



Av. Almirante Barroso, 63 – sala 1503/1504
Rio de Janeiro, RJ 20036-900
Fone/Fax: (21) 2532-4626
www.appsci.com.br



Applied Science Associates, Inc.
70 Dean Knauss Drive Narragansett,
Rhode Island - 0282-1143 USA
www.appsci.com

RELATÓRIO TÉCNICO

TÍTULO

Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar Bacia de Campos - P-53

AUTORES

ASA SOUTH AMERICA

CLIENTE:

HABTEC

DATA:

Junho, 2004





Applied Science Associates

*Av. Almirante Barroso, nº 63 – salas
1503/1504 – Centro – Rio de Janeiro – RJ
CEP: 20036-900*



Habtec Engenharia Ambiental

*Av. Treze de Maio, nº 13/15º andar - Centro
Rio de Janeiro - RJ CEP: 20003-900*

MODELAGEM DO TRANSPORTE E DISPERSÃO DE ÓLEO NO MAR

P-53 - BACIA DE CAMPOS

Responsáveis técnicos:

| | |
|-----------------------|---------------------|
| EDUARDO YASSUDA | (Nº IBAMA : 94066) |
| JOSÉ EDSON PEREIRA | (Nº IBAMA : 326336) |
| ANDREA GALLO XAVIER | (Nº IBAMA : 58617) |
| CAROLINE IZABEL FISCH | (Nº IBAMA : 196038) |

Equipe **ASA SOUTH AMERICA:**

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| ÁGATA ROMERO | (Nº IBAMA : 434252) |
| ANA CAROLINA DA ROCHA | (Nº IBAMA : 325047) |
| ANDRÉ LANFER MARQUEZ | (Nº IBAMA : 434248) |
| CARLOS EDUARDO SIMÃO | (Nº IBAMA : 434226) |
| JOÃO MARCOS AZEVEDO | (Nº IBAMA : 271262) |
| MARCO ANTONIO CORRÊA | (Nº IBAMA : 434236) |
| MARIA REGINA FONSECA GUIMARÃES | (Nº IBAMA : 434231) |
| MAURÍCIO PERSON LAMMARDI | (Nº IBAMA : 272165) |
| RAFAEL BONANATA DA ROCHA | (Nº IBAMA : 434253) |
| RODERICK MOREIRA GAMA | (Nº IBAMA : 300885) |
| RONALDO MAIA DE JESUS PALMEIRA | (Nº IBAMA : 434269) |

Consultor Técnico:

| | |
|-------------|------------|
| EDMO CAMPOS | (IO - USP) |
|-------------|------------|

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| RESUMO | 1 |
| 1 INTRODUÇÃO | 3 |
| 2 FORMULAÇÃO DO MODELO E DADOS DE ENTRADA | 5 |
| 2.1 ÁREA DE ESTUDO | 6 |
| 2.2 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO NA REGIÃO | 8 |
| 2.3 DADOS DE VENTO | 12 |
| 3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS DE DERRAME DE ÓLEO | 15 |
| 3.1 PONTOS DE RISCO E VOLUMES | 15 |
| 3.2 CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO | 16 |
| 3.3 CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES | 16 |
| 4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NA REGIÃO EM ESTUDO | 19 |
| 4.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS | 19 |
| 4.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS | 41 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |

RESUMO

O sistema de modelos **OILMAP** da **Applied Science Associates (ASA)** foi utilizado para estudar a trajetória e transformações biogeoquímicas de um potencial acidente com petróleo na Bacia de Campos.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida a partir de resultados de um modelo baseado no *Princeton Ocean Model* (POM) para simular as condições na plataforma continental e a partir de resultados baseados no *Parallel Ocean Climate Model* (POCM) para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

Para a aplicação deste sistema de modelos, uma posição geográfica deve ser definida como a fonte do derrame. A modelagem do transporte e dispersão de óleo apresentada neste estudo foi realizada a partir de dois pontos geográficos correspondentes a: (1) localização da Plataforma P-53, e (2) localização do Poço P3H na área de exploração da Plataforma P-53, na Bacia de Campos.

Foram conduzidas simulações probabilísticas para determinar contornos de probabilidade da mancha atingir a área de estudo a partir de 3 (três) classes de derrame, como definido na Resolução CONAMA nº 293/01: pequeno, com 8 m³; médio, com 200 m³, simulados a partir da Plataforma P-53; e pior caso, com 78.915 m³ derramados ao longo de 30 dias (109,6 m³/h), correspondente à perda de controle do poço P3H (*blowout* por 30 dias). A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram selecionados os cenários determinísticos de “pior caso” para condições de verão e inverno, utilizando como critérios o maior volume de óleo na linha de costa e o menor tempo de chegada do óleo na costa,

para o caso de toque de óleo na costa, e a menor distância da costa, no caso do óleo não atingir a costa.

Os resultados mostraram que, para uma condição catastrófica de derrame (volume de pior caso simulado por 30 dias), a probabilidade de a mancha chegar à costa é de 78,3% em condições de inverno e matematicamente inexistente em condições de verão. Os resultados da modelagem revelaram uma forte correlação entre a trajetória e o destino da mancha simulada e o padrão de circulação na região. As condições meteorológicas e oceanográficas da região onde se localiza a Plataforma P-53 são caracterizadas pela dinâmica associada à Corrente do Brasil e ao padrão barotrópico associado às oscilações de maré nesta área da plataforma continental.

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte a HABTEC no desenvolvimento de Estudos Ambientais na Bacia de Campos, apresentamos este trabalho de modelagem computacional sobre a dispersão de óleo na área de estudo.

O objetivo principal deste trabalho é a modelagem da trajetória e de transformações biogeoquímicas de um potencial derrame de óleo neste local. Esta avaliação foi conduzida através da utilização de um sistema de modelos conhecido como **OILMAP**, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA)** dos EUA. A **ASA** tem mais de 20 anos de experiência com estudos de impacto ambiental causados por acidentes com petróleo.

Para estudos de modelagem, como o realizado neste trabalho, são necessários: (a) um conhecimento detalhado das características geomorfológicas do local (morfologia da linha de costa e fundo oceânico), (b) padrões de circulação local e em larga escala, e (c) séries temporais de vento de longa duração (preferencialmente de bóias *offshore* e/ou estação meteorológica costeira). Para a modelagem de transporte da mancha de óleo foram utilizados dados de vento obtidos da bóia oceanográfica da PETROBRAS localizada no campo de Albacora, nas coordenadas 22°30'S e 40°W. A caracterização dos padrões de circulação na região foi realizada a partir de resultados de um modelo desenvolvido pela equipe da **ASA SOUTH AMERICA**, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), para simular as condições na plataforma continental, e resultados do *Parallel Ocean Climate Model* (POCM) para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

A Seção 1 discute o propósito do estudo e fornece informações sobre a área de estudo. A Seção 2 descreve o modelo hidrodinâmico e a Seção 3 apresenta a calibração do mesmo. A Seção 4 descreve o modelo OILMAP utilizado na modelagem dos cenários acidentais de óleo. A Seção 5 apresenta os cenários simulados, suas características e os dados de entrada. Os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas, com as prováveis trajetórias de um acidente no local de estudo, são apresentados na Seção 6.

2 FORMULAÇÃO DO MODELO E DADOS DE ENTRADA

O sistema OILMAP, representando o estado-da-arte em sistemas de modelos para simulação de derramamento de óleo, foi utilizado neste estudo para previsão da trajetória e transformações biogeoquímicas de potenciais acidentes com petróleo na Bacia de Campos.

Primeiramente foi definida a área de estudo para o ponto de derramamento. Nesta área, foi definido um conjunto de duas grades computacionais, ou malhas, com uma certa quantidade de blocos menores, sobrepostas ao mapa digital da área de estudo. Uma das grades define quais células ou blocos correspondem à área de terra e quais à área de água, com a interface definindo a linha de costa. A linha de costa é representada por uma série de blocos que limita a extensão na qual a mancha de óleo pode se movimentar. A outra grade, compreendendo apenas a região de água, define o campo de circulação.

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são: ponto de derramamento, tipo de óleo, data, horário e duração do derramamento, campo de correntes, arquivo de dados meteorológicos, opções de saída e parâmetros de simulação. Os resultados de cada simulação correspondem, então, a um único cenário, definido pelo arquivo de entrada de dados e parâmetros.

O modelo de trajetória e transformações biogeoquímicas simula o transporte e a degradação do óleo a partir de derramamentos instantâneos ou contínuos. O modelo apresenta os resultados das simulações através da localização da mancha, concentração do óleo de superfície e sub-superfície versus tempo. O sistema também calcula e apresenta graficamente o balanço de massa do óleo derramado,

em termos da porcentagem de óleo na superfície, na coluna d'água, evaporado, na linha de costa e fora da área de estudo.

A simulação é iniciada no momento especificado pelo arquivo de entrada e quando a liberação do óleo começa; o modelo calcula a trajetória da mancha e transformações biogeoquímicas para cada ponto da grade. Estas transformações (por exemplo: evaporação, espalhamento) que o modelo simula, resultam em uma distribuição de massa sobre quanto deste óleo se move para os pontos de grades circundantes, o quanto adentra na coluna d'água e o quanto evapora. O modelo calcula a quantidade de óleo em cada bloco e quais as propriedades resultantes após as moléculas mais leves terem sido evaporadas e as mais pesadas terem adentrado na coluna d'água. Estes cálculos se repetem para todos os pontos da grade, em cada passo de tempo simulado. Os processos biogeoquímicos do óleo que eventualmente entra em contato com a linha de costa são calculados em função de quanto se prende à costa e quanto se ressuspende caso as condições meteorológicas e oceanográficas se alterem.

No modo probabilístico, como utilizado neste trabalho, o modelo pode ser aplicado para determinar as trajetórias mais prováveis para os derramamentos, em bases mensais, sazonais ou anuais. Os resultados deste tipo de simulação incluem mapas mostrando as probabilidades de contato com óleo em cada ponto da grade computacional, na linha de costa e o tempo de deslocamento da mancha.

2.1 ÁREA DE ESTUDO

As simulações para um potencial acidente com petróleo nas proximidades da Plataforma P-53, localizada na Bacia de Campos, foram realizadas a partir de dois

pontos: (1) a Plataforma P-53, e (2) Poço P3H, na área de produção da Plataforma P-53 (Figura 1).

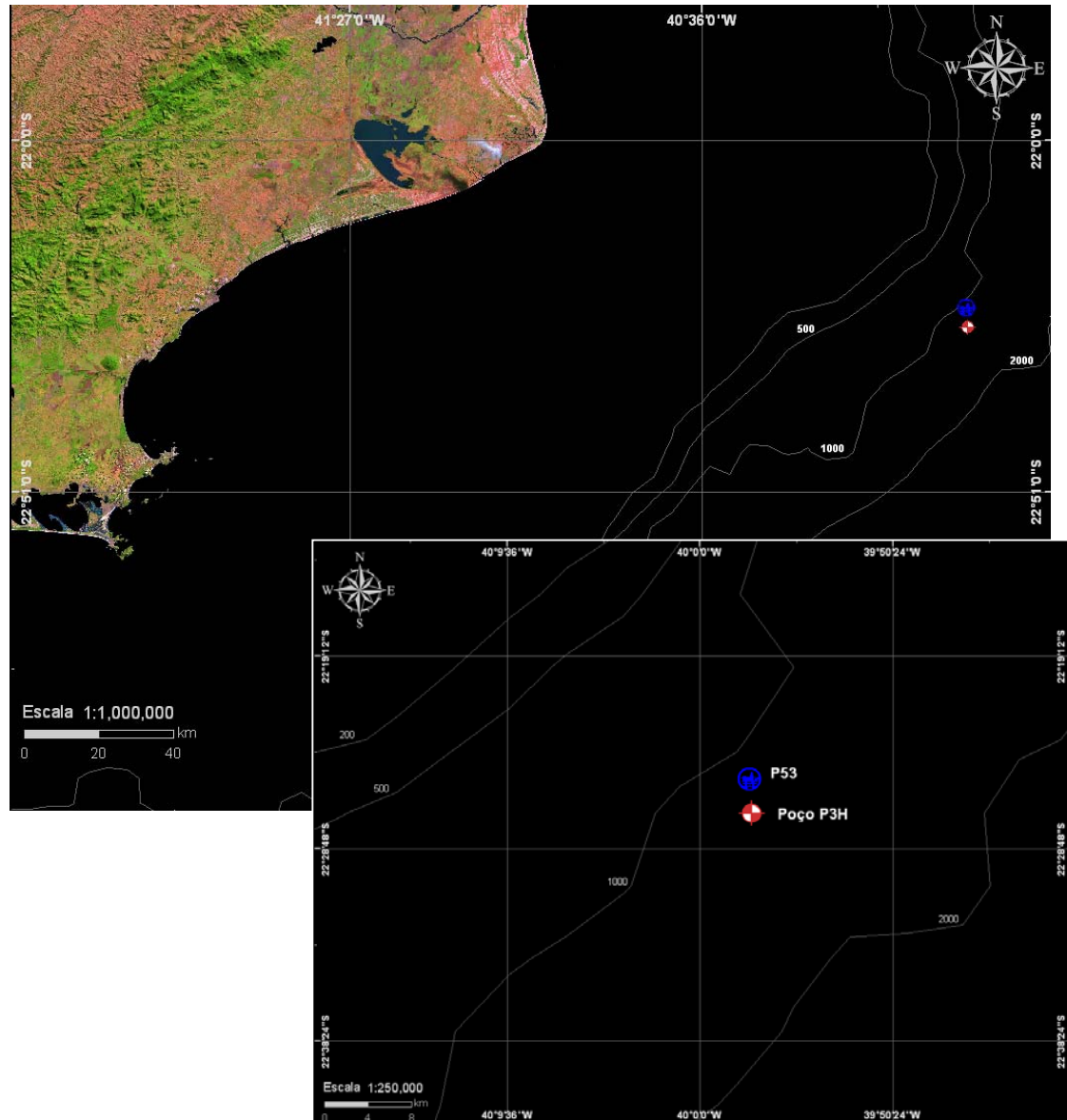


Figura 1. Localização da Plataforma P-53 e do Poço P3H na Bacia de Campos.

2.2 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO NA REGIÃO

Para caracterização dos padrões de circulação foram utilizados campos de velocidades gerados pelo modelo POCM (WOCE Parallel Ocean Climate Model) ajustado para modelar as correntes oceânicas da costa sudeste do Brasil, acoplado a um modelo implementado no mesmo domínio (ASA South America), visando à introdução de respostas da plataforma as forçantes locais. Os campos de velocidade de baixa frequência foram fornecidos pelo Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES) para o ano de 1992 com resultados a cada 3 dias, cobrindo a região oceânica compreendida entre as latitudes 13° e 30°S e as longitudes 30° e 50°W. O campo hidrodinâmico resultante da combinação destes modelos e utilizado como base para o modelo de óleo, apresenta resultados a cada 3 horas para o ano de 1992. Salienta-se que esta implementação encontra-se em contínuo desenvolvimento devido à extensão e complexidade da área.

A circulação oceânica nesta área da plataforma é alvo de um interesse científico particular devido às feições batimétricas. Parte significativa do fluxo da Corrente do Brasil (CB) passa através dos canais dos bancos de Abrolhos e divide-se em dois ramos. Um deles flui afastado da costa, além da isóbata de 3000 m (Stramma et al., 1990 apud Lima, 1997), enquanto o outro flui seguindo a linha da quebra da plataforma, onde se estende até o fundo, com uma significativa parte fluindo sobre a plataforma externa, que algumas vezes localiza-se aquém da isóbata de 100 metros (Signorini, 1978).

A circulação na camada superficial sobre a quebra da plataforma e no talude é caracterizada pelo fluxo da Corrente do Brasil para sul. Esta corrente representa

o limite ocidental do giro subtropical do Atlântico Sul. Poucas medições de correntes foram feitas na CB. As primeiras medições diretas foram feitas por Evans e Signorini em 1985, nas latitudes de 20° 30'S e 23°S, as quais apresentaram um fluxo confinado aos primeiros 400 m de profundidade, com uma contra-corrente no sentido norte abaixo destes 400 m iniciais. Na parte norte da área, acima do Cabo de São Tomé, a direção da corrente é para 180°, variando para 220° na região de Cabo Frio. Isto está altamente coerente com a variação da linha de costa (e das isóbatas). Esta mudança afeta significativamente a Corrente do Brasil, induzindo a formação de vórtices e meandros.

A componente que se desloca para sul cobre os primeiros 400 metros da coluna d'água, englobando a Água Tropical e grande parte da Água Central do Atlântico Sul (ACAS). O volume estimado transportado pela Corrente do Brasil na região da quebra da plataforma e do talude na latitude de 22° S é de $5,5 \pm 2,6$ Sv (Lima, 1997).

Imagens AVHRR, usadas por Garfield (1990), parecem indicar um padrão de meandramento regular entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio, com a separação ocasional de vórtices ciclônicos (Lima, 1997).

Próximo ao Cabo de São Tomé (22°S), a CB parece ocupar a maior parte da plataforma durante o verão. Medidas diretas de corrente feitas por Harari et al., em 1993, mostram que a circulação sobre a plataforma interna próxima ao Cabo de São Tomé se dá predominantemente em direção ao sul no verão, alternando entre sudoeste e nordeste durante o inverno, com a magnitude média de 30 a 50 cm/s. Nos primeiros 100 metros da coluna d'água, a velocidade da corrente pode chegar a 1 m/s (Castro e Miranda, 1998).

A água que flui para sudoeste durante o verão é reforçada pelos ventos predominantes, que sopram principalmente de nordeste nesta estação, devido à influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul. No inverno, entretanto, a alta incidência de sistemas frontais induz a ocorrência de correntes com direção nordeste nas porções interna e média da plataforma (Castro e Miranda, 1998).

Outra consequência do predomínio dos ventos de NE é a ressurgência, fenômeno no qual a ACAS penetra sobre a plataforma, levando águas frias em direção à costa. Estes eventos são muito comuns na região de Cabo Frio. Ventos fortes de sudoeste podem impedir a ocorrência do fenômeno nesta área, deslocando a massa fria ressurgida para as proximidades do Cabo de São Tomé, mais ao norte.

A velocidade da corrente relativa à contribuição da maré é baixa, de cerca de 5 cm/s e, quase em sua totalidade, no eixo perpendicular à plataforma.

A ação forçante residual de ondas aprisionadas na costa, com sentido de propagação norte (para o Equador) é um possível mecanismo para explicar algumas anomalias no campo de correntes. Maiores estudos para esclarecimento deste fator ainda estão sendo desenvolvidos (Lima, 1997).

Na Figura 2 são apresentados campos de velocidades típicos observados nos resultados do modelo para verão e inverno, respectivamente, onde se destaca a definição da Corrente do Brasil. Na Figura 3 é apresentada a grade utilizada na modelagem hidrodinâmica.

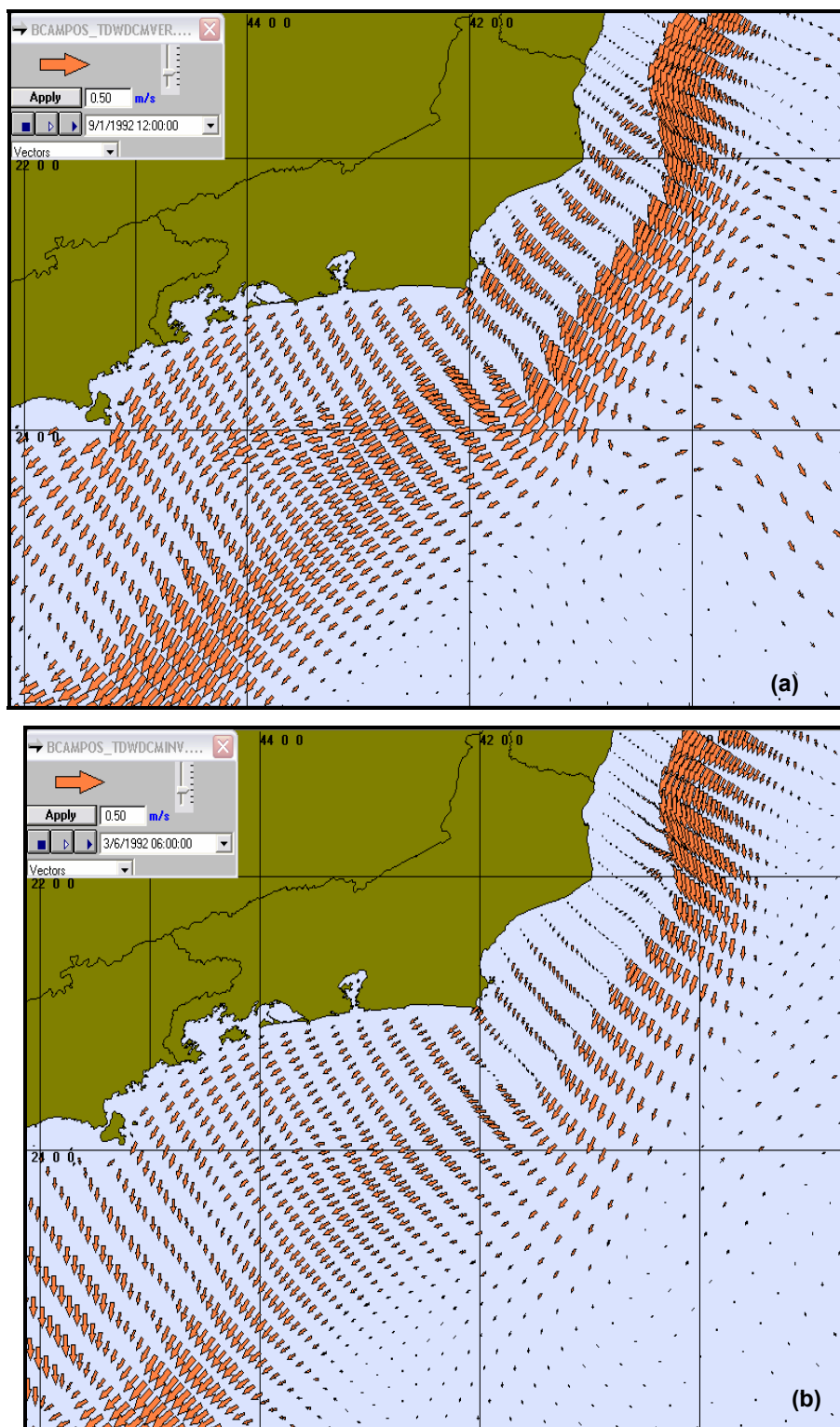


Figura 2. Exemplos ilustrativos de campos de velocidades obtidos com os modelos hidrodinâmicos para verão (a) e inverno (b) no ano de 1992.

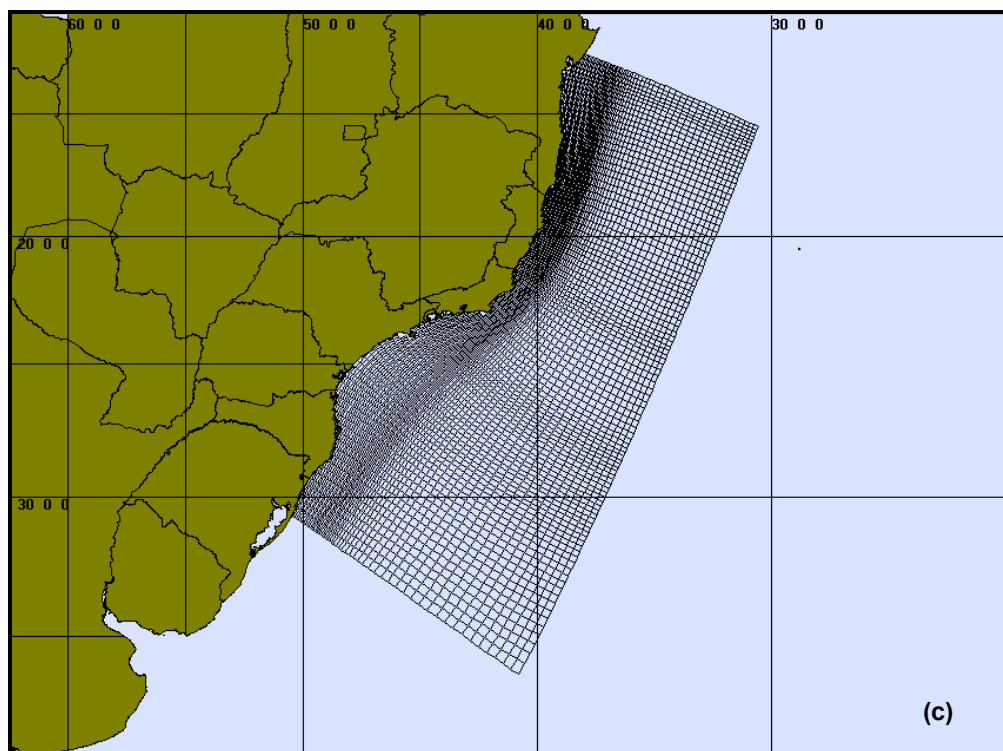


Figura 3. Grade numérica utilizada na modelagem.

2.3 DADOS DE VENTO

Para este estudo, foram utilizados dados de vento medidos em uma bóia oceanográfica localizada no campo de Albacora (Bacia de Campos). Estes dados foram fornecidos pelo Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES), para o ano de 1992, com intervalo de amostragem de 3 horas. A Figura 4 apresenta o diagrama de dispersão para a série temporal fornecida, onde foi adotada a convenção meteorológica, isto é, a direção do vento corresponde à direção de onde este sopra.

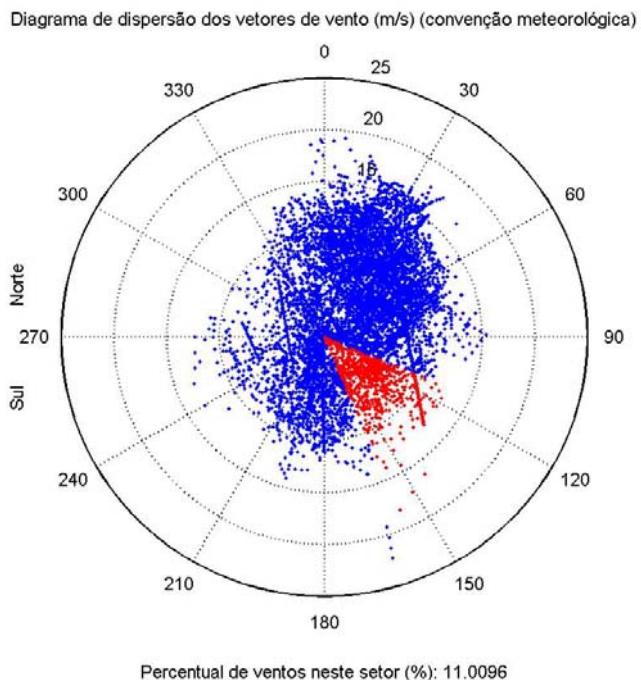


Figura 4. Diagrama de dispersão do vento para o ano de 1992, na Bacia de Campos.

A Tabela 1 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento obtida para os dados fornecidos. Observa-se que os ventos mais freqüentes são de NE (17,4%) e NNE (16,9%). Os ventos com velocidades médias máximas (9,8 m/s) vieram de NNE; e os ventos mais fortes registrados foram provenientes de SSE (22,3 m/s) e N (19,3 m/s). Do total de registros dos ventos, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 14,0 m/s, como indica a soma das porcentagens de ocorrência por faixa de intensidade apresentadas na tabela.

Tabela 1. Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o ano de 1992, na Bacia de Campos.

| Ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do Vento. | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-------|
| Obs.: a direção é medida em graus e para o sentido utiliza-se a convenção meteorológica que é de onde o vento vem . | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSO | SO | OSO | O | ONO | NO | NNO | Total |
| 0.0- 1.0 | 9 | 13 | 7 | 9 | 11 | 15 | 21 | 13 | 14 | 17 | 10 | 8 | 8 | 10 | 9 | 3 | 177 |
| 1.0- 2.0 | 10 | 24 | 15 | 18 | 20 | 25 | 8 | 7 | 20 | 29 | 17 | 19 | 15 | 13 | 10 | 12 | 262 |
| 2.0- 3.0 | 18 | 17 | 15 | 24 | 28 | 39 | 24 | 18 | 28 | 45 | 26 | 15 | 16 | 11 | 17 | 27 | 368 |
| 3.0- 4.0 | 24 | 27 | 39 | 55 | 66 | 36 | 43 | 90 | 73 | 42 | 16 | 18 | 10 | 12 | 20 | 28 | 599 |
| 4.0- 5.0 | 27 | 49 | 113 | 91 | 46 | 53 | 78 | 65 | 47 | 49 | 19 | 25 | 9 | 12 | 19 | 30 | 732 |
| 5.0- 6.0 | 30 | 45 | 105 | 129 | 49 | 107 | 108 | 53 | 64 | 40 | 24 | 13 | 6 | 4 | 26 | 20 | 823 |
| 6.0- 7.0 | 75 | 113 | 102 | 154 | 87 | 76 | 54 | 61 | 48 | 43 | 22 | 17 | 10 | 2 | 14 | 28 | 906 |
| 7.0- 8.0 | 61 | 124 | 123 | 154 | 104 | 28 | 43 | 44 | 51 | 32 | 27 | 12 | 15 | 6 | 10 | 24 | 858 |
| 8.0- 9.0 | 93 | 210 | 382 | 225 | 52 | 38 | 38 | 33 | 47 | 59 | 13 | 19 | 6 | 3 | 10 | 36 | 1264 |
| 9.0-10.0 | 105 | 135 | 146 | 142 | 26 | 49 | 19 | 17 | 46 | 17 | 2 | 7 | 11 | 2 | 4 | 28 | 756 |
| 10.0-11.0 | 94 | 150 | 167 | 90 | 17 | 25 | 11 | 5 | 30 | 14 | 0 | 4 | 6 | 0 | 0 | 30 | 643 |
| 11.0-12.0 | 85 | 149 | 100 | 66 | 11 | 6 | 17 | 11 | 7 | 6 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 14 | 475 |
| 12.0-13.0 | 57 | 147 | 78 | 26 | 11 | 5 | 12 | 7 | 5 | 3 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 11 | 366 |
| 13.0-14.0 | 26 | 101 | 60 | 15 | 12 | 0 | 0 | 5 | 0 | 4 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 9 | 234 |
| 14.0-15.0 | 14 | 83 | 34 | 2 | 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 141 |
| 15.0-16.0 | 7 | 65 | 21 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 94 |
| 16.0-17.0 | 2 | 17 | 8 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 |
| 17.0-18.0 | 3 | 8 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 |
| 18.0-19.0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| 19.0-20.0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 20.0-21.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 21.0-22.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 22.0-23.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total | 746 | 1477 | 1522 | 1200 | 547 | 502 | 477 | 436 | 480 | 401 | 177 | 161 | 116 | 75 | 139 | 300 | 8756 |
| Porc. | 8.5 | 16.9 | 17.4 | 13.7 | 6.2 | 5.7 | 5.4 | 5.0 | 5.5 | 4.6 | 2.0 | 1.8 | 1.3 | 0.9 | 1.6 | 3.4 | |
| Vel.méd. | 9.0 | 9.8 | 8.6 | 7.5 | 6.4 | 5.9 | 5.9 | 5.9 | 6.0 | 5.6 | 4.8 | 5.2 | 5.3 | 3.6 | 4.6 | 6.9 | |
| Vel.máx. | 19.3 | 18.0 | 17.6 | 14.8 | 15.3 | 12.6 | 16.3 | 22.3 | 13.0 | 14.1 | 11.4 | 13.1 | 12.4 | 9.9 | 9.7 | 13.8 | |
| Percts(0,9) | 12.0 | 14.0 | 12.0 | 10.0 | 10.0 | 9.0 | 9.0 | 9.0 | 9.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 7.0 | 7.6 | 11.0 | | |

3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS DE DERRAME DE ÓLEO

Os cenários simulados foram definidos junto a HABTEC, de forma a abranger as diferentes condições meteorológicas e oceanográficas locais, bem como as hipóteses acidentais descritas na Resolução CONAMA nº 293/01.

As informações que definem os cenários de óleo simulados são: ponto de risco, volume derramado, características do produto e período de simulação.

3.1 PONTOS DE RISCO E VOLUMES

As coordenadas da Plataforma P-53 e do Poço P3H, especificadas pela PETROBRAS, respectivamente, como 22°25'21"S e 39°57'32"W e 22°27'1"S e 39°57'24"W (SAD 69), foram adotadas como pontos de risco.

Os volumes utilizados nas simulações foram definidos segundo a Resolução CONAMA nº 293/01:

- a. Pequeno: 8 m³
- b. Médio: 200 m³
- c. Pior caso: 78.915 m³

O volume de “pior caso” foi definido como o volume resultante da perda de controle do poço por 30 dias. Assim, nas simulações de “pior caso”, o derrame de todo o volume é considerado contínuo ao longo de 30 dias e tem como origem o poço P3H. Nas simulações realizadas com os volumes pequeno (8 m³) e médio (200 m³), considerou-se o vazamento de todo o volume de óleo instantaneamente, ou seja, no instante inicial da simulação, a partir da Plataforma P-53.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO

Com base nas informações fornecidas pela PETROBRAS, o óleo tipo Marlim Leste foi utilizado em todas as simulações. As características definidas para o óleo cru são apresentadas na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2. Características do óleo Marlim Leste.

| PARÂMETRO | VALOR |
|----------------------------------|-------------------------|
| Nome do óleo | MARLIM LESTE |
| Grau API | 17,8 |
| Densidade | 0,944 g/cm ³ |
| Viscosidade dinâmica a 25°C | 866,1872 cP |
| Tensão interfacial | 19,94 din/cm |
| Conteúdo máximo de água | 0,1% |
| Ponto de ebulição inicial | 450 K |
| Gradiente da curva de evaporação | 680 |
| Constante de evaporação A | 8,8 |
| Constante de evaporação B | 12,6 |

3.3 CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES

Para os cenários com derrame de 8 m³ foi adotado como critério de parada das simulações o tempo necessário para que a mancha resultante alcançasse a concentração calculada de 20 mg/L.

Para os cenários com derrame de 200 m³ foram adotados os tempos de 6h e 9h (relativo ao tempo de atendimento), além do tempo necessário para que a

mancha alcance os 20 mg/L. Os cenários onde o critério de concentração é atingido antes do tempo de atendimento, não serão apresentados.

Para o derrame do volume de “pior caso” foram utilizados como critério de parada os tempos de simulação de 6, 9, 12, 36, 60 horas e 30 dias.

Todos os cenários probabilísticos simulados estão resumidos na Tabela 3, onde (a) representa os cenários com derrame de 8 m³, (b) cenários com derrame de 200 m³, e (c) cenários com derrame do volume de “pior caso”.

Para um derrame de 200 m³ foi observado que a mancha atinge a concentração calculada de 20 mg/L em menos de 9h. Nos cenários com derrame de 8 m³, a mancha atinge a concentração calculada de 20 mg/L em aproximadamente 1 hora.

Tabela 3. Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames de óleo.

| CENÁRIO | PRODUTO (PETRÓLEO) | VOLUME (M ³) | ESTAÇÃO | TEMPO |
|-------------------------|--------------------|--------------------------|---------|----------|
| P53_VER_8_20MGL | Marlim Leste | 8 (a) | Verão | 1 hora |
| P53_INV_8_20MGL | Marlim Leste | 8 (a) | Inverno | 1 hora |
| P53_VER_200_6H | Marlim Leste | 200 (b) | Verão | 6 horas |
| P53_INV_200_6H | Marlim Leste | 200 (b) | Inverno | 6 horas |
| P53_VER_200_20MGL | Marlim Leste | 200 (b) | Verão | 7 horas |
| P53_INV_200_20MGL | Marlim Leste | 200 (b) | Inverno | 7 horas |
| P53_VER_PIORCASO_6H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Verão | 6 horas |
| P53_INV_PIORCASO_6H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Inverno | 6 horas |
| P53_VER_PIORCASO_9H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Verão | 9 horas |
| P53_INV_PIORCASO_9H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Inverno | 9 horas |
| P53_VER_PIORCASO_12H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Verão | 12 horas |
| P53_INV_PIORCASO_12H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Inverno | 12 horas |
| P53_VER_PIORCASO_36H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Verão | 36 horas |
| P53_INV_PIORCASO_36H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Inverno | 36 horas |
| P53_VER_PIORCASO_60H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Verão | 60 horas |
| P53_INV_PIORCASO_60H | Marlim Leste | 78.915 (c) | Inverno | 60 horas |
| P53_VER_PIORCASO_30DIAS | Marlim Leste | 78.915 (c) | Verão | 30 dias |
| P53_INV_PIORCASO_30DIAS | Marlim Leste | 78.915 (c) | Inverno | 30 dias |

4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NA REGIÃO EM ESTUDO

4.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

O modelo OILMAP foi utilizado para simular os cenários descritos na seção anterior e produzir as curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da área de estudo. Nestas simulações foram consideradas como forçantes hidrodinâmicas os campos de correntes obtidos através da modelagem (conforme descrito na Seção 2.2), representativos das Correntes do Brasil e das correntes costeiras) e os dados de vento medidos na Bacia de Campos (descritos na Seção 2.3) para o ano de 1992. Cabe ressaltar que todas as simulações realizadas não levam em conta as ações provenientes de Planos de Contingência e Planos de Ações Emergenciais.

Da Figura 5 até a Figura 23 são apresentados os contornos de probabilidade da presença de óleo na água e na costa para os cenários de acidentes na Plataforma P-53 e no poço P3H, ocorrendo durante os meses de verão (janeiro a março) e inverno (junho a agosto).

Em seu modo probabilístico, o sistema OILMAP realiza uma série de simulações determinísticas de modo a reproduzir a variabilidade das forçantes oceanográficas e meteorológicas. As trajetórias individuais são superpostas, de forma a definir a probabilidade da mancha atingir cada ponto da grade de integração do modelo. Os resultados são, então, expressos na forma de curvas de

contornos de probabilidade. Neste estudo foram realizadas 300 simulações determinísticas para a definição dos contornos de probabilidade de cada cenário.

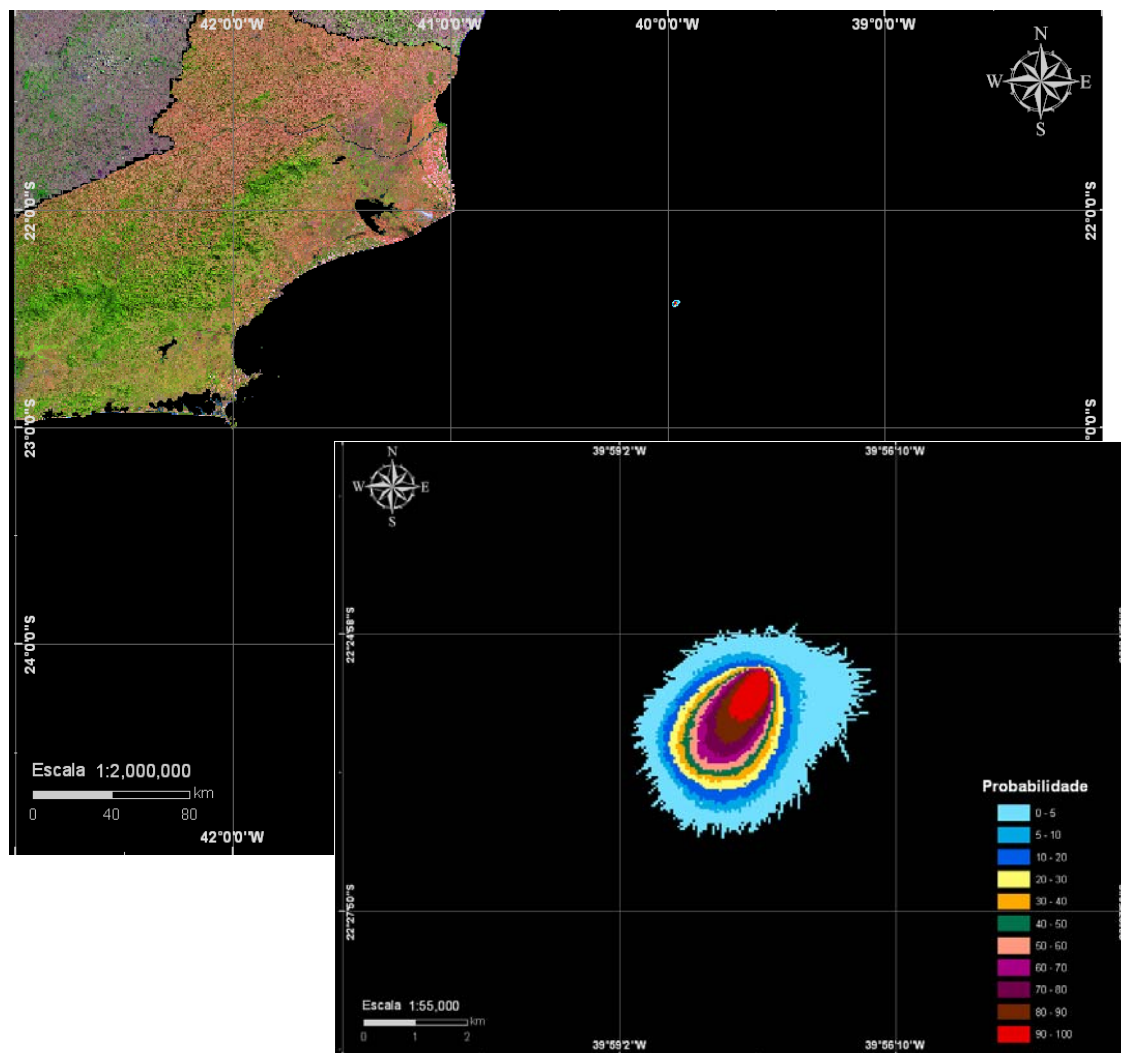


Figura 5. *Cenário P53 VER 8 20MGL. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo na Plataforma P-53 durante os meses de verão (janeiro a março) com derrame de 8 m³ após 1 hora, atingindo 20 mg/L.*

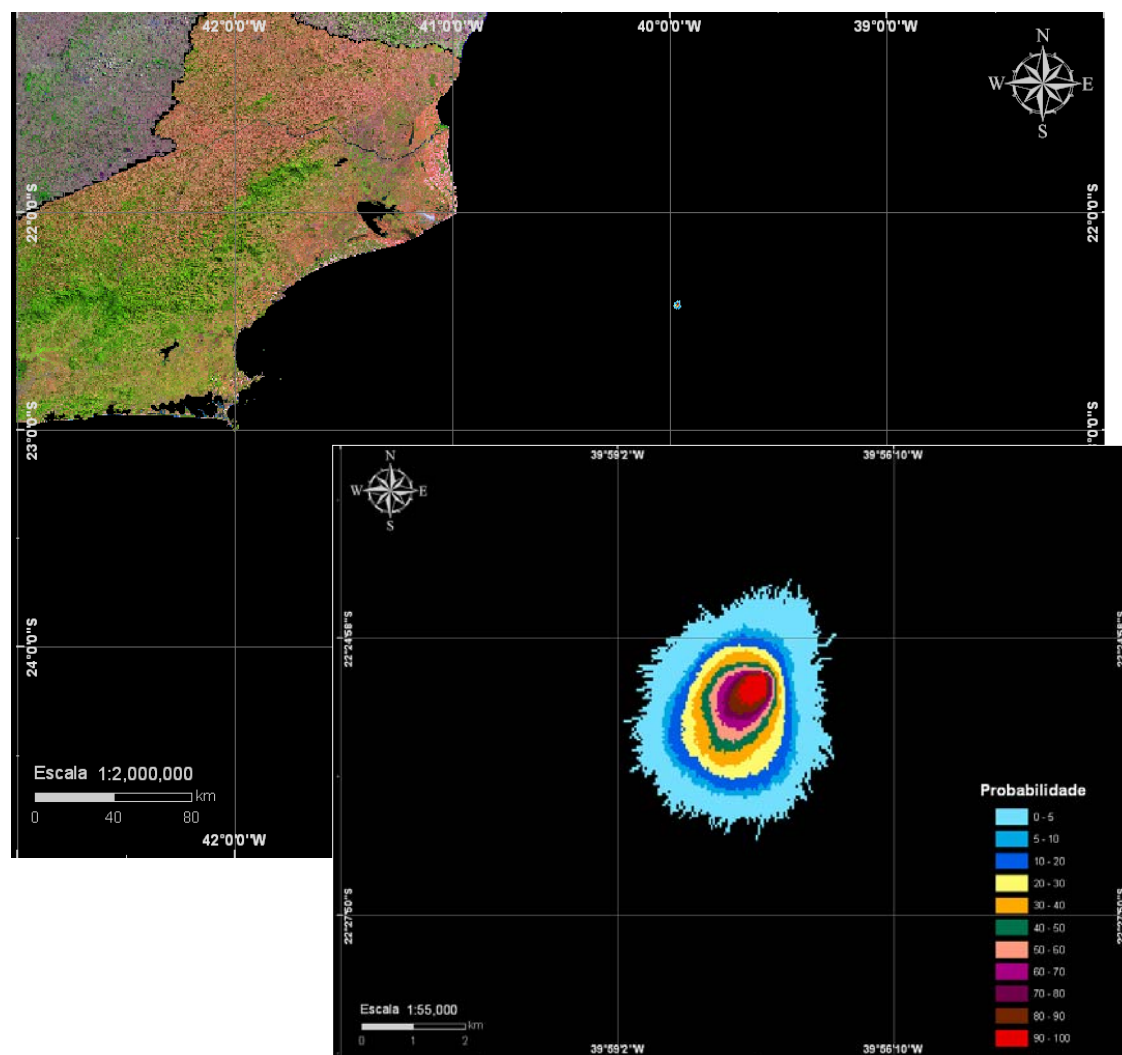


Figura 6. Cenário P53 INV 8 20MGL. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo na Plataforma P-53 durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 8 m³ após 1 hora, atingindo 20 mg/L.

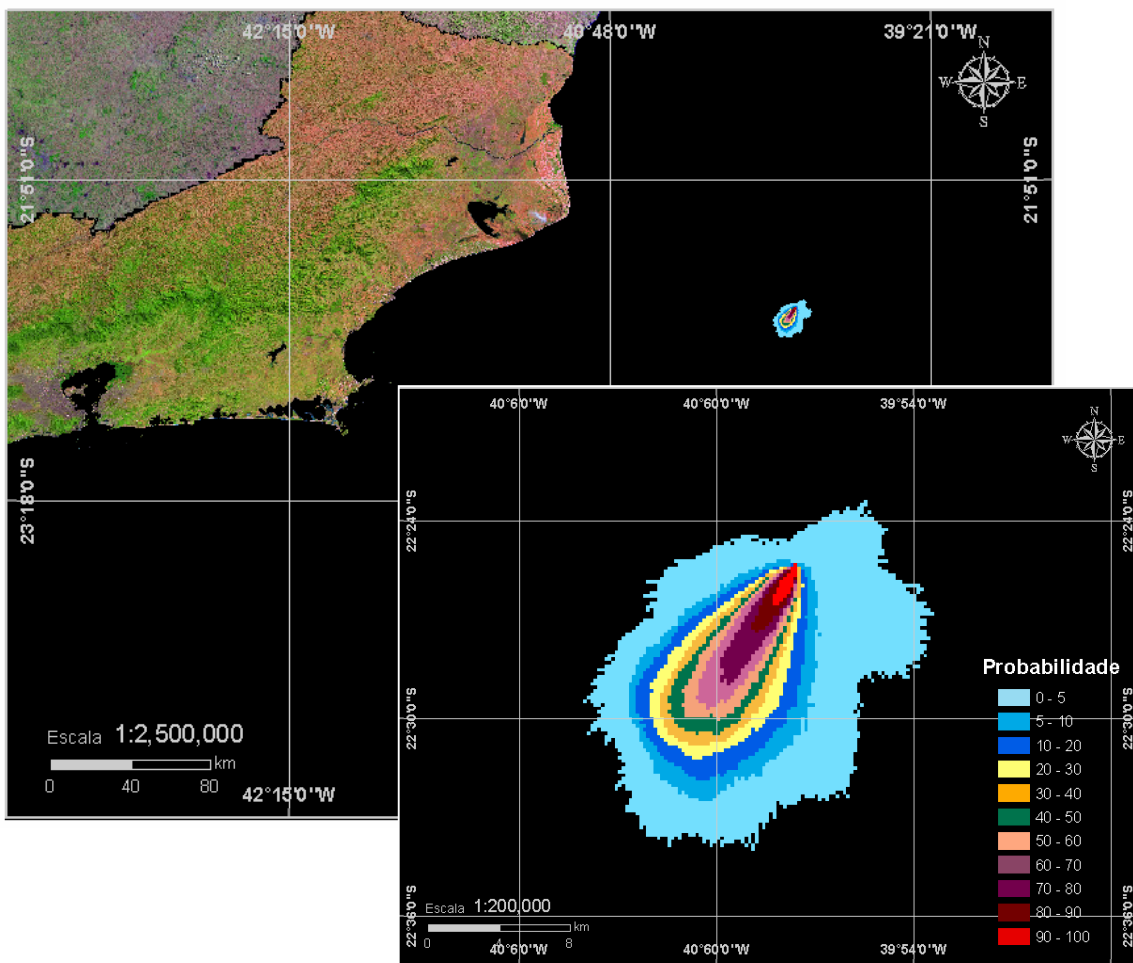


Figura 7. Cenário P53 VER 200 6H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo na Plataforma P-53 durante os meses de verão (janeiro a março) com derrame de 200 m³ após 6 horas.

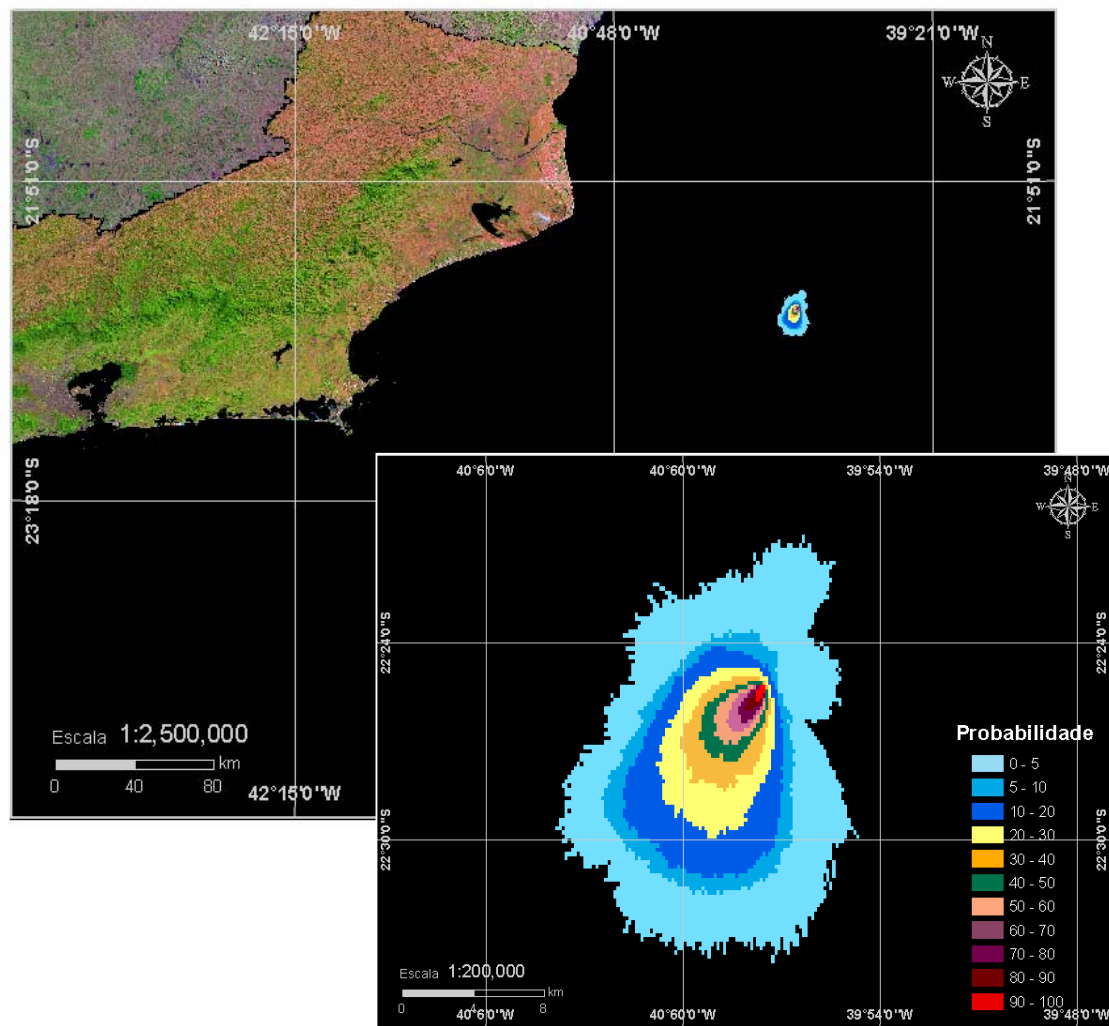


Figura 8. Cenário P53 INV 200 6H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo na Plataforma P-53 durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 200 m³ após 6 horas.

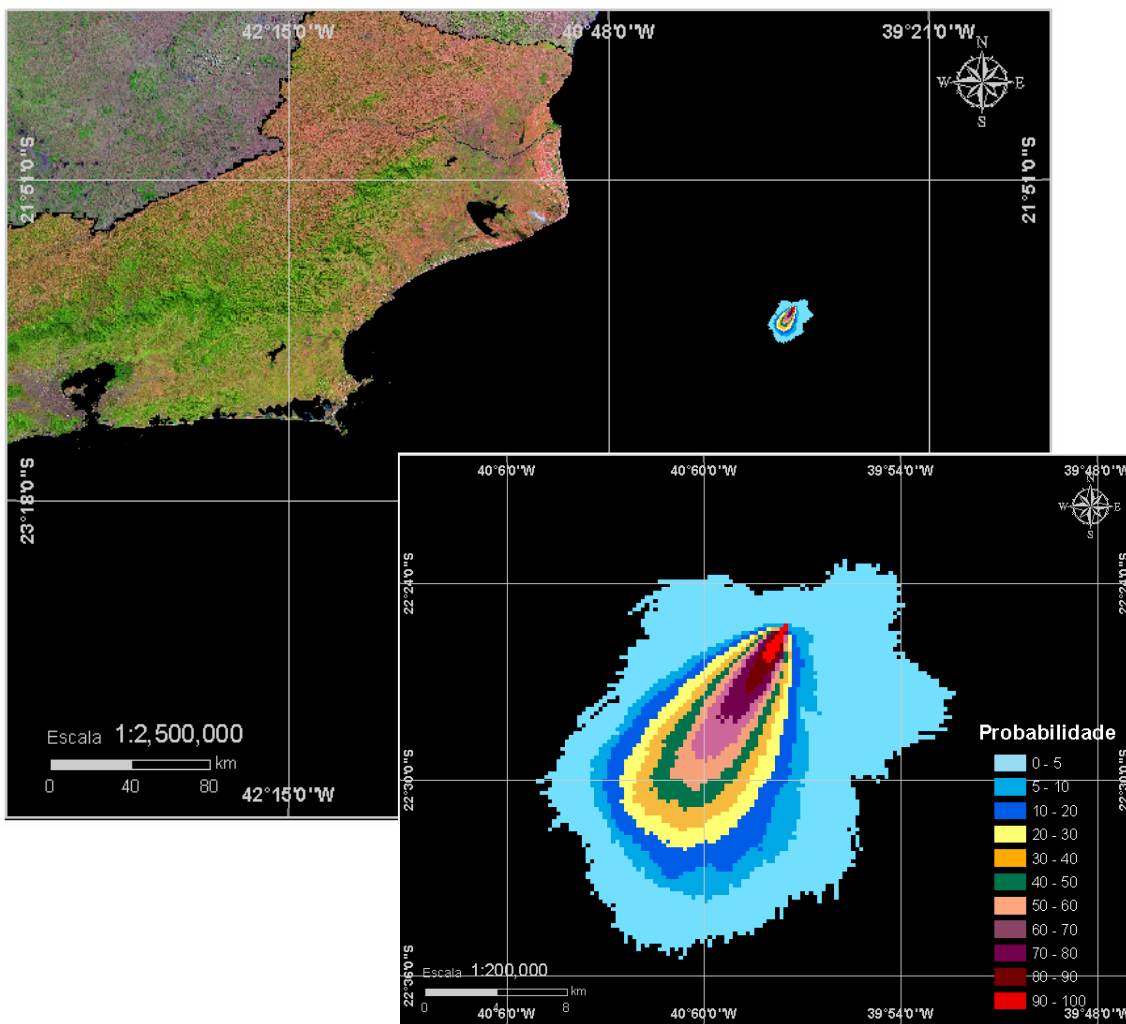


Figura 9. Cenário P53 VER 200 20MGL. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo na Plataforma P-53 durante os meses de verão (janeiro a março) com derrame de 200 m³ após 7 horas, atingindo 20 mg/L.

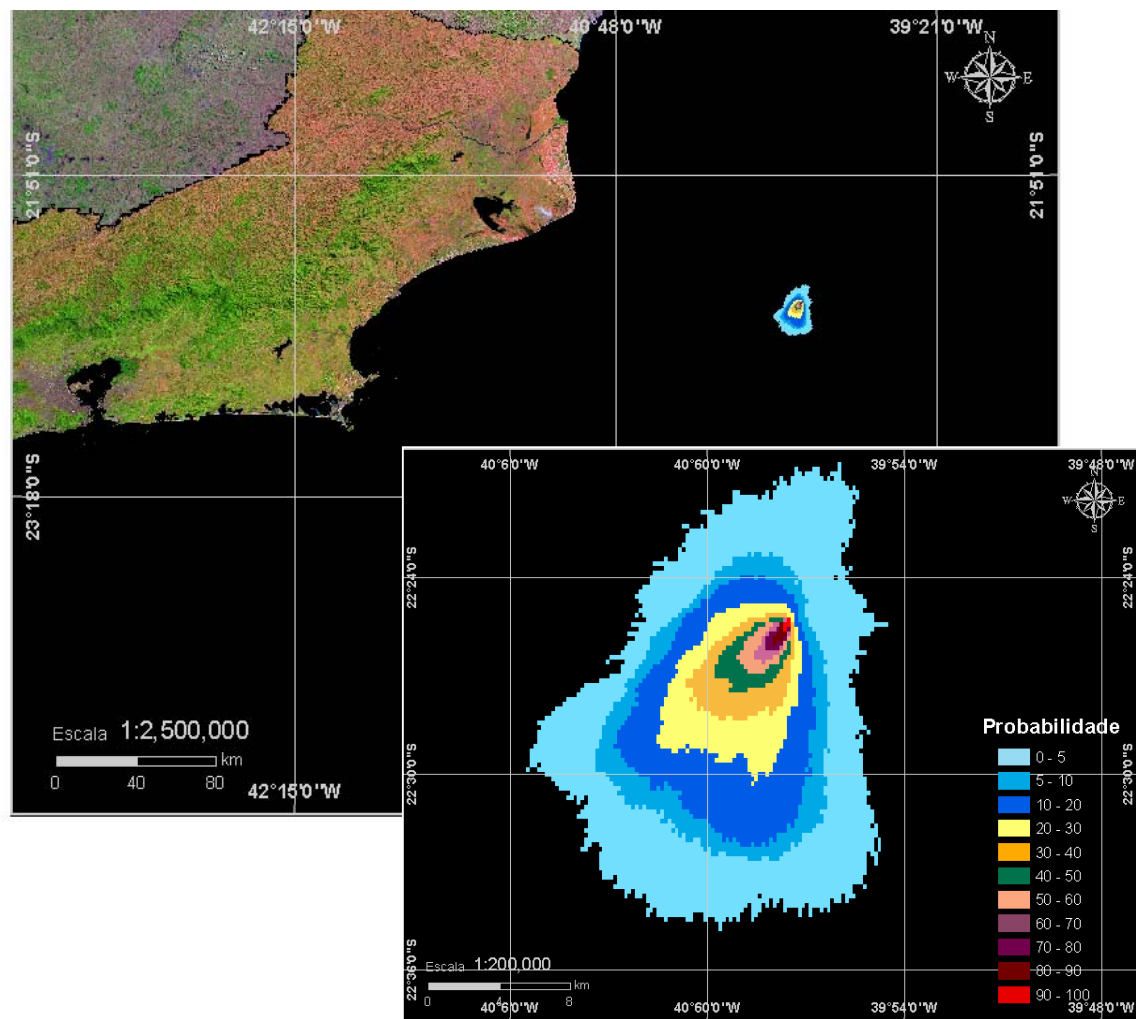


Figura 10. Cenário P53 INV 200 20MGL. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo na Plataforma P-53 durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 200 m³ após 7 horas, atingindo 20 mg/L.

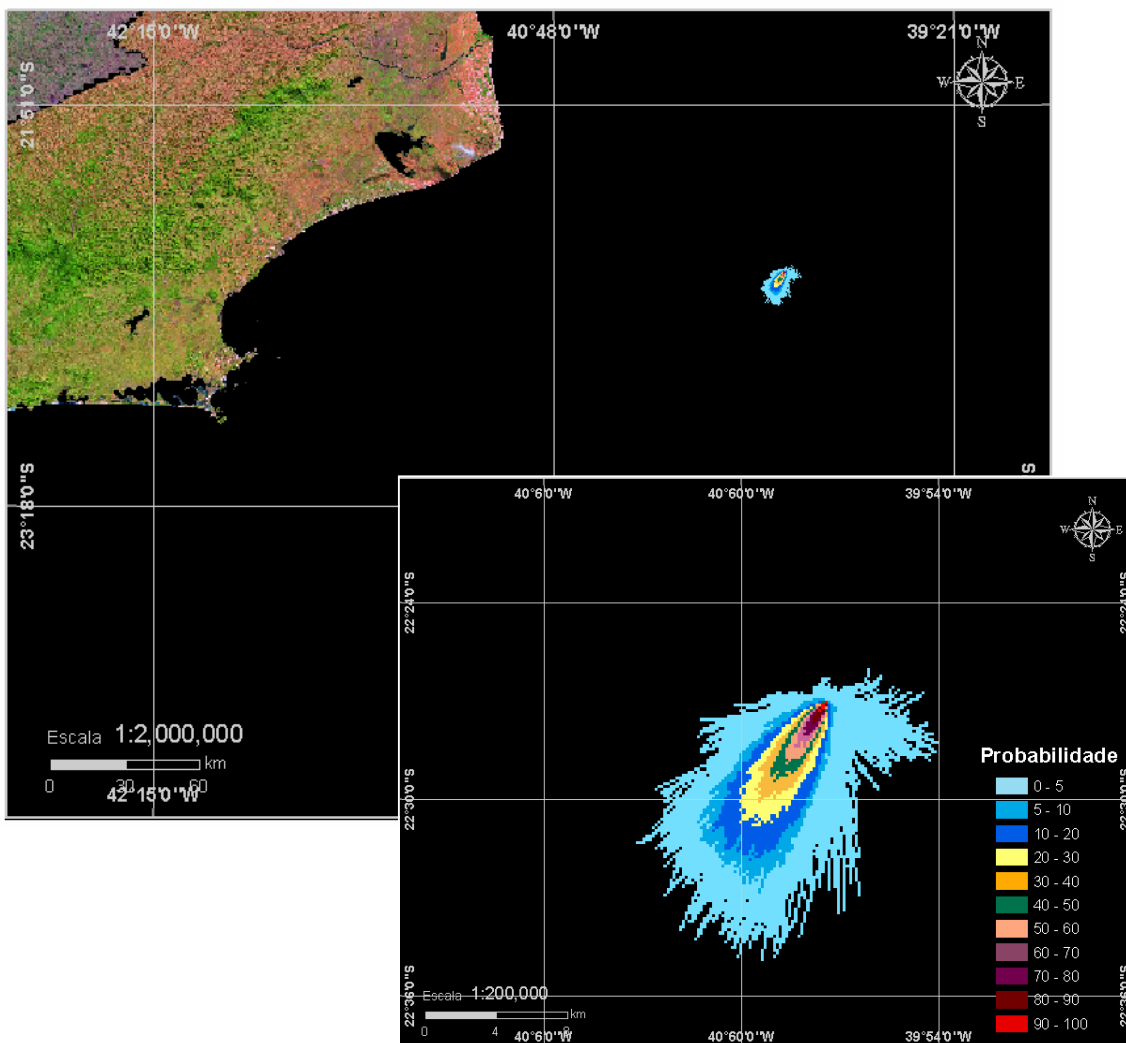


Figura 11. Cenário P53 VER PIORCASO 6H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de verão (janeiro a março) com derrame de $109,6 \text{ m}^3/\text{h}$ após 6 horas.

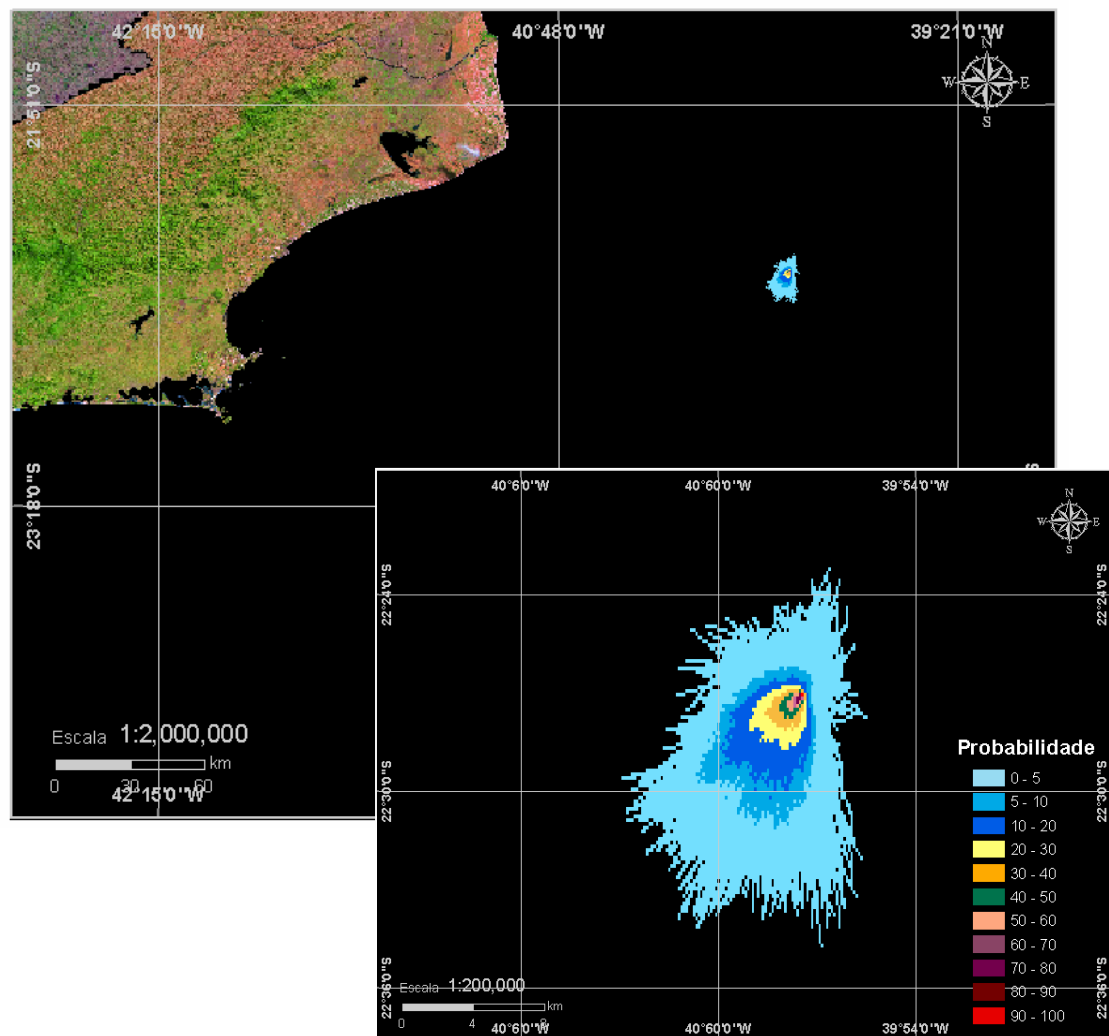


Figura 12. Cenário P53 INV PIORCASO_6H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 109,6 m³/h após 6 horas.

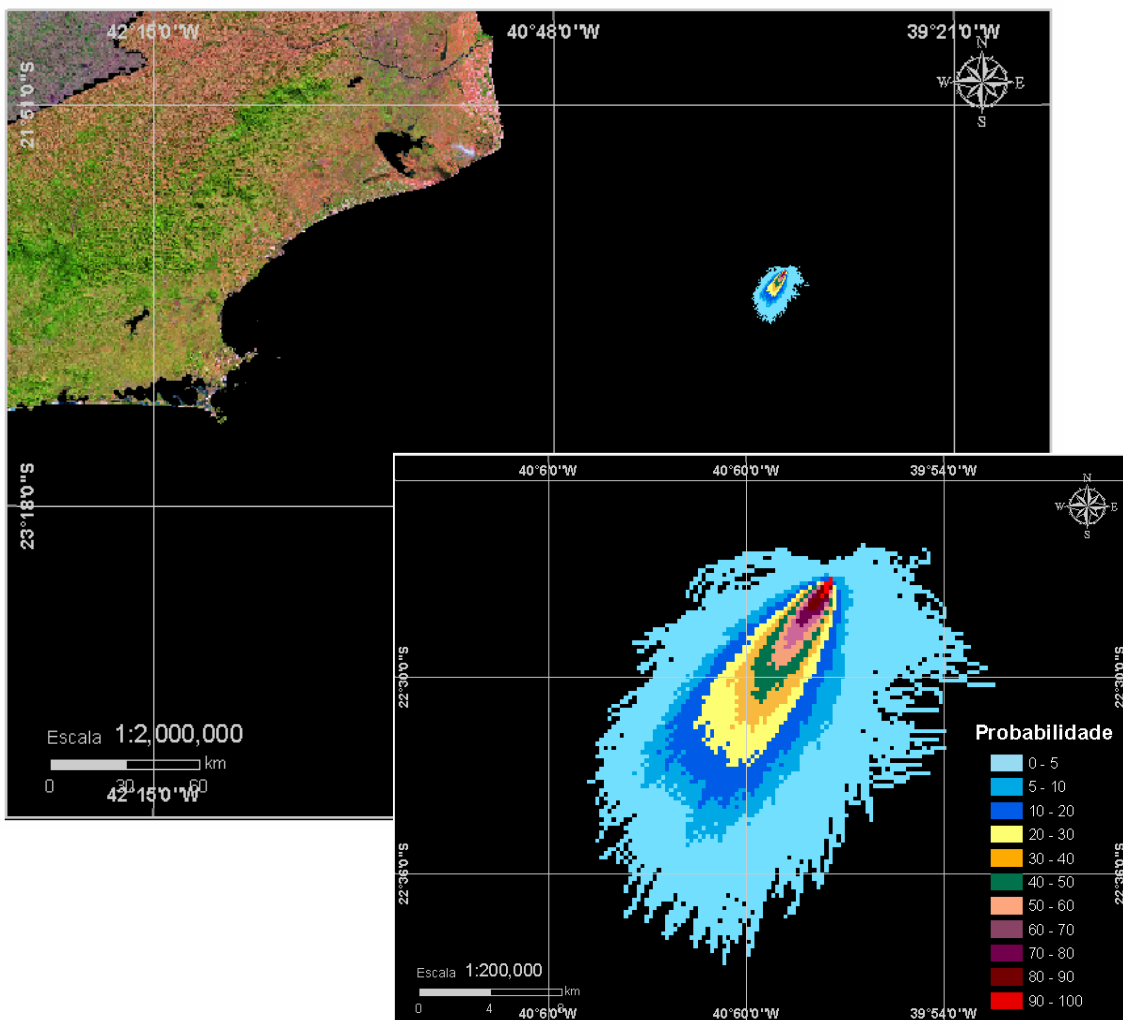


Figura 13. Cenário P53 VER PIORCASO 9H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de verão (janeiro a março) com derrame de 109,6 m³/h após 9 horas.

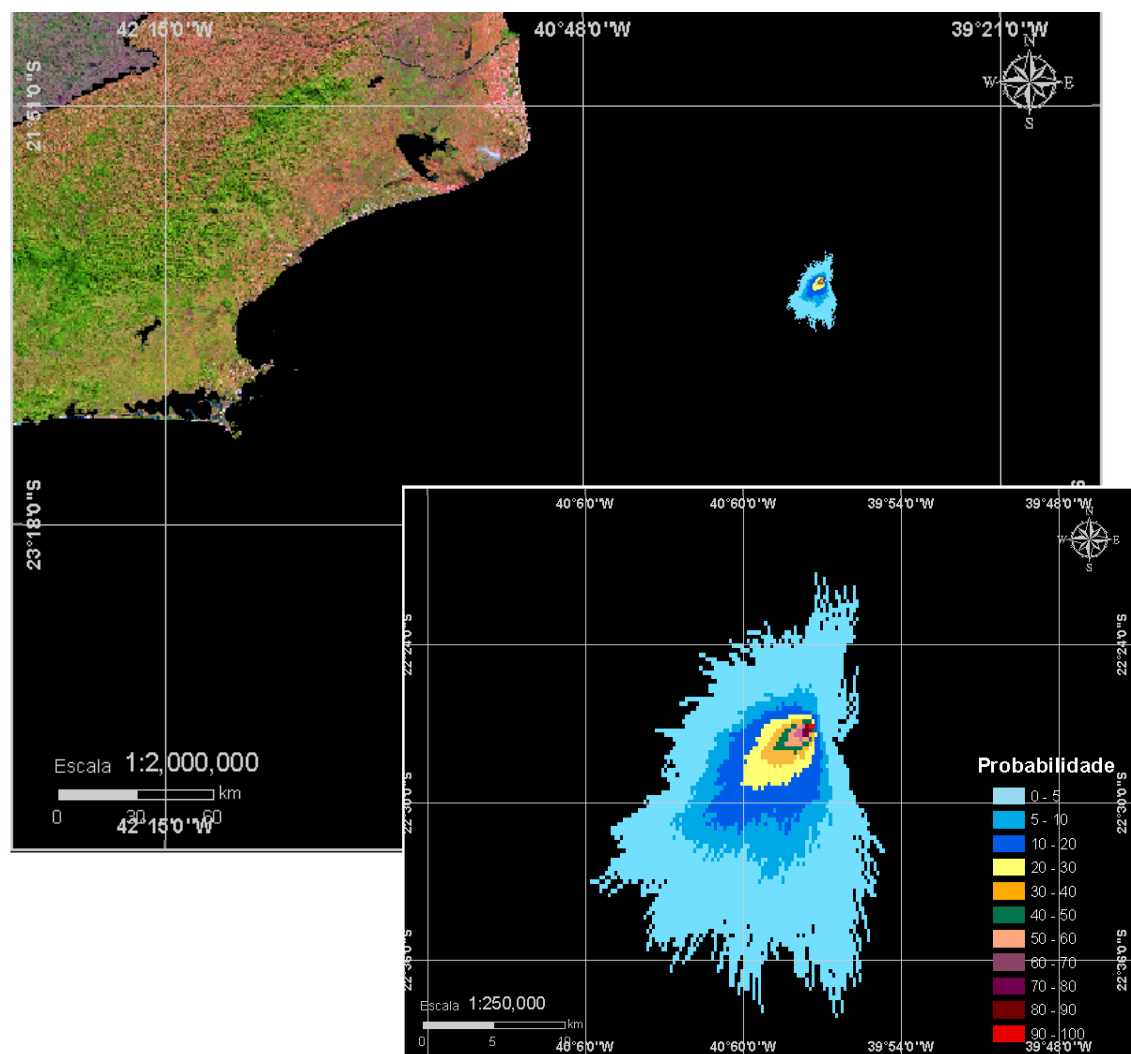


Figura 14. Cenário P53 INV PIORCASO 9H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 109,6 m³/h após 9 horas.

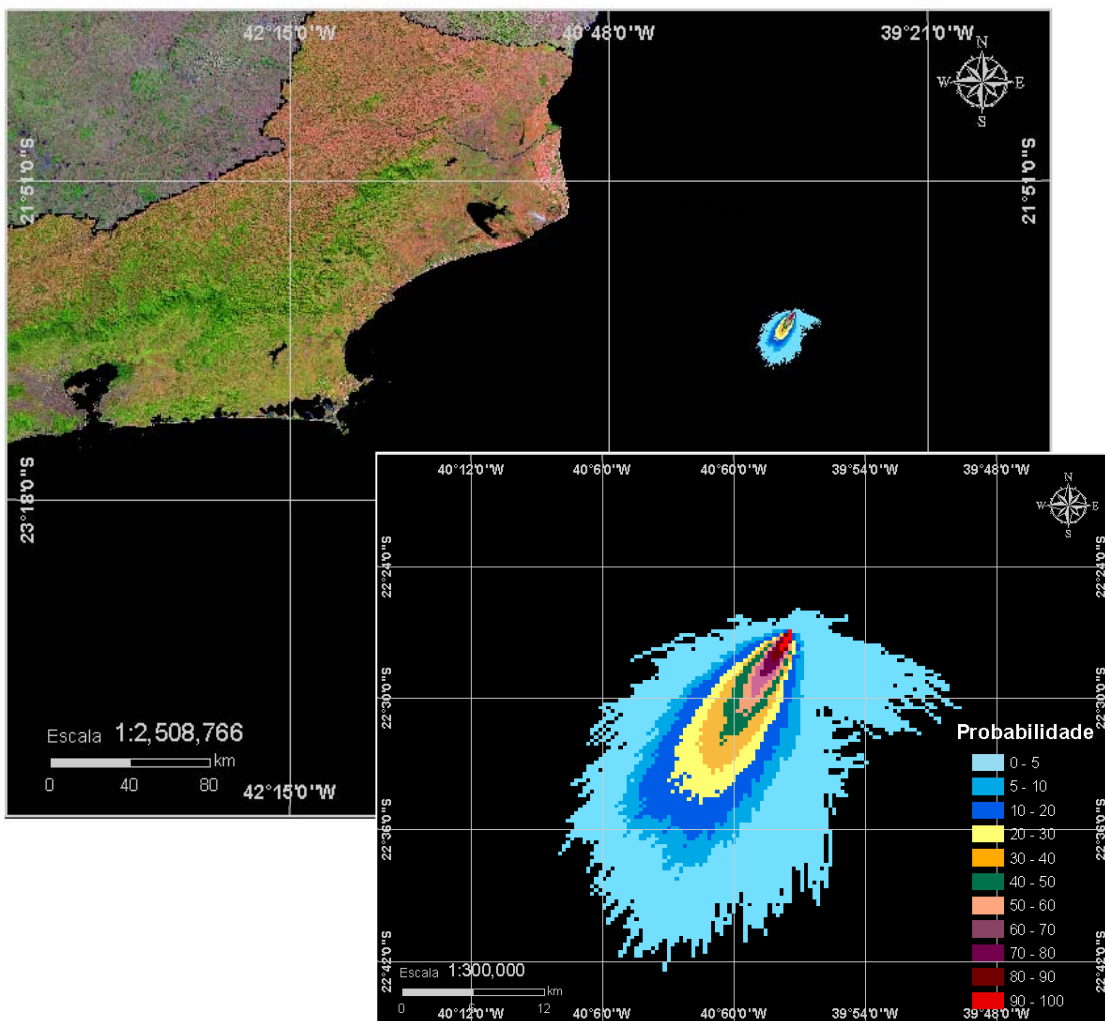


Figura 15. Cenário P53 VER PIORCASO 12H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de verão (janeiro a março) com derrame de $109,6 \text{ m}^3/\text{h}$ após 12 horas.

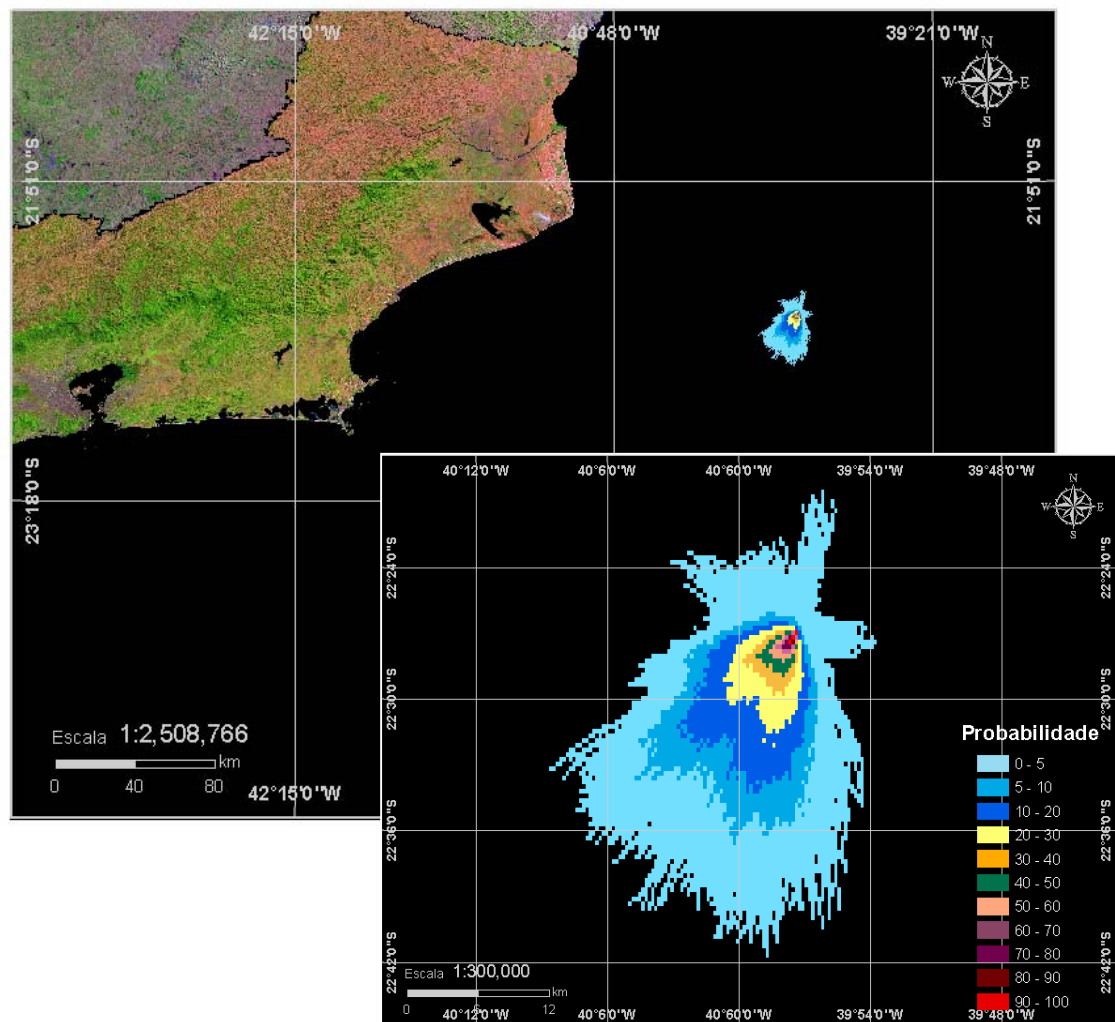


Figura 16. Cenário P53 INV PIORCASO 12H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 109,6 m³/h após 12 horas.

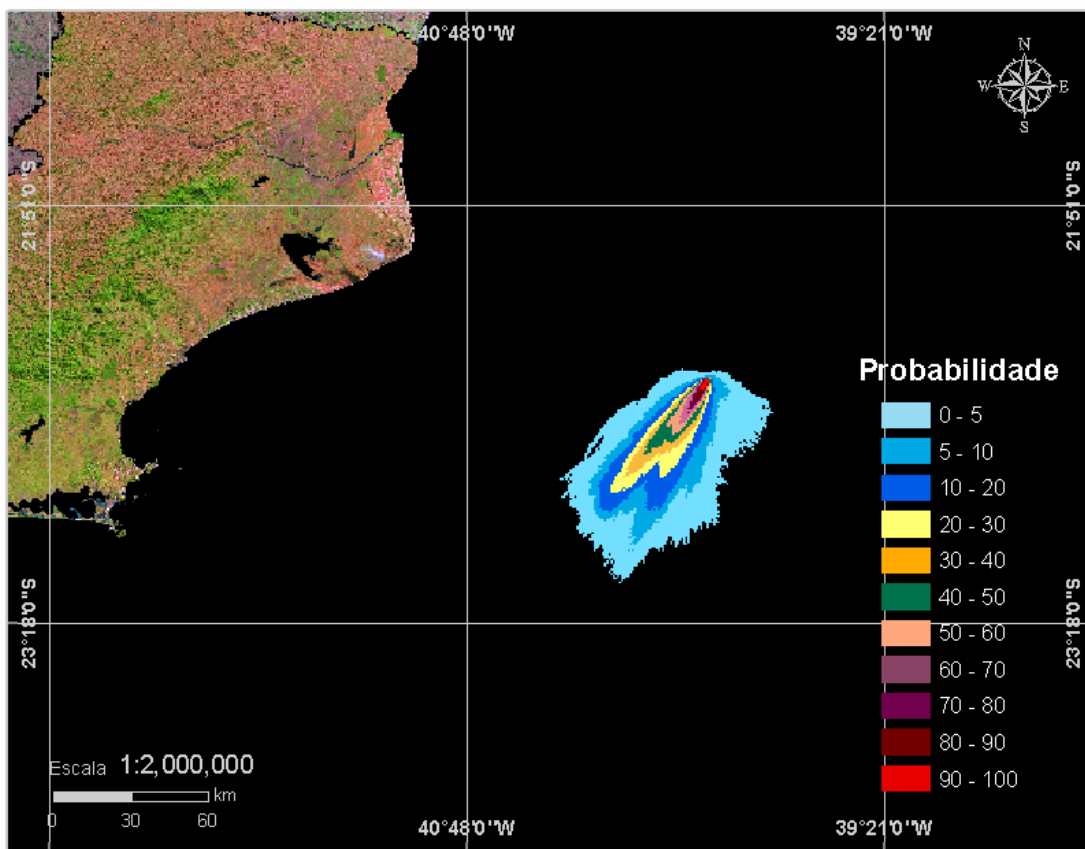


Figura 17. Cenário P53 VER PIORCASO 36H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de verão (janeiro a março) com derrame de $109,6 \text{ m}^3/\text{h}$ após 36 horas.

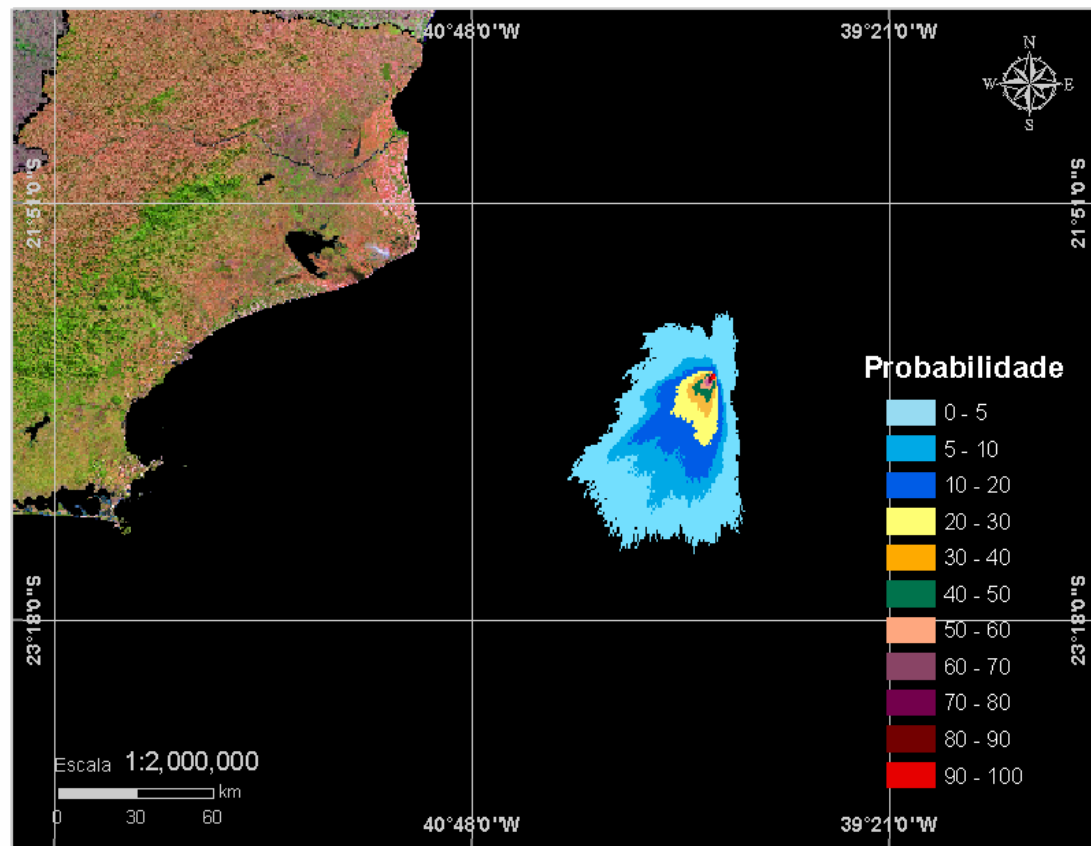


Figura 18. *Cenário P53 INV PIORCASO 36H.* Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 109,6 m³/h após 36 horas.

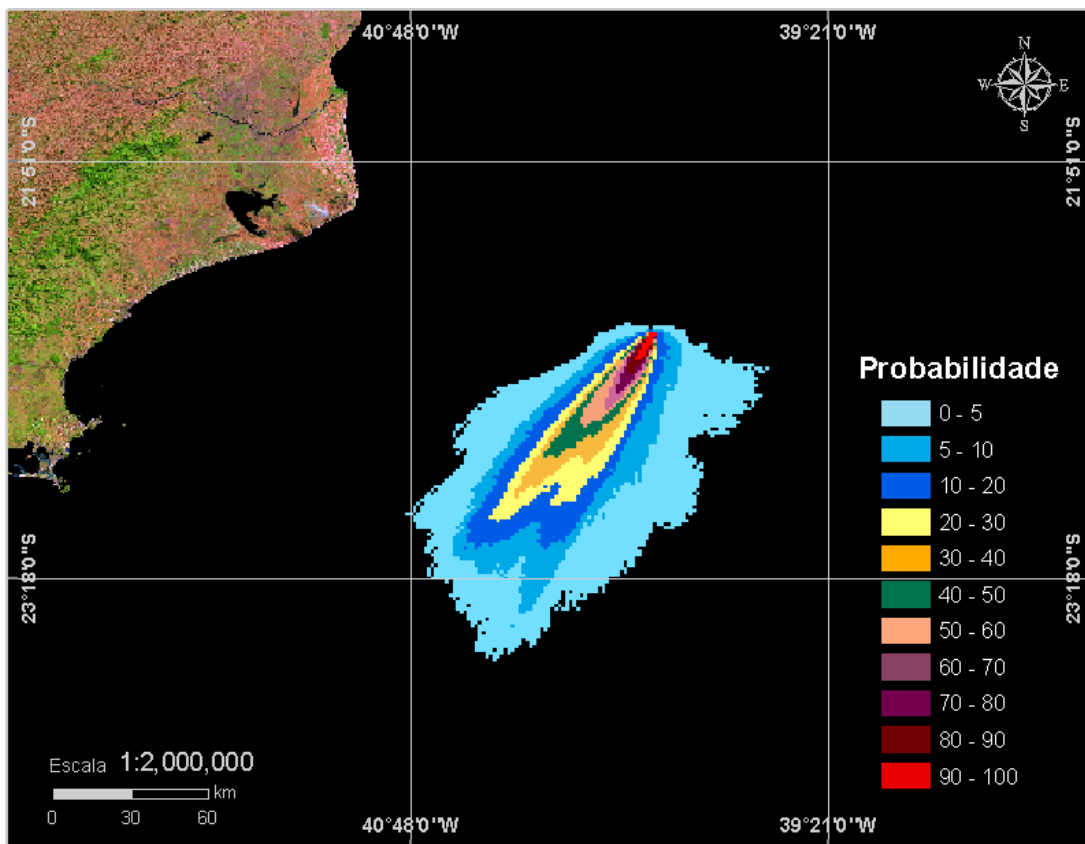


Figura 19. Cenário P53 VER PIORCASO 60H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de verão (janeiro a março) com derrame de 109,6 m³/h após 60 horas.

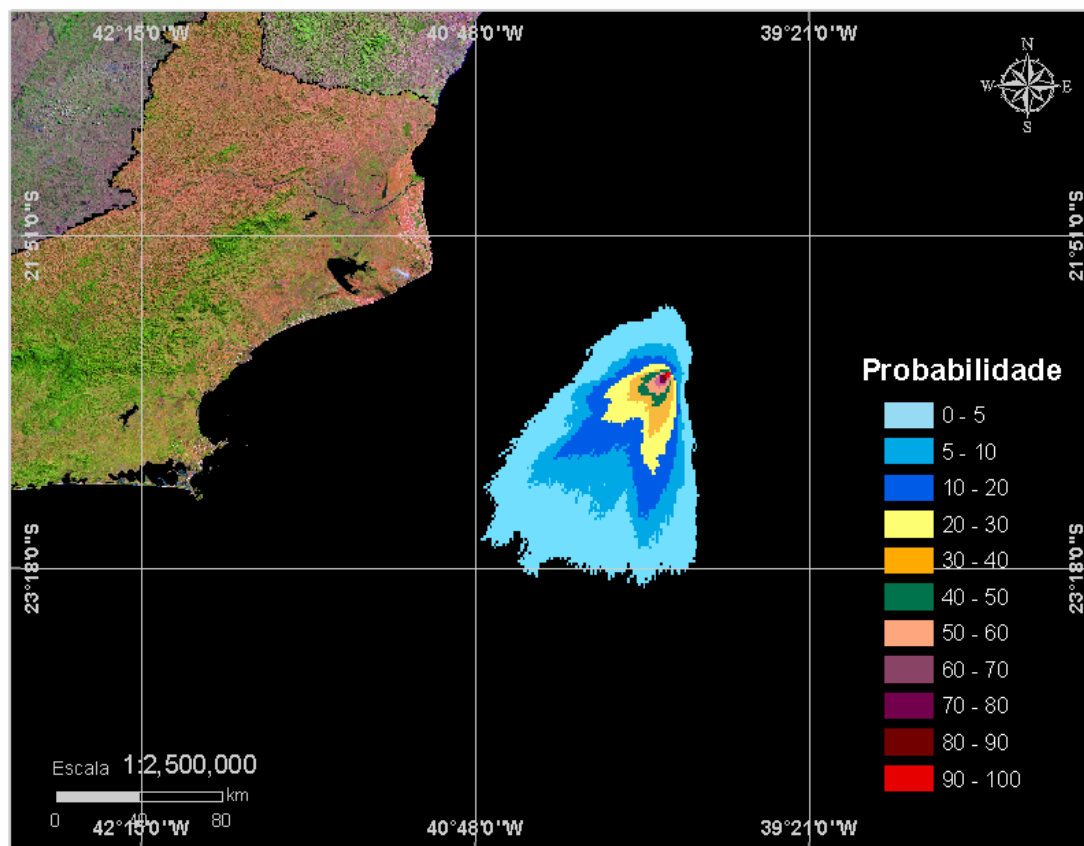


Figura 20. *Cenário P53 INV PIORCASO 60H. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 109,6 m³/h após 60 horas.*

Como se observa na Figura 21, para o cenário de “pior caso” de verão, com derrame de $109,6 \text{ m}^3/\text{h}$ durante 30 dias, não há probabilidade de toque na costa.

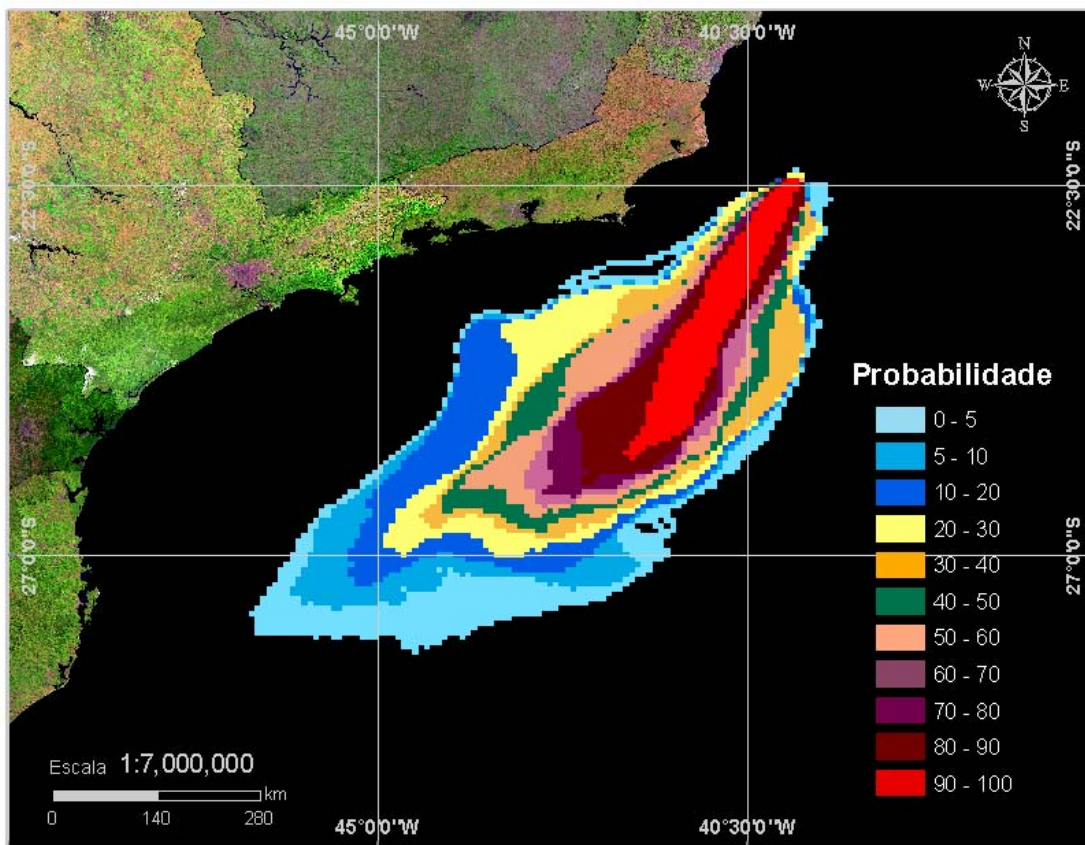


Figura 21. Cenário P53 VER PIORCASO 30DIAS. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de verão (janeiro a março) com derrame de $109,6 \text{ m}^3/\text{h}$ após 30 dias.

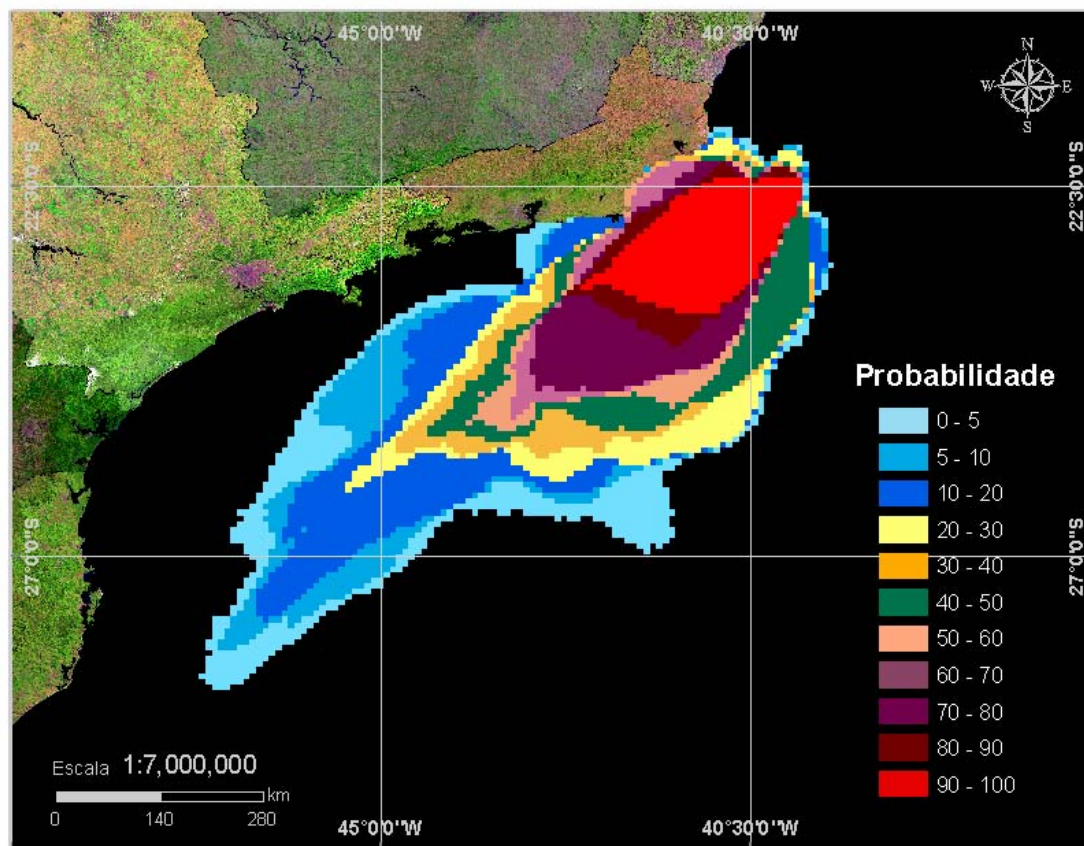


Figura 22. *Cenário P53 INV PIORCASO 30DIAS. Contornos de probabilidade para um acidente ocorrendo no poço P3H durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 109,6 m³/h após 30 dias.*

Na Figura 23 verifica-se que, para um cenário simulado com derrame de “pior caso” em condições de inverno e após 30 dias, as áreas com maior probabilidade de toque (70-80%) correspondem aos municípios de Cabo Frio (RJ) e Armação de Búzios (RJ). A área total com probabilidade de ser atingida por um possível acidente abrange os municípios compreendidos entre Maricá (RJ) e São João da Barra (RJ).

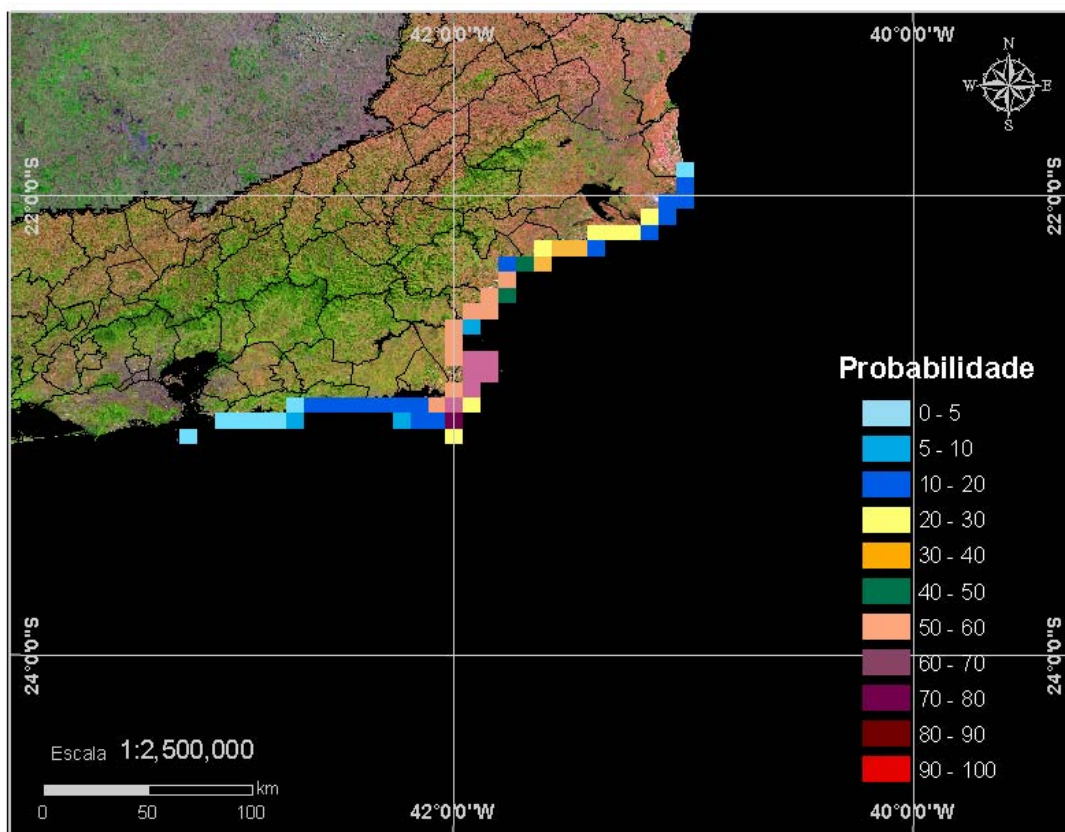


Figura 23. *Cenário P53_INV_PIORCASO_30DIAS_SHORE. Probabilidades de toque na costa para um acidente ocorrendo no Poço P3H durante os meses de inverno (junho a agosto) com derrame de 109,6 m³/h após 30 dias.*

A Figura 24 apresenta o volume médio de óleo por km de costa atingida para simulações em condições de inverno e após 30 dias de simulação. O município de Campos dos Goytacazes (RJ) se destaca com um volume médio da ordem de 70 m³ por km de linha de costa.

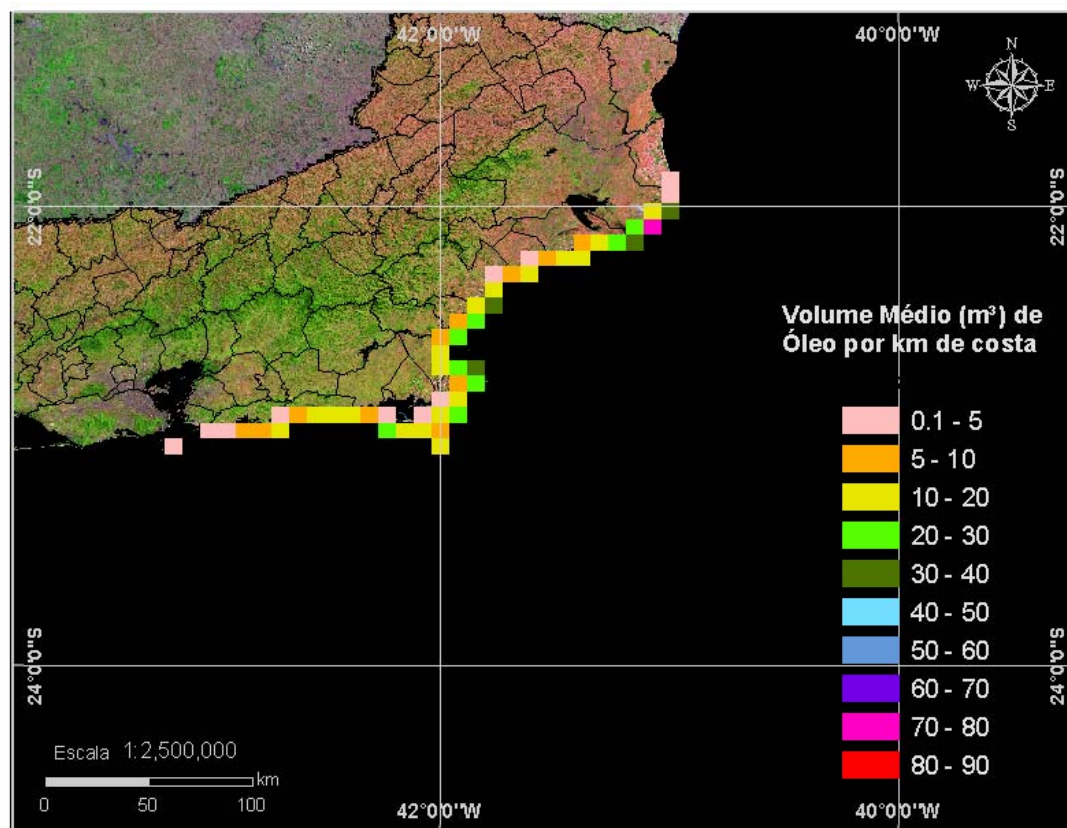


Figura 24. *Cenário P53 INV PIORCASO 30DIAS _OLEOMED. Volume médio de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto).*

A Figura 25 mostra o volume máximo de óleo por km de costa passível de atingir a região de estudo em condições de inverno e após 30 dias. Observa-se um máximo de cerca de 70 m³ nos municípios de Quissamã, Rio das Ostras e Cabo Frio (RJ).

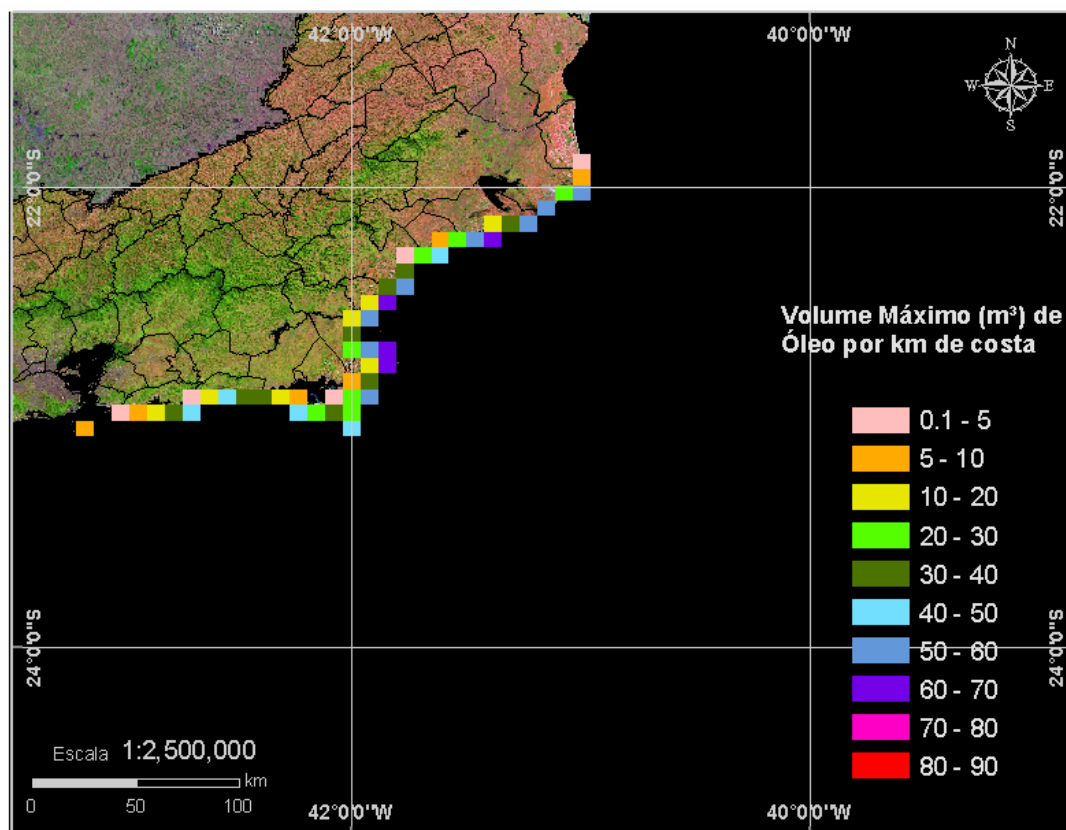


Figura 25. *Cenário P53 INV PIORCASO 30DIAS _OLEOMAX. Volume máximo de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto).*

A Tabela 4 apresenta o percentual de simulações que impactaram a linha de costa, o menor período de tempo para atingir a costa e o tempo médio para o óleo atingir a costa nos cenários de “pior caso”, para acidentes ocorrendo durante os meses de inverno (junho a agosto).

Tabela 4. Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso ocorrendo durante os meses de inverno (junho a agosto).

| CENÁRIOS | TEMPO MÍNIMO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS) | TEMPO MÉDIO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS) | PERCENTAGEM DE SIMULAÇÕES COM TOQUE NA COSTA (%) |
|-------------------------|---|--|--|
| P53_INV_PIORCASO_30DIAS | 220 | 460 | 78,3 |

4.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS

A análise dos resultados das simulações probabilísticas permitiu identificar os cenários determinísticos críticos de verão e inverno. Para essas simulações foram consideradas como mais críticas, para a condição de inverno, duas situações: (1) cenário no qual se observa a maior quantidade de óleo na costa, e (2) cenário que apresenta o menor tempo para o primeiro toque do óleo na costa. Para a condição de verão foi considerado como mais crítico o cenário no qual o óleo mais se aproxima da linha de costa. Em ambos os cenários foram considerados vazamentos de 78.915 m³ (109,6 m³/h).

A Tabela 5 apresenta um resumo dos cenários críticos de inverno para o caso de vazamento de petróleo a partir do Poço P3H.

Tabela 5. Resumo dos cenários determinísticos críticos de inverno para o Poço P3H.

| CENÁRIOS | DATA DE INÍCIO | VOLUME QUE CHEGA À COSTA (m ³) | TEMPO PARA CHEGAR À COSTA (h) |
|---------------|----------------|--|-------------------------------|
| INVERNO_VOL | 19/07/1992 | 19.666,2 | 619 |
| INVERNO_TOQUE | 04/07/1992 | 122,0 | 220 |

Na Figura 26, Figura 28 e Figura 30 são apresentados os contornos de espessura no momento final das simulações dos cenários críticos, destacando-se os limites de 0,0003 mm (limite para ambientes sensíveis), e 0,05 mm (limite de recolhimento). Nestas figuras a cor cinza representa a região por onde a mancha se deslocou durante os 30 dias de duração do derrame e, portanto não está associada a uma espessura. A mancha final é aquela representada pela escala de cores indicada nas figuras.

A Figura 26 apresenta o resultado da simulação determinística de 30 dias para o pior caso em condições de verão. Nesta observa-se que, no instante final de simulação após 30 dias, toda a mancha encontra-se com espessuras abaixo de 0,05 mm. Segundo definido no RT/MC 154/2002, considerando-se uma altura de onda significativa de 1,3 m para a Bacia de Campos e os contornos de espessuras apresentados, conclui-se que a concentração de óleo na água encontra-se abaixo de 20 mg/L, limite determinado na Resolução CONAMA nº 20/86. A menor distância da mancha em relação à costa ocorre nas proximidades do município de Arraial do Cabo, aproximadamente 82 km de distância da linha de costa.

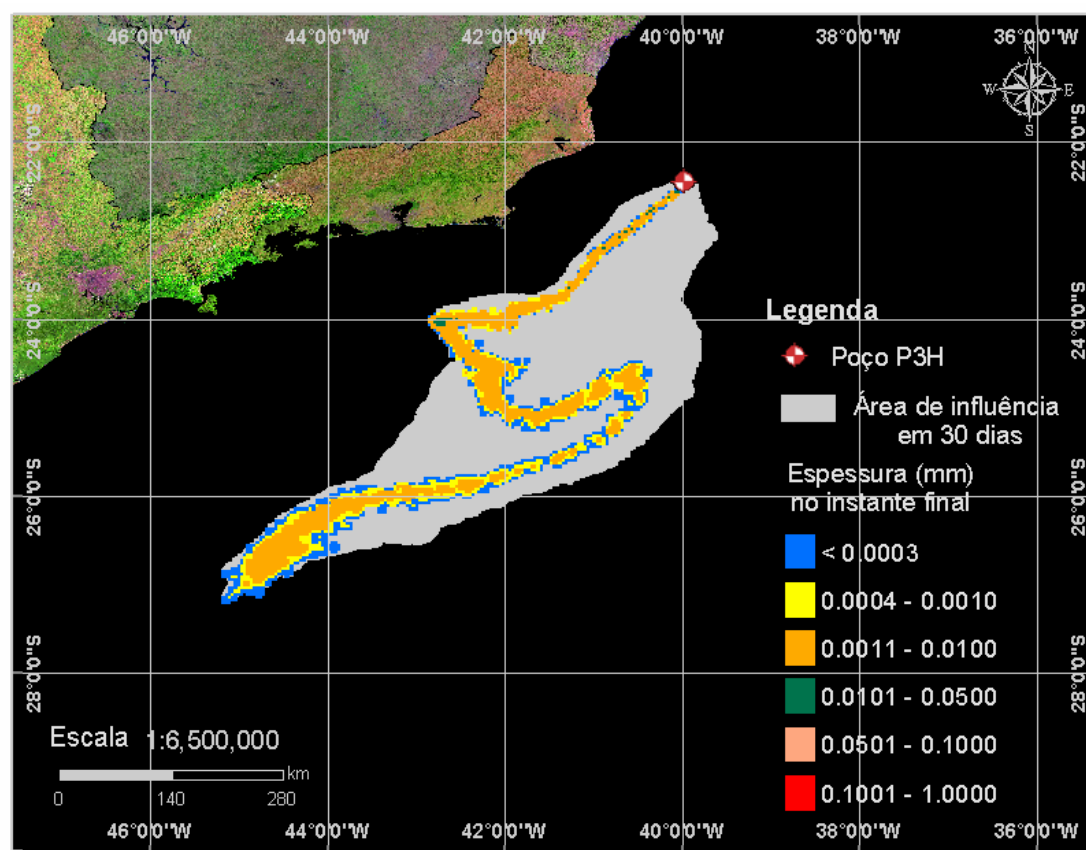


Figura 26. Cenário determinístico de pior caso de vazamento no verão para o Poço P3H.

Na Figura 27 é apresentado um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, na costa, evaporado e na coluna d'água) para a simulação de pior caso no período de verão. Observa-se que a evaporação apresenta um importante papel na redução da massa de óleo nesse período, não havendo acúmulo de óleo na linha de costa nem na coluna d'água.

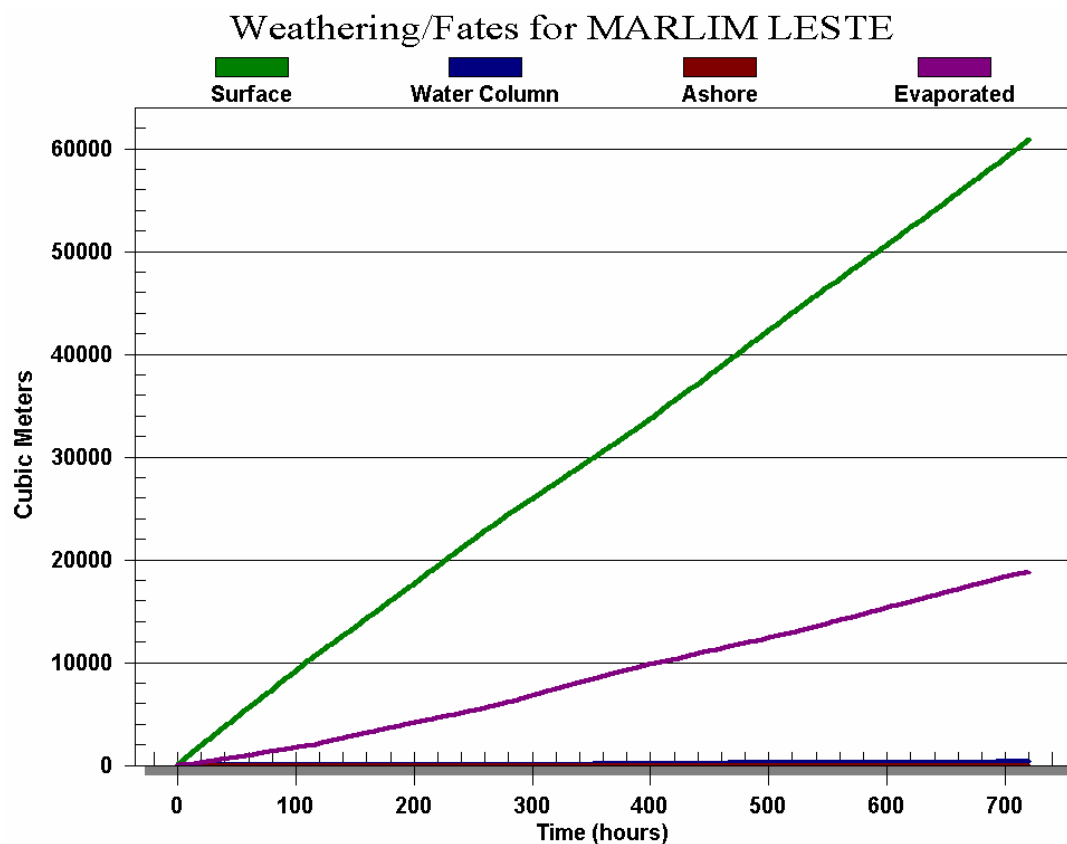


Figura 27. Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no verão para o Poço P3H.

A Figura 28 apresenta os resultados das simulações determinísticas para o pior caso de vazamento, para inverno, no Poço P3H, utilizando o critério de maior volume de óleo na costa. Observa-se que, no instante final de simulação após 30 dias, toda a mancha encontra-se com espessuras abaixo de 0,1 mm. Isto equivale a uma concentração inferior aos 20 mg/L estabelecidos na Resolução CONAMA nº 20/86.

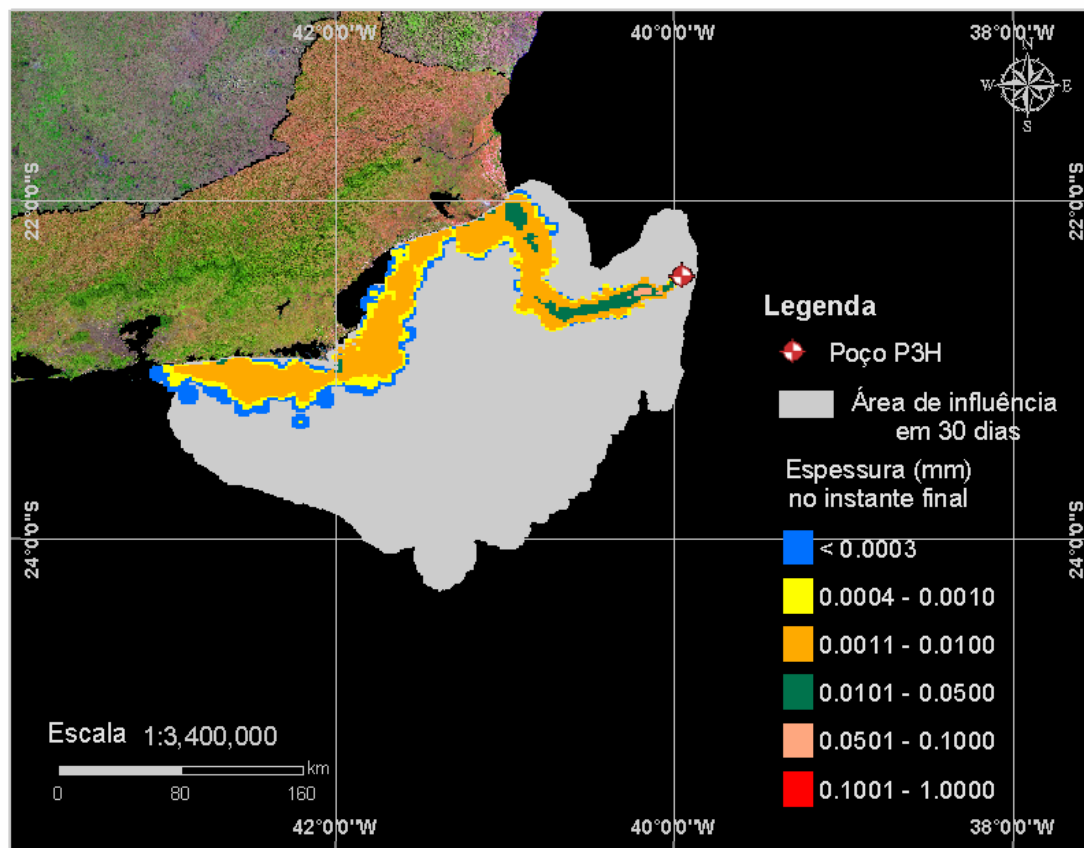


Figura 28. Cenário determinístico de pior caso de vazamento no inverno para o Poço P3H, considerando-se como critério o maior volume de óleo na costa.

A Figura 29 apresenta o gráfico de balanço de massa para o cenário com derrame de volume de pior caso, simulado por 30 dias, em condições de inverno, considerando-se o critério de maior volume de óleo na costa. Observa-se que parte considerável do volume derramado é depositado na costa após aproximadamente 640h do início da simulação. Assim como na simulação de verão, o processo de evaporação é o principal responsável pela redução da massa de óleo no inverno.

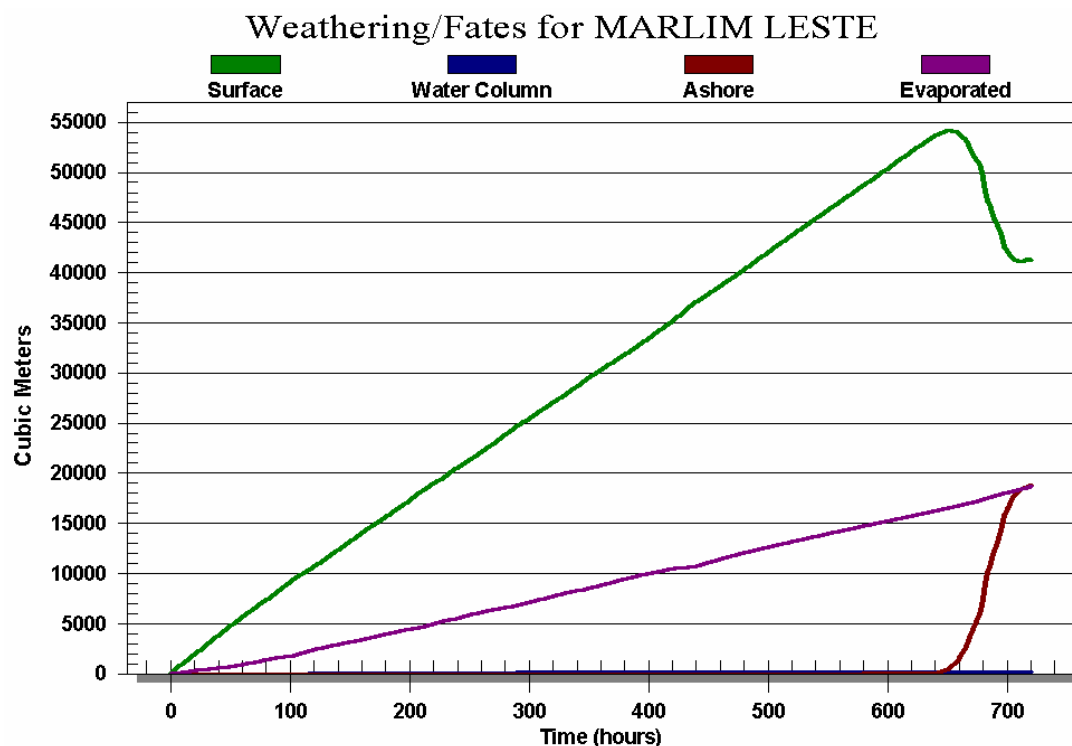


Figura 29. Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no inverno para o Poço P3H, considerando-se como critério a maior quantidade de óleo na costa.

A Figura 30 apresenta os resultados das simulações determinísticas para o pior caso de vazamento, para inverno, no Poço P3H, considerando o critério de menor tempo para o primeiro toque do óleo na costa. O instante do primeiro toque na costa ocorre após 9 dias e 9 horas. Neste instante toda a mancha encontra-se com espessuras abaixo de 0,05 mm. Isto equivale a uma concentração inferior aos 20 mg/L estabelecidos na Resolução CONAMA nº 20/86.

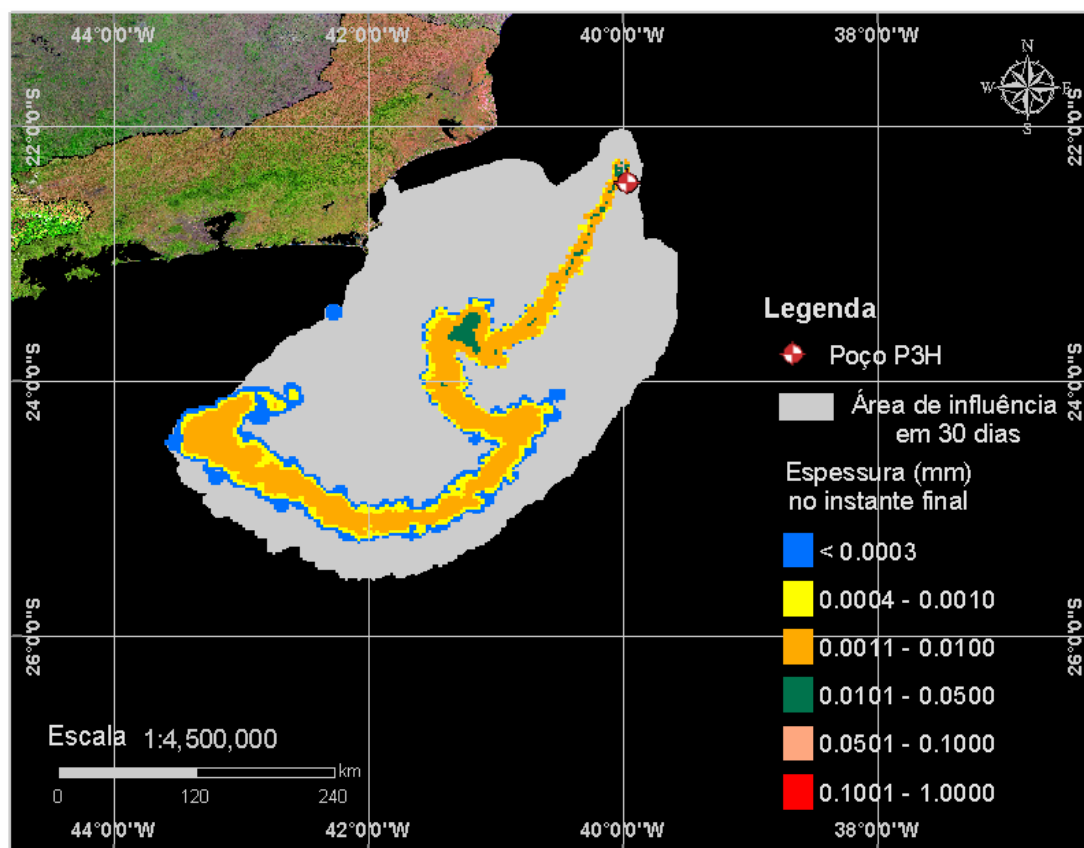


Figura 30. Cenário determinístico de pior caso de vazamento no inverno para o Poço P3H, considerando-se como critério o menor tempo para o primeiro toque do óleo na costa.

Na Figura 31 é apresentado um gráfico com o balanço de massa para o cenário com derrame de volume de pior caso, simulado por 30 dias, em condições de inverno, no instante do primeiro toque do óleo na costa. Observa-se que, assim como nas demais simulações, a evaporação apresenta um importante papel na redução da massa de óleo nesse período. O volume de óleo na linha de costa, neste caso, é muito reduzido e não é observado nenhum acúmulo de óleo na coluna d'água.

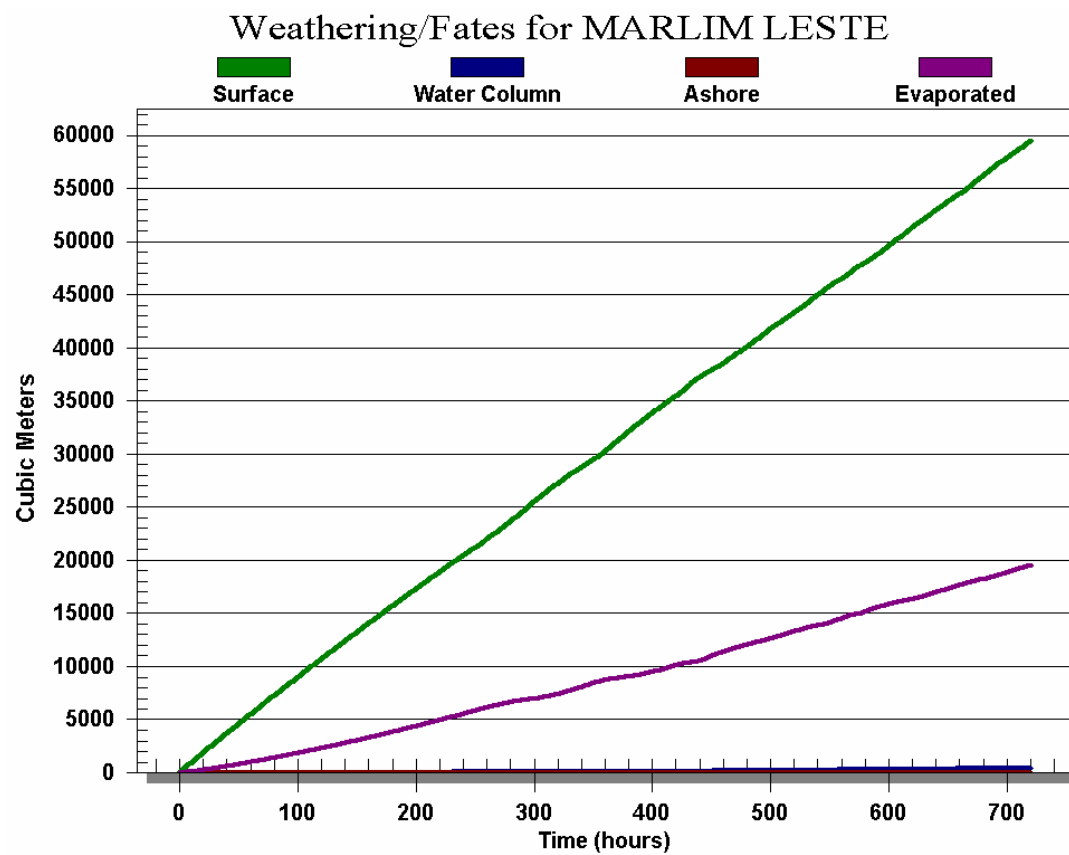


Figura 31. Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no inverno para o Poço P3H, considerando-se como critério o menor tempo para o primeiro toque do óleo na costa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTRO FILHO, B.M.C. & MIRANDA, L. B., 1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 40° N and 34° S. *The Sea. John Wiley & Sons, Inc.* 11: p. 209-251.
- EVANS, D. L. & SIGNORINI, S. R., 1985. Vertical structure of the Brazil Current. *Nature*, 315, p. 48-50.
- GARFIELD III, N. 1990. The Brazil Current at subtropical latitudes. Tese de Doutorado, University of Rhode Island. 121pp.
- LIMA, J. A. M. , 1997. Oceanic Circulation on the Brazilian Shelf Break and Continental Slope at 22°S. Tese de doutorado. University of New South Wales, Austrália.
- SIGNORINI, S. S., 1978. On the Circulation and volume transport of the Brazil Current between Cape of São Tomé and Guanabara Bay. *Deep Sea Res.*, 25, p. 481-490.
- STRAMMA, L.; IKEDA, Y. & PETERSEN, R.G., 1990. Geostrophic transport in the Brazil Current region, *Deep-Sea. Res.*, 37(12): p. 1875-1886.