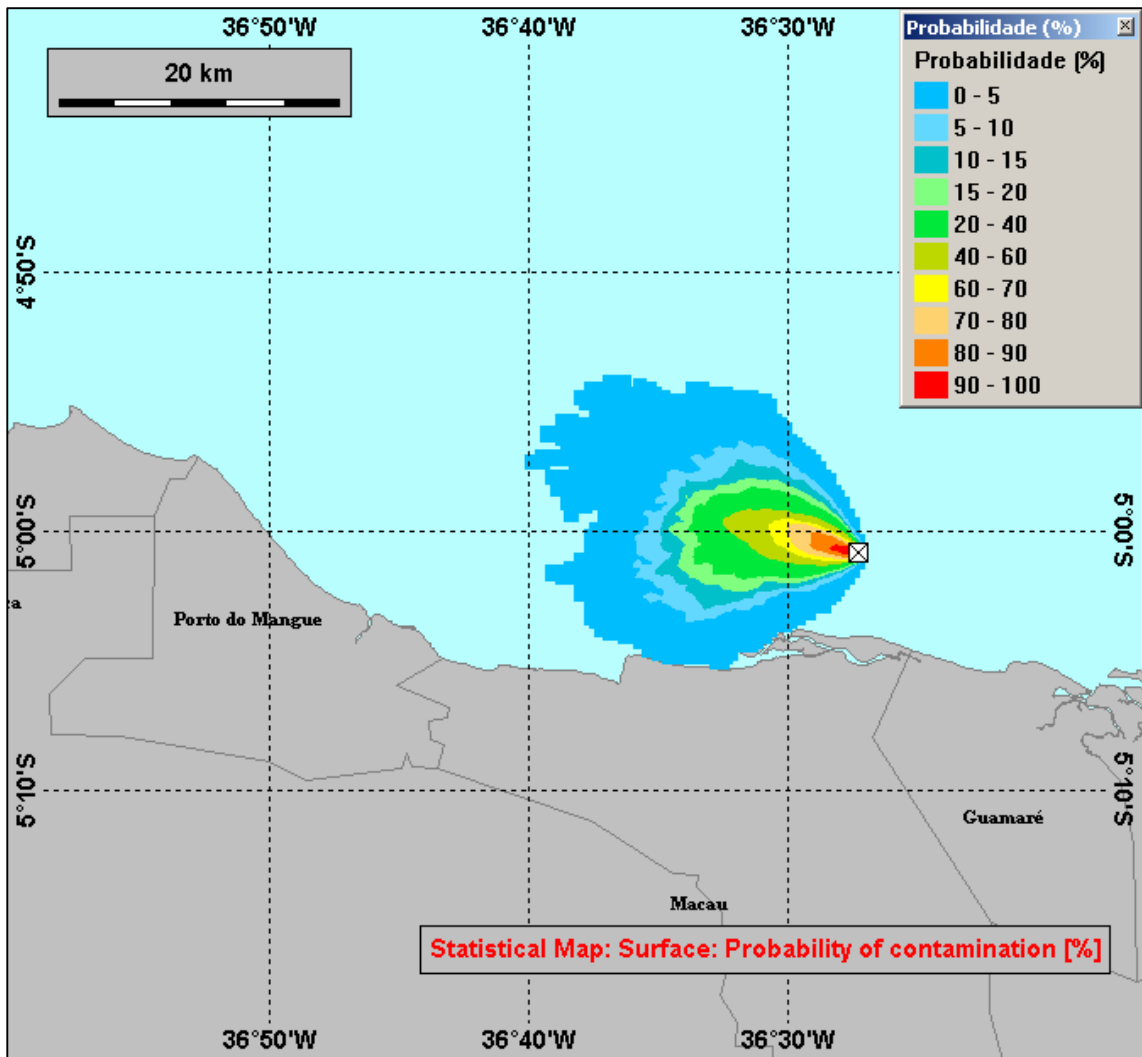
**Figura 28:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 9 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 36 horas).



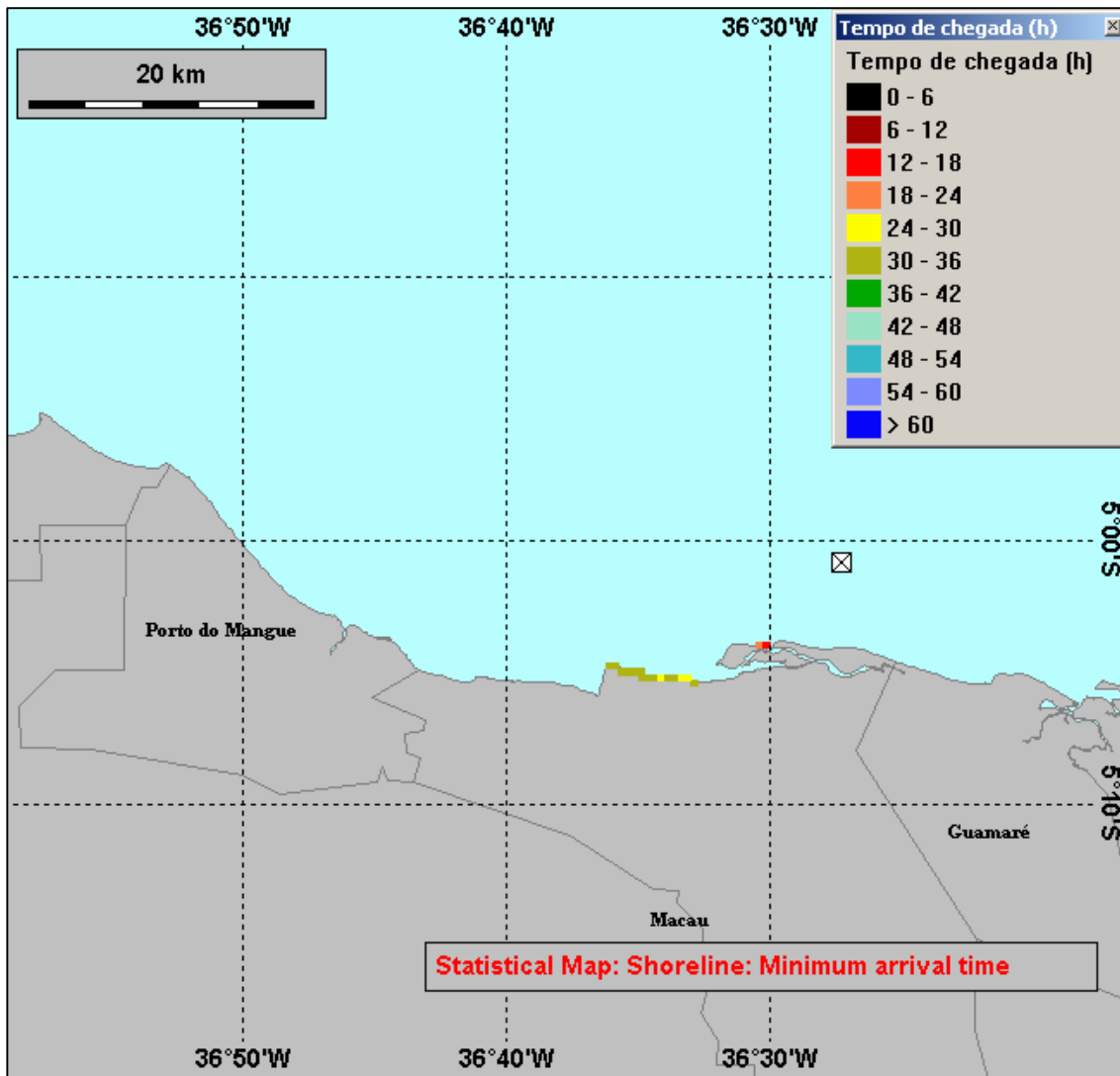
**Figura 29:** Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 9 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 36 horas).



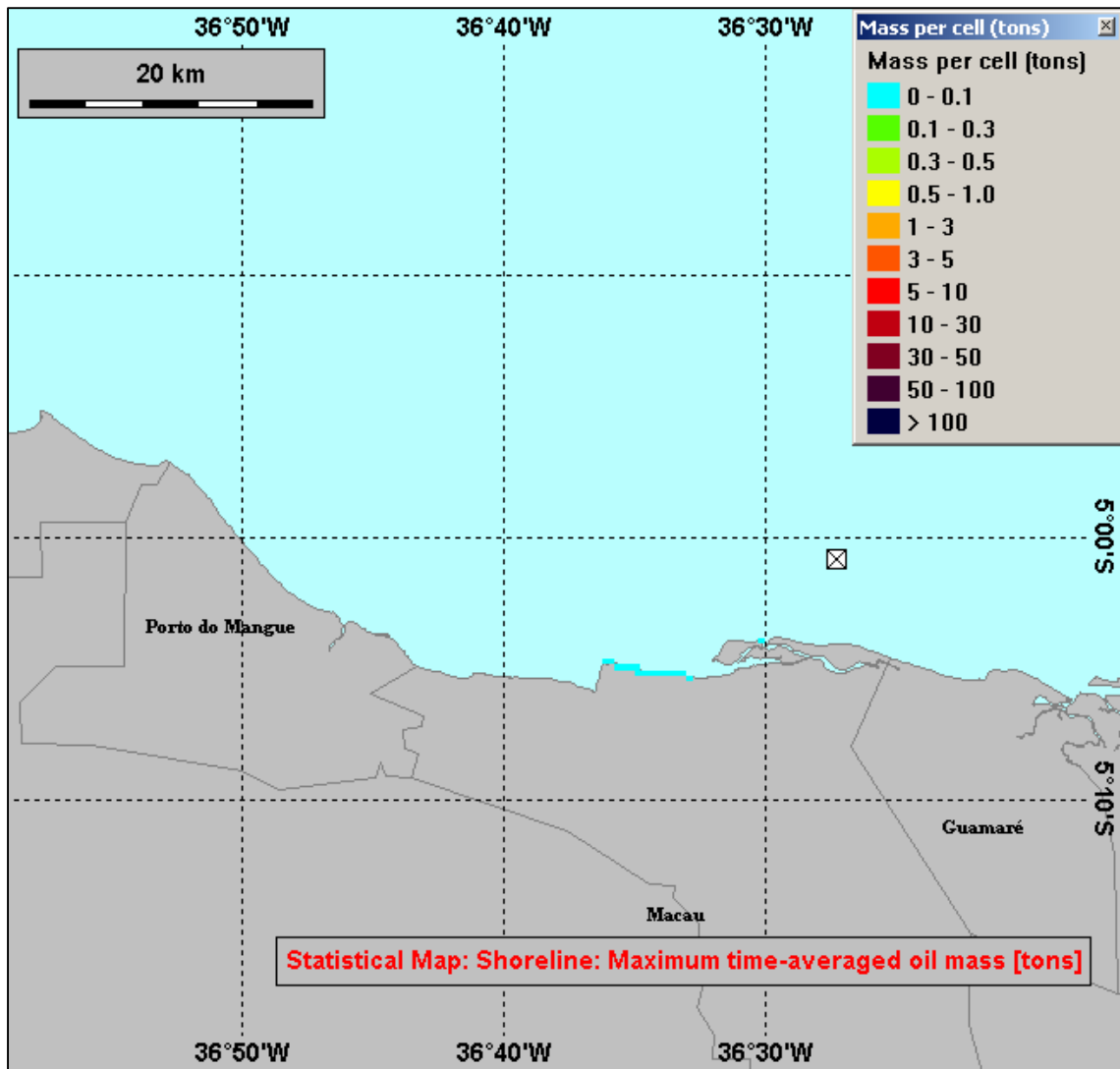
**Figura 30:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 9 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 36 horas).



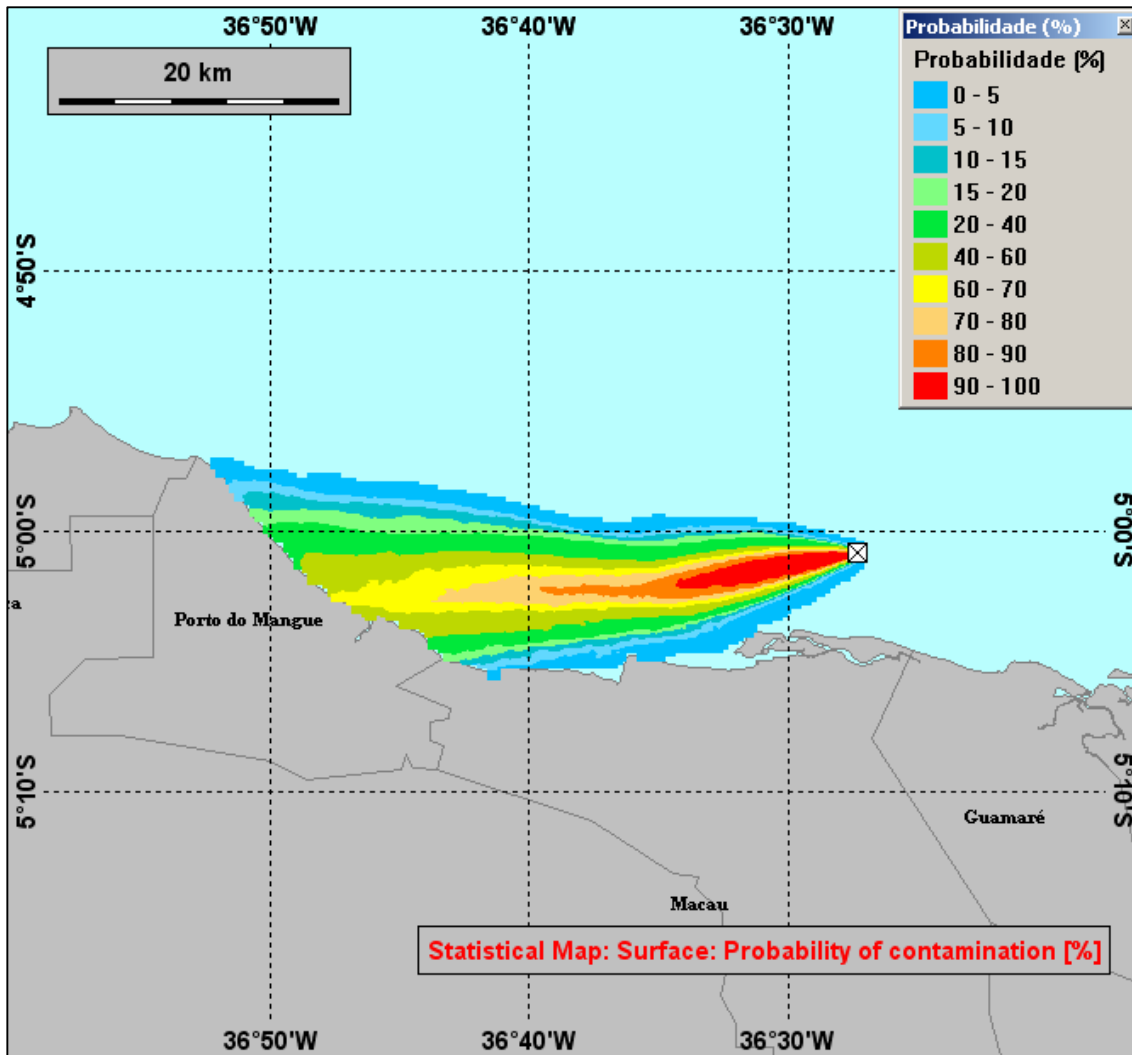
**Figura 31:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 10 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 36 horas).



**Figura 32:** Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 10 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 36 horas).

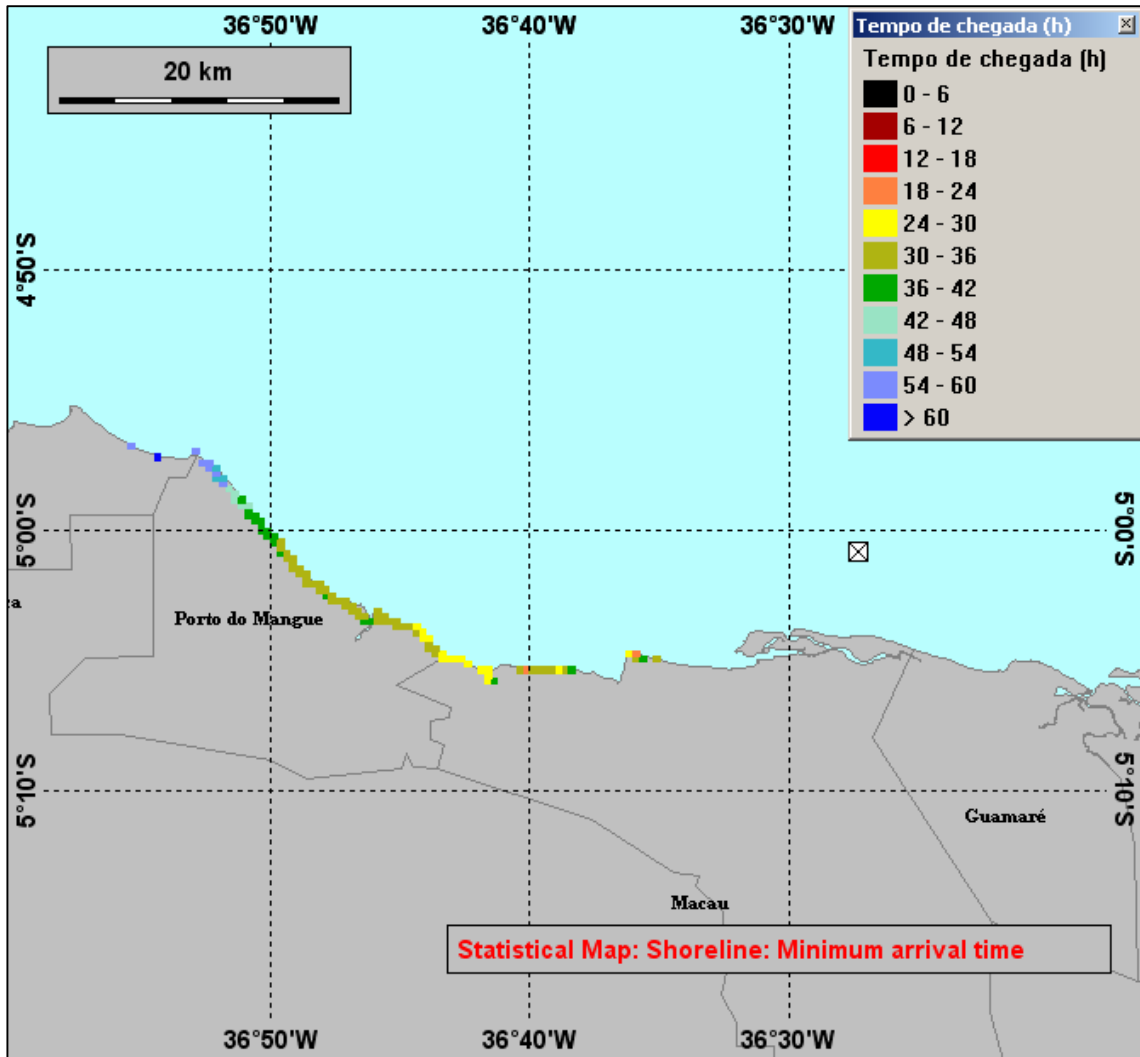


**Figura 33:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 10 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 36 horas).

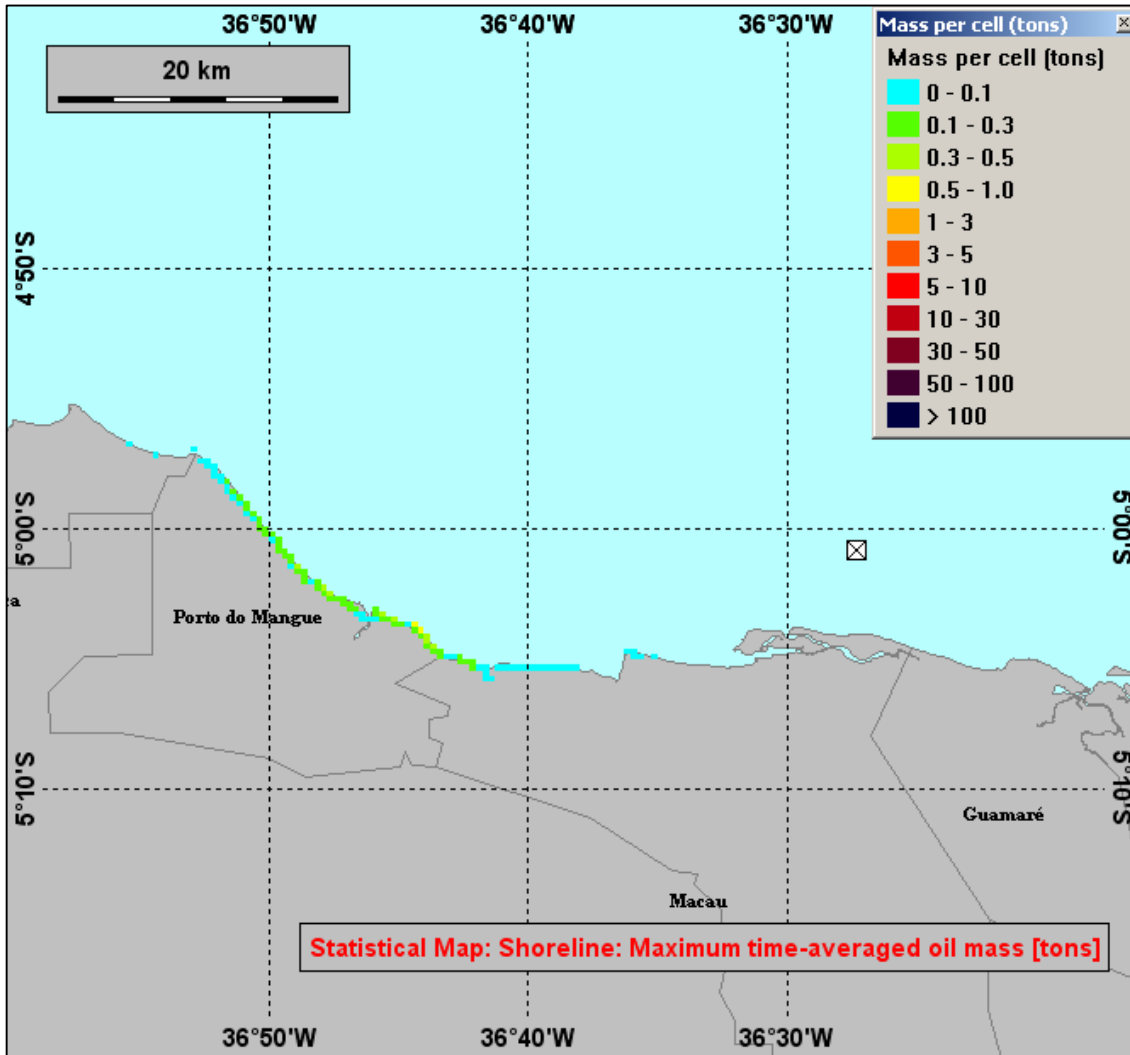


**Figura 34:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 11 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 60 horas).

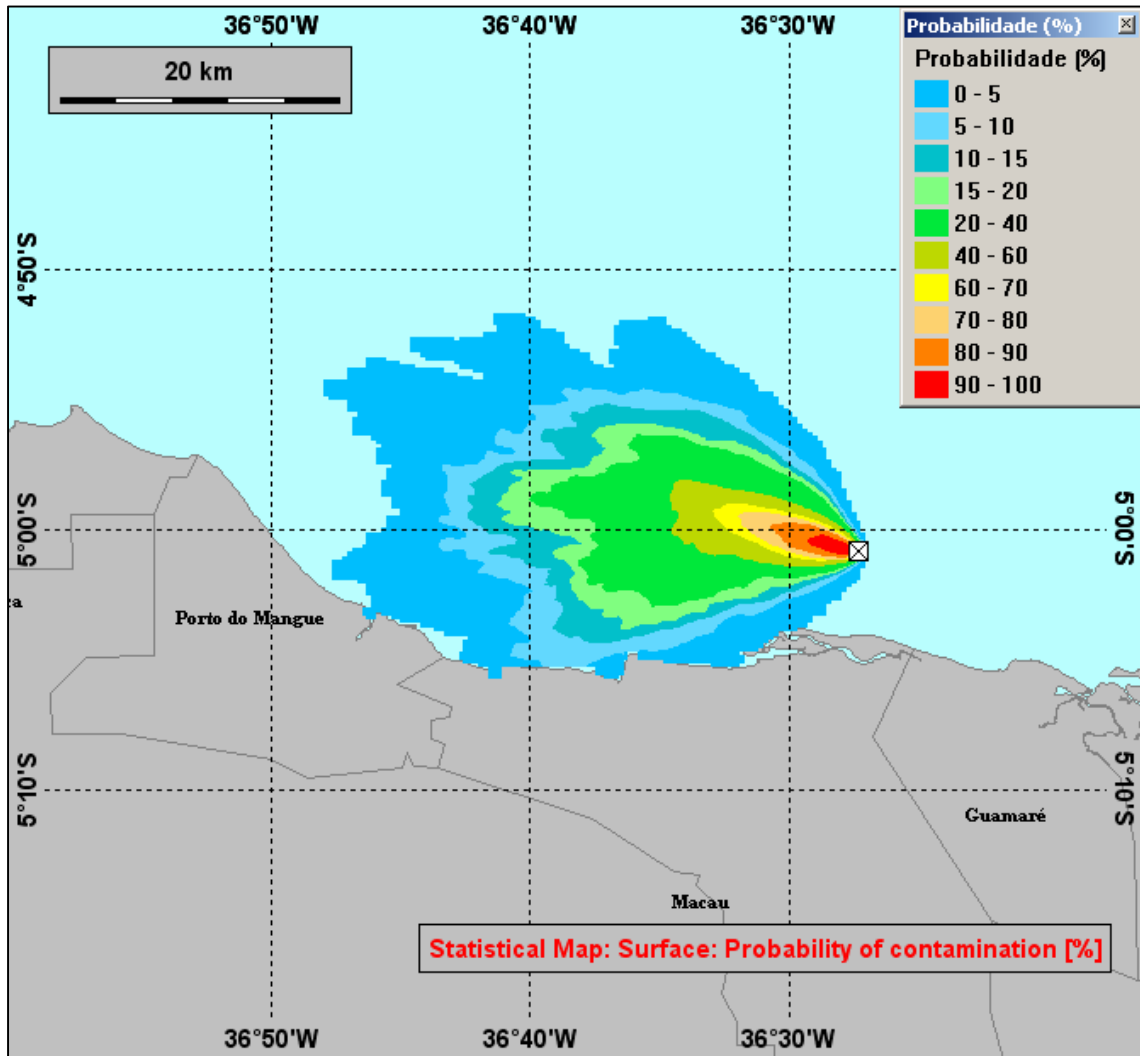




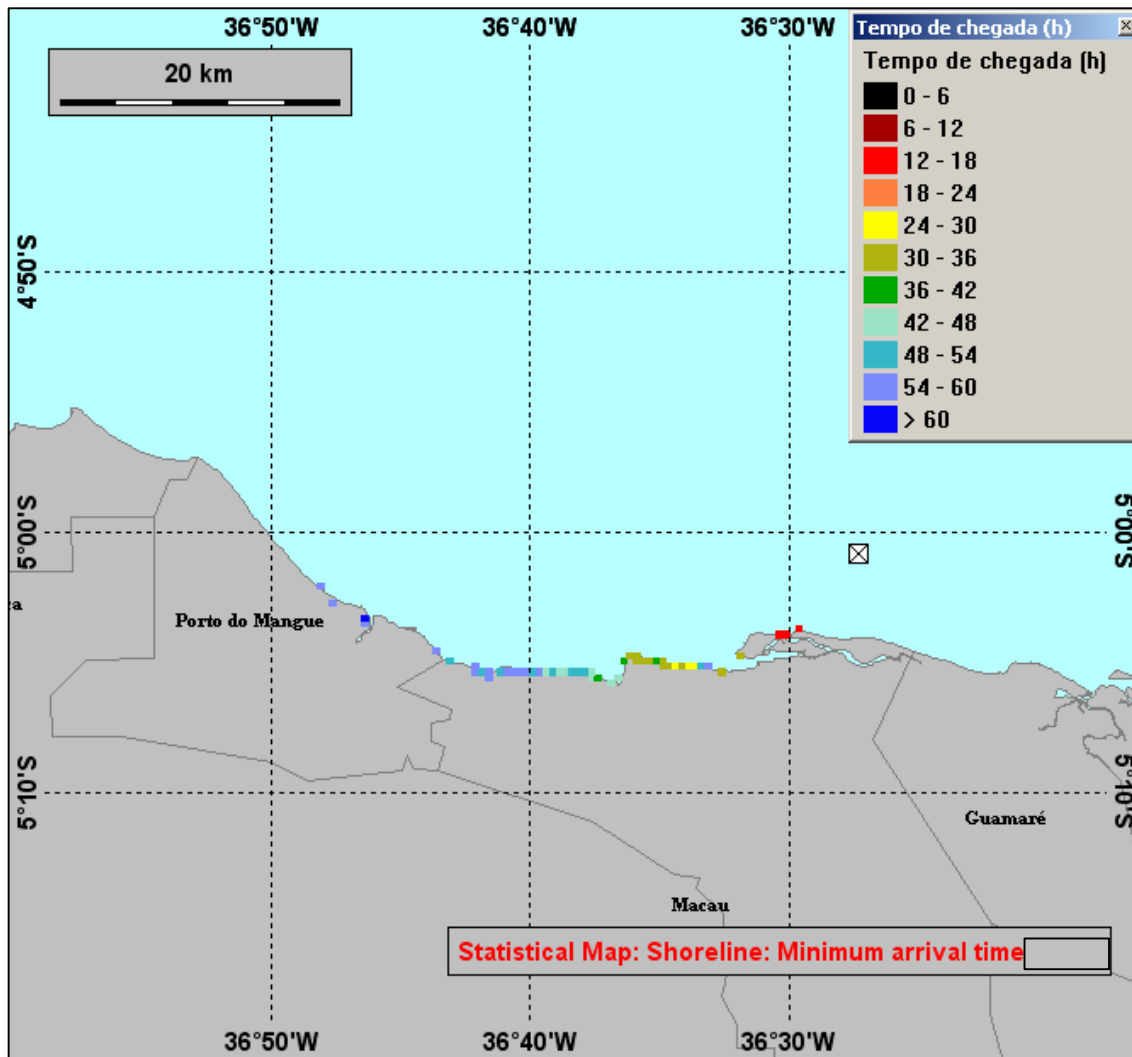
**Figura 35:** Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 11 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 60 horas).



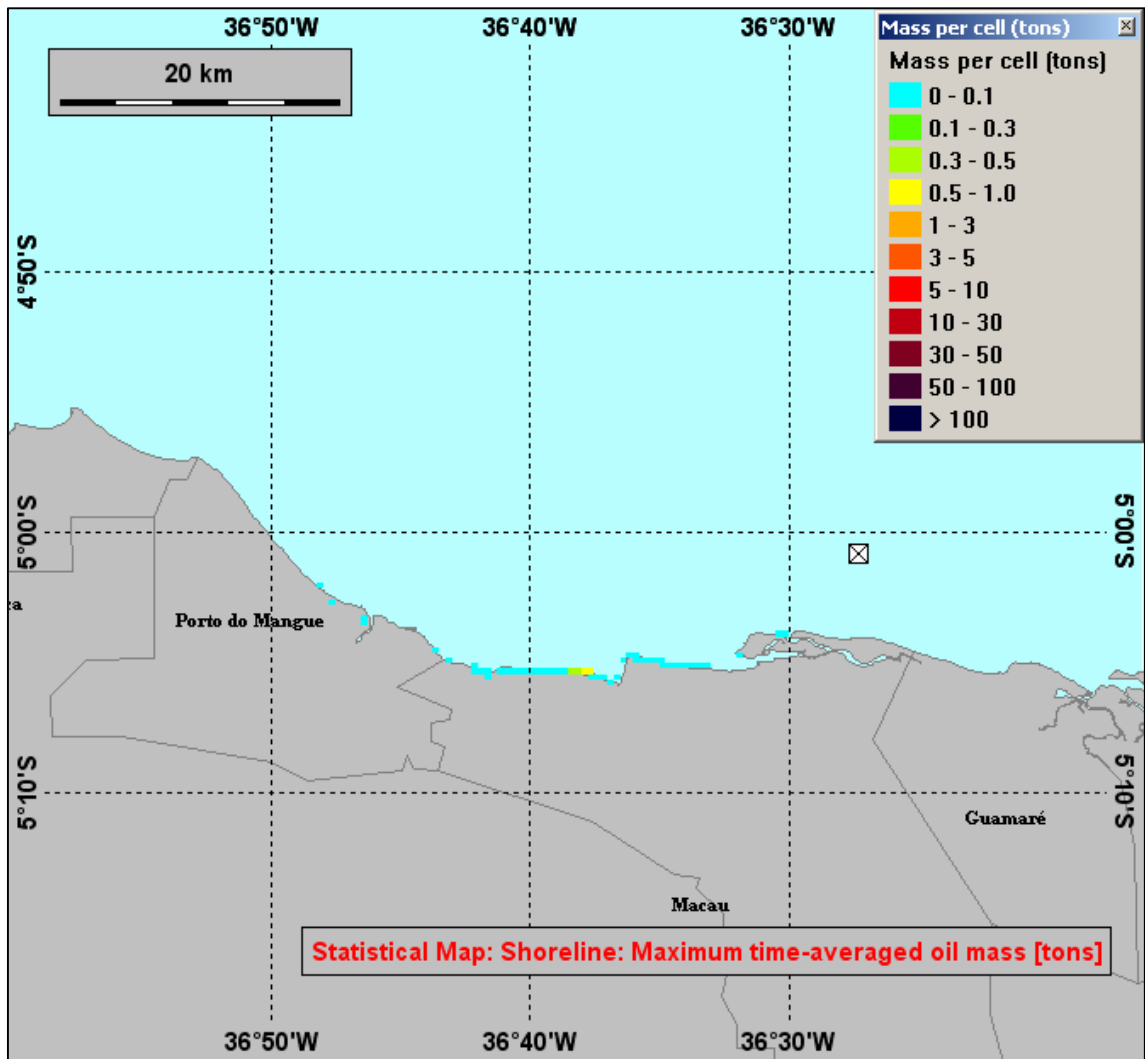
**Figura 36:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 11 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 60 horas).



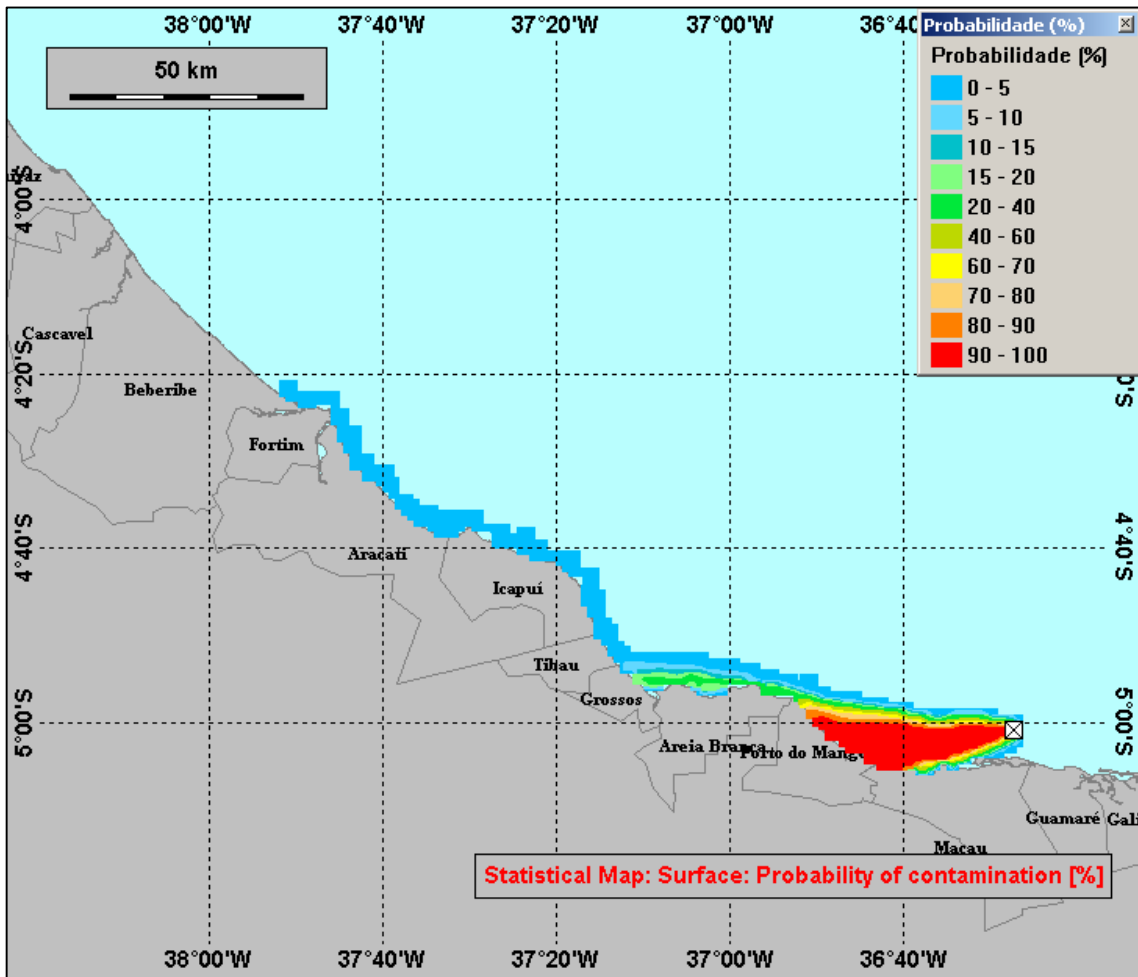
**Figura 37:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 12 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 60 horas).



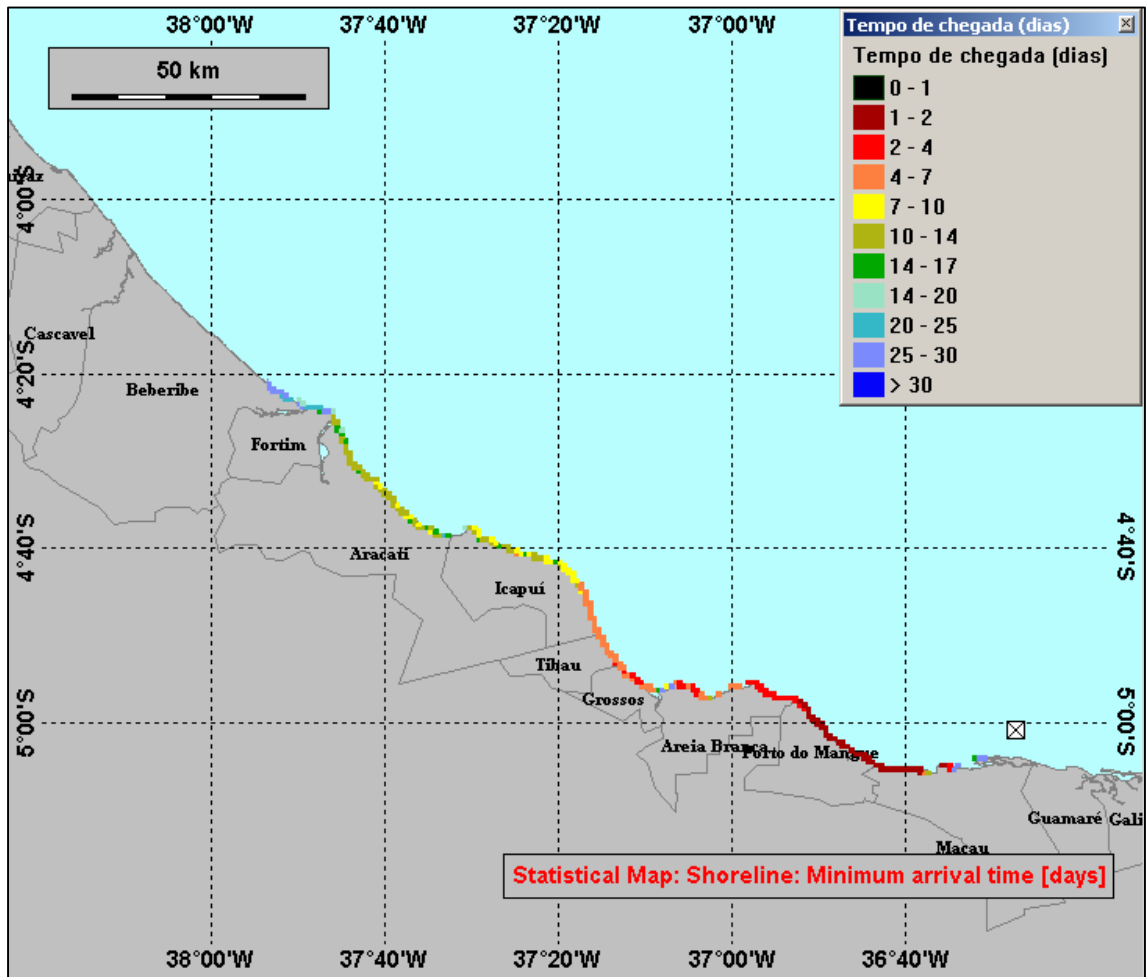
**Figura 38:** Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 12 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 60 horas).



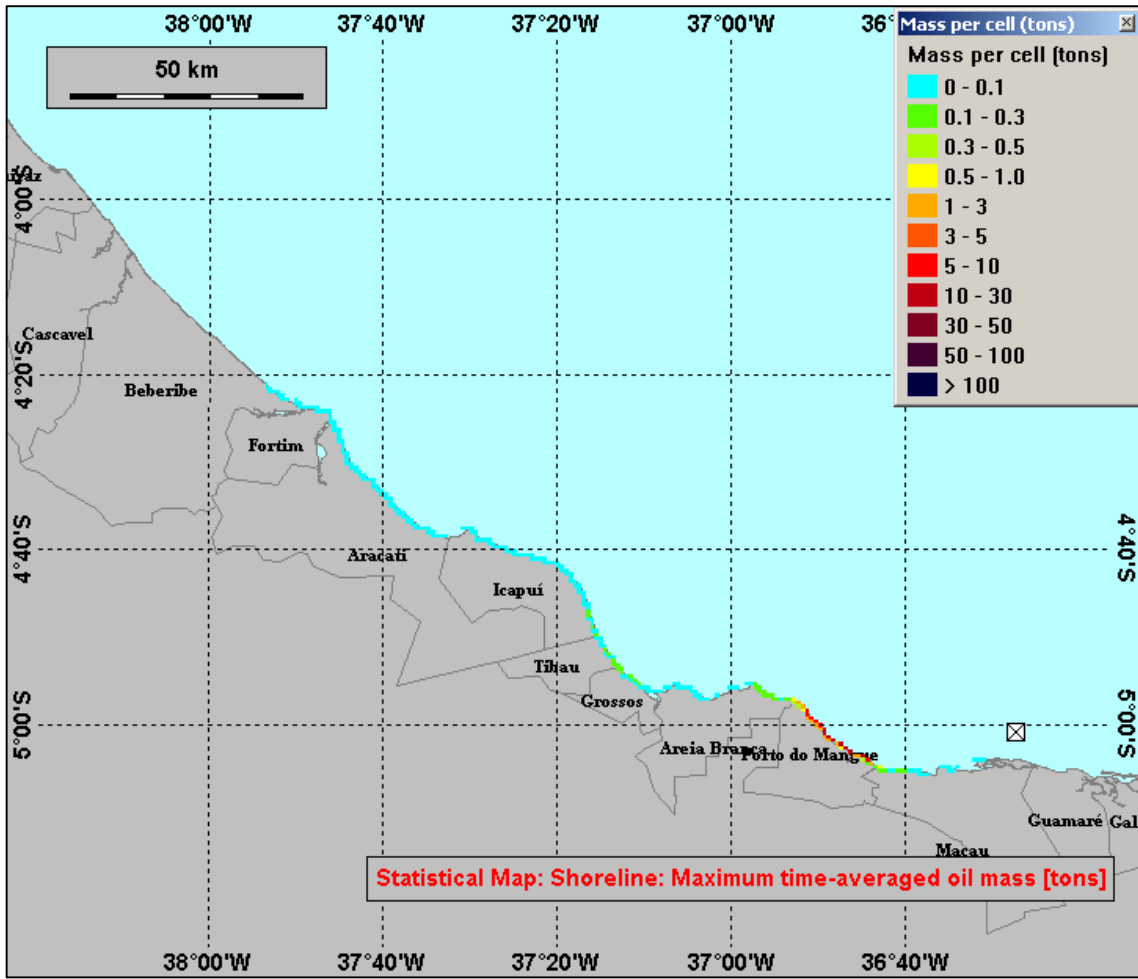
**Figura 39:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 12 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 60 horas).



**Figura 40:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 13 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 30 dias).

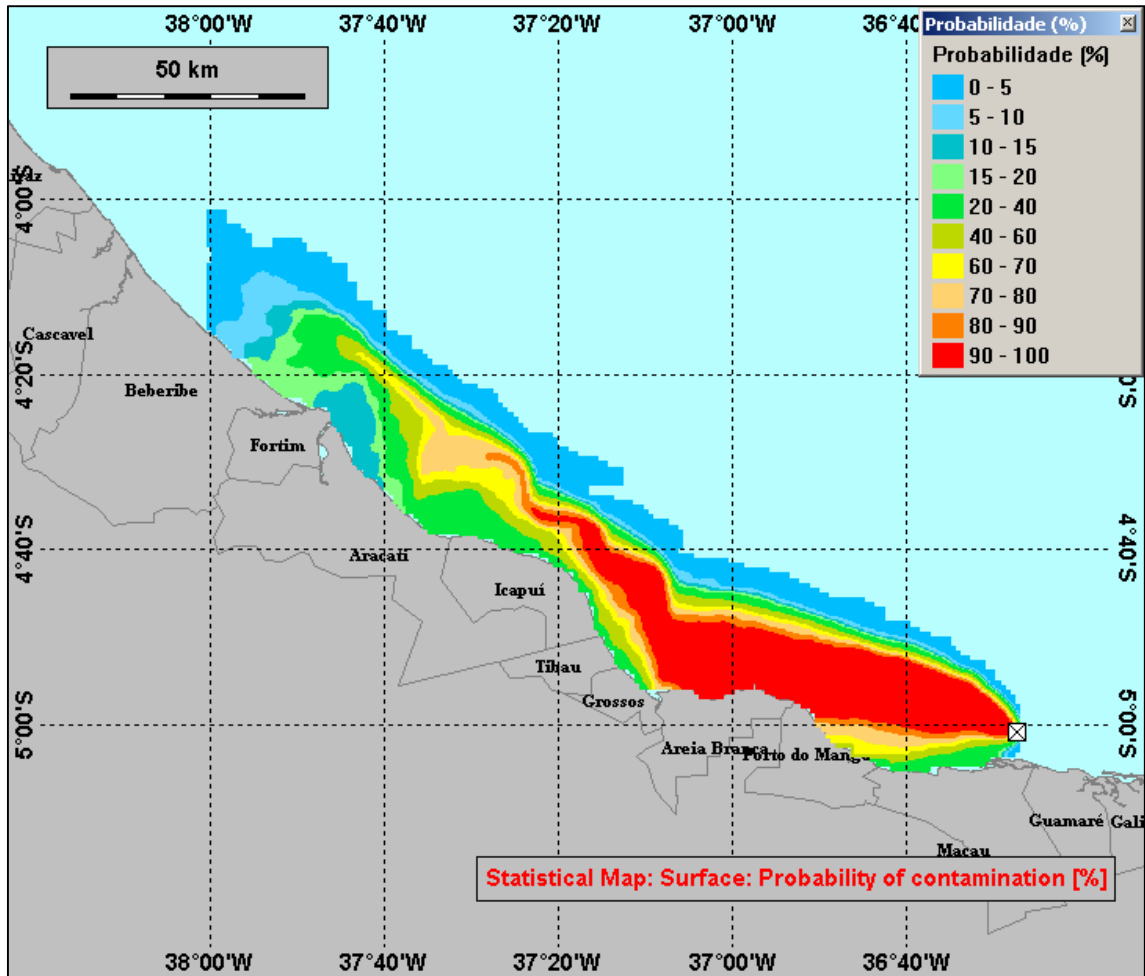


**Figura 41:** Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 13 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 30 dias).



**Figura 42:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 13 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, verão, 30 dias).





**Figura 43:** Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 14 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 30 dias).

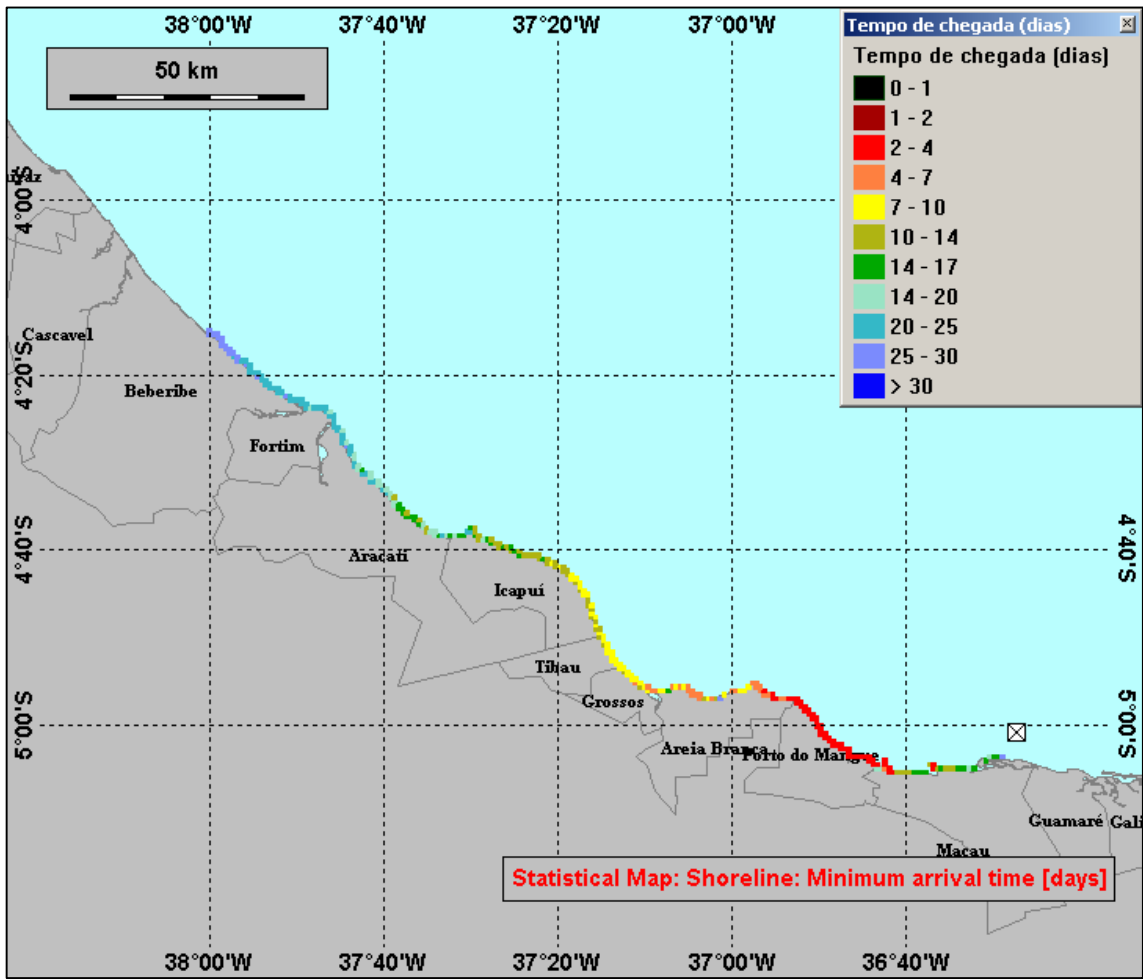
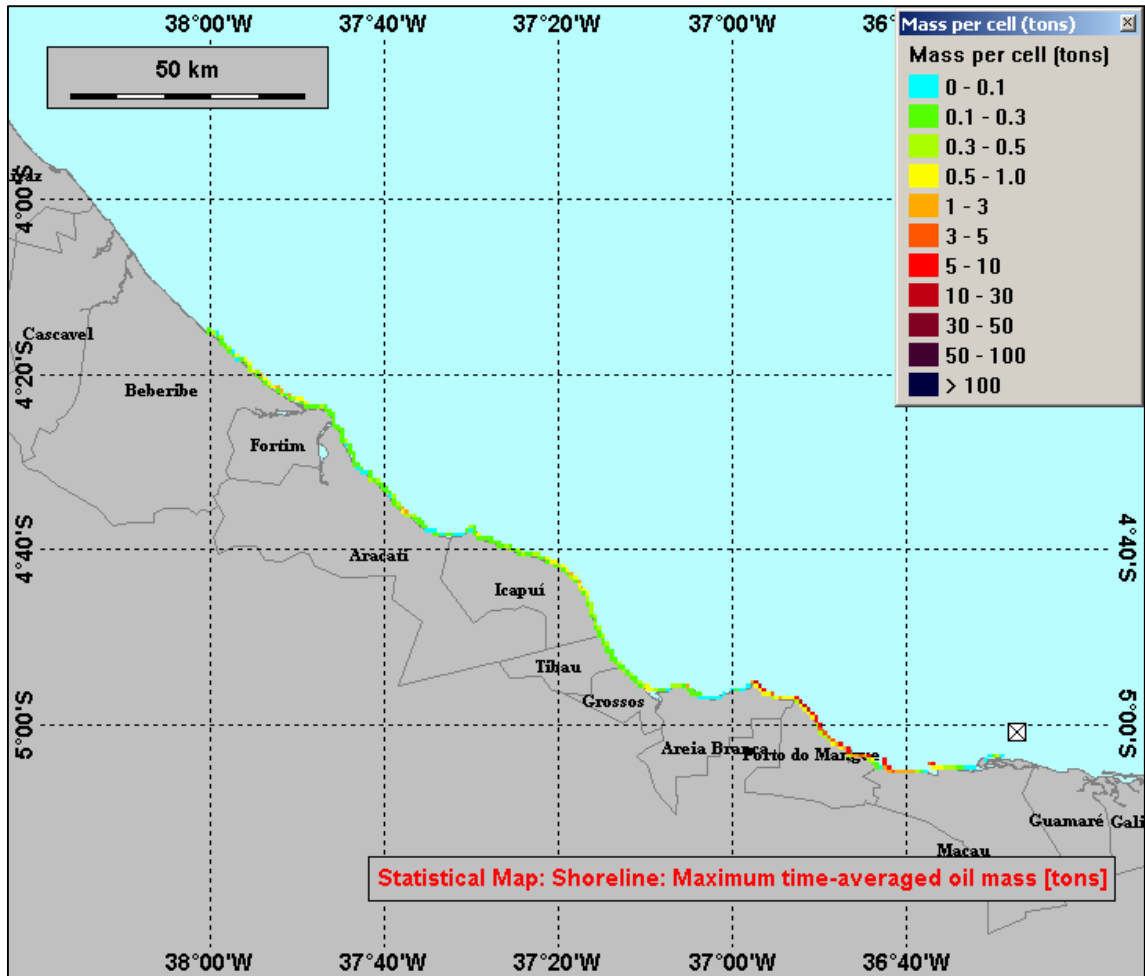


Figura 44: Tempo de chegada do óleo na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 14 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 30 dias).



**Figura 45:** Massa de óleo por célula na costa para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 14 (vazamento contínuo de 0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, 30 dias).

## C.2) Simulações Determinísticas de Cenários Críticos

Foram classificados como cenários determinísticos críticos 4 diferentes cenários, compreendidos nas seguintes classes: vazamento instantâneo/verão; instantâneo/inverno; contínuo/verão; e contínuo/inverno. Para estes cenários foram realizadas simulações determinísticas considerando-se, para cada cenário, as seqüências temporais das forçantes, condições hidrodinâmicas e vento, que resultaram no menor tempo de toque do óleo na costa.

Sendo assim, foram escolhidos para simulação determinística os cenários de verão e inverno com um vazamento instantâneo de 8 m<sup>3</sup> e tempo de parada de 20 mg/l (cenários 1 e 2), assim como os cenários de verão com um vazamento contínuo (0,83 m<sup>3</sup>/h) durante 30 dias (cenário 13) e de inverno com um vazamento contínuo durante 60 horas (cenário 12).

A Tabela 7 apresenta os resultados das simulações determinísticas até o instante no qual ocorre o primeiro toque na costa. Os resultados do instante final da simulação, como a extensão aproximada de costa atingida pelo óleo, o volume total de óleo na costa e o balanço de massa do mesmo são apresentados na Tabela 8.

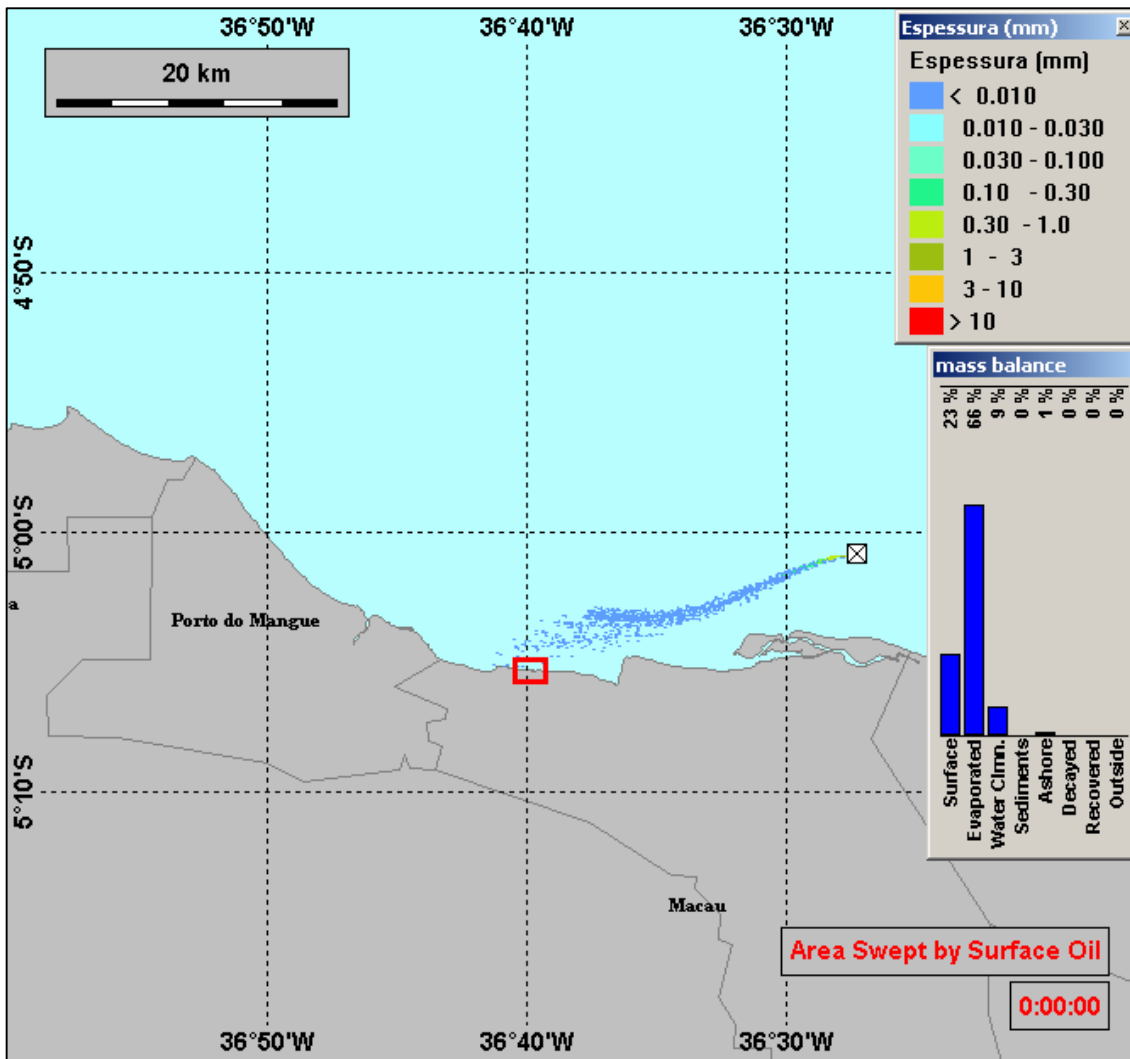
**Tabela 7:** Resultados dos cenários determinísticos críticos para o instante de primeiro toque na costa.

| CLASSE              | CENÁRIO | PONTO DE TOQUE NA COSTA | TEMPO DE TOQUE NA COSTA (h) |
|---------------------|---------|-------------------------|-----------------------------|
| Verão/Instantâneo   | 1       | 5°05'17"S / 36°39'52"W  | 20,4                        |
| Inverno/Instantâneo | 2       | 5°04'09"S / 36°30'36"W  | 18                          |
| Verão/Contínuo      | 13      | 5°05'21"S / 36°39'26"W  | 17,8                        |
| Inverno/Contínuo    | 12      | 5°03'56"S / 36°30'08"W  | 16,1                        |

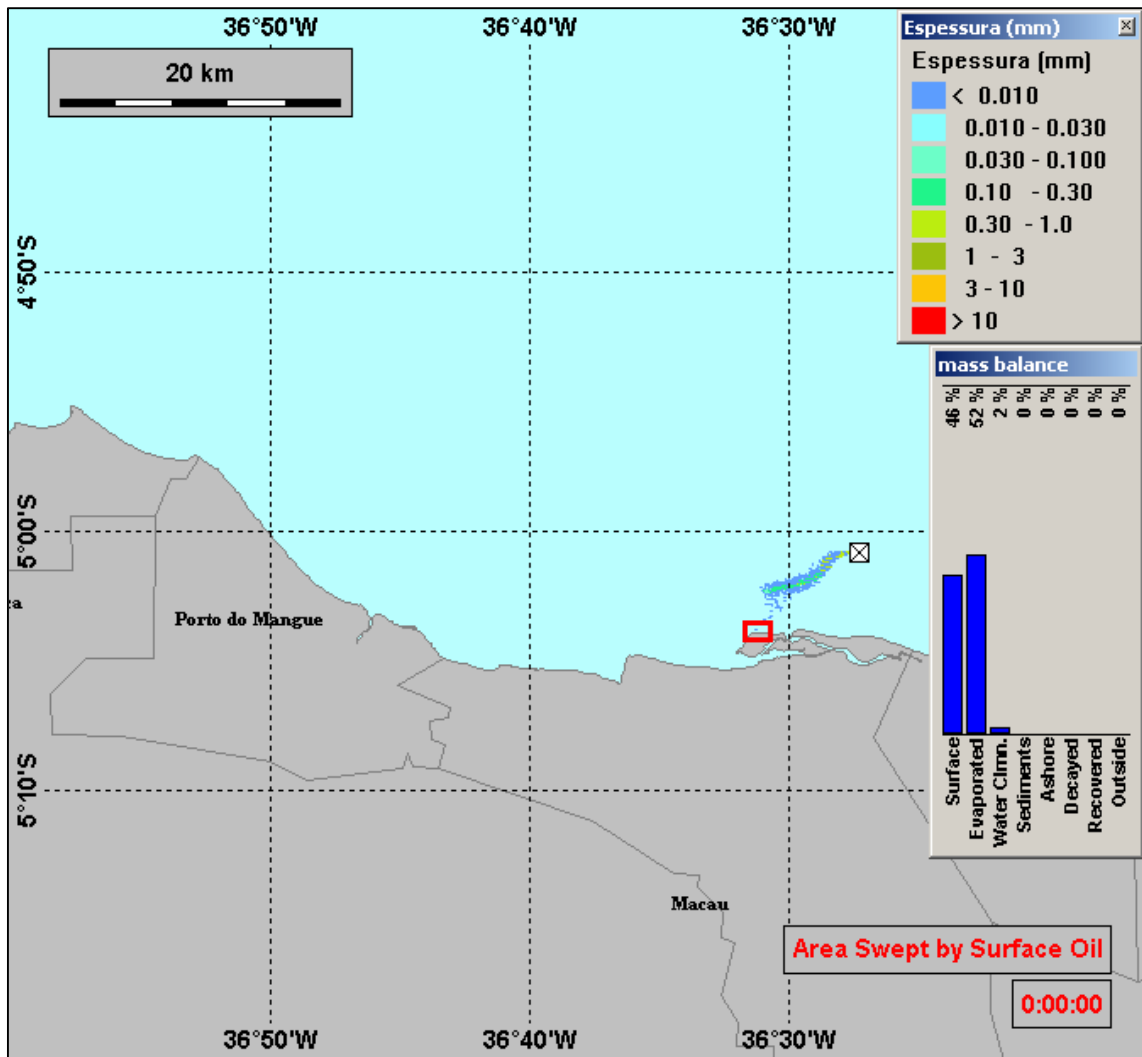
**Tabela 8:** Resultados cenários determinísticos críticos para o instante final.

| CENÁRIO | EXTENSÃO DE ÓLEO NA COSTA (km) | VOLUME TOTAL NA COSTA (m <sup>3</sup> ) | BALANÇO DE MASSA (%) - PRINCIPAIS PROCESSOS |            |               |             |       |            |
|---------|--------------------------------|---|---|------------|---------------|-------------|-------|------------|
|         |                                |   | SUPER-FÍCIE                                 | EVAPO-RADO | COLUNA D'ÁGUA | SEDI-MENTOS | COSTA | DEGRA-DADO |
| 1       | 29                             | 0,32                                    | 21  | 68         | 8             | 0           | 4     | 1          |
| 2       | 11                             | 0,03                                    | 37  | 58         | 4             | 0           | 0     | 0          |
| 13      | 190                            | 132                                     | 3   | 67         | 1             | 4           | 22    | 3          |
| 12      | 17                             | <1% do volume total                     | 34  | 60         | 5             | 0           | 0     | 0          |

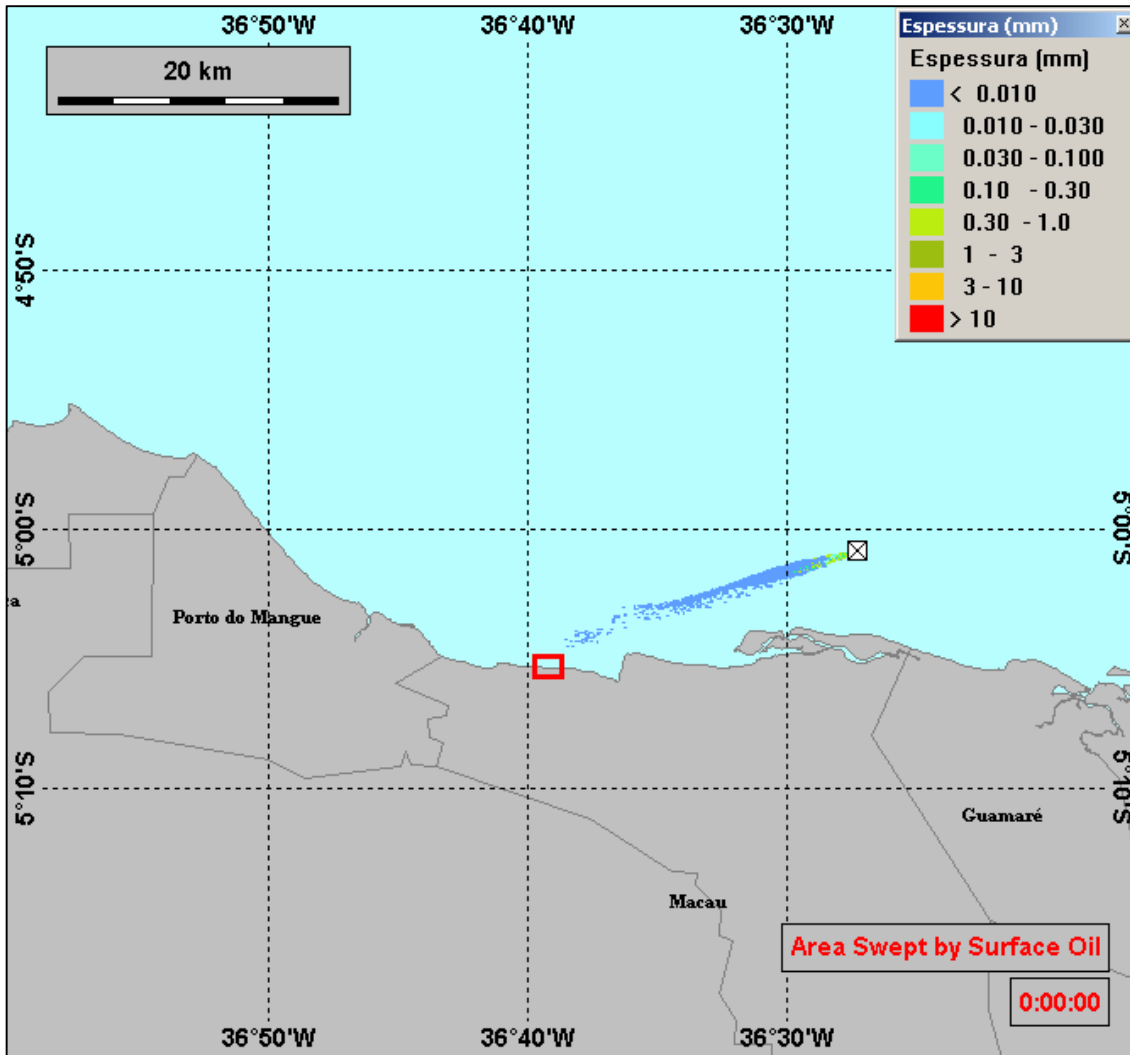
As Figuras 46 a 49 apresentam a área varrida para cada um destes cenários. Nestas figuras, as legendas indicam a espessura de óleo e o balanço de massa do óleo no momento final da simulação.



**Figura 46:** Cenário determinístico crítico em período de verão para um vazamento instantâneo. Área varrida pelo óleo para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 1 (8 m<sup>3</sup>, verão, critério de parada - 20 mg/l). As legendas apresentam a espessura do óleo e o balanço de massa do óleo até o momento do toque. A área onde ocorre o primeiro toque está indicada pelo retângulo em vermelho.

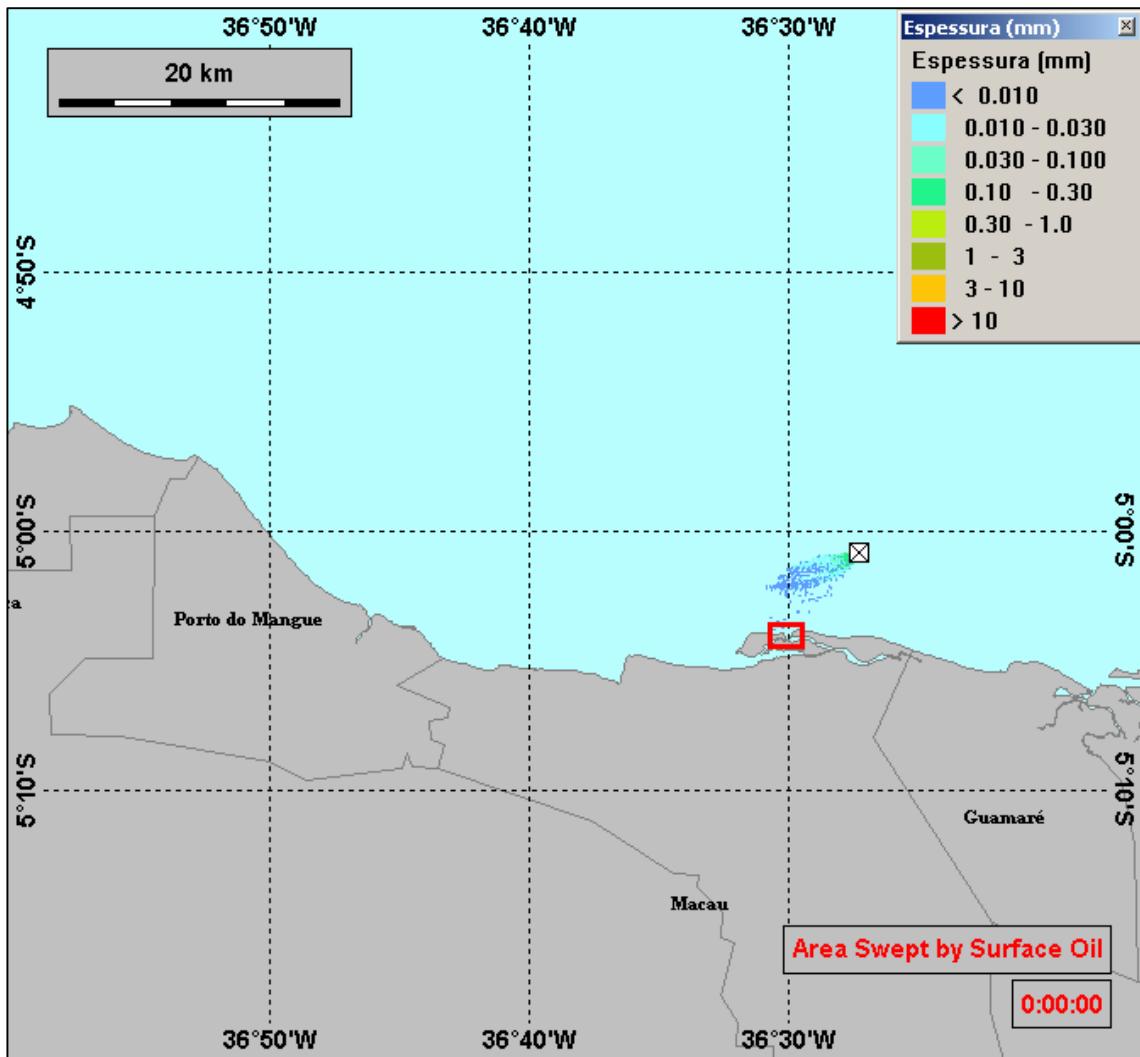


**Figura 7:** Cenário determinístico crítico em período de inverno para um vazamento instantâneo. Área varrida pelo óleo para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 2 (8 m<sup>3</sup>, inverno, critério de parada - 20 mg/l). As legendas apresentam a espessura do óleo e o balanço de massa do óleo até o momento do toque. A área onde ocorre o primeiro toque está indicada pelo retângulo em vermelho.



**Figura 48:** Cenário determinístico crítico em período de verão para um vazamento contínuo. Área varrida pelo óleo para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 13 ( $0,83 \text{ m}^3/\text{h}$ , verão, critério de parada – 30 dias). As legendas apresentam a espessura do óleo e o balanço de massa do óleo até o momento do toque. A área onde ocorre o primeiro toque está indicada pelo retângulo em vermelho.





**Figura 49:** Cenário determinístico crítico em período de inverno para um vazamento contínuo. Área varrida pelo óleo para o poço 1-RNS-140 do Campo de Siri: CENÁRIO 12 (0,83 m<sup>3</sup>/h, inverno, critério de parada - 60 horas). As legendas apresentam a espessura do óleo e o balanço de massa do óleo até o momento do toque. A área onde ocorre o primeiro toque está indicada pelo retângulo em vermelho.

## D) Conclusões

O modelo hidrodinâmico POM, alimentado por dados *in situ* (vento) e por outros modelos computacionais (OCCAM – temperatura e salinidade; FES95.2 – maré), e o modelo de dispersão de óleo OSCAR foram a base metodológica para as simulações probabilísticas e determinísticas de transporte de óleo no mar, referentes ao poço 1-RNS-140 do Campo de Siri, Bacia Potiguar, tendo fornecido resultados capazes de representar bem as condições meteo-oceanográficas da região.

Quanto às simulações onde houve toque na costa, ficou evidenciado que o cenário mais crítico, onde a mancha de óleo chega à costa em menor tempo, no caso 16,1 horas, foi o cenário 12 que representa um vazamento de 0,83m<sup>3</sup>/h em período de inverno com critério de parada de 60 horas. Para o período de verão, o cenário 13 (0,83m<sup>3</sup>/h com critério de parada de 30 dias) foi o mais crítico, com primeiro toque na costa em 17,8 horas.

As simulações probabilísticas mostram que os vazamentos no poço 1-RNS-140 seguem predominantemente o sentido E-W no verão e E-W a ESE-WNW no inverno.