

ESTUDO DE DERIVA DE MANCHAS DE ÓLEO PARA ELABORAÇÃO DO PEI DA P-51 NO CAMPO DE MARLIM SUL, BACIA DE CAMPOS

- 1 INTRODUÇÃO**
- 2 FORMULAÇÃO DO MODELO E DADOS DE ENTRADA**
 - 2.1 LOCAL DO ESTUDO**
 - 2.2 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO NA REGIÃO**
 - 2.3 DADOS DE VENTO**
- 3 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO**
- 4 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS**
- 5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES**
 - 5.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS**
 - 5.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXO A
ANEXO B
ANEXO C

1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte a PETROBRAS E&P/SMS no desenvolvimento de Estudos Ambientais para suas atividades na Bacia de Campos, estamos apresentando este trabalho de modelagem computacional para elaboração de Cenários de Deriva de Acidentes com Petróleo para a área de estudo.

O objetivo principal deste trabalho é a modelagem da trajetória e transformações biogeoquímicas de um potencial derramamento de óleo neste local. Esta avaliação foi conduzida através da utilização de um sistema de modelos computacionais 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 geomorfométricas do local (contornos da linha de costa e oceano), (b) padrões de circulação local e em larga escala, (c) séries temporais de vento de longa duração (preferencialmente de bóias offshore e/ou estação meteorológica costeira). Para este estudo, foram utilizados dados de vento obtidos da bóia oceanográfica da PETROBRAS localizada no campo de Albacora. A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida a partir de resultados do modelo POCM (WOCE Parallel Ocean Climate Model) ajustado para modelar as correntes oceânicas da costa sudeste do Brasil.

Os cenários simulados, bem como os dados de entrada e hipóteses simplificadoras assumidas durante as simulações são apresentados na Seção 2; as características químicas do óleo utilizado nas simulações são apresentadas na Seção 3; a descrição dos cenários simulados é apresentada na Seção 4; e os resultados das simulações com as prováveis trajetórias de um acidente no local

de estudo são apresentados na Seção 5. Uma descrição abreviada do modelo OILMAP é apresentada no Apêndice A deste relatório. No Anexo B deste Relatório é apresentada uma sugestão oferecida pelo Dr. Merv Fingas da Agência Canadense de Meio Ambiente – Environment Canadá.

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 grade define quais as células ou blocos correspondem à área de terra e quais a área de água, com a interface definindo a linha de costa. A linha de costa, por sua vez, é uma série de blocos que limita a extensão à qual a mancha de óleo pode se movimentar em uma determinada direção. A outra grade ou malha compreendendo apenas a região de água define o campo de circulação.

O conjunto de dados de entradas e parâmetros do modelo que definem um cenário é: ponto de derramamento, tipo de óleo, data, horário e duração do derramamento, campo de corrente, 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 se inicia 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 (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 então 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. O modelo repete estes cálculos 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 pode ser ressuspenso caso as condições meteoceanográficas 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 Local do Estudo

As simulações para um potencial acidente com petróleo na Bacia de Campos foram realizadas a partir do poço de maior produção (B5-P5), cujas coordenadas foram especificadas pela PETROBRAS:

UTM – Datum Aratu	Geodésica – Datum SAD69
Norte: 7.496.269	22° 38' 11,5" S
Leste: 389.022	40° 4' 47,9" W

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) visando à introdução de respostas da plataforma a 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 de 13° e 30° S, e as longitudes de 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 m (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 em 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).

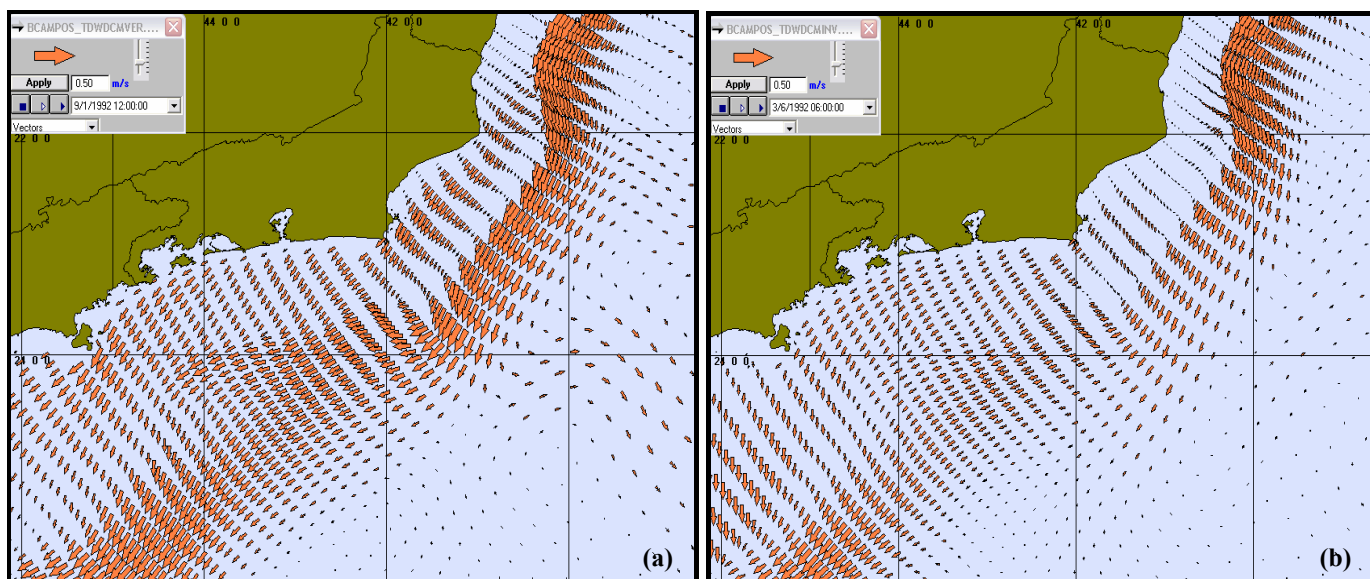
A água que flui para sudoeste durante o verão é reforçada pelos ventos predominantes, que sopram principalmente de nordeste nesta estação, devido à influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul. No inverno, entretanto, a alta incidência de sistemas frontais induz a ocorrência de correntes com direção 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 1 (a e b) são apresentados campos de velocidades típicos observados nos resultados do modelo para verão e inverno, onde se destaca a definição da Corrente do Brasil. Na Figura 1.c observamos a grade utilizada no modelo hidrodinâmico.



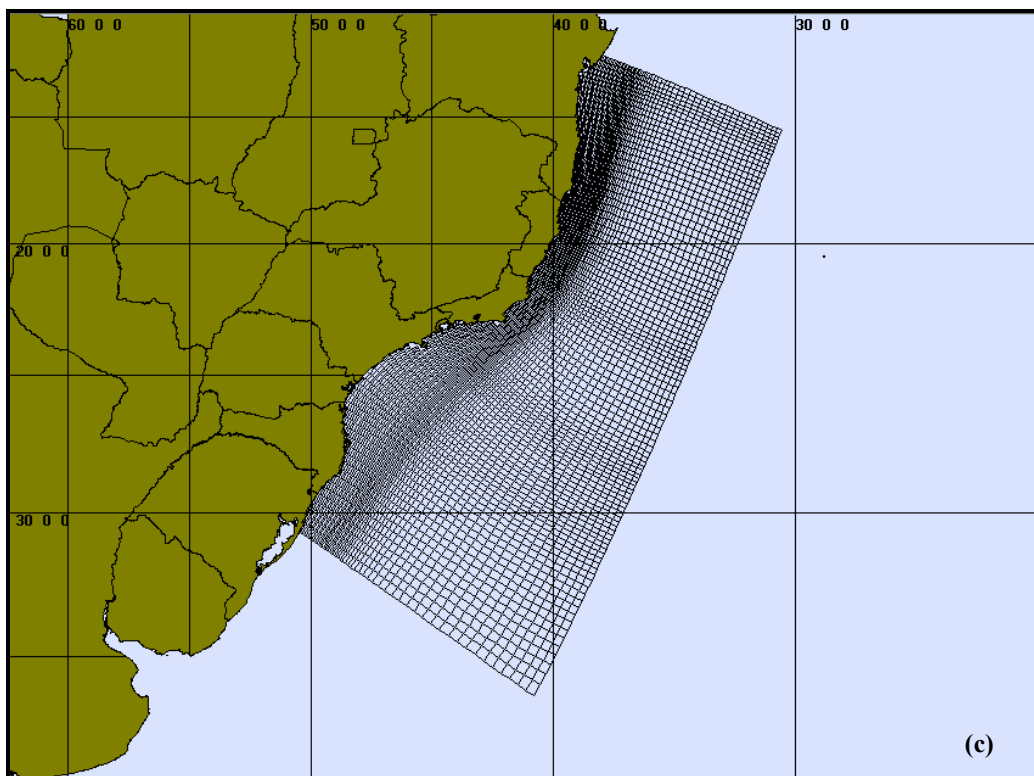


Figura 1 – Exemplos ilustrativos de campos de velocidades obtidos com os modelos hidrodinâmicos para verão (a) e inverno (b) no ano de 1992 e grade utilizada no modelo (c).

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 2 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.

Diagrama de dispersão dos vetores de vento (m/s) (convenção meteorológica)

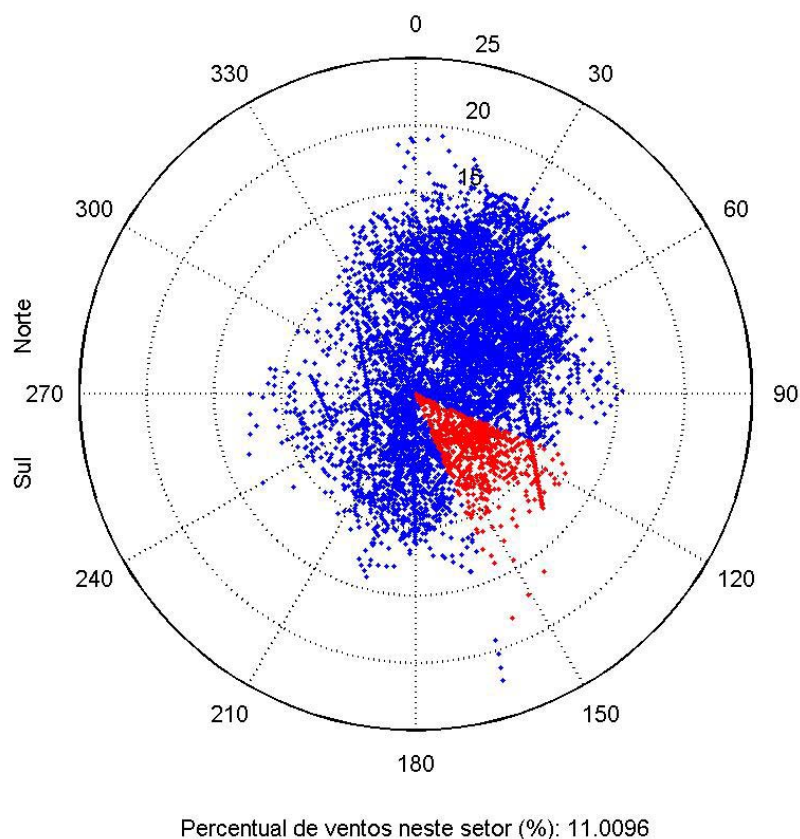


Figura 2 – Diagrama de dispersão do vento para o ano de 1992 na Bacia de Campos.

A Tabela 1 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento obtida para os dados fornecidos. Esta tabela demonstra que os ventos mais frequentes são de NE (17,4%) e NNE (16,9%). Os ventos com velocidades médias máximas (9,8 m/s) sopraram de NNE; e os ventos mais fortes registrados vieram de SSE (22,3 m/s) e N (19,3m/s). Observando-se a frequência conjunta, o vento mais comum soprou de NE com velocidades variando entre 8 e 9 m/s.

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	Porc.	Dir.med.
0.0- 1.0	9	13	7	9	11	15	21	13	14	17	10	8	8	10	9	3	177	2.0	156
1.0- 2.0	10	24	15	18	20	25	8	7	20	29	17	19	15	13	10	12	262	3.0	153
2.0- 3.0	18	17	15	24	28	39	24	18	28	45	26	15	16	11	17	27	368	4.2	147
3.0- 4.0	24	27	39	55	66	36	43	90	73	42	16	18	10	12	20	28	599	6.8	126
4.0- 5.0	27	49	113	91	46	53	78	65	47	49	19	25	9	12	19	30	732	8.4	95
5.0- 6.0	30	45	105	129	49	107	108	53	64	40	24	13	6	4	26	20	823	9.4	97
6.0- 7.0	75	113	102	154	87	76	54	61	48	43	22	17	10	2	14	28	906	10.3	74
7.0- 8.0	61	124	123	154	104	28	43	44	51	32	27	12	15	6	10	24	858	9.8	65
8.0- 9.0	93	210	382	225	52	38	38	33	47	59	13	19	6	3	10	36	1264	14.4	51
9.0-10.0	105	135	146	142	26	49	19	17	46	17	2	7	11	2	4	28	756	8.6	48
10.0-11.0	94	150	167	90	17	25	11	5	30	14	0	4	6	0	0	30	643	7.3	38
11.0-12.0	85	149	100	66	11	6	17	11	7	6	1	0	2	0	0	14	475	5.4	36
12.0-13.0	57	147	78	26	11	5	12	7	5	3	0	2	2	0	0	11	366	4.2	32
13.0-14.0	26	101	60	15	12	0	0	5	0	4	0	2	0	0	0	9	234	2.7	32
14.0-15.0	14	83	34	2	6	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	141	1.6	30
15.0-16.0	7	65	21	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	1.1	26
16.0-17.0	2	17	8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0.3	29
17.0-18.0	3	8	7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0.2	28
18.0-19.0	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0.1	9
19.0-20.0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.0	21
20.0-21.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0	162
21.0-22.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0	163
22.0-23.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0	163
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.med.	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.max.	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	9.0	7.0	8.0	9.0	7.0	7.6	11.0			

3. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO

Com base nas informações fornecidas pela PETROBRAS, o óleo tipo MARLIM foi utilizado em todas as simulações. As características definidas para o óleo cru são as seguintes:

- Densidade: 0,935 g/cm³
- Viscosidade Dinâmica: 376.2 cP a 25 °C

4. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS

Utilizando-se o OILMAP em modo probabilístico, é possível levar em consideração à variabilidade das forçantes ambientais. No modo probabilístico, as simulações de derramamento foram realizadas através da variação aleatória do início do derramamento dentro do período para o qual se dispunha de dados de vento (1º de janeiro a 31 de dezembro de 1992). Uma vez identificado o instante de início do derrame, o campo de velocidades associado ao mesmo (mesmo dia e mês) é também identificado e utilizado ao longo do período de simulação. As múltiplas trajetórias foram então utilizadas para a produção de curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da grade computacional (área de estudo). Os resultados em forma gráfica são apresentados como contornos de probabilidade da presença de óleo na água e na costa. Nos estudos de avaliação de impacto ambiental e análise de risco, estas probabilidades de presença de óleo e tempo de deslocamento da mancha podem ser correlacionadas a recursos naturais armazenados no banco de dados (GIS), de forma a auxiliar na avaliação de impactos ambientais em termos da probabilidade da presença de óleo em recursos importantes.

Para que se pudesse incorporar a variabilidade das forçantes meteoceanográficas, em cada cenário probabilístico foi realizada uma série de 300 simulações com o modelo OILMAP. Os cenários probabilísticos são resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames de óleo.

Cenário	Produto	Volume (m ³)	Estação do ano	Tempo
P-51_VER_8_20PPM	Petróleo Marlim	8 (a)	Verão	Até atingir 20 mg/L
P-51_INV_8_20PPM	Petróleo Marlim	8 (a)	Inverno	Até atingir 20 mg/L
P-51_VER_200_6HORAS	Petróleo Marlim	200 (b)	Verão	6 horas
P-51_INV_200_6HORAS	Petróleo Marlim	200 (b)	Inverno	6 horas
P-51_VER_200_9HORAS	Petróleo Marlim	200 (b)	Verão	9 horas
P-51_INV_200_9HORAS	Petróleo Marlim	200 (b)	Inverno	9 horas
P-51_VER_PIORCASO_6HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Verão	6 horas
P-51_INV_PIORCASO_6HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Inverno	6 horas
P-51_VER_PIORCASO_9HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Verão	9 horas
P-51_INV_PIORCASO_9HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Inverno	9 horas
P-51_VER_PIORCASO_12HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Verão	12 horas
P-51_INV_PIORCASO_12HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Inverno	12 horas
P-51_VER_PIORCASO_36HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Verão	36 horas

P-51_INV_PIORCASO_36HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Inverno	36 horas
P-51_VER_PIORCASO_60HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Verão	60 horas
P-51_INV_PIORCASO_60HORAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Inverno	60 horas
P-51_VER_PIORCASO_30DIAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Verão	30 dias
P-51_INV_PIORCASO_30DIAS	Petróleo Marlim	pior caso (c)	Inverno	30 dias

Para um derrame de 200 m³ foi observado que a mancha atinge a concentração calculada de 20 mg/L em menos de 9h.

Definição dos volumes, segundo CONAMA 293

- a. Pequeno: 8 m³
- b. Médio: 200 m³
- c. Pior caso: 168.826,0 m³ em 30 (trinta) dias

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

5.1. Simulações Probabilísticas

O modelo OILMAP foi utilizado para simular 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. As Figuras 3 a 20 mostram os contornos de probabilidade da presença de óleo para os cenários de acidentes na plataforma P-51 ocorrendo durante os meses de verão (Novembro a Março) e inverno (Maio a Setembro). Conforme mostram as figuras, somente para o cenário catastrófico de derrames de 168.826 m^3 durante o inverno é que existe a probabilidade da mancha chegar em águas costeiras. Praticamente em todas as simulações, a mancha se deslocou para sudoeste seguindo a orientação da Corrente do Brasil.

Originalmente a PETROBRAS solicitou que, para os cenários de “pior caso”, fossem realizadas simulações probabilísticas com duração definida em função do tempo para que a pseudo-concentração da mancha alcance o limite de 20 mg/L . A pseudo-concentração da mancha é calculada a partir do volume de óleo na superfície e coluna d'água vezes a área da mancha vezes 1,5 a altura de onda significativa ($H_s = 1,3$ metros, informação fornecida pelo CENPES). Entretanto, para o volume de 168.826 m^3 , e considerando apenas os processos de evaporação, espalhamento, entranhamento, esta condição nunca seria atingida, como mostra a Figura 22. Desta forma, as simulações dos cenários de “pior caso” foram definidas para 30 dias.

Cabe ressaltar que todas as simulações realizadas não levam em conta ações provenientes de Planos de Contingência e Planos de Ações Emergenciais. As simulações probabilísticas mostram que para todos os tipos de vazamentos, a probabilidade da mancha atingir a costa está centrada na região que vai de Arraial do Cabo (RJ) à Armação de Búzios (RJ), sendo de no máximo 7% no período de inverno.

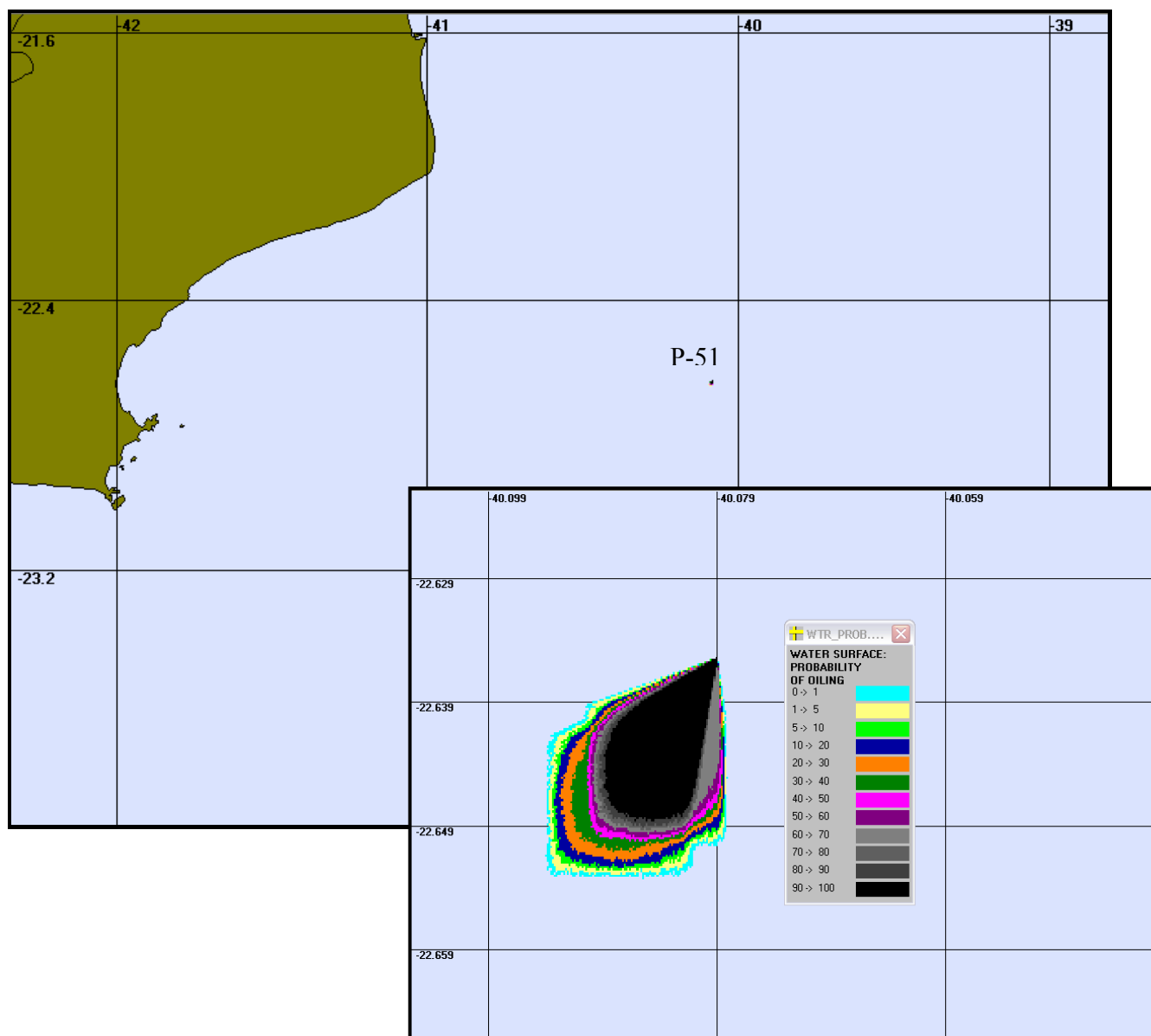


Figura 3 – Cenário P-51_VER 8 20PPM. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de verão (Novembro a Março) com derrame de 8m³ após 1 hora atingindo 20ppm.

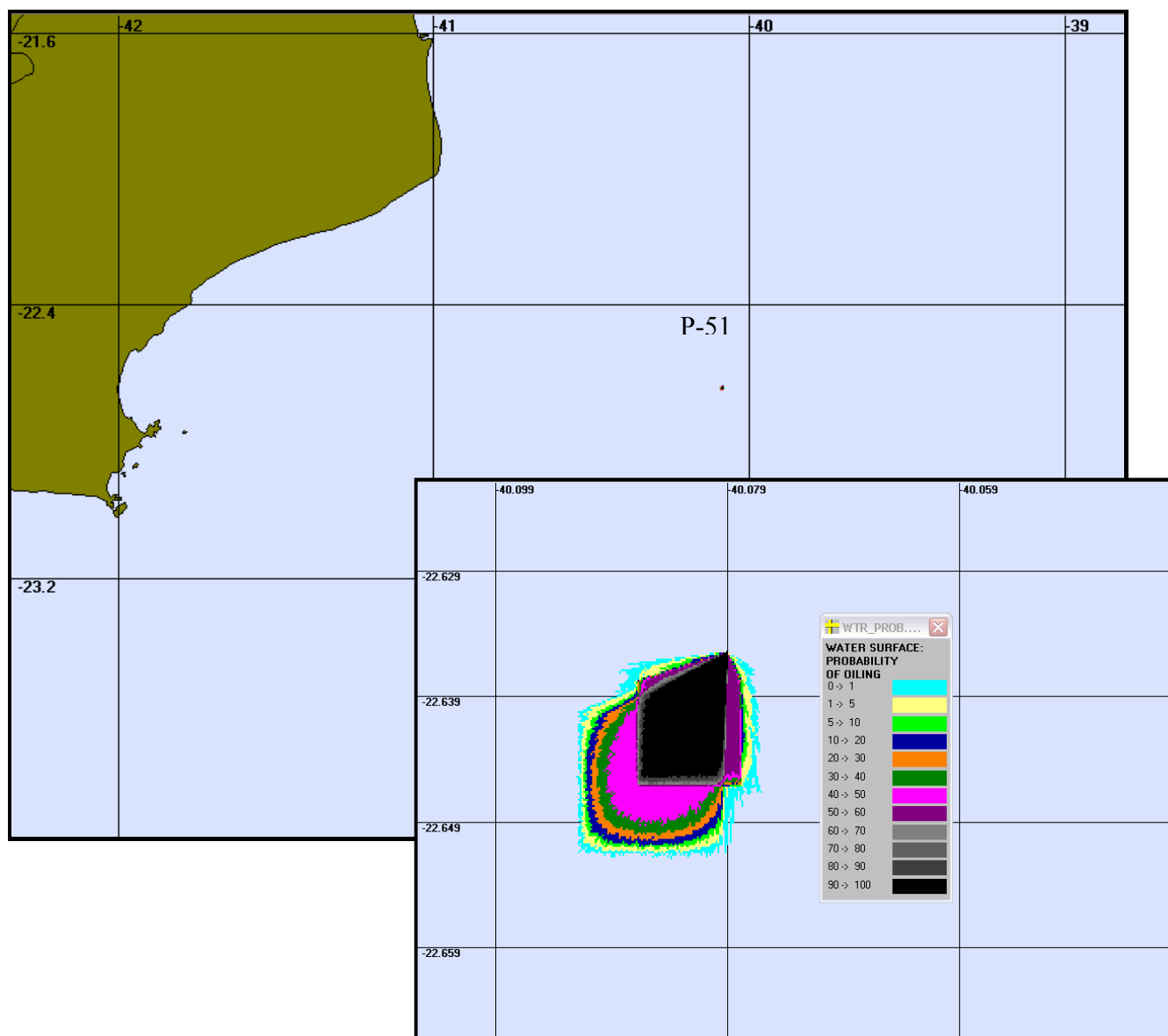


Figura 4 – Cenário P-51_INV 8 20PPM. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de inverno (Maio a Setembro) com derrame de 8m^3 após 1 hora atingindo 20ppm.

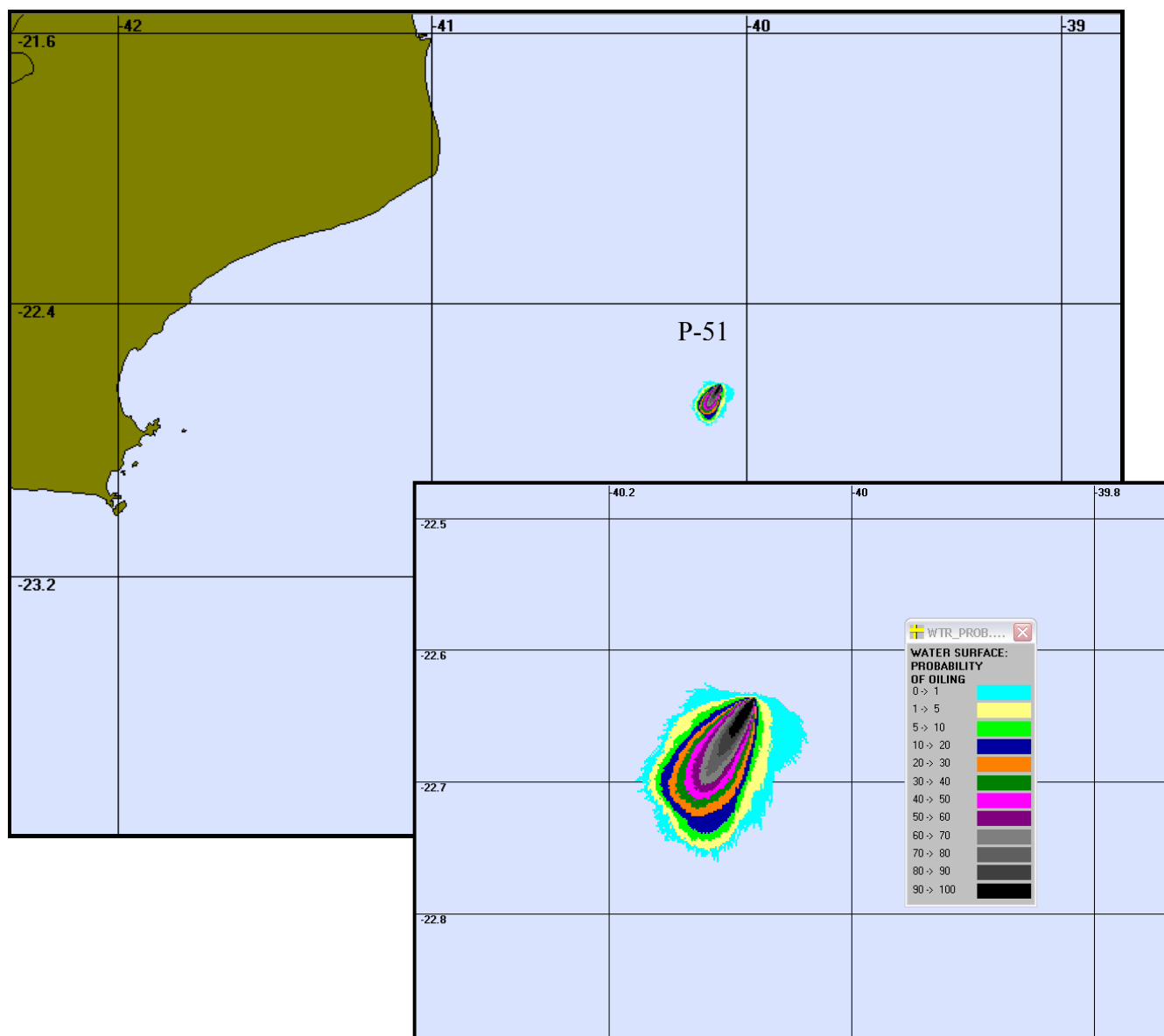


Figura 5 – Cenário P-51 VER 200 6HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de verão (Novembro a Março) com derrame de 200m³ após 6 horas.

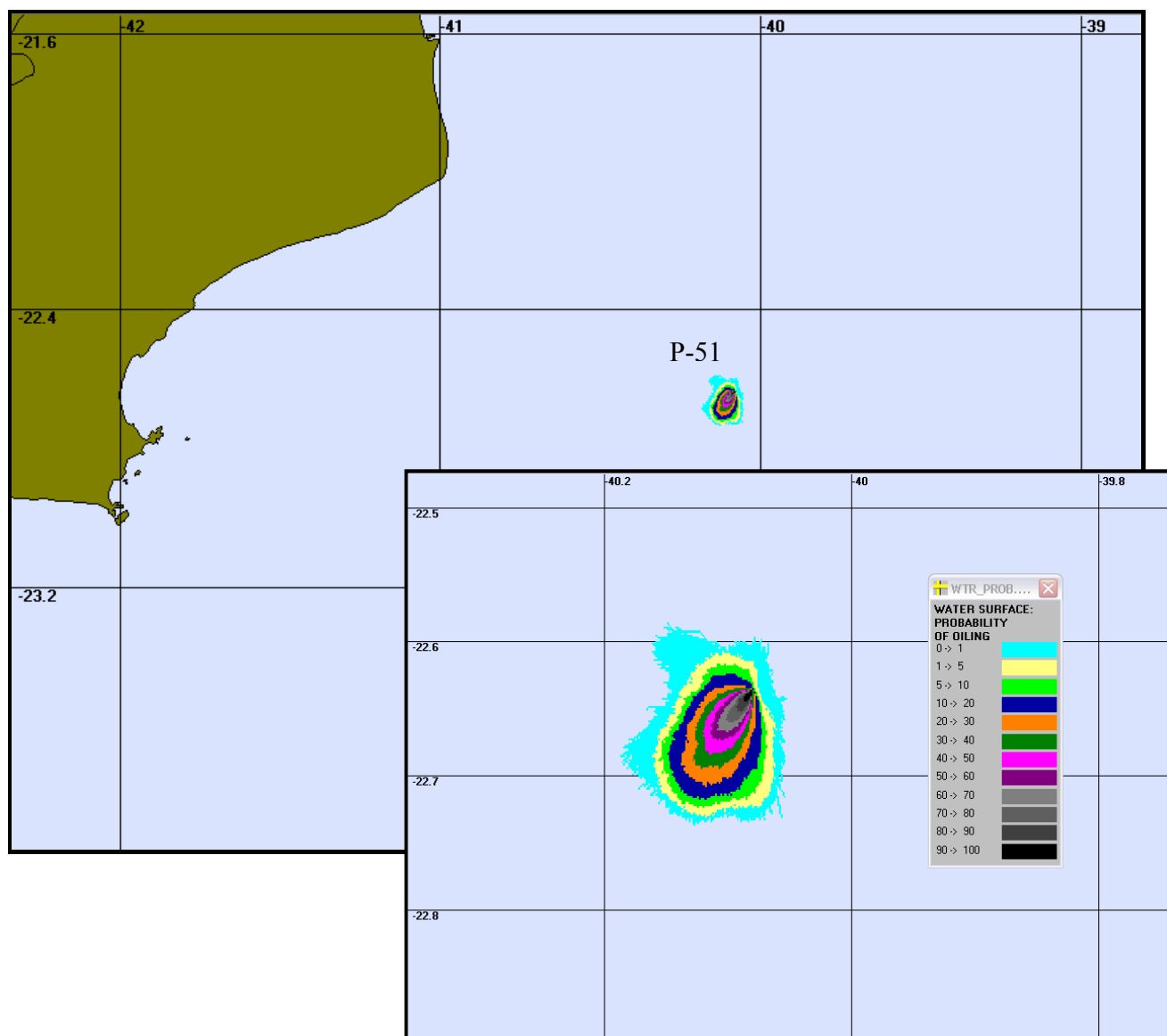


Figura 6 – Cenário P-51 INV 200 6HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de inverno (Maio a Setembro) com derrame de 200m³ após 6 horas.

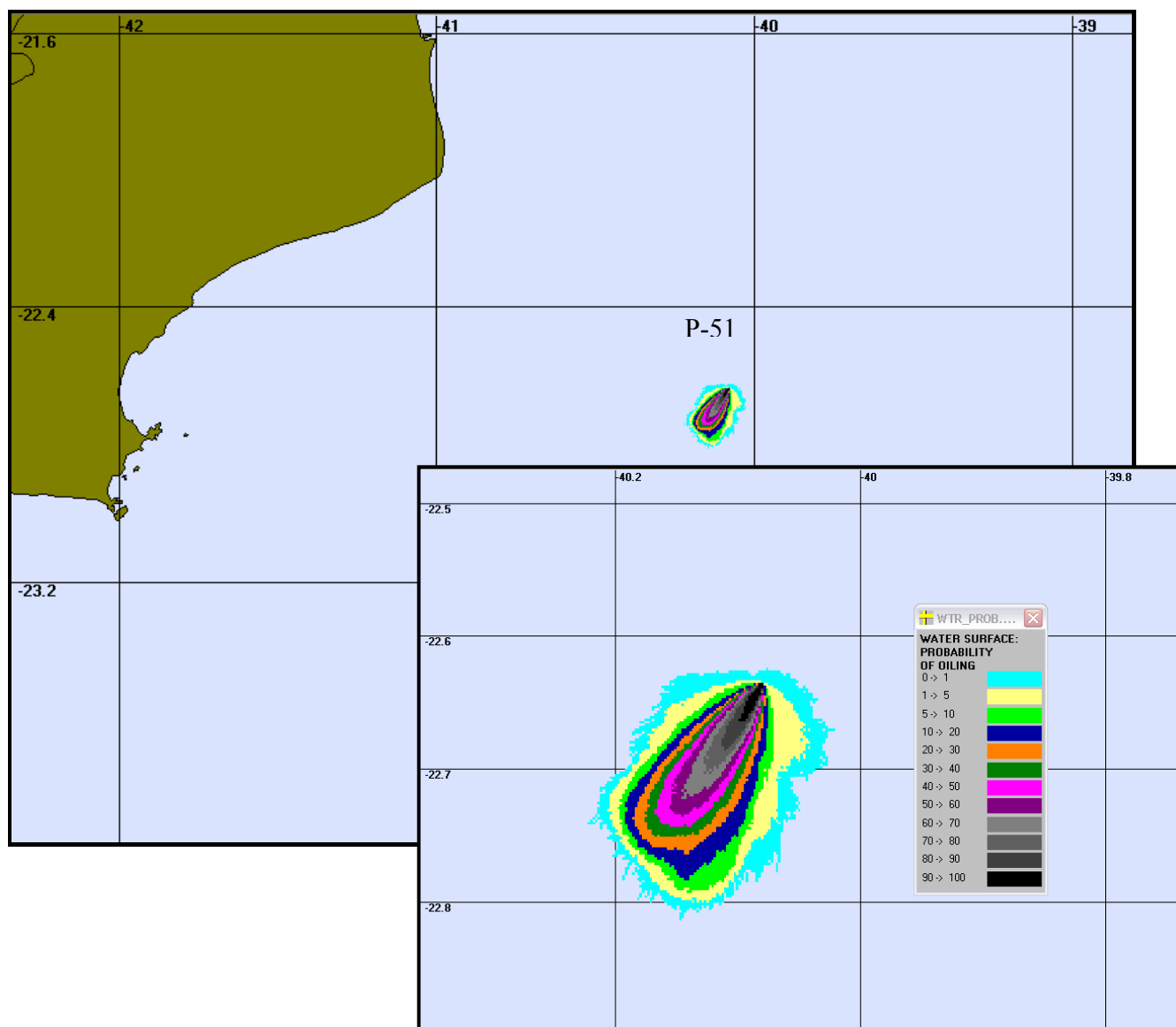


Figura 7 – Cenário P-51 VER 200 9HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de verão (Novembro a Fevereiro) com derrame de 200m³ após 9 horas.

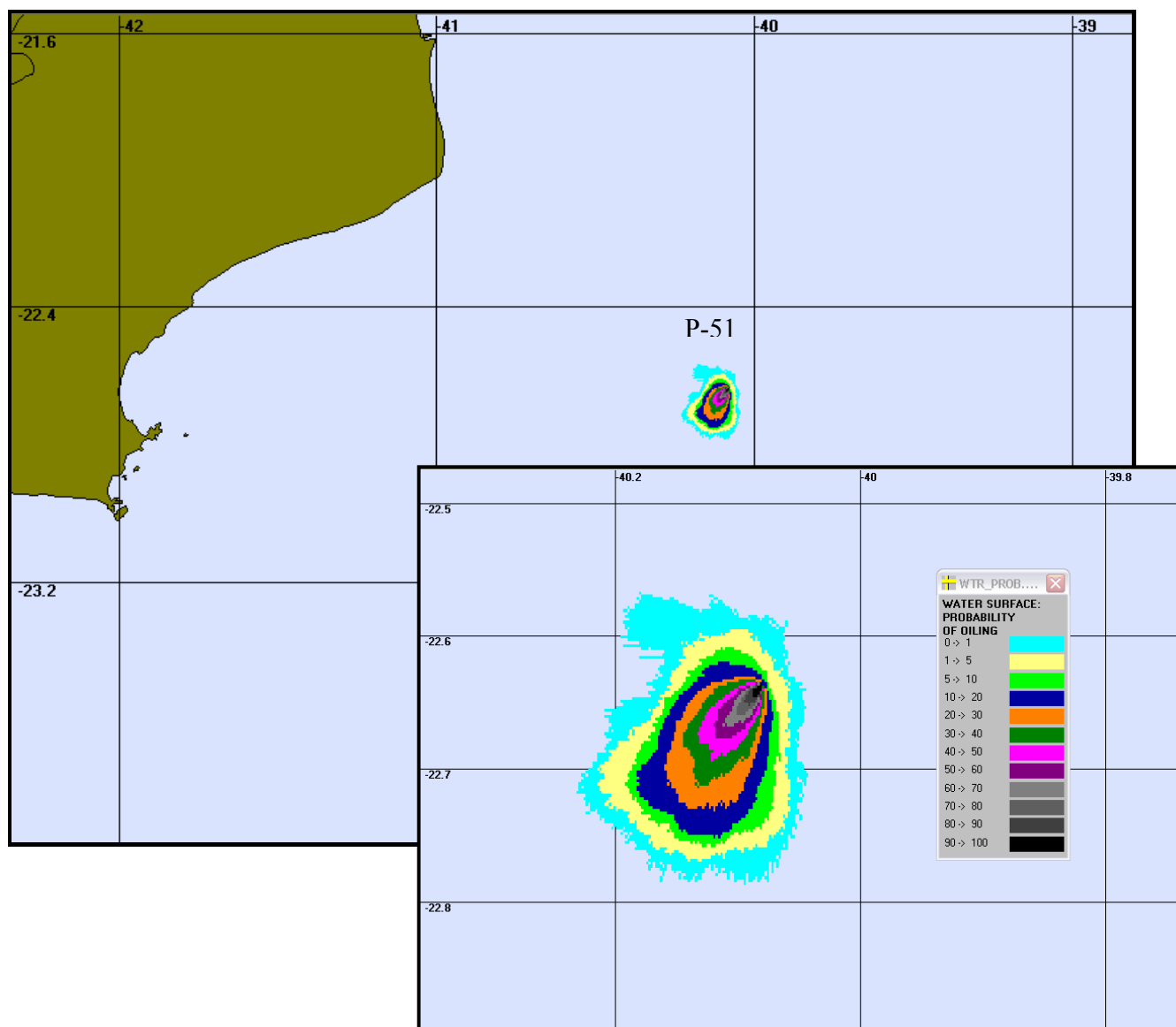


Figura 8 – Cenário P-51 INV 200 9HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de inverno (Maio a Setembro) com derrame de 200m³ após 9 horas.

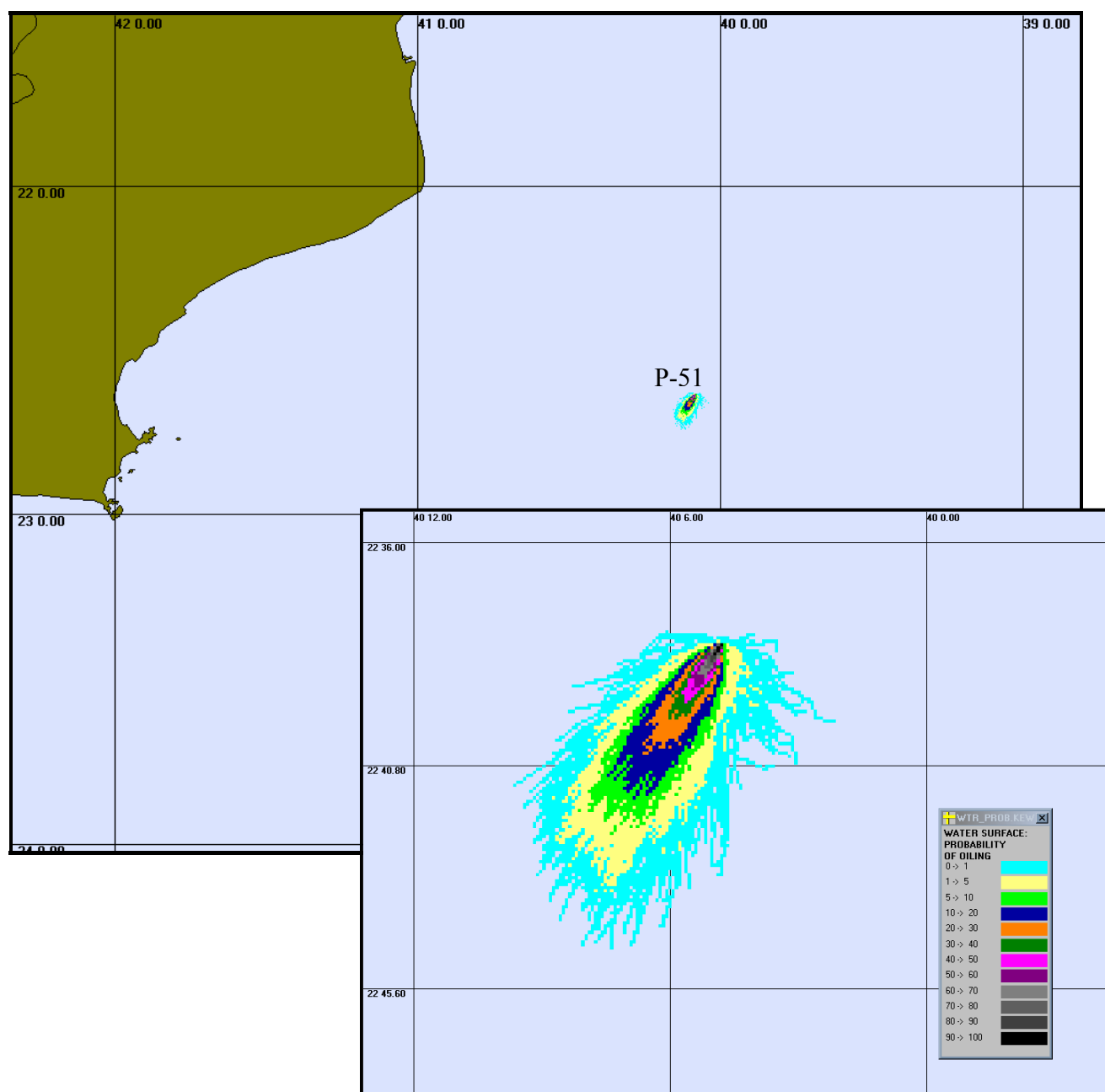


Figura 9 – Cenário P-51 VER PIORCASO 6HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de verão (Novembro a Fevereiro) com derrame de 168.826m^3 após 6 horas.

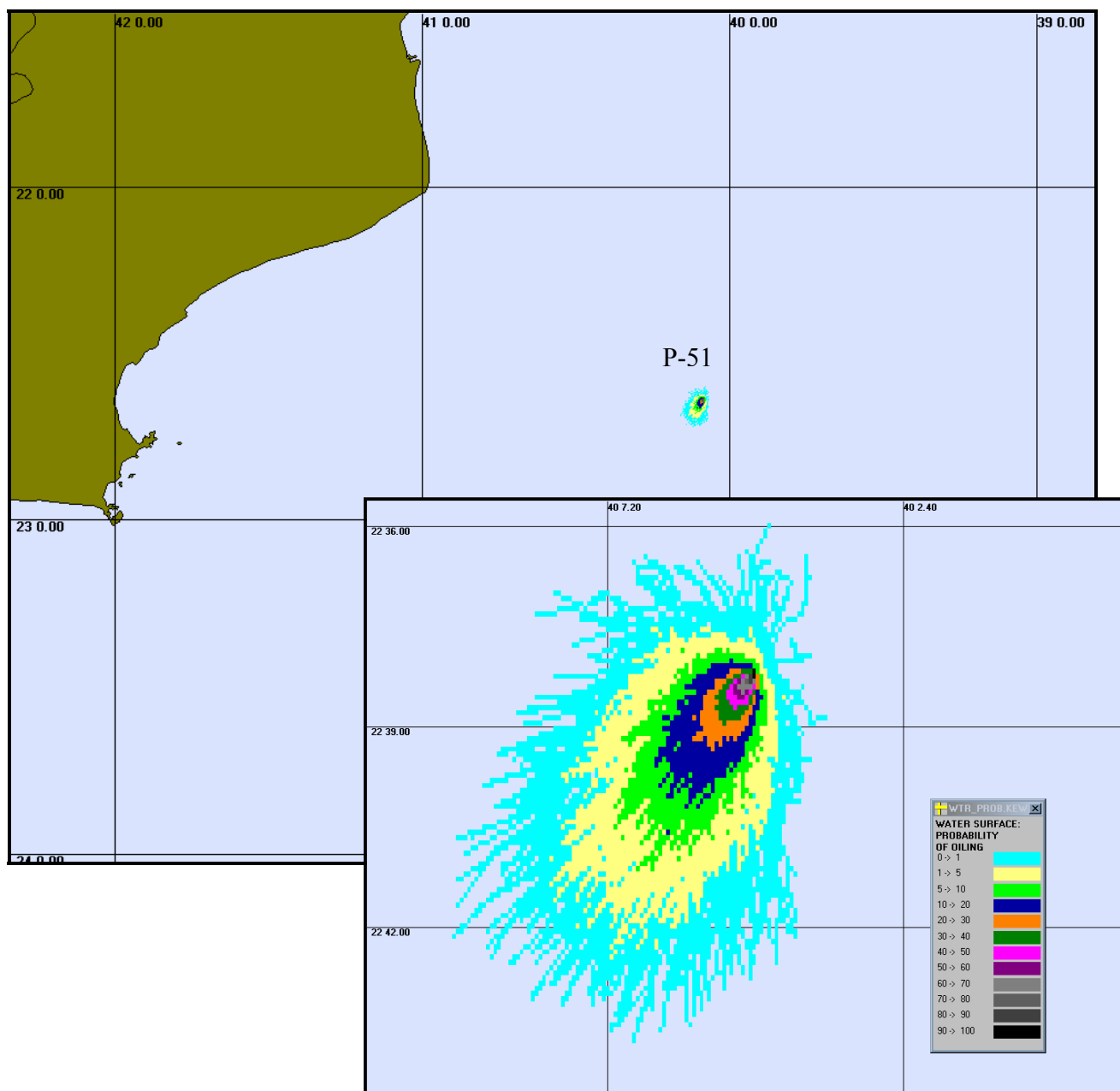


Figura 10 – Cenário P-51 INV PIORCASO 6HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de inverno (Maio a Setembro) com derrame de 168.826m^3 após 6 horas.

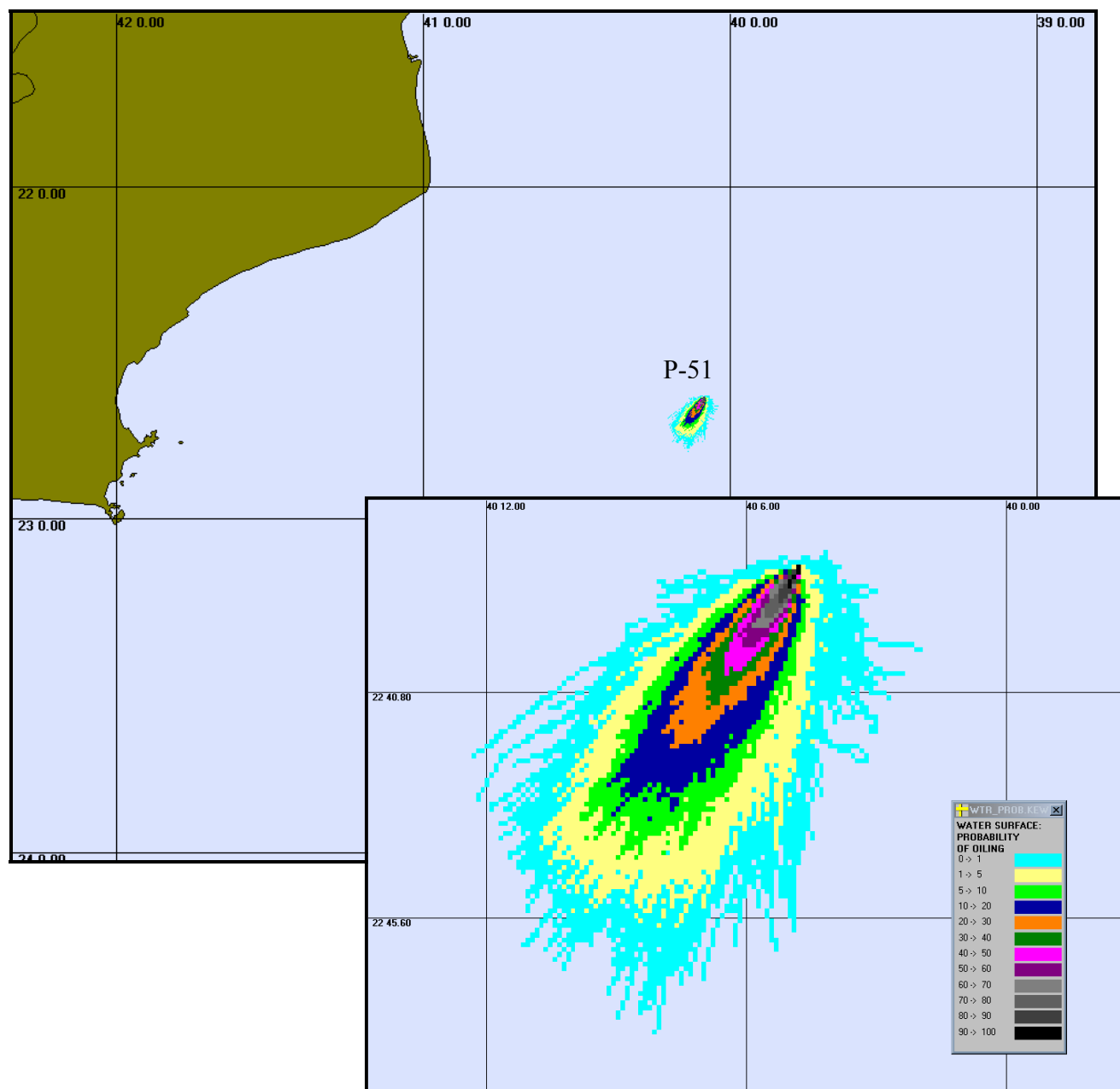


Figura 11 – Cenário P-51 VER PIORCASO 9HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de verão (Novembro a Fevereiro) com derrame de 168.826m^3 após 9 horas.

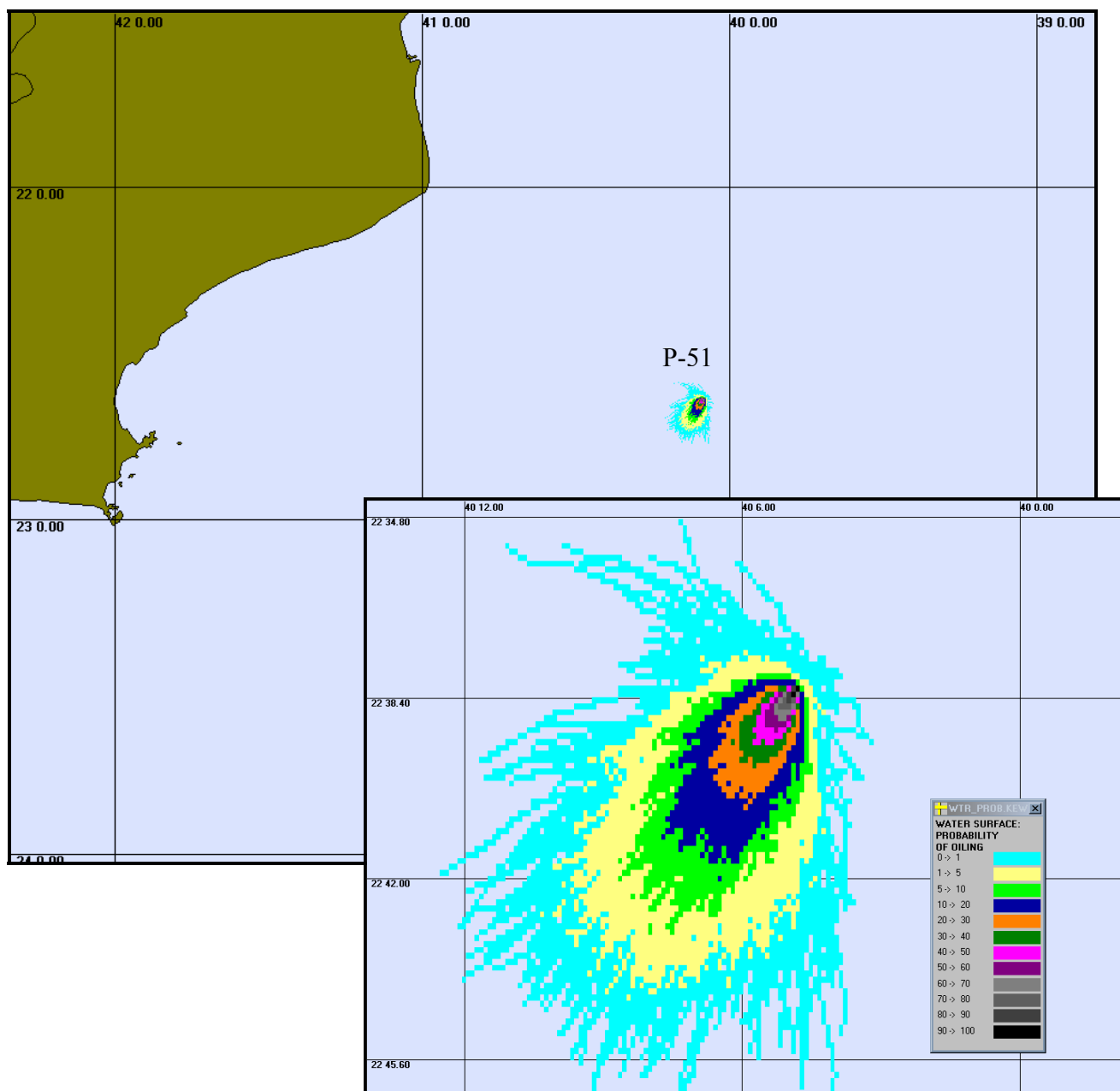


Figura 12 – Cenário P-51 INV PIORCASO 9HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de inverno (Maio a Setembro) com derrame de 168.826m^3 após 9 horas.

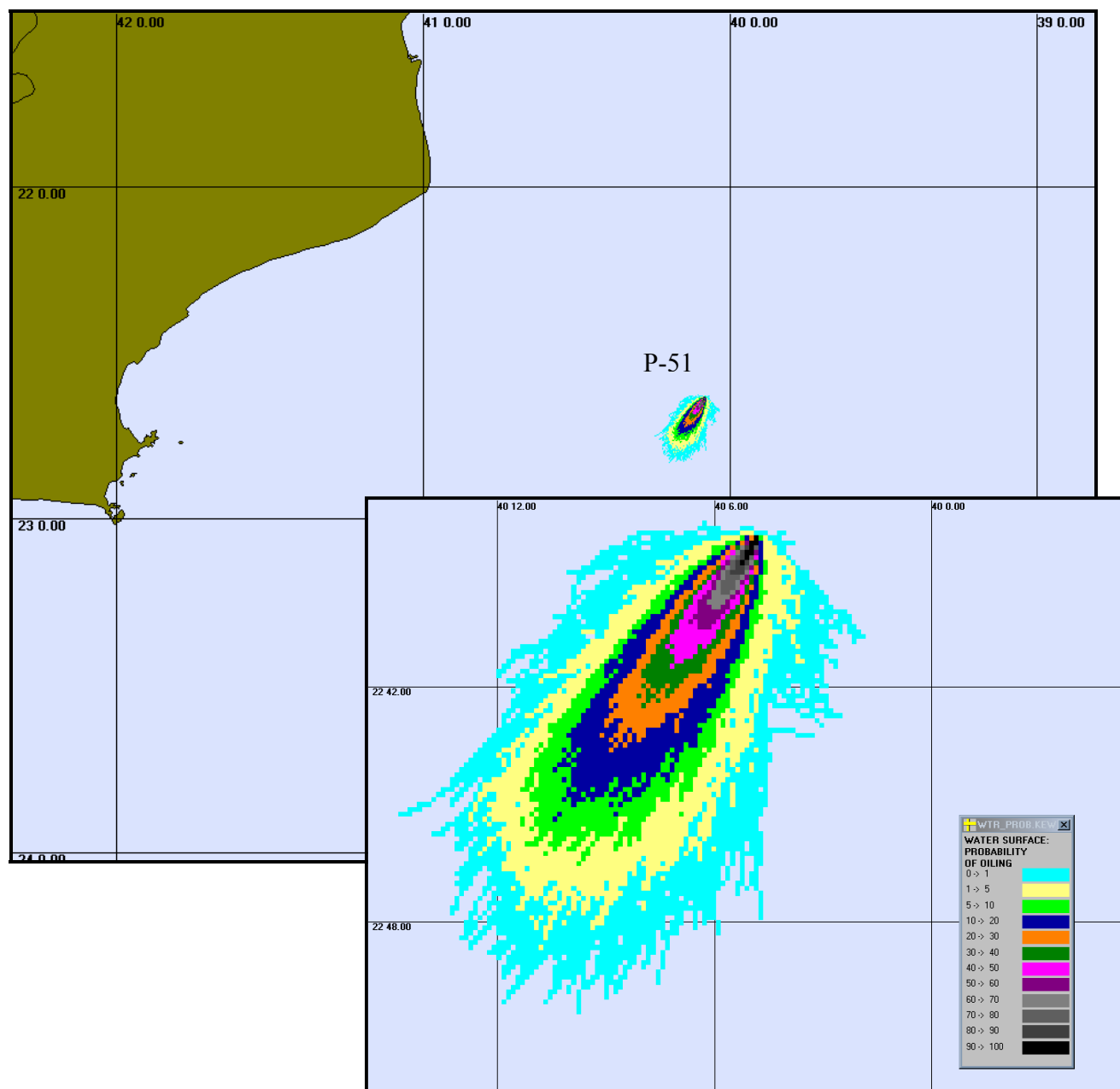


Figura 13 – Cenário P-51 VER PIORCASO 12HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de verão (Novembro a Fevereiro) com derrame de 168.826m^3 após 12 horas.

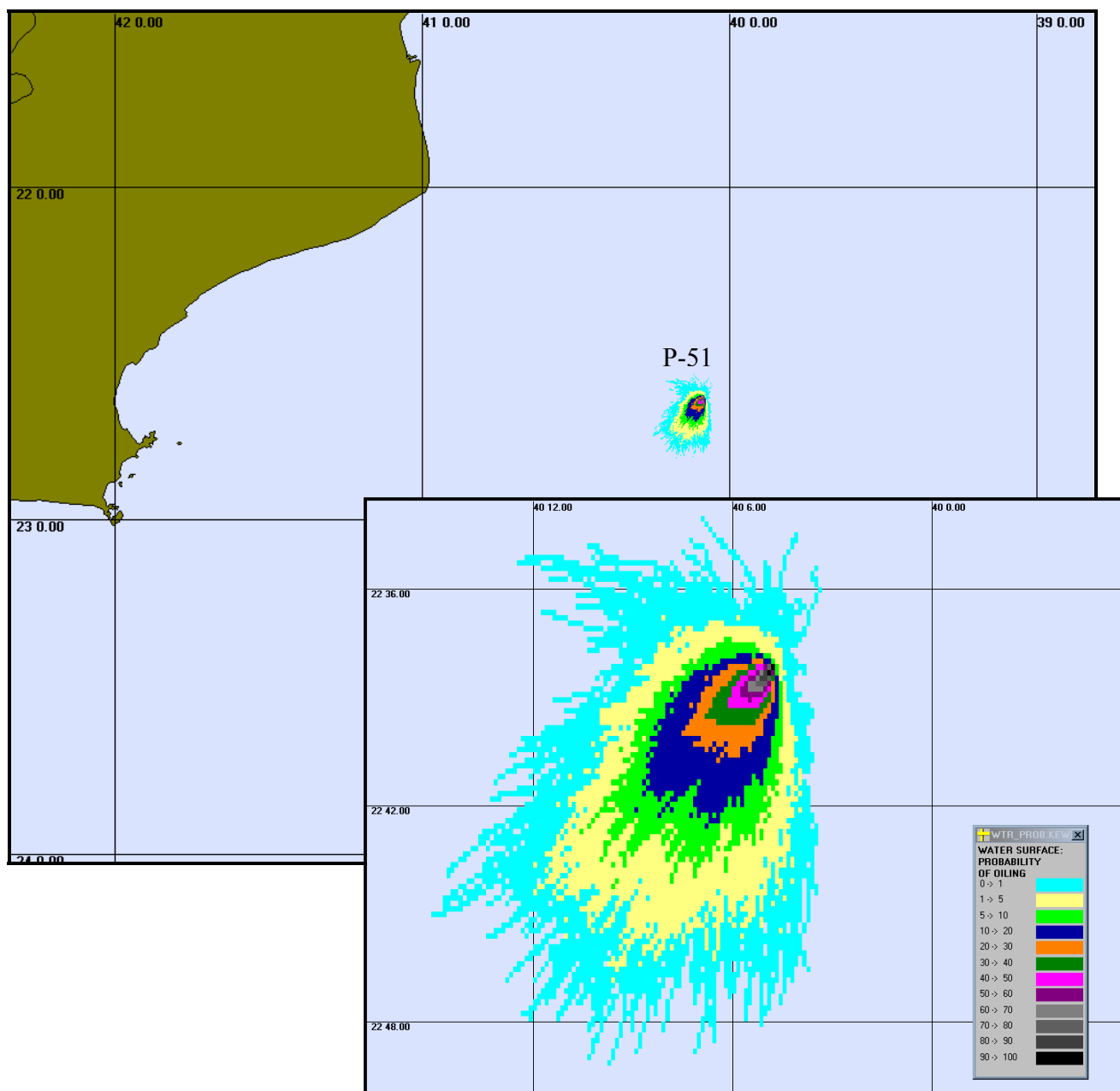


Figura 14 – Cenário P-51 INV PIORCASO 12HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de inverno (Maio a Setembro) com derrame de 168.826m^3 após 12 horas.

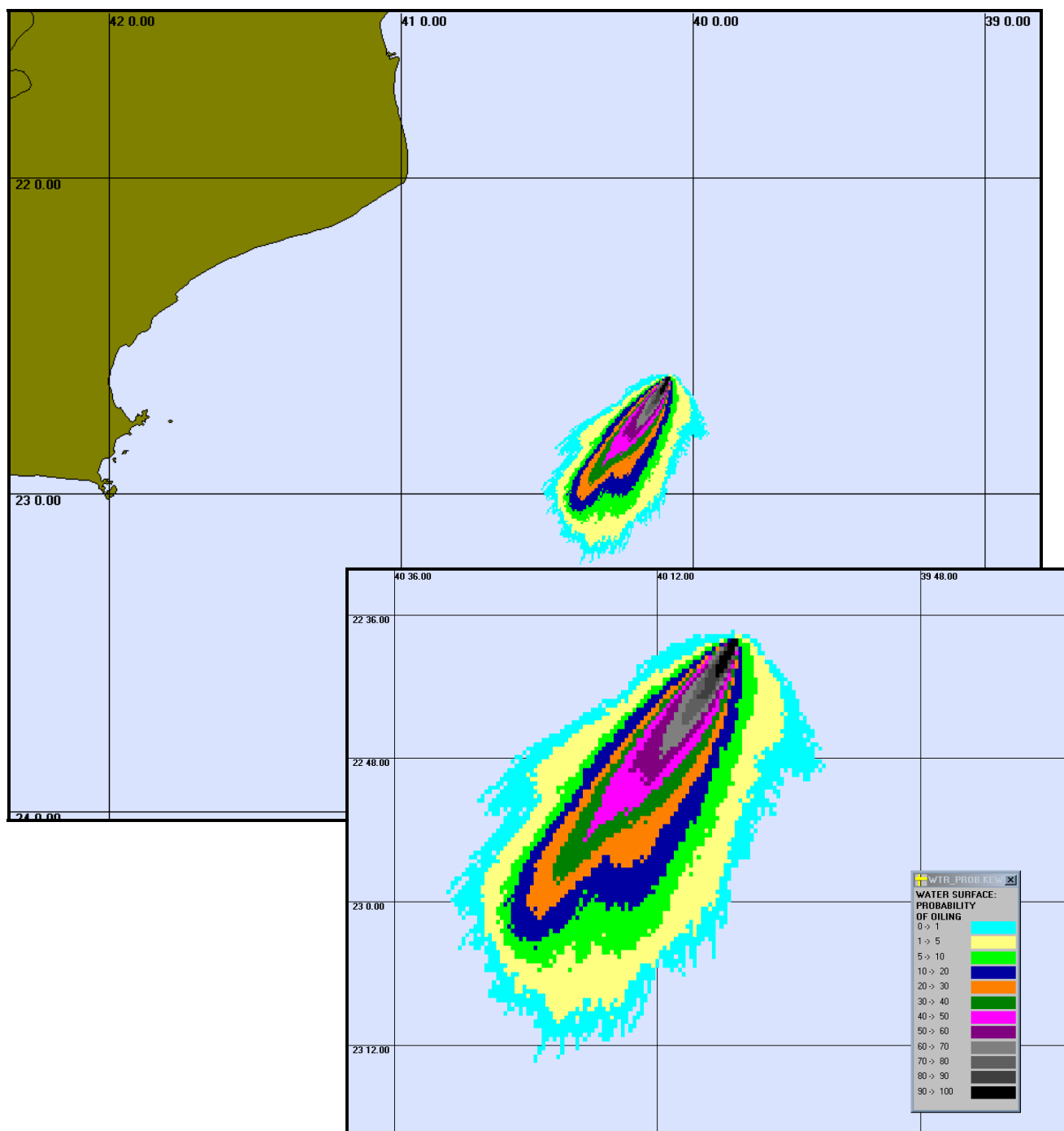


Figura 15 – Cenário P-51 VER PIORCASO 36HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de verão (Novembro a Fevereiro) com derrame de 168.826m^3 após 36 horas.

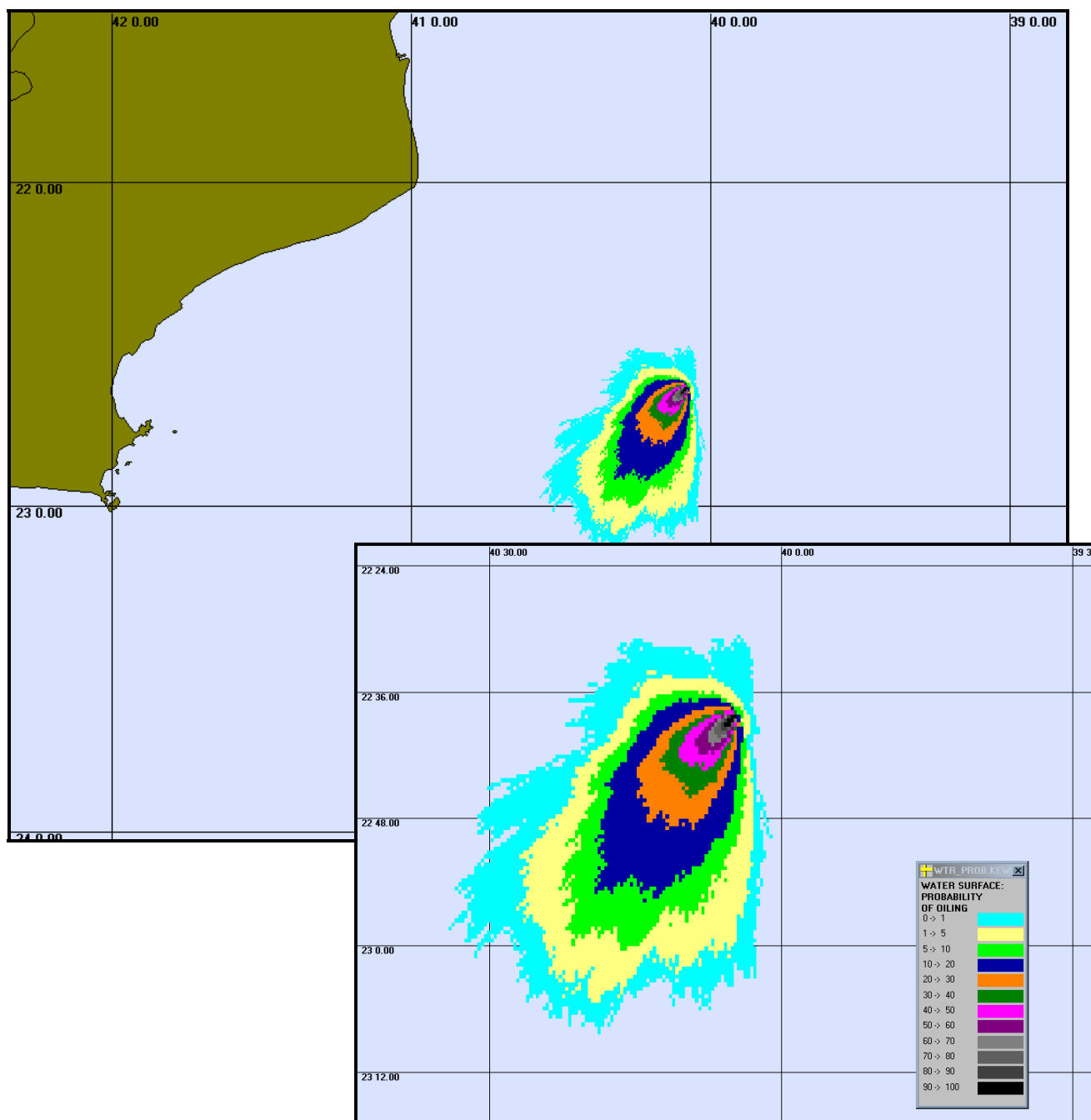


Figura 16 – Cenário P-51_INV_PIORCASO_36HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de inverno (Maio a Setembro) com derrame de 168.826m^3 após 36 horas.

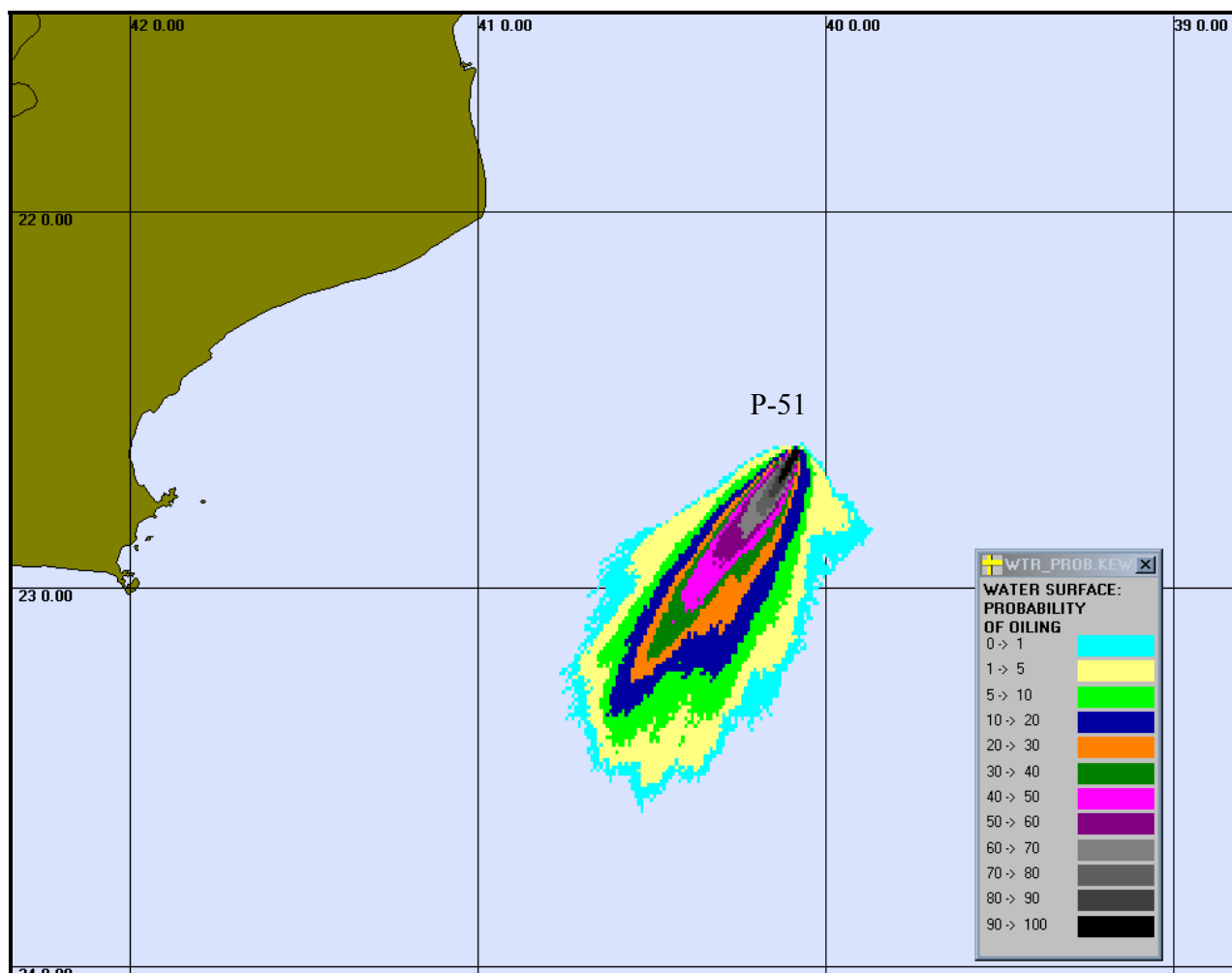


Figura 17 – Cenário P-51 VER PIORCASO 60HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de verão (Novembro a Fevereiro) com derrame de 168.826m^3 após 60 horas.

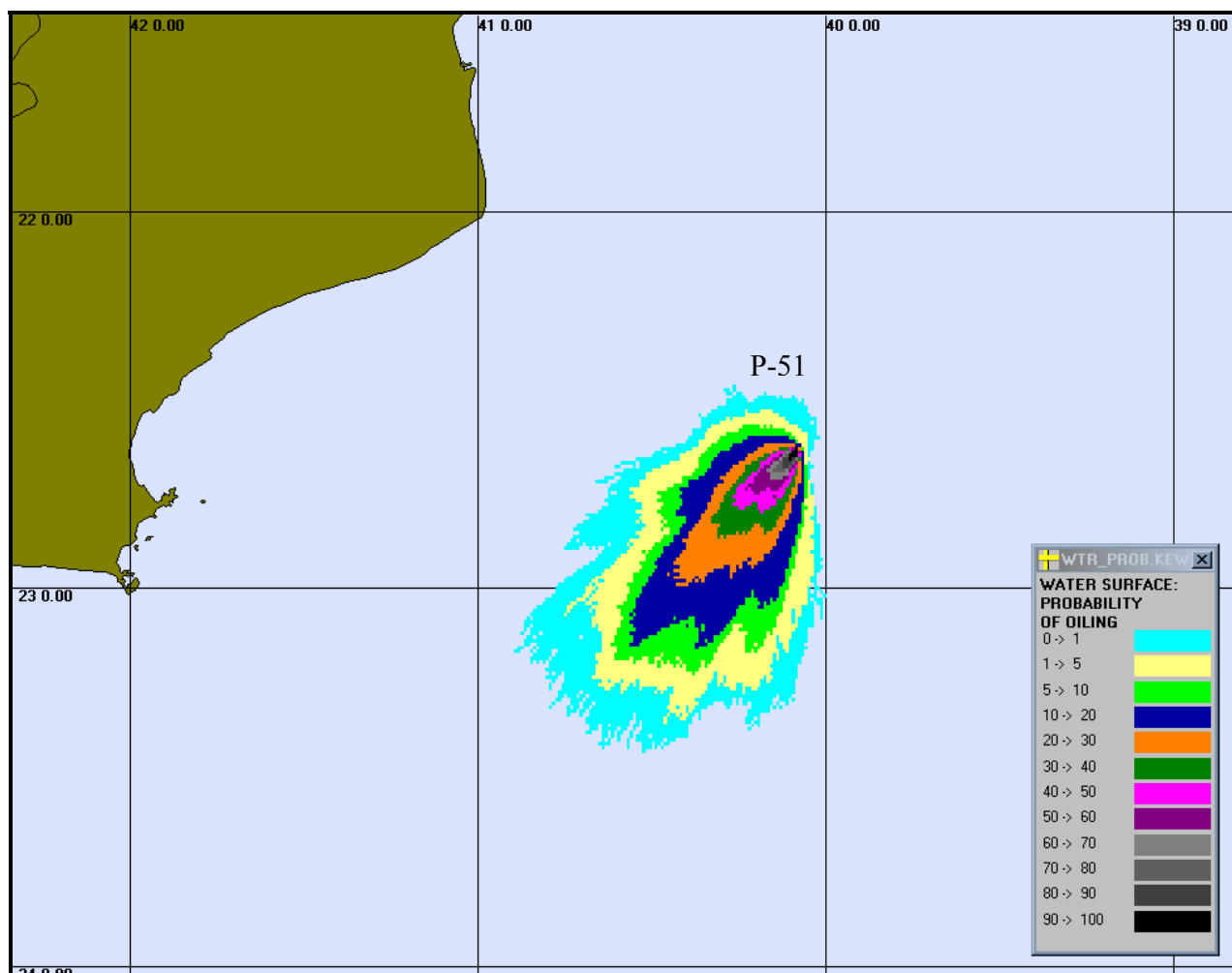


Figura 18 – Cenário P-51 INV PIORCASO 60HORAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de inverno (Maio a Setembro) com derrame de 168.826m^3 após 60 horas.

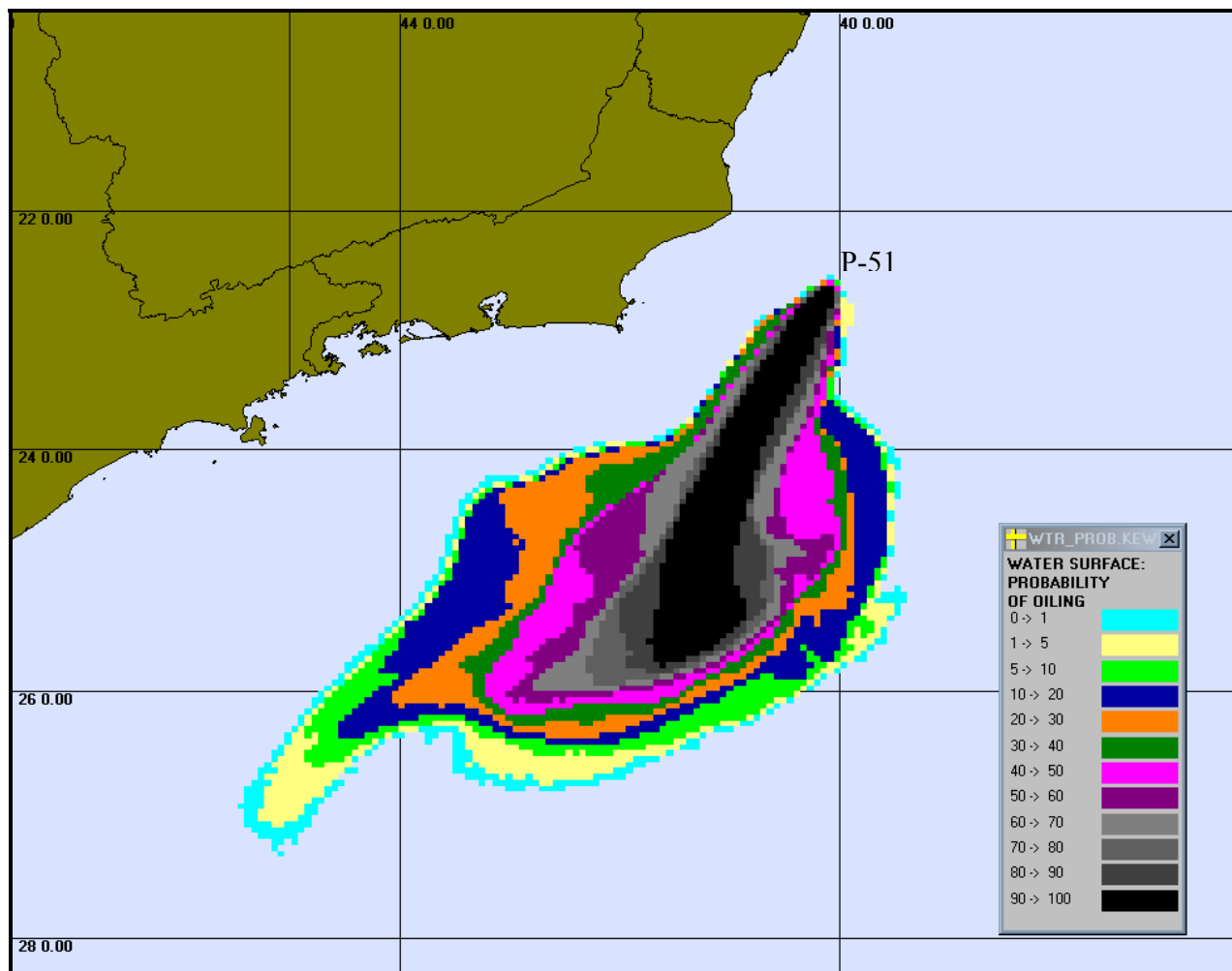


Figura 19 – Cenário P-51 VER PIORCASO 30DIAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de verão (Novembro a Fevereiro) com derrame de 168.826m^3 após 30 dias.

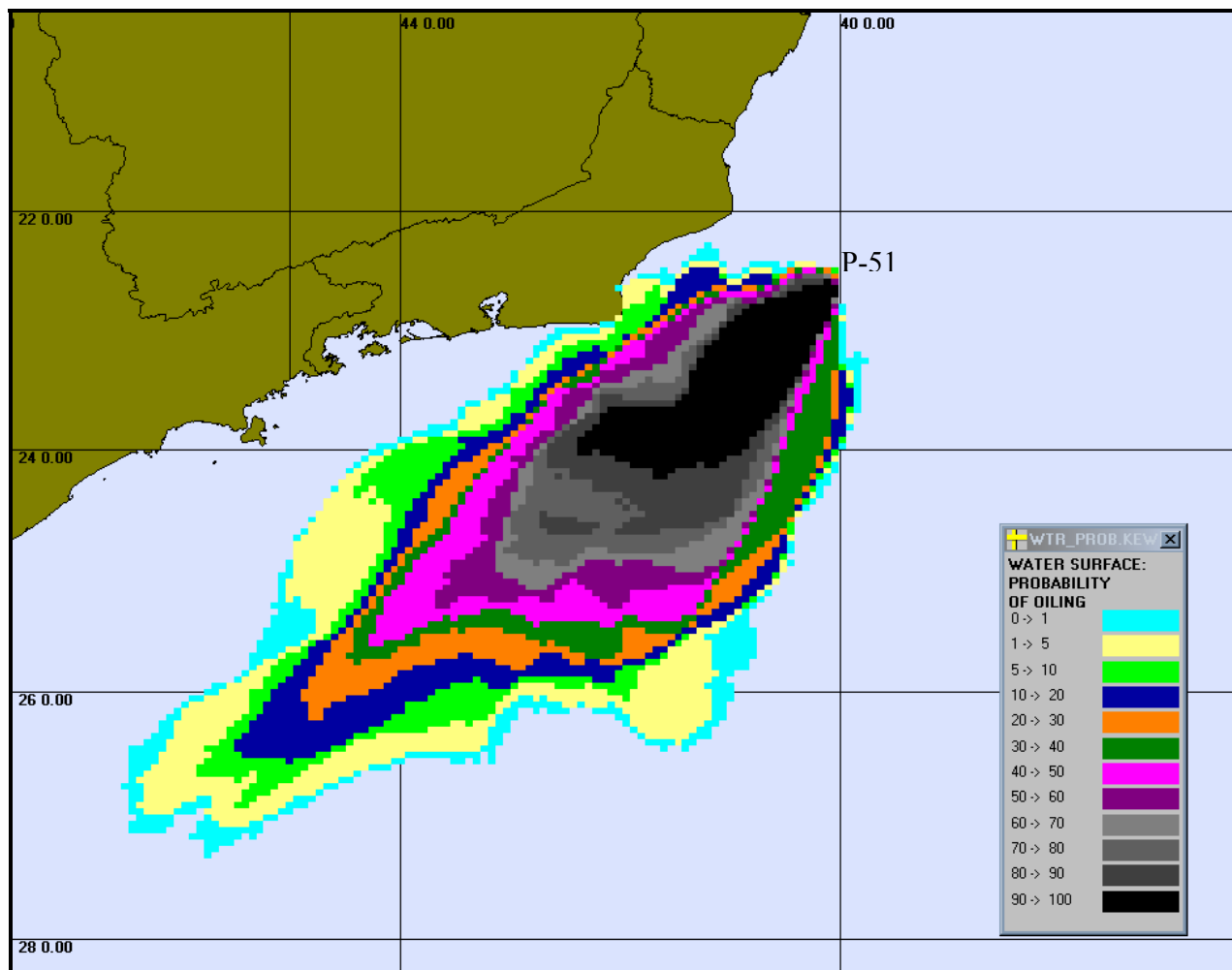


Figura 20 – Cenário P-51 INV PIORCASO 30DIAS. Contorno de probabilidades para um acidente ocorrendo na Plataforma P-51 durante os meses de inverno (Maio a Setembro) com derrame de 168.826m^3 após 30 dias.

A Figura 21 mostra os contornos de probabilidade de toque na linha de costa para o cenário de derrame de pior caso no inverno para a Plataforma P-51. Conforme mostra a figura, mesmo para o cenário catastrófico de derrames de 168.826m^3 em condições de inverno, a probabilidade da mancha atingir áreas específicas do litoral do Rio de Janeiro entre Arraial do Cabo (RJ) e o Cabo de Búzios (RJ) é igual ou inferior a 10%.

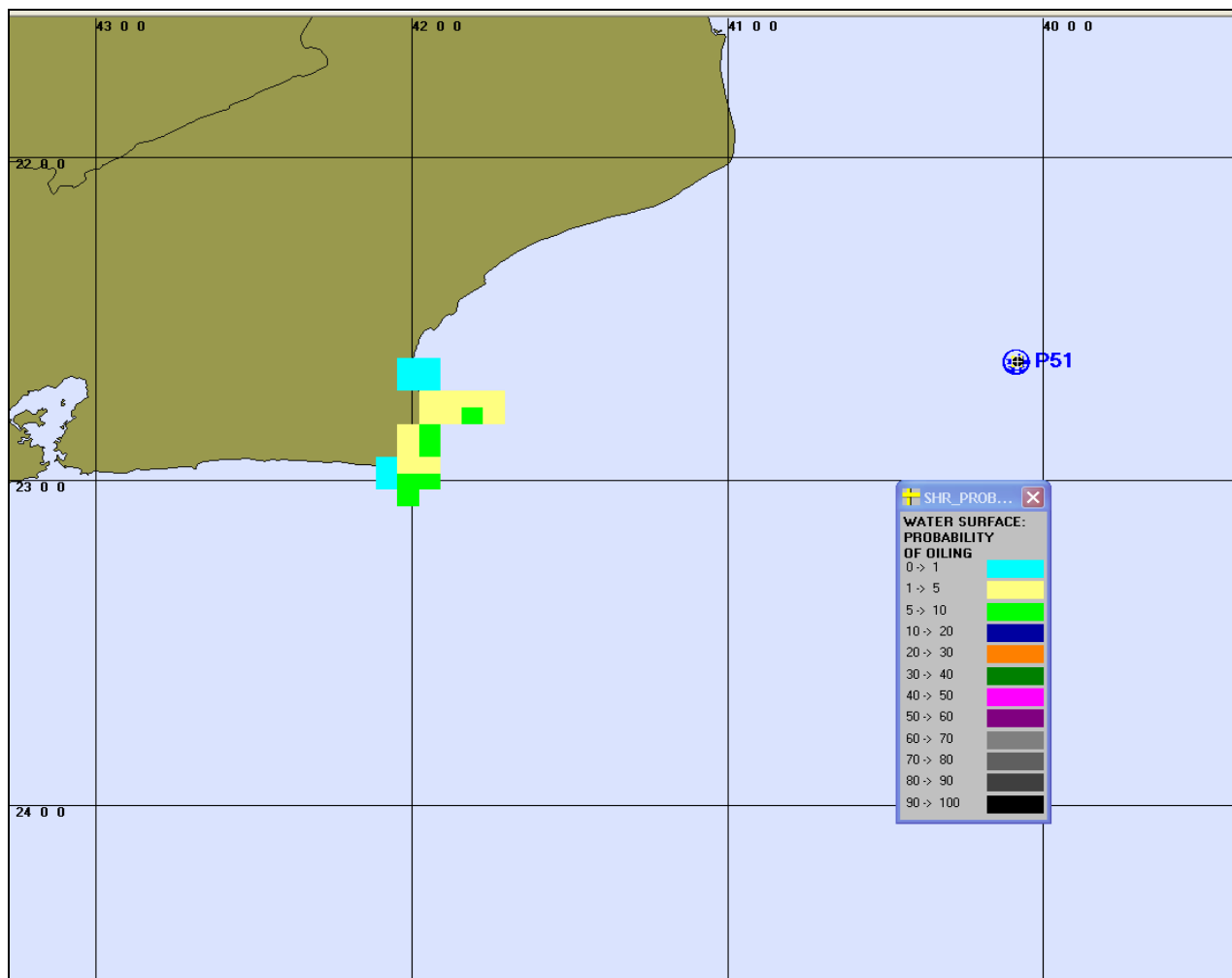


Figura 21 – Cenário P-51 INV PIORCASO 30DIAS. Contorno de probabilidades de toque na linha de costa no para um acidente ocorrendo durante os meses de inverno (Maio a Setembro).

No Anexo C, a Figura 21 é apresentada sobre a Carta Náutica DHN 1500, com a representação da área potencialmente afetada caso ocorra um acidente na P-51, em condições de inverno, com vazamento de 168.826 m³ em 30 (trinta) dias, correspondente à perda de controle do poço produtor de maior vazão.

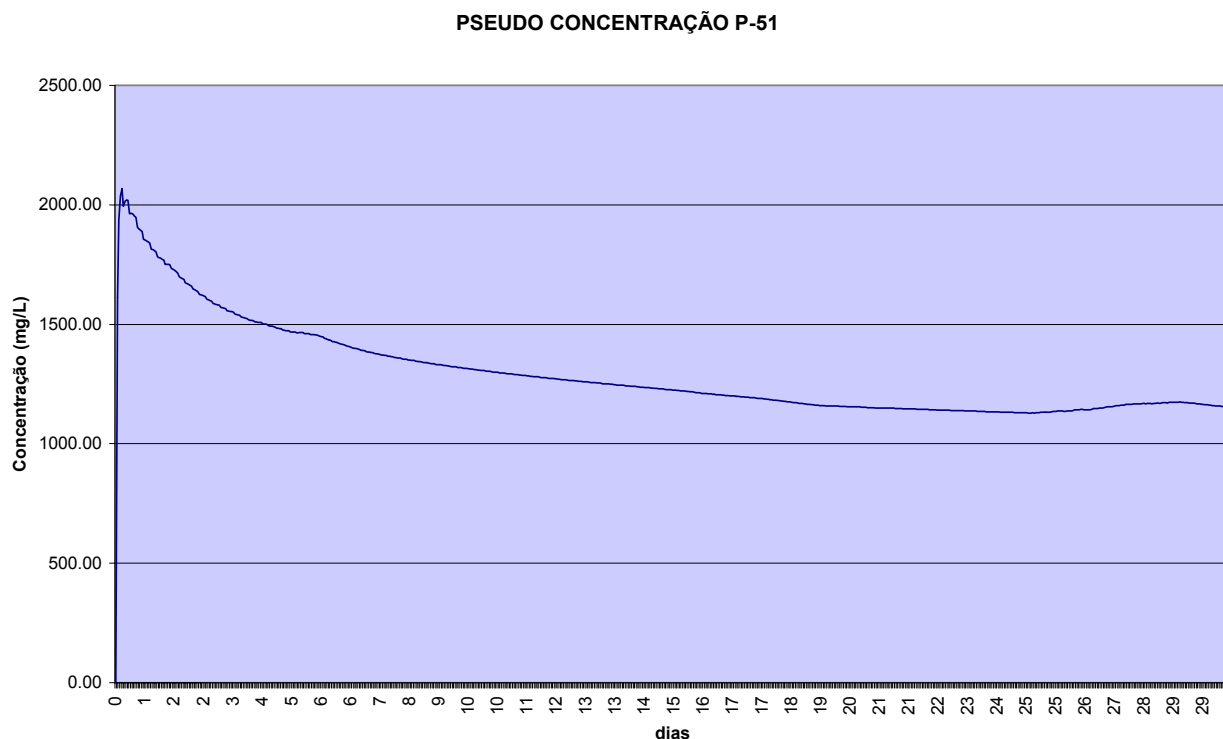


Figura 22 – Evolução temporal da pseudo-concentração da mancha para o cenário P-51 INV PIORCASO_30DIAS.

A Tabela 3 mostra para o cenário de pior caso para um acidente ocorrendo durante os meses de inverno (Maio a Setembro), 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.

Tabela 3. Resumo do resultado da modelagem probabilística de pior caso ocorrendo durante os meses de inverno (Maio a Setembro). (300 simulações)

Cenário	Tempo mínimo para atingir a costa (horas)	Tempo médio para atingir a costa (horas)	Percentagem de simulações com toque na costa
P-51_INV_PIORCASO_30DIAS	551	613,14	7

5.2 Cenários Determinísticos Críticos

A análise dos resultados das simulações probabilísticas permitiu identificar os cenários determinísticos críticos de verão e inverno. Para as simulações de inverno, foi considerado como mais crítico o cenário que levou o maior volume de óleo a costa. Para as simulações de verão, foi considerado como mais crítico o cenário no qual a mancha mais se aproxima da costa. Em ambos cenários foi considerado um vazamento de 168.826 m³.

A Tabela 4, a seguir, apresenta um resumo dos cenários críticos de verão e inverno para um caso de vazamento de petróleo a partir do poço produtor de maior vazão (B5-P5).

Tabela 4. Resumo dos cenários determinísticos críticos de verão e inverno para a plataforma P-51.

CENÁRIO	DATA DE INÍCIO	VOLUME QUE CHEGA À COSTA (M ³)	TEMPO PARA CHEGAR À COSTA (H)
VERÃO	28/02/1992 22:00	-	-
INVERNO	31/07/1992 20:00	7.474	585

A Figura 23 apresenta o resultado da simulação determinística do pior caso para inverno na plataforma P-51. Este cenário foi simulado por 30 dias, com a trajetória por onde percorreu a mancha demarcada na cor verde. A figura também mostra, em vermelho, os pontos de costa atingidos pelo acidente, o contorno de espessura da mancha ao final de 30 dias, e um quadro na parte superior esquerda mostrando o balanço de massa (óleo na superfície, na costa, evaporado, e na coluna d'água).

A Figura 24 mostra a posição da mancha no instante do primeiro toque na costa, após 24 dias e 09 horas. A área total da mancha neste instante é de aproximadamente 10.857 km², e como mostra o quadro de balanço de massa, 112.521 m³ de óleo se encontram na superfície, 63 m³ na costa, 22.009 m³ evaporaram, e 2.056 m³ encontram-se na coluna d'água.

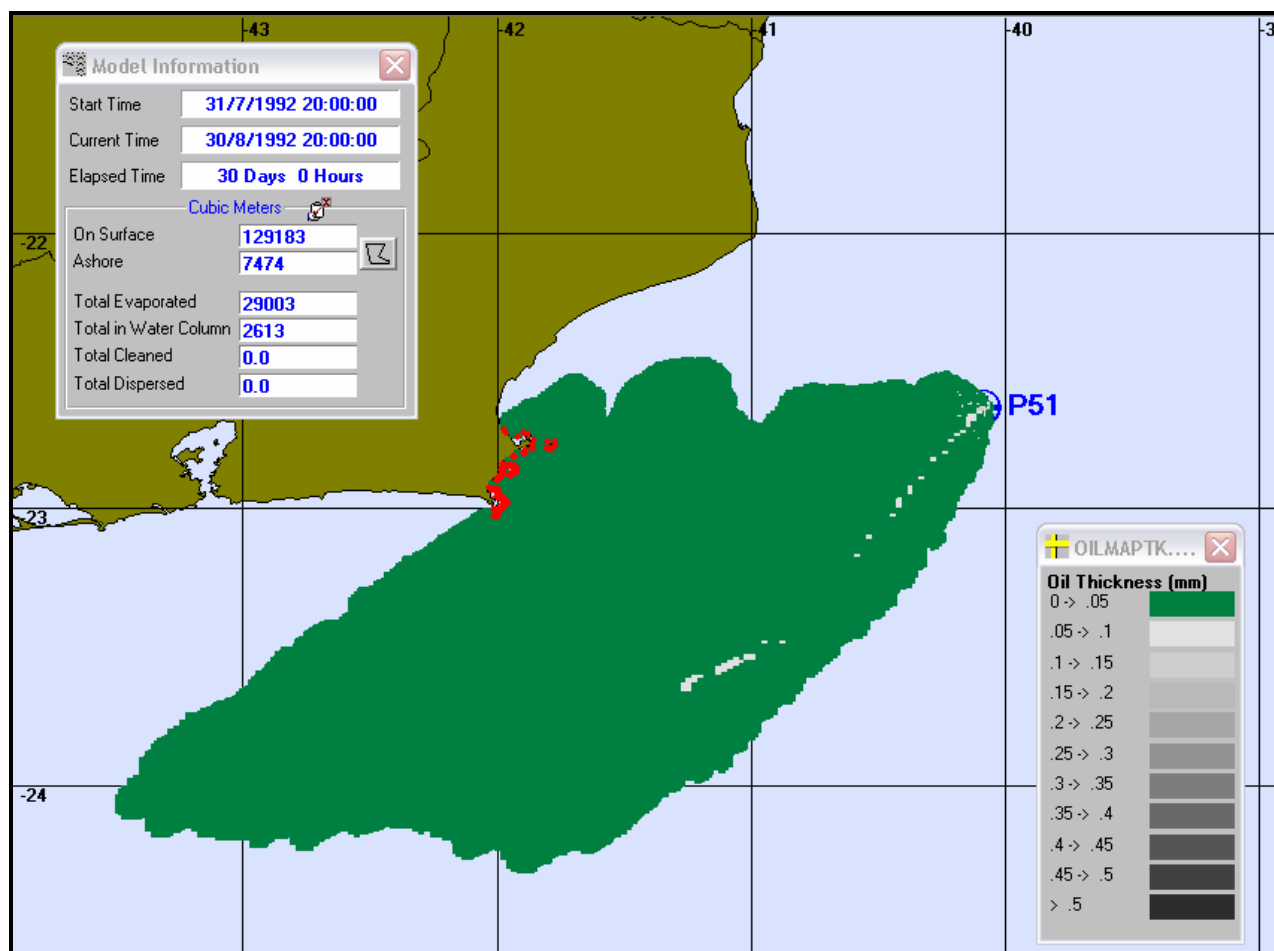


Figura 23 – Cenário de pior caso de vazamento no inverno para a plataforma P-51

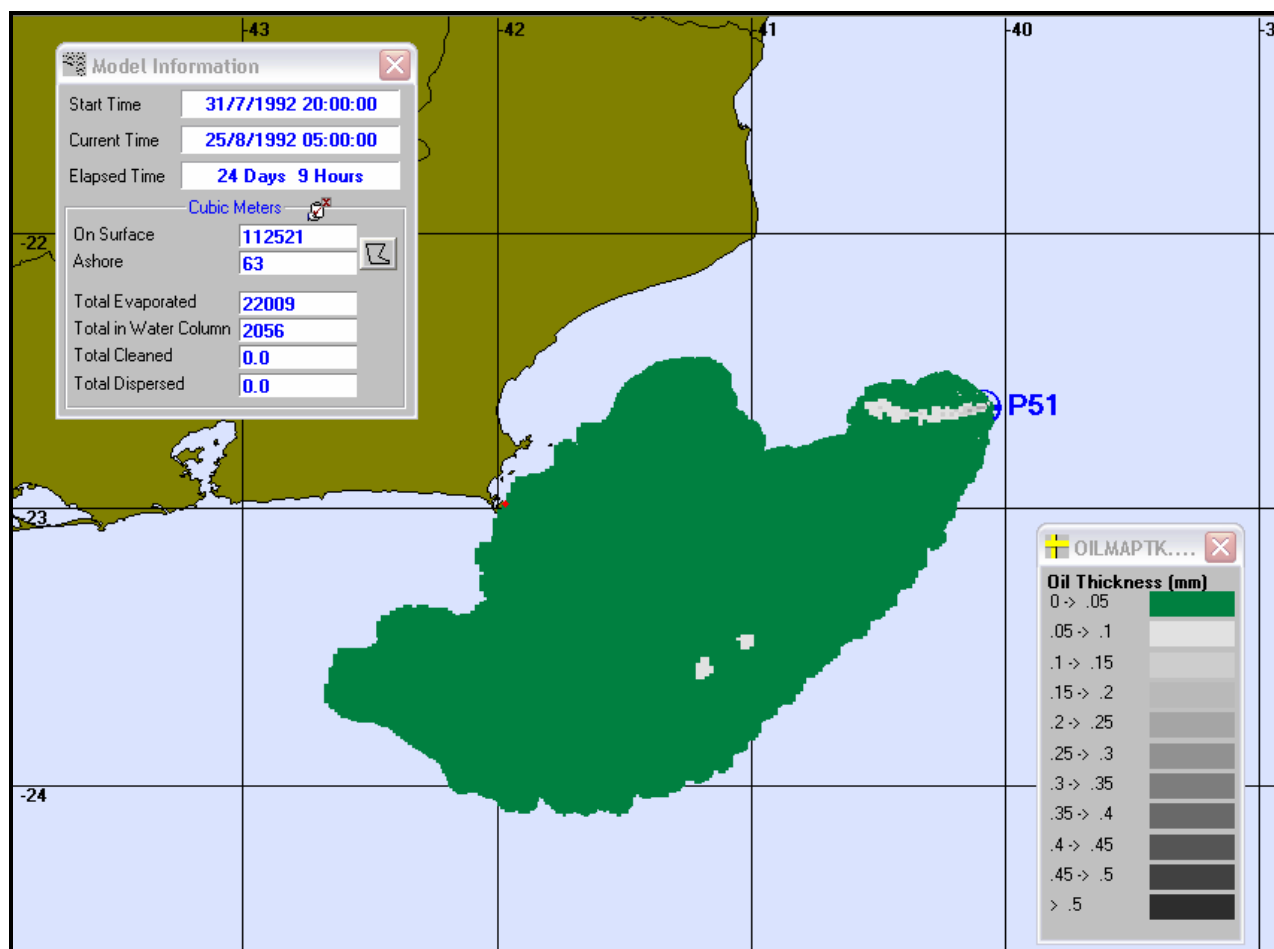


Figura 24 – Instante do primeiro toque na costa para o cenário de pior caso de vazamento no inverno para a plataforma P-51.

De forma semelhante, a Figura 25 apresenta o resultado da simulação determinística para o pior caso de vazamento para verão na plataforma P-51. A menor distância que a mancha alcança da costa é de 100 km a partir da Ilha de Cabo Frio em 6 dias e 9 horas.

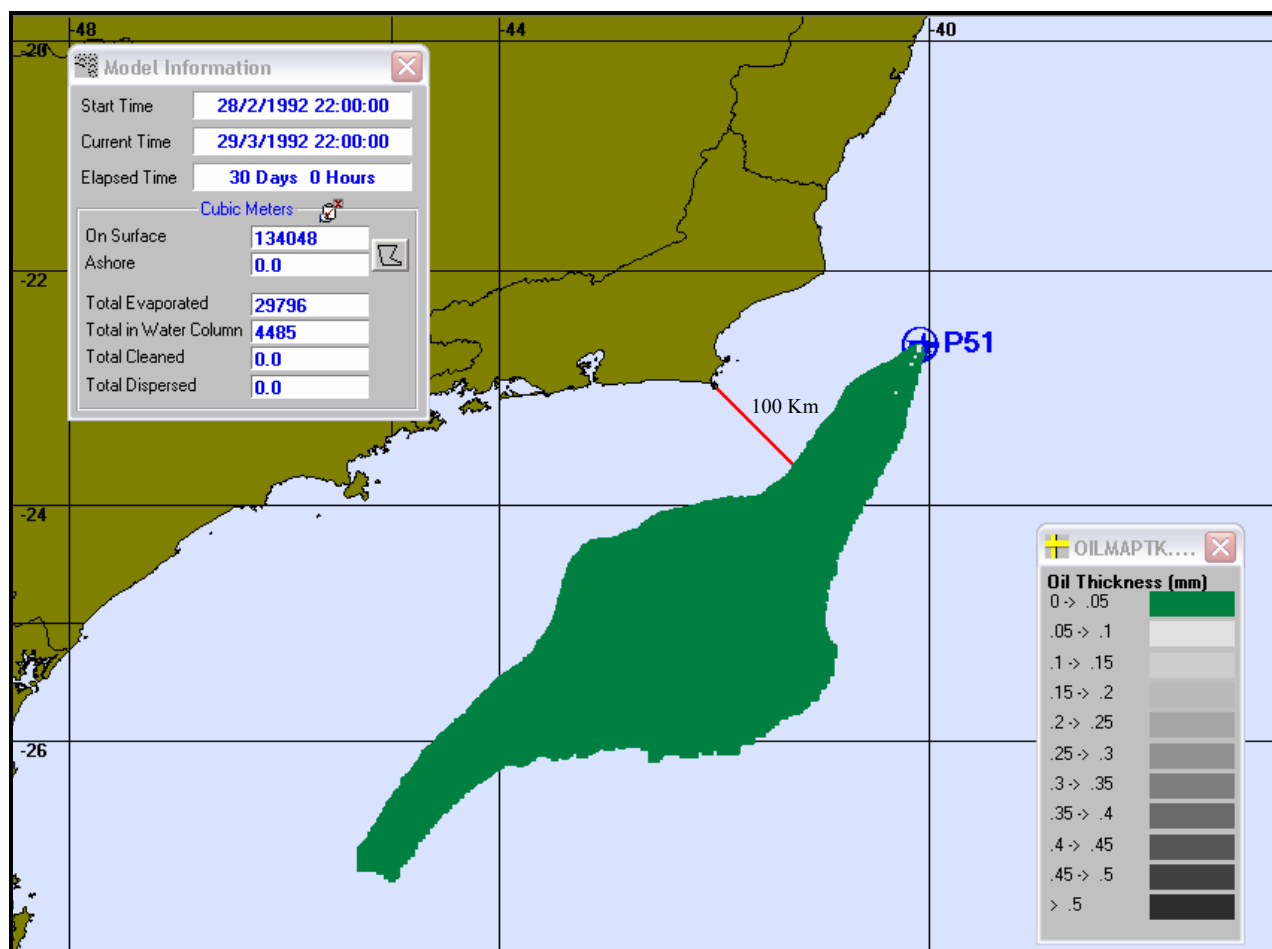


Figura 25 – Cenário de pior caso de vazamento no verão para a plataforma P-51

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEA Technology plc, 2000 Environmental Behaviour and Dispersibility of Kashagan Crude, December, 2000.
- Applied Science Associates, Inc. (ASA), 2000. Internal comparison study of NOAA/NCEP atmospheric model predictions with Trinidad airport wind record.
- Applied Science Associates, Inc.(ASA) , 1998. Final report for ASA 97-136.
- Applied Science Associates, Inc.(ASA) , 1997. OILMAP users manual Applied Science Associates, Inc., Narragansett, RI..
- Applied Science Associates, Inc. (ASA), 1996. Technical Manual for Spill Impact Modeling (SIMAP), Version W1.0, Applied Science Associates, Inc., Narragansett, RI.
- 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. 11:209-251.
- Delvigne, G.A.L., and L.J.M. Hulsen, 1994. Simplified laboratory measurement of oil dispersion coefficient – Application in computations of natural oil dispersion. Proceedings of the Seventeenth Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar, June 8-10, 1994, Vancouver, BC Canada, pp. 173-187.
- Delvigne, G.A.L., and C.E. Sweeney. 1988. Natural dispersion of oil. Oil & Chemical Pollution 4 (1988) 281-310.
- Evans, D. L and Signorini, S. R. 1985. Vertical structure of the Brazil Current. Nature, 315, pp. 48-50.
- Fingas, M. F., 1995. A literature review of the physics and predictive modeling of oil spill evaporation. Journal of Hazardous Materials, 42, pp 157-175.
- Fingas, M. F., 1998. The chemistry and physics of oil behavior at sea: weathering and incorporation into spill models. Australian U.N. Workshop.
- Fingas, M. F., 2001a. The evaporation of oil spills: development and implementation of new prediction methodology. In Oil Spill Modelling Process, WIT Press, Boston, pp 109-138.
- Fingas, M. F., 2001b. The basics of oil spill cleanup. Edited by Jennifer Charles, 2nd edition. Lewis Publishers.
- Fingas, M. F., Fieldhouse, B. Lambert, P. et al., 2002. Water-in-oil emulsions formed at sea, in test tanks, and the laboratory. Report Series No. EE-170. Environmental Technology Advancement Directorate, Environmental Protection Service, Emergencies Science and Technology Division, Environmental Technology Center.
- French, D. E. Howlett, and D. Mendelsohn, 1994. Oil and Chemical impact model system description and application, 17th Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar, June 8-10, 1994, Vancouver, British Columbia, Canada, pp 767-784.

- Jayko, K. And E. Howlett, 1992. OILMAP an interactive oil spill model, OCEANS 92, October 22-26, 1992, Newport, RI.
- Kirstein, B., J. R. Clayton, C. Clary, J. R. Payne, D. McNabb, G. Fauna, and R. Redding, 1985. Integration of suspended particulate matter and oil transportation study, Mineral Management Service, Anchorage, Alaska.
- Kolluru, V., M. L. Spaulding, and E. Anderson, 1994. A three dimensional subsurface oil dispersion model using a particle based technique, 17th Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar, June 8-10, 1994, Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 767-784.
- 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.
- Mackay, D., S. Paterson, and K. Trudel, 1980. A mathematical model of oil spill behavior, Department of Chemical Engineering, University of Toronto, Canada, 39 pp.
- Mackay, D., W. Shui, K. Houssain, W. Stiver, D. McCurdy, and S. Paterson, 1982. Development and calibration of an oil spill behavior model, Report No. CG-D027-83, US Coast Guard Research and Development Center, Groton, CT.
- Reed, M., E. Gundlach, and T. Kana, 1989. A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies, Oil and Chemical Pollution, Vol. 5, p. 411-449.
- 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, 481-490.
- Spaulding, M. L., E. Howlett, E. Anderson, and K. Jayko, 1992a. OILMAP a global approach to spill modeling. 15th Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar, June 9-11, 1992, Edmonton, Alberta, Canada, p. 15-21.
- Spaulding M. L., E. Holwett, E. Anderson, and K. Jayko, 1992b. Oil spill software with a shell approach. Sea Technology, April 1992. P. 33-40.
- Spaulding, M.L., E.L. Anderson, T. Isaji and E. Howlett, 1993. Simulation of the oil trajectory and fate in the Arabian Gulf from the Mina Al Ahmadi Spill, Marine Environmental Research, Vol. 36, No. 2, p. 79-115.
- Spaulding, M. L., V. S. Kolluru, E. Anderson, and E. Howlett, 1994. Application of three dimensional oil spill model (WOSM/OILMAP) to hindcast the Braer spill, Spill Science and Technology Bulletin, Vol. 1., No. 1, 23-35.
- Spaulding, M. L., T. Opishinski, E. Anderson, E. Howlett, and D. Mendelsohn, 1996a. Application of OILMAP and SIMAP to predict the transport and fate of the North Cape spill, Narragansett, RI. 19th Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar, June 12-14, 1996, Calgary, Alberta, Canada, p. 745-776.
- Spaulding, M. L., T. Opishinski, and S. Haynes, 1996b. COASTMAP: An integrated monitoring and modeling system to support oil spill response, Spill Science and Technology Bulletin, Vol. 3, No. 3, pp. 149-169.

ANEXO A

O modelo OILMAP, desenvolvido pela Applied Science Associates, Inc. (ASA), representa o estado da arte em modelagem computacional para acompanhamento e previsão do deslocamento e transformações químicas (“trajectory and fates”) de qualquer tipo de óleo derramado em acidentes com petróleo. OILMAP é um sistema de modelos, baseados em plataforma PC, que pode ser utilizado em Planos de Contingência, Planos de Emergência com acompanhamento em tempo real, Relatório de Controle Ambiental (RCA), e ou Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) em qualquer região do mundo (Jayko and Howlett, 1992; Spaulding et al 1992a,b).

O OILMAP foi projetado em uma configuração modular, de forma que diferentes tipos de modelos de derramamento, bem como um conjunto de ferramentas sofisticadas de dados ambientais, podem ser acoplados dependendo do problema e situação em estudo. Como o sistema utiliza uma interface gráfica desenvolvida para ambiente Windows, as diferentes configurações são acopladas em menus visuais, que são acionados a partir de simples toques do mouse.

O sistema OILMAP inclui os seguintes modelos: um modelo de trajetória e transformações (“trajectory and fates”) para óleo de superfície e sub-superfície, um modelo de resposta a derramamento de óleo, modelos probabilísticos, e um modelo receptor que através do método inverso localiza a origem do derramamento a partir de informações da posição da mancha.

O modelo de trajetória e transformações prevê o transporte e a degradação do óleo a partir de derramamentos instantâneos e contínuos. As estimativas demonstram a localização e concentração do óleo de superfície e sub-superfície versus tempo. O modelo estima a variação temporal da cobertura de área, espessura da mancha, e viscosidade do óleo. O modelo também estima o balanço da massa de óleo ou a quantidade de óleo sobre a superfície do mar, na coluna de água, evaporado, na costa, e fora da área de estudo versus tempo. Os processos de transformações biogeoquímicas no modelo incluem dispersão, evaporação, entranhamento ou arrastamento, dispersão natural ou por suspensão e emulsificação. Em versão opcional, o OILMAP pode também calcular as interações do óleo com a camada de sedimentos, e no balanço de massa, a sedimentação associada a este processo. Uma descrição detalhada dos processos biogeoquímicos representados no modelo, bem como suas formulações matemáticas são apresentadas em ASA (1997).

A dispersão e o espalhamento da mancha são representados no modelo pela formulação espessofino de Mackay¹ et al.'s (1980, 1982), utilizando-se a abordagem de mancha espessa (Mackay² et al.'s, 1980, 1982).

O processo de evaporação baseia-se na formulação analítica parametrizada em termos de exposição à evaporação (Mackay et al., 1980, 1982). Os processos de entranhamento e arrastamento são modelados utilizando-se a formulação de Delvigne and Sweeney's² (1988) que,

¹ Mackay, D., S. Paterson, and K. Trudel, 1980. Um modelo matemático de comportamento de derramamento de óleo do Departamento de Engenharia Química da Universidade de Toronto, Canadá, 39 pp (*A mathematical model of oil spill Behavior, Department of Chemical Engineering*).

Mackay, D., W. Shui, K. Houssain, W. Stiver, D. McCurdy, and S. Paterson, 1982. Desenvolvimento e Calibragem de um modelo de comportamento de derramamento de óleo (*Development and calibration of an oil spill behavior model*), Relatório No. CG-D027-83, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Guarda Costeira dos EUA (*US Coast Guard Research and Development Center*), Groton, CT.

² Delvigne, G.A.L., and L.J.M. Hulsen, 1994. Medição de laboratório simplificada de coeficiente de dispersão de óleo (*Simplified laboratory measurement of oil dispersion coefficient*) – Aplicação em cálculos de dispersão

explicitamente, representa índices de injeção de óleo para dentro da coluna de água por gotículas de óleo. O coeficiente de entranhamento ou arrastamento, como uma função da viscosidade do óleo, baseia-se em Delvigne and Hulsen (1994). O processo de emulsificação do óleo, em função de perdas de evaporação e alterações na porcentagem de água na mistura, baseia-se em Mackay et al. (1980, 1982). A interação do óleo com o litoral e linha de costa é modelada com base em uma versão simplificada de Reed³ et al. (1989) que formula o problema em termos de uma capacidade de retenção dependendo do tipo da costa e de um índice de remoção exponencial.

Em sua configuração básica, o OILMAP também inclui uma variedade de ferramentas computacionais gráficas que permitem ao usuário a especificação dos cenários, animação das trajetórias, correntes e vento, importar e exportar dados ambientais, a definição da grade computacional para qualquer área dentro do domínio, gerar correntes médias ou de maré, incluir ou editar as características dos óleos registrados no banco de dados, apresentar dados contidos em objetos georeferenciados (GIS), e determinar o impacto ambiental em recursos naturais. As funções do GIS permitem ao usuário a entrada, manipulação, e exibir objetos na tela através de pontos, linhas, e polígonos georeferenciados ao domínio definido pelo cenário. A cada objeto pode ser atribuído dados em formato de texto, valores numéricos, ou arquivos através de link externos.

Utilizando-se o OILMAP em modo estatístico, é possível levar em consideração à variabilidade das forçantes ambientais. No modo estatístico, as simulações de derramamento são realizadas através da variação aleatória do início do derramamento dentro do período para o qual se têm dados meteoceanográficos. Tanto os ventos, quanto as correntes, ou ambos podem variar estocasticamente. As múltiplas trajetórias são então utilizadas para a produção de curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da grade computacional (área de estudo). Os resultados em forma gráfica podem ser apresentados como contornos de probabilidade da presença de óleo na água, na costa, ou tempo de deslocamento da mancha decorrido após início do derramamento. Estas probabilidades de presença de óleo e tempo de deslocamento da mancha podem ser correlacionadas a recursos naturais armazenados no banco de dados (GIS), de forma a auxiliar na avaliação de impactos ambientais em termos da probabilidade da presença de óleo em recursos importantes.

natural de óleo (*Application in computations of natural oil dispersion*). Procedimentos do Décimo Sétimo Programa de Derramamento de Óleo Marítimo e Ártico (*Seventeenth Arctic and Marine Oil Spill Program*), Seminário Técnico, 8 a 10 de junho de 1994, Vancouver, BC Canada, pp. 173-187.

³ Reed, M., E. Gundlach, and T. Kana, 1989. Um modelo de derramamento de óleo na zona costeira: estudos de desenvolvimento e suscetibilidade a Poluição de Óleo e Produtos Químicos (*A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies*, *Oil and Chemical Pollution*), Vol. 5, p. 411-449.

ANEXO B

CRITÉRIO PARA DEFINIÇÃO DA DURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

Seguindo orientação da PETROBRAS, as simulações probabilísticas de “pior caso” deveriam prosseguir até que a mancha atingisse uma pseudo-concentração de 20 mg/L. Entretanto, como mostra a Figura 24, para um acidente com o vazamento de 168.826 m³ esta condição nunca seria atingida. Por esta razão, as simulações dos cenários de “pior caso” foram definidas para 30 dias.

Em reunião com o Dr. Merv Fingas da Agência Canadense “Environment Canada”, foram discutidas algumas alternativas para atender as legislações ambientais e definir a duração das simulações probabilísticas. O Dr. Fingas trabalha nesta agência ambiental do governo canadense desde 1974, ocupando, atualmente, o cargo de “Chief of the Emergencies Science Division”. No período 1987-1991 ele foi o chairman do “NATO-CCMS Committee on Spill Studies”, e é considerado uma das autoridades mundiais no conhecimento e estudo da dinâmica de acidentes com petróleo, com diversos trabalhos publicados sobre o assunto (e.g. Fingas, 2002, 2001a, 2001b, 1998, 1995).

Segundo o Dr. Fingas, a utilização do critério de espessura ou pseudo-concentração não possuem base científica “defensável”, uma vez que os modelos não representam adequadamente valores de espessuras tão pequenos. Além do mais, no atual estado da arte de conhecimento do comportamento do óleo, no mundo real, não é possível implementar esses processos nos modelos de forma confiável e segura. Outro aspecto refere-se à variação do filme de óleo que corresponde ao “rainbow sheen” não tem os limites bem definidos e pode variar de 0,4 micrometros a 3 micrometros. E há um outro fenômeno, que não é representado no modelo, responsável pela alternância entre espalhamento e contração do filme causando o “aparecimento” e “desaparecimento” desse filme sobre a água.

O Dr. Fingas sugeriu determinar o tempo de simulação com base na evaporação do produto simulado, estimando-se, por meio de equações aceitas pela comunidade científica, o tempo necessário para evaporar um determinado percentual do total “evaporável” para aquele volume a ser simulado. A justificativa para adoção desse critério, além daquele exposto anteriormente, baseia-se no fato de que a partir desse ponto começam a atuar processos que ainda não são bem conhecidos e ainda não estão incorporados nos modelos: emulsificação, biodegradação e foto-oxidação.

Área potencialmente afetada caso ocorra um acidente na P-51, em condições de inverno, com vazamento de 168.826 m³ em 30 (trinta) dias, correspondente à perda de controle do poço produtor de maior vazão.

