

Modelagem de Dispersão de Óleo e Efluentes

Introdução

Este relatório apresenta os resultados de simulações probabilísticas para Plataforma de Merluza na Bacia de Santos, empregando o modelo hidrodinâmico POM (Princeton Ocean Model) e o modelo de dispersão de óleo OSCAR (Oil Spill Contingency and Response).

Foram conduzidas simulações probabilísticas para determinar contornos de probabilidade da mancha atingir a área de estudo a partir de 3 (três) classes de vazamento, como definido na Resolução CONAMA nº 293/01: pequeno, com 8 m³; médio com 200 m³ e de pior caso, com 1.912,5 m³ ao longo de 30 dias. Para todas as simulações foi considerado o vazamento de um duto próximo ao ponto determinado.

Os resultados mostraram que em nenhum dos cenários realizados o óleo atingiu a costa.

Modelagem Hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica foi realizada para dois períodos, compreendidos respectivamente entre 1 e 31 de março de 1996 e 1 e 30 de junho de 1996. Os resultados de velocidade do experimento de março foram calibrados contra uma série de correntometria coletada no ponto de coordenadas 26°14' S e 48°29' W e os resultados do experimento de junho contra uma série de correntometria coletada no ponto de coordenadas 26°40' S e 46°50' W. Os resultados de nível foram calibrados contra séries de nível obtidas na Ponta da Galheta (25°34,3' S e 48°19,1' W), para ambos os períodos. A grade elaborada para o estudo numérico estende-se desde o cabo de Santa Marta (RS) até Cabo Frio (RJ), estendendo-se por aproximadamente 750 km na direção paralela à costa e 350 km na direção normal à costa.

Uma abordagem completa da circulação na Bacia de Santos só é possível se os experimentos numéricos contemplarem as correntes de maré, as correntes

geradas localmente pelo vento e a Corrente do Brasil, com seus meandros e vórtices, os quais imprimem variabilidade de meso-escala na área de estudo. 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, e dados de temperatura e salinidade que reproduzem tanto a circulação barotrópica como a circulação baroclínica da Corrente do Brasil. O estudo foi feito com um modelo hidrodinâmico tri-dimensional, que incorpora um esquema de fechamento turbulento para resolução da mistura turbulenta nas camadas de contorno, e que permite a realização de simulações prognósticas.

Descrição da Grade Numérica

O estudo na Bacia de Santos apresenta uma grade telescópica e curvilínea, de modo que o tamanho dos elementos é menor nas áreas de interesse, e aumenta em direção ao oceano aberto. Essa configuração também permite maior resolução espacial (resolução mais fina) nas proximidades da costa e na quebra da plataforma continental, onde as variações topográficas são mais expressivas. A topografia na Bacia de Santos apresenta uma declividade suave, portanto as grades não apresentam uma variação expressiva no tamanho dos elementos.

Outra utilidade de uma grade curvilínea desse tipo é a possibilidade de abranger uma grande área, apesar de manter alta resolução da área de interesse. Grades muito pequenas não possuem pista suficiente para que o vento faça o empilhamento/rebaixamento (*Wind setup/setdown*) contra a costa e, portanto, acabam subestimando o valor das correntes geradas por vento. A utilização de uma grade de grandes dimensões também foi essencial para a correta reprodução da onda de maré.

O tamanho dos elementos varia entre aproximadamente 2.500 x 2.500 m, nas áreas de alta resolução, até 8.000 x 15.000 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.

Descrição do Modelo

O modelo hidrodinâmico utilizado é o modelo de Princeton, mais comumente conhecido como Princeton Ocean Model (POM). A descrição do modelo aqui apresentada é bastante simplificada. Para uma descrição mais detalhada o leitor é referenciado aos trabalhos de Blumberg & Mellor (1987) e Mellor (1998).

O POM é um modelo de diferenças finitas, que trabalha com superfície livre e com a possibilidade de simulações bi e tridimensionais. Em simulações tridimensionais o modelo decompõe as velocidades em suas componentes barotrópicas (bi-dimensionais) e baroclínicas (tri-dimensionais). A elevação da superfície (η) e as velocidades barotrópicas (U_A e V_A) são resolvidas separadamente em um módulo conhecido como módulo externo. As velocidades baroclínicas (U , V e W) são resolvidas no módulo interno. Também fazem parte do módulo interno as variáveis temperatura (T), salinidade (S), energia cinética turbulenta (q) e a escala da energia cinética turbulenta (l). Essa técnica de separação das velocidades em módulo externo e interno, conhecida como “mode-splitting”, permite a utilização de passos de tempos diferentes para cada módulo, sendo que o módulo interno, que é computacionalmente o mais pesado, utiliza um passo de tempo mais lento. Periodicamente os módulos são ajustados entre si para que não ocorra divergência das respectivas soluções.

Uma das características do POM, que corrobora bastante para sua versatilidade, é o uso de coordenadas *sigma*. A coordenada *sigma* “ σ ” substitui a coordenada cartesiana “ z ” usualmente utilizada na direção vertical. *Sigma* é literalmente definida como uma porcentagem da coluna d'água, variando entre 0, na superfície, e -1 no fundo. Ao invés de trabalharmos com distâncias verticais, trabalhamos com camadas cujas espessuras dependem da profundidade local, sendo que o mesmo número de camadas é utilizado em todos os pontos do domínio. Assim, camadas mais finas são definidas em áreas rasas da grade numérica, enquanto que camadas mais espessas aparecem nas regiões mais profundas. Essa característica permite boa reprodução da hidrodinâmica de áreas com grande variação topográfica, como a região de quebra de plataforma e talude. No entanto, a coordenada *sigma* apresenta um erro, que se manifesta nas regiões de grandes gradientes batimétricos como um gradiente de pressão

espúrio, o qual causa velocidades numéricas no modelo. Tal erro é minimizado utilizando-se elementos de grade menores nas regiões de grande variação topográfica.

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 e Yamada (1982). Nesse esquema, coeficientes de mistura vertical são calculados a cada passo de tempo, de modo que os mesmos variam espacial e temporalmente de acordo com a dinâmica do meio. Esse método é bem mais eficiente do que as parametrizações comumente utilizadas, e permite representações bastante realistas das camadas de mistura. Tal característica é bastante eficiente quando aliada ao sistema de coordenadas *sigma*, pois a coordenada *sigma* permite o uso de camadas de espessura variável. Assim, camadas extremamente finas podem ser utilizadas dentro das camadas de Ekman de superfície e fundo, permitindo uma representação bastante realista dessas camadas e maior eficiência na transferência de momento do vento para o oceano. A representação eficiente da camada de Ekman de fundo também é essencial na reprodução de corrente de maré.

O uso de alta resolução espacial vertical nas camadas de mistura (camadas bastante finas) também é dependente de outra característica do modelo. O POM resolve separadamente a difusão vertical da advecção e mistura horizontal. A advecção e mistura horizontal são resolvidas através de um esquema explícito, enquanto que mistura vertical é resolvida através de um esquema implícito. Assim, a resolução dos termos advectivos e difusivos horizontais deve obedecer à condição de estabilidade de CFL (Couran-Friederick-Levy), a qual restringe o passo de tempo do modelo em função do tamanho dos elementos. Por outro lado, a resolução dos termos difusivos verticais fica livre dessa restrição, por ser feita implicitamente, e assim camadas bastante finas podem ser utilizadas sem ter que observar o passo de tempo do modelo.

Os coeficientes de mistura horizontal também variam espacial e temporalmente. Esses últimos são calculados pela fórmula de Smagorinsky (1963), a qual leva em consideração não apenas os gradientes de velocidade do fluido, mas também o espaçamento de grade, de modo que coeficientes menores

são utilizados em áreas de alta resolução espacial onde a mistura horizontal perde a importância.

Além dos aspectos específicos acima mencionados, 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).

Descrição dos Experimentos Numéricos na Bacia de Santos

Os experimentos numéricos com o modelo POM na Bacia de Santos foram executados com as seguintes forçantes: vento horário, maré, nível médio, temperatura e salinidade prescritas. Os períodos simulados foram 30 dias do mês de março de 1996 e 30 dias do mês de junho de 1996.

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, posteriormente, projetados sobre uma grade regular com espaçamento de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Os dados de amplitude e fase do FES95.2 foram interpolados para os pontos das grades da Bacia de Santos usando-se um interpolador espacial escrito em linguagem MATLAB, e armazenados em formato ASCII de modo a serem lidos pelo modelo POM na execução de cada experimento. Para interpolação dos dados de fase, os quais são medidos em graus, os graus de fase referentes a Greenwich foram decompostos em seno e co-seno. Seno e co-seno foram interpolados individualmente, e os ângulos foram então recompostos como arco-tangente.

Dados de Temperatura e Salinidade

A circulação termohalina está sendo 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 fluxo de calor estimados a partir da temperatura superficial, também do OCCAM, é prescrito na superfície. 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.

O modelo OCCAM 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). Os autores do OCCAM colocam a disposição da comunidade internacional resultados de um experimento de 14 anos que foi inicializado com dados de temperatura e salinidade climatológicos do Levitus e forçado com dados de ventos médios mensais do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Esse experimento de 14 anos foi executado em uma grade com resolução espacial de $1/4^\circ$ e 36 níveis verticais. Os autores recomendam os resultados de 4 anos compreendidos entre os dias 2922

e 4383 como o melhor período da simulação. Este período corresponde aos anos 8 a 12 da simulação, sendo o dia 4383 correspondente ao dia 12 de agosto de 1996.

Os dados de temperatura, salinidade e elevação da superfície do mar correspondentes ao período de 4 anos foram obtidos e interpolados para os pontos das grades da área de interesse. Utilizou-se o mesmo interpolador espacial construído em Linguagem de programação MATLAB que foi usado para interpolar os dados de amplitude e fase da maré. No entanto, antes da interpolação espacial ser executada, foram calculadas as médias mensais dos dados do OCCAM para cada um dos 36 níveis verticais. Esses dados médios mensais foram interpolados para os níveis *sigma* da grade do POM e somente então foram interpolados horizontalmente para a grade. Os dados médios mensais correspondentes a março estão sendo usados para forçar os experimentos de março de 1996 e os dados médios mensais correspondentes a junho estão sendo usados nos experimentos de junho de 1996.

Alguns ajustes são necessários, pois os dados do OCCAM são distribuídos em uma grade regular que tem resolução espacial de $0,5^\circ$ e, ao serem interpolados para os pontos da grade, cobrem a região muito próxima da costa. Os dados interpolados são então extrapolados em direção à costa e depois filtrados espacialmente com um filtro alisador do tipo Lanczos-cosseno desenvolvido em linguagem de programação. Uma janela de 41 pontos é utilizada nesse filtro espacial.

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 do Brasil na Bacia de Santos; e 2) a estratificação vertical de densidade contida nesses dados afeta a circulação induzida pelo vento. Sabe-se que as correntes induzidas por vento são sensíveis à estratificação dos oceanos (Csanady, 1982). A presença de uma camada superficial bem misturada e de uma termoclina forte altera a transferência do momentum para camadas inferiores. A termoclina cria uma forte estratificação, resultando em alta estabilidade vertical, a qual inibe a transferência de momentum

para camadas inferiores. Nessas condições, a camada superficial responde mais rapidamente ao stress do vento (Soares, 2003; Kourafalou, 1993).

Dados de Vento

Os experimentos de março foram forçados com uma série de vento horário. Já os experimentos de junho foram forçados com dados de reanálise de vento, a partir de dados da **NCEP (National Centers for Environmental Predictions)** da agência americana **NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)**, dada a indisponibilidade de dados de vento observados durante o período de junho de 1996. Os dados de reanálise apresentam intervalo de 6 horas, mas foram interpolados para cada hora. Além disso, esses dados de vento apresentam variação espacial, com intervalo de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, ao contrário da série para o período de verão. Os dados de reanálise (junho de 1996) foram então interpolados espacialmente, além da interpolação temporal já mencionada acima.

Os dados da série temporal de vento estão em termos de intensidade do vento e direção em graus, relativa ao norte. Esses dados foram decompostos em componente U (leste/oeste) e V (norte/sul) e armazenados em formato ASCII para serem lidos pelo POM. Os dados são lidos pelo modelo com intervalo de 1 hora, mas uma interpolação no tempo é feita de modo que o vento é atualizado a cada passo de tempo do modelo.

Já os dados da reanálise foram fornecidos em componentes U e V.

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:

1. 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;

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

Os dados de vento foram lidos com intervalo de 1 hora e interpolados para cada passo de tempo. A condição de estabilidade de CFL para as grades de Santos exigiu um passo de tempo menor que 7,5 segundos. Para o modo interno foi adotado um passo de tempo de 180 segundos, mantendo um quociente de 30 entre os passos tempo dos modos interno e externo, o que está de acordo com o recomendado na literatura (e.g. Mellor, 1998).

Nos resultados apresentados a seguir, aparecem os vetores de velocidade no primeiro nível sigma sobrepostos a campos de elevação do nível do mar ou de temperatura superficial. Como a grade é do Tipo Arakawa C, a qual é uma grade alternada, as componentes U e V tiveram que ser mediadas para o ponto central de cada elemento de grade antes da confecção dos gráficos. Além disso, o fato da grade ser curvilinear exigiu uma transformada de coordenadas da seguinte forma:

$$u_t = u \cdot \cos(\phi) - v \cdot \sin(\phi) \quad \text{e} \quad v_t = u \cdot \sin(\phi) + v \cdot \cos(\phi) \quad (1)$$

Onde o índice *t* indica a componente após a transformada de coordenada e ϕ é o ângulo de rotação de cada elemento de grade em relação ao eixo leste-oeste. Dessa forma, os vetores de velocidade que aparecem nas figuras a seguir são aqueles referenciados aos eixos norte-sul e leste-oeste.

Experimentos de Março de 1996

Elevação da Superfície – Março

Na Figura-1, são apresentadas as correntes do primeiro nível *sigma*, sobrepostas ao campo de elevação da superfície do mar no instante $t = 608$ horas.

Temperatura e Salinidade – Março

Nas Figuras-2 e 3 apresentam-se respectivamente os campos superficiais de temperatura e de salinidade obtidos nos instantes $t = 600$ horas e $t=606$ horas. Sobrepostos aos campos de salinidade e temperatura encontram-se os vetores de velocidade do primeiro nível sigma.

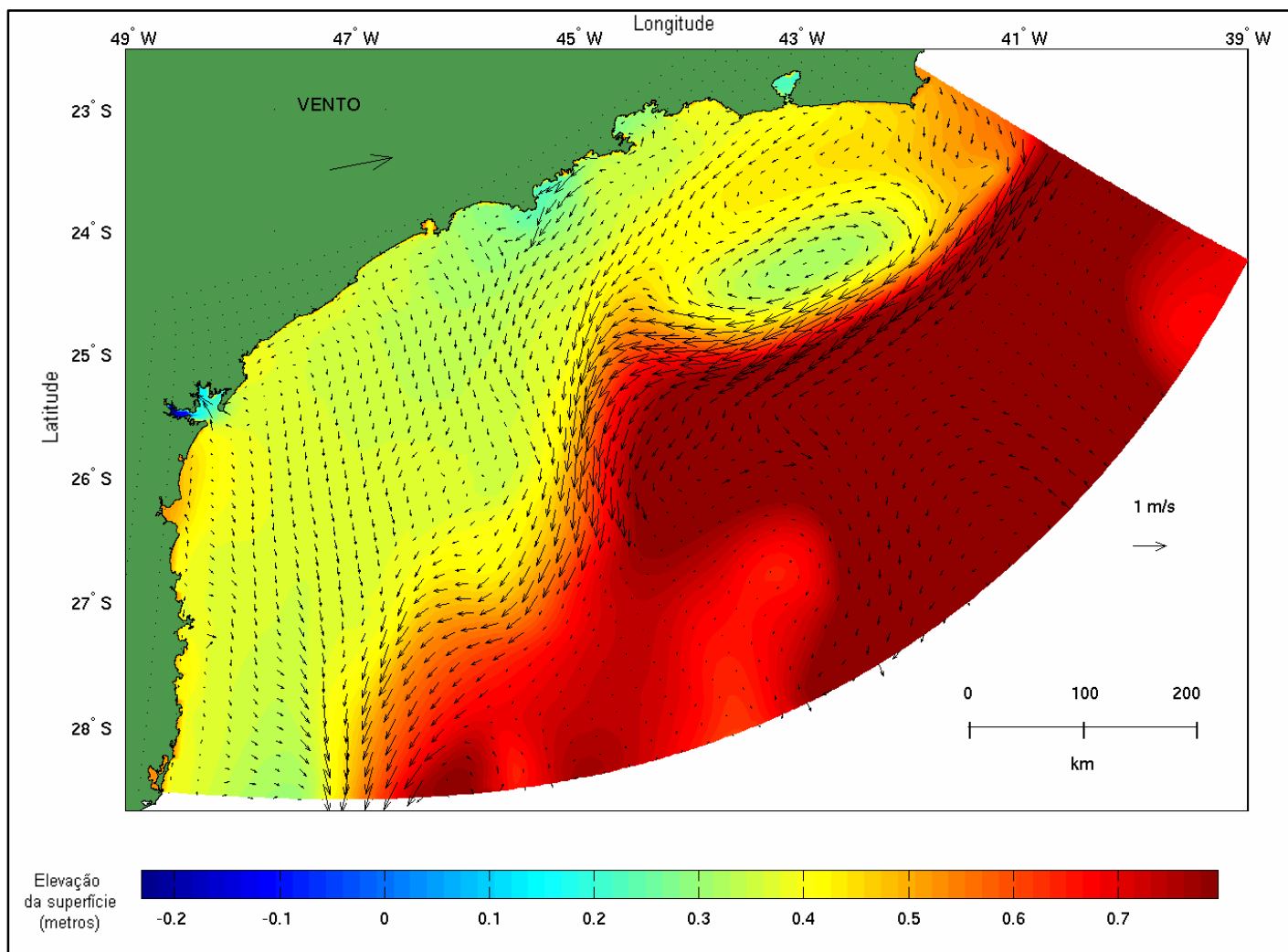


Figura -1: Elevação da superfície + velocidades no nível sigma 1 – hora 608.

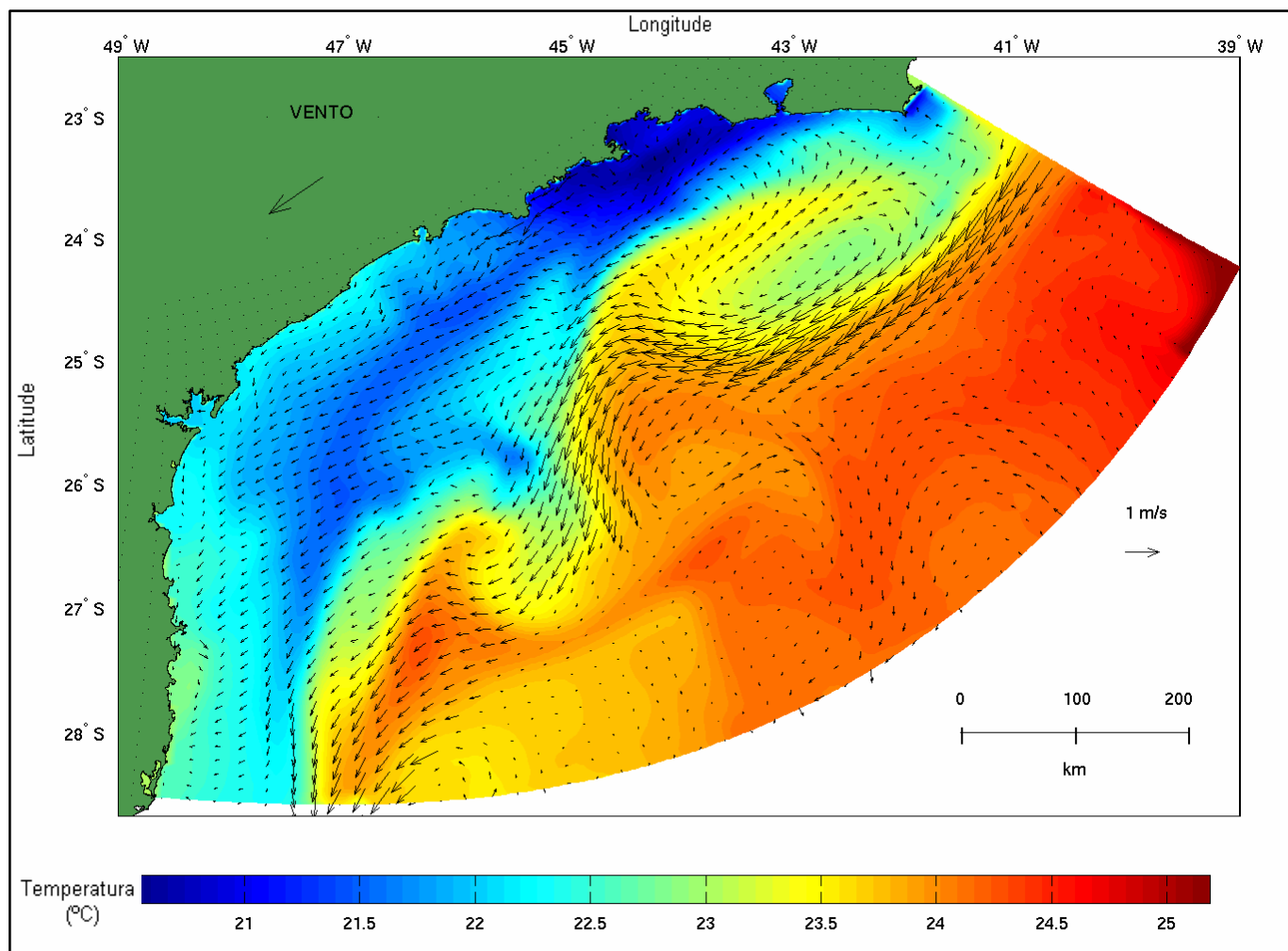


Figura -2: Temperatura + velocidades no nível sigma 1 – hora 600.

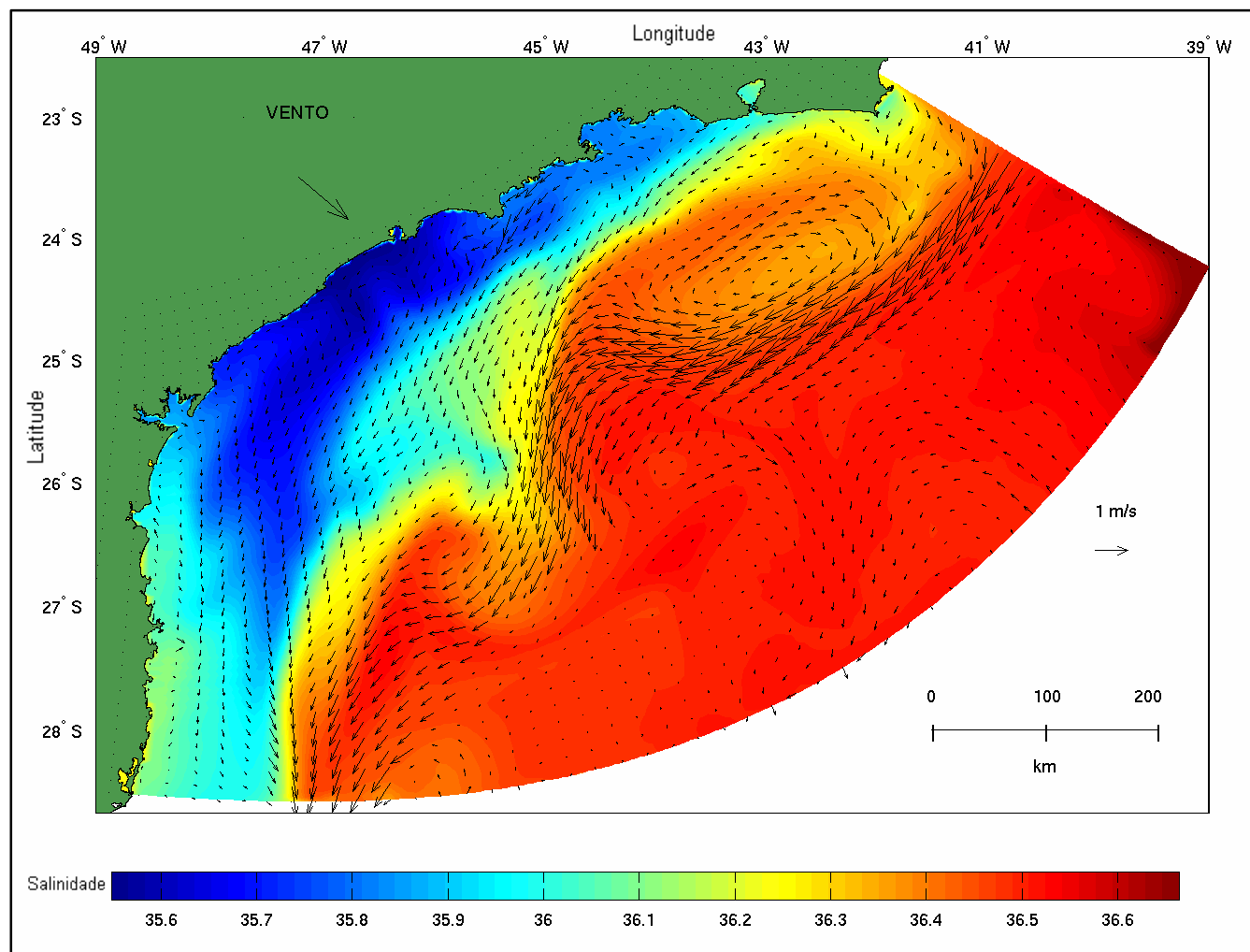


Figura -3: Salinidade + velocidades no nível sigma 1 – hora 606.

Experimentos de Junho de 1996

Elevação da Superfície

Na Figura-4, são apresentadas as correntes do primeiro nível *sigma*, sobrepostas ao campo de elevação da superfície do mar no instante $t = 608$ horas.

Temperatura e Salinidade – Junho

Nas Figuras-5 e 6 apresentam-se, respectivamente, os campos superficiais de temperatura e de salinidade obtidos, ambos, no instante $t = 620$ horas. Sobrepostos aos campos de salinidade e temperatura encontram-se os vetores de velocidade do primeiro nível *sigma*.

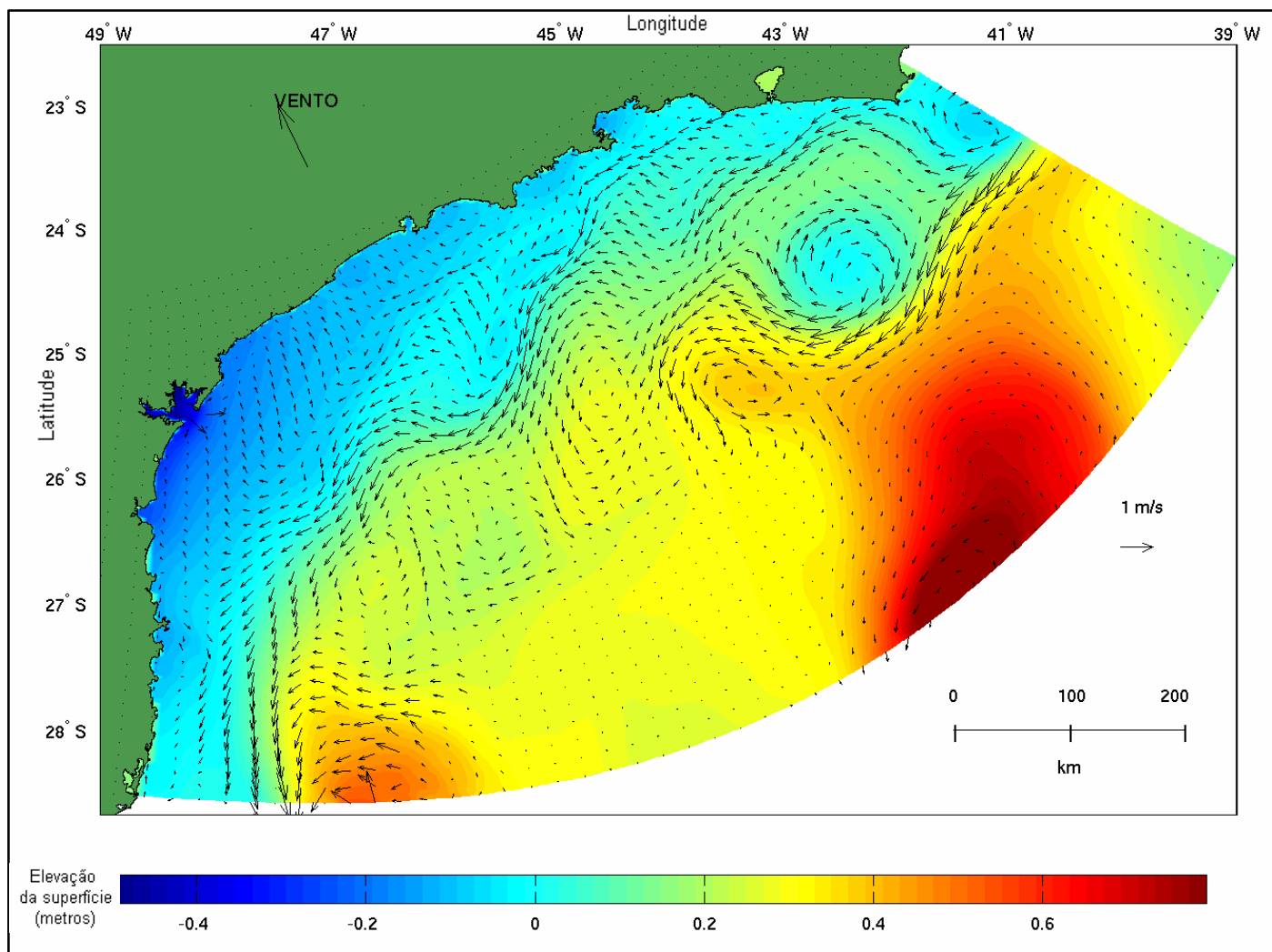


Figura -4: Elevação da superfície + velocidades no nível sigma 1 – hora 608

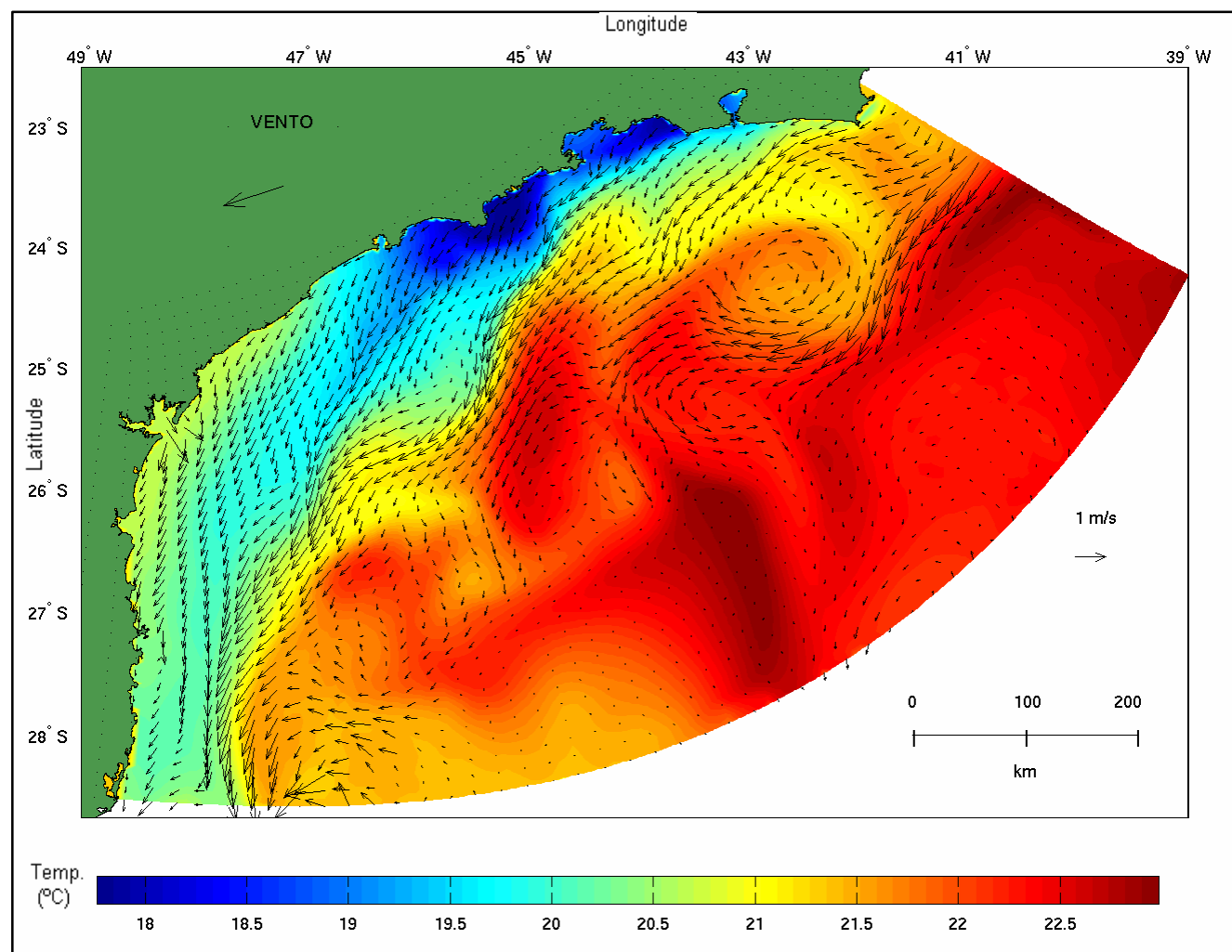


Figura -5: Temperatura + velocidades no nível sigma 1 – hora 620

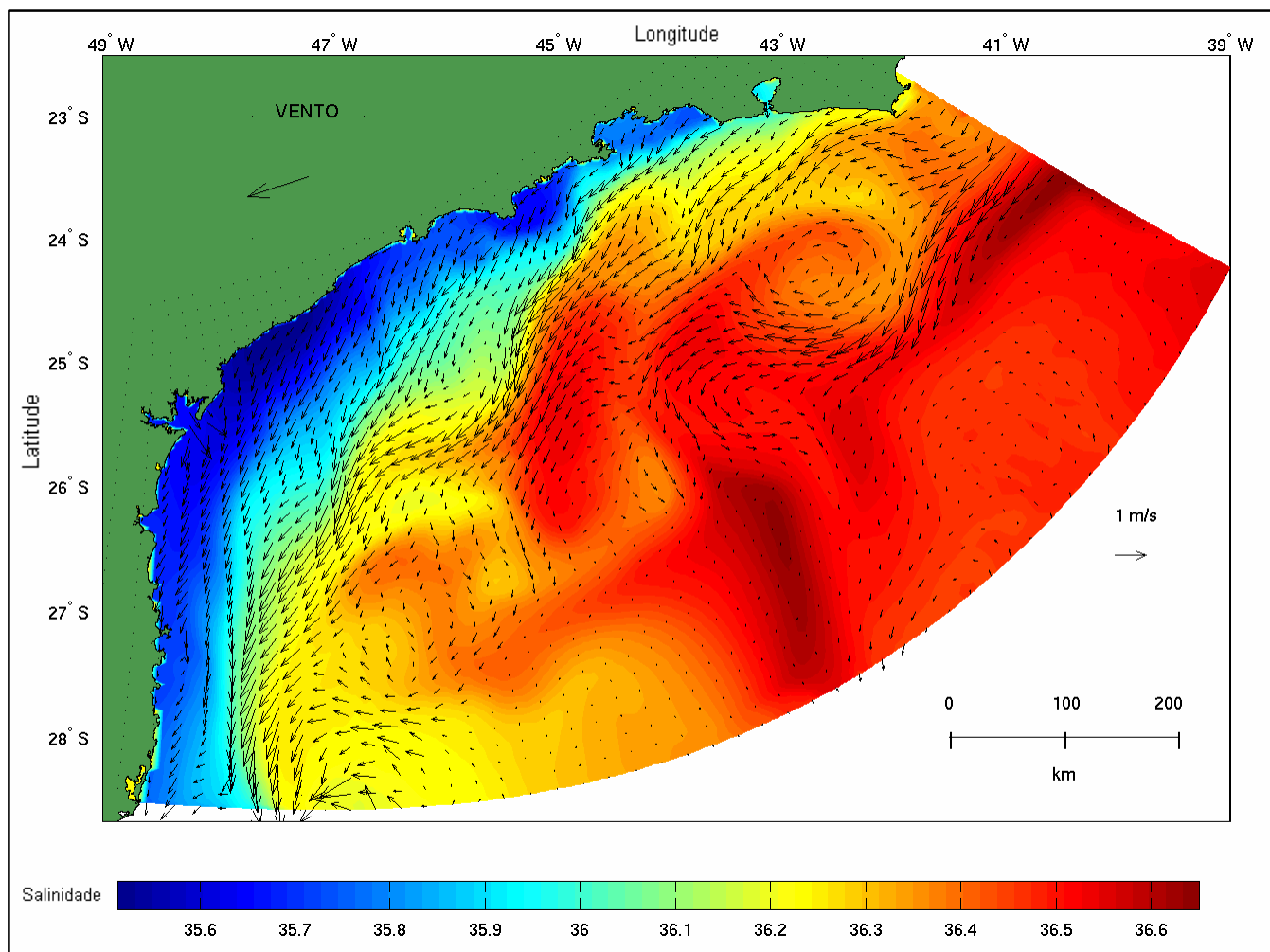


Figura -6: Salinidade + velocidades no nível sigma 1 – hora 620

Calibração

Os resultados do modelo foram calibrados contra séries de correntometria obtidas *in situ*, conforme descrito no início da seção. 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 mediadas para o ponto central dos elementos de grade e rodadas para o sistema de eixos norte/sul e leste/oeste, de acordo com a transformada de coordenadas mencionada acima. Foram realizadas duas calibrações, portanto tem-se duas figuras. Os dados de nível foram calibrados contra séries de nível compostas a partir das constituintes harmônicas obtidas na Ponta da Galheta (PR).

O coeficiente de ajuste (ou erro percentual) entre a série modelada e observada é calculado de acordo com Spiegel (1975), sendo definido como a razão entre o desvio médio do “erro” e o dobro do desvio médio do dado observado:

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

Sendo o “erro” definido como a diferença entre a série observada e a série modelada.

$$\text{Erro} = |x_{\text{obs}} - x_{\text{mod}}| \quad (3)$$

E o desvio médio é definido como :

$$DM = \left(\sum_0^N |x_n - \bar{x}| \right) / N \quad (4)$$

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

Março de 1996

Para o experimento de março, o melhor ajuste entre as series modeladas e medidas ocorreu durante período compreendido entre as horas 50 e 220. As séries medidas e modeladas de corrente e nível são apresentadas na Figura -7, estando a componente U da velocidade no painel superior, a componente V no painel central e nível do painel inferior dessa figura.

Para este experimento o coeficiente de ajuste entre a série modelada e a observada foi de 24,88 % para U, 23,20 % para V e 9,17 % para nível.

Junho de 1996

A calibração do experimento de Junho foi feita para o período de 170 horas compreendido entre as horas 300 e 470, e os coeficientes foram de 24,03% para U, 17,23 % para V e 6,97 % para o nível. As calibrações são apresentadas na Figura -8.

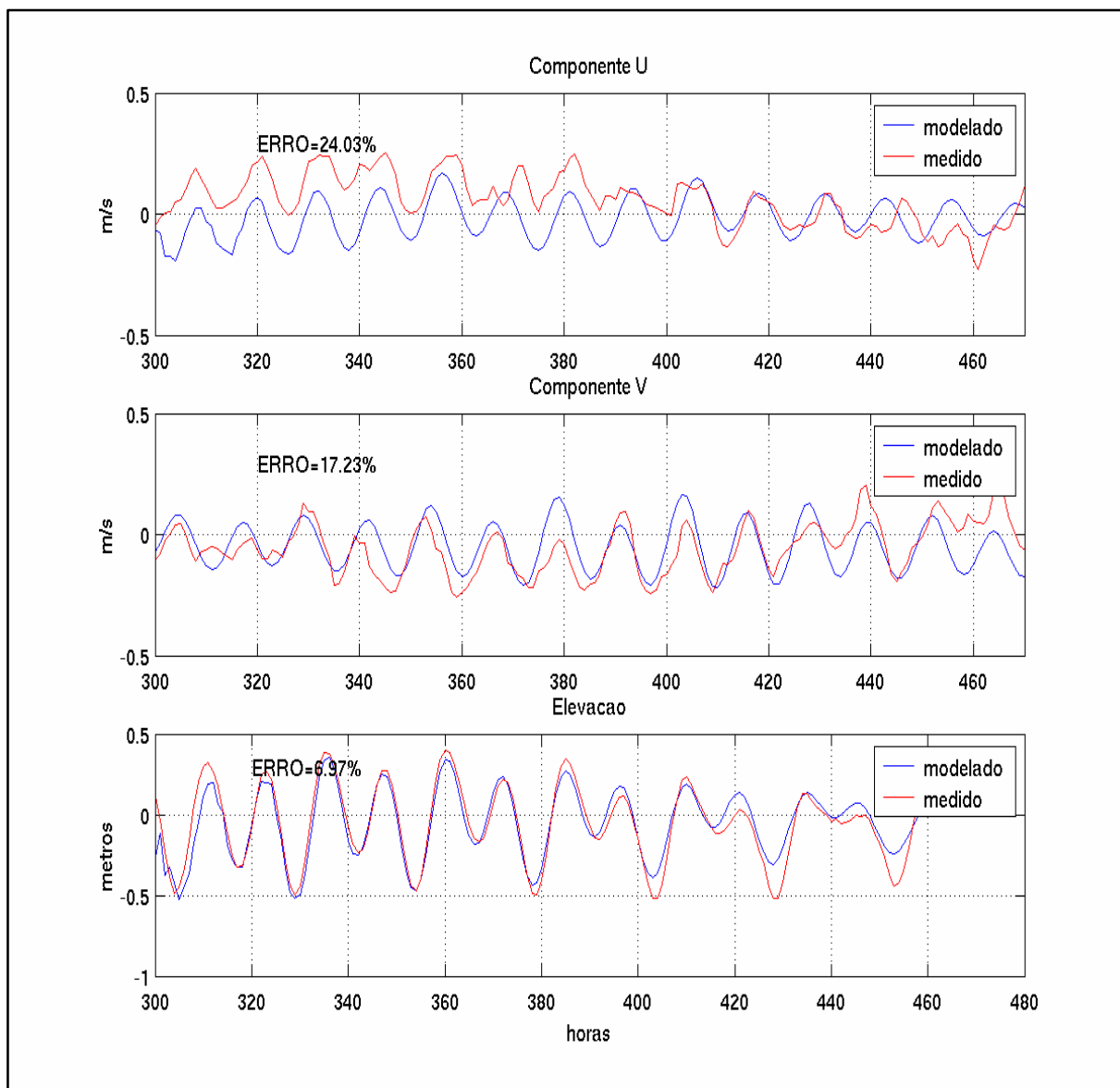


Figura -7: Séries de corrente (componentes U e V) e elevação, medida e modelada, utilizadas para a calibração no período de março de 1996.

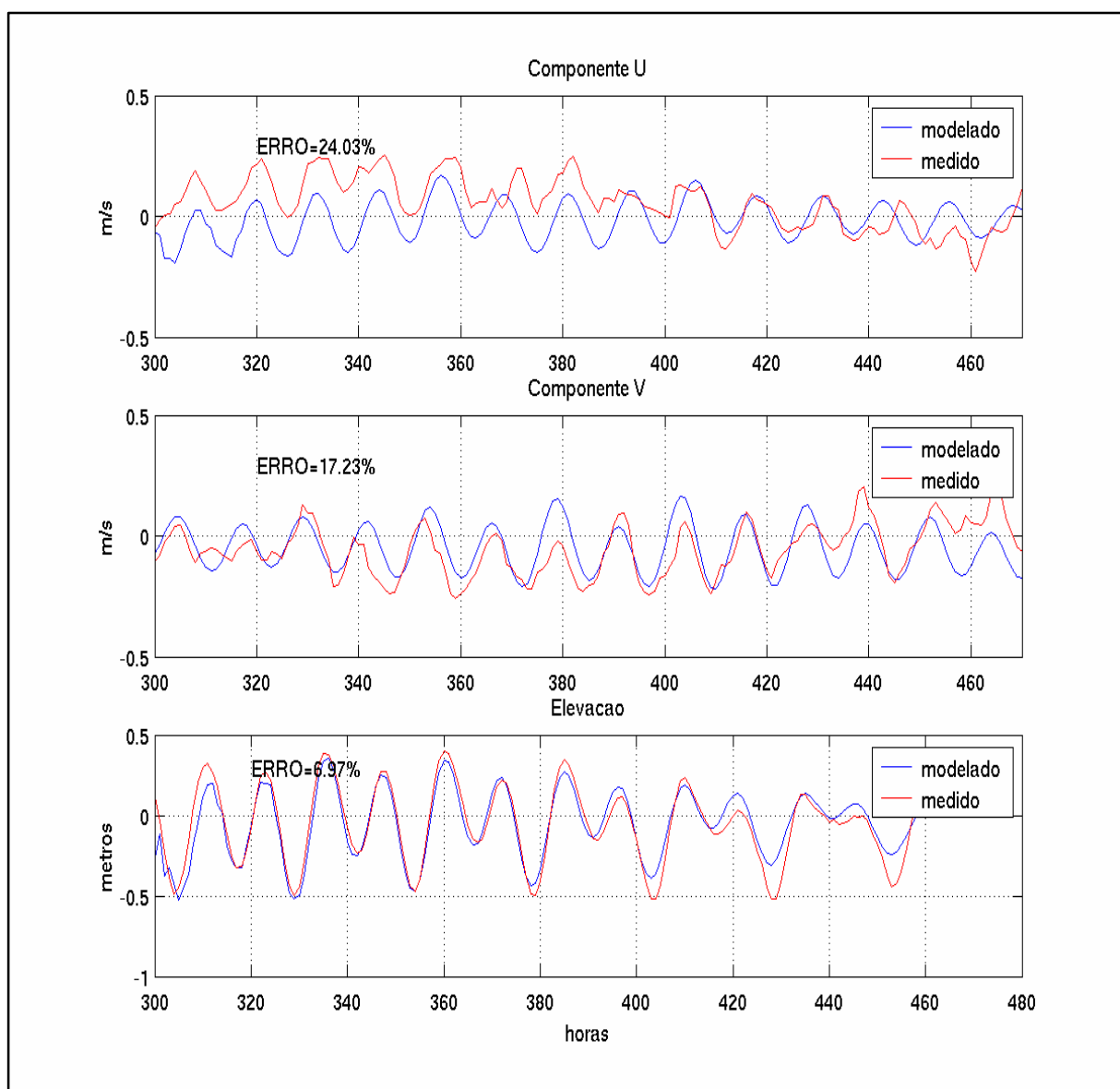


Figura -8: Séries de corrente (componentes U e V) e elevação, medida e modelada, utilizadas para a calibração no período de junho de 1996.

Discussão Acerca da Modelagem Hidrodinâmica

Os resultados obtidos na Bacia de Santos mostram que a circulação local foi reproduzida com sucesso. Os dados de correntes superficiais mostram a Corrente do Brasil bem formada, fluindo para o sul na quebra de Plataforma e Talude, enquanto que as correntes sobre a Plataforma continental média e Plataforma continental interna estão respondendo primariamente ao vento, ficando direcionadas a esquerda deste, como determinado na Teoria de Ekman.

O comportamento da Corrente do Brasil nos experimentos aqui apresentados está condizente com a bibliografia. Os vórtices formados na Corrente do Brasil apresentam circulação ciclônica na parte interna da Corrente (voltada para a plataforma) e circulação anticiclônica na parte externa da Corrente (voltada para oceano aberto), exatamente como descrito por Campos *et al.* (1995) para a Bacia de Santos e por Lee *et al.* (1983) para a Southern Atlantic Bight (SAB), na costa leste dos EUA, a qual apresenta circulação semelhante à da Bacia de Santos, sendo a Corrente do Golfo a contrapartida da Corrente do Brasil na SAB.

Os vórtices ciclônicos aqui apresentados possuem núcleos mais frios e mais baixos, condizentes com a circulação ciclônica descrita por Campos (*op. cit.*), dado que apresentam subsidência em seu núcleo. Já os vórtices anticiclônicos apresentam núcleo mais alto e mais quente.

Esses resultados demonstram que a modelagem das correntes marinhas superficiais na Bacia de Santos foi realizada com níveis de erro baixos e campos de correntes superficiais representativos da área de estudo. Os resultados demonstram também que o modelo demora cerca de 60 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 Blumberg & Kantha (1985), a qual, apesar de demonstrar-se bastante eficiente na reprodução da maré, exige um tempo de ajuste.

A partir das 60 horas iniciais, o modelo POM demonstrou ser eficiente e robusto, constituindo-se numa importante ferramenta na predição das correntes na Bacia de Santos. A metodologia utilizada para incorporar os dados dos modelos OCCAM e FES95.2 mostrou-se adequada para a região.

Estando os resultados compatíveis com a circulação conceitual e dentro dos limites aceitáveis de calibração, a base numérica produzida pelo POM foi, então, assimilada no OSCAR, modelo de dispersão e transporte que visa prever o comportamento de manchas de óleo em eventos de derramamento acidental na região.

Modelagem de dispersão do Óleo

Para a modelagem de óleo foi utilizado o modelo OSCAR, desenvolvido pela SINTEF Applied Chemistry (<http://www.sintef.no>). Os itens a seguir descrevem as características físico-químicas do óleo e seu comportamento no mar, sendo as unidades representadas seguindo o Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Características Físico-Químicas e Comportamento do Óleo no Mar

Espalhamento

Pode-se definir o espalhamento natural do óleo como o aumento da área da mancha devido à tendência que o óleo tem para se espalhar em água parada. Esta tendência é explicada pelas forças gravitacionais e pela tensão superficial, contrapondo-se ao efeito inercial e à viscosidade da interface (óleo-água).

Simula-se o espalhamento do óleo com base no método proposto por Fay (1971), onde é analisado o balanço de forças, assumindo que a mancha é circular e que a espessura do óleo na mancha é homogênea.

Nos primeiros minutos após o vazamento, o espalhamento é, provavelmente, o processo predominante. Após algum tempo, e mediante a existência de vento forte, mar agitado e efeito das correntes, a mancha pode ser deformada, fragmentada e dispersa. Na fase inicial do vazamento, o cálculo da área da mancha é estimado pela teoria de Fay ou outra teoria modificada, até porque a área é um parâmetro importante não só para o desenvolvimento de estratégias de defesa e contenção da mancha, mas também porque alguns processos de envelhecimento (como a evaporação, por exemplo) dependem diretamente da área superficial ocupada.

Assim, segundo Fay (1971), o espalhamento pode ser dividido em três fases, cada uma delas dominada por duas forças. Imediatamente após o vazamento, o espalhamento é comandado pelas forças gravitacionais – trata-se da fase gravitacional-inercial. Após um período de tempo curto segue-se a fase gravitacional-viscosa, em que a força gravitacional é balanceada pela da interface óleo-água. Quando a espessura da mancha é muito pequena, a força gravitacional deixa de ser importante, sendo o espalhamento dominado pelas forças de tensão superficial. Esta é a fase tensão superficial-viscosa.

A equação de Fay que descreve o balanço das forças acima mencionado é a seguinte:

$$a_1(r_w - r_{oil})gh^2 + a_2s_n = \frac{a_3r_wv_w^{1/2}}{t^{1/2}}R\frac{dR}{dt} + r_wh\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \quad (5)$$

Onde:

R = raio da mancha assumindo um espalhamento assimétrico

r_w = densidade da água

r_o = densidade do óleo

s_n = tensão interfacial óleo-água

g = aceleração da gravidade

t = tempo após o vazamento

ν_w = viscosidade cinemática da água

h = espessura da mancha

α_1 , α_2 e α_3 são constantes empíricas dimensionais, que podem ser estimadas como sendo $\alpha_1=0,42$, $\alpha_2=1,64$, $\alpha_3=0,86$, segundo Stolzenbach (1977).

As soluções dessa mesma equação para as três fases assumem as seguintes formas apresentadas na Tabela -1

Tabela -1 – Fases do espalhamento.

Fase de Espalhamento	R
Gravitacional-inercial	$k_1(\Delta g V t^2)^{1/4}$
Gravitacional-viscosa	$k_2 \left(\frac{\Delta g V^2 t^{3/2}}{v_w^{1/2}} \right)^{1/6}$
Tensão superficial-viscosa	$k_3 \left(\frac{s^2 t^3}{r_w^2 v_w} \right)^{1/4}$

Onde:

$$\Delta = (r_w - r_o)/r_w$$

V = volume do óleo derramado

k_1 , k_2 e k_3 assumem diferentes valores por diferentes autores. Os valores recomendados por Flores *et al.* (1998) são, respectivamente, 0,57, 0,725 e 0,5.

Uma vez que a fase inicial é muito curta, muitas vezes não chega sequer a ser modelada diretamente, sendo hábito calcular a área (A_0) e o tempo (t_0) em que esta fase termina, iniciando-se a fase gravitacional-viscosa:

$$a_1(r_w - r_{oil})gh^2 + a_2s_n = \frac{a_3r_w v_w^{1/2}}{t^{1/2}} R \frac{dR}{dt} + r_w h \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (6)$$

A área no final da primeira fase é, assim, muitas vezes assumida como a área inicial da mancha.

A terceira fase se inicia quando a mancha já é muito fina, resultando muitas vezes numa divisão em pequenas manchas devido aos efeitos do vento e ondas. E assim, a Teoria de Fay não pode ser aplicada.

Assim, neste modelo, é apenas simulada a fase gravitacional-viscosa (segunda fase) para calcular o espalhamento.

Evaporação

Este é um processo bastante importante que ocorre desde o início do vazamento. Quando o óleo é derramado, os componentes que possuem ponto de ebulição mais baixo (mais voláteis) são rapidamente volatilizados, reduzindo assim o volume e a massa da mancha que permanece na água. Durante as primeiras 24 horas após o vazamento, a maior parte dos óleos-crus perde aproximadamente 25-30% dos seus componentes mais leves. Os vazamentos de hidrocarbonetos mais leves podem ter os seus volumes reduzidos em 40% em poucas horas, apenas devido à evaporação. A evaporação destes componentes mais voláteis aumenta a densidade e viscosidade da mancha de óleo, podendo os compostos mais pesados continuar a sofrer outros processos de envelhecimento. A evaporação é, portanto, o primeiro processo envolvido na remoção de óleo da superfície da água. À medida que o óleo continua a envelhecer, e especialmente se forem formadas emulsões água + óleo, a evaporação vai diminuindo progressivamente.

A taxa e extensão da evaporação dependem de diversos fatores, tais como as frações com baixo ponto de ebulição, área superficial e espessura da mancha, pressões de vapor do óleo e coeficiente de transferência de massa, que por sua vez são funções da composição do óleo, velocidade do vento, estado do mar e temperatura do ar e da água.

Diferentes algoritmos podem ser utilizados para o cálculo da taxa de evaporação. Entre os mais conhecidos encontram-se o modelo de pseudo-componentes (desenvolvido por Yang & Wang, 1977 e Payne *et al.*, 1984) e o modelo analítico, também conhecido como o modelo de exposição evaporativa (desenvolvido por Stiver & Mackay, 1984).

O método utilizado no modelo é o método da exposição evaporativa e pode ser expresso por:

$$\frac{dF_e}{dt} = \frac{K_e A_s}{V_0} \cdot \exp\left(A - \frac{B}{T}(T_0 + T_G F_e)\right) \quad (7)$$

Onde, F_e é a fração do volume de óleo evaporado A e B são constantes empíricas, T_0 é o ponto de ebulição inicial e T_G é o gradiente da curva de destilação. Todas estas propriedades dependem do tipo de óleo. Caso estes valores sejam desconhecidos, poderão ser aproximados, sendo T_0 e T_G estimados com base na densidade API . K_e é o coeficiente de transferência de massa, com o valor proposto por Buchanan & Hurford (1988).

$$K_e = 2.5 \times 10^{-3} W^{0.78} \quad (8)$$

$$A = 6, B = 10,3$$

$$T_G = 1356,7 - 247,36 \times \ln(API)$$

Para óleos-crus:

$$T_0 = 532,98 - 3,1295 \cdot API \quad (9)$$

Para produtos refinados:

$$T_0 = 654,45 - 4,6588 \cdot API \quad (10)$$

Dispersão na coluna d'água

A dispersão vertical é um processo físico em que as gotículas de óleo são transportadas a partir da superfície do mar para a coluna de água, sobretudo devido à ação das ondas. Essas gotículas podem ter dimensões variáveis, sendo que as menores não voltam à superfície devido à turbulência natural da água, difundindo-se na coluna de água. Este processo é influenciado por três fatores essenciais: a viscosidade do óleo, as temperaturas da água e do ar e o estado do mar.

Quanto maior for a viscosidade do produto, maior é a possibilidade de se formarem espessas camadas de óleo na superfície da água, e assim diminuir a dispersão do mesmo na água, ao contrário dos hidrocarbonetos menos viscosos que facilmente se podem dispersar completamente ao fim de alguns dias. As temperaturas da água e do ar também podem inibir a dispersão, caso sejam inferiores ao ponto de fluidez.

O estado do mar é associado à energia da arrebentação das ondas. Assim, em vazamentos de óleo durante tempestades, a dispersão poderá ser o principal mecanismo de remoção de óleo da superfície, enquanto que em condições meteorológicas normais a evaporação será mais significativa, apesar da dispersão poder continuar a ter alguma relevância.

Método de Delvigne & Sweeney

O algoritmo da dispersão na coluna de água pode recorrer a duas formulações diferentes. Uma delas é proposta por Delvigne & Sweeney (1998), que desenvolveram uma série de estudos laboratoriais acerca da dispersão natural do óleo. Com base nos resultados experimentais obtidos, desenvolveram uma relação empírica para a taxa de dispersão do óleo para a coluna de água devida à arrebentação das ondas:

$$\frac{dm_d}{dt} = c_{oil} \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot f_s \cdot F_{wc} \cdot d_0^{0,7} \cdot \Delta d \quad (11)$$

Em que f_s é a fração de superfície coberta pelo óleo (igual ao conteúdo de óleo na emulsão óleo+água); d_0 é o diâmetro das partículas; Δd é o intervalo de diâmetros das partículas; c_{oil} é um parâmetro determinado experimentalmente, e que depende do tipo de óleo e D_{ba} é a energia de dissipação das ondas por unidade de área superficial, que pode ser calculada da seguinte forma:

$$D_{ba} = 0,0034 r_w g H_{rms}^2 \quad (12)$$

H_{rms} , é determinada por:

$$H_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} H_0 \quad (13)$$

Sendo H_0 a altura da onda.

F_{wc} é a fração de superfície de mar atingida pela arrebentação das ondas por unidade de tempo, dada por:

$$F_{wc} = \frac{C_b(W - W_i)}{T_w} \quad (14)$$

Onde, $C_b = 0,032 \text{ s.m}^{-1}$ e W_i é a velocidade do vento para iniciar o rompimento (3 m.s^{-1}). T_w é o período da onda.

Caso a altura e período de onda não sejam conhecidos, estes poderão ser determinados empiricamente, com base na velocidade do vento, de acordo com a formulação:

$$H_0 = 0,243 \frac{W^2}{g} \quad \text{e} \quad T_w = 8,13 \frac{W}{g} \quad (15)$$

Método de Mackay

Alternativamente, o algoritmo da dispersão vertical pode recorrer à formulação proposta por Mackay e Matsugu (1973):

$$\frac{dm_d}{dt} = 0,11 m_{oil} \frac{(1+W)^2}{1+50 \mathbf{m}^{1/2} h \mathbf{s}} \quad (16)$$

Esta formulação determina a taxa de transferência de massa por hora, em que m_{oil} é a massa de óleo que permanece à superfície, em kg, \mathbf{m} é a viscosidade dinâmica do óleo (cP), h é a espessura da mancha (cm), W é a velocidade do vento (m/s) e \mathbf{s} é a tensão da interface óleo-água (dina/cm).

Parâmetros utilizados nas simulações

Para a elaboração dos cenários de deriva para acidentes com petróleo na Plataforma de Merluza, primeiro foi definida a área de estudo para o ponto de vazamento. A grade utilizada nas simulações possui a dimensão de 400 x 400 células, com resolução de 200 m.

Para a modelagem de transporte da mancha de óleo derramado, foram utilizados os mesmos dados de vento aplicados no modelo hidrodinâmico.

Parâmetros, premissas e dados utilizados nas simulações

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

- Pequeno: 8 m³
- Médio: 200 m³
- Pior caso: 1912,5 m³

A Tabela -2 apresenta as características do ponto simulado.

Tabela -2 – Características do ponto simulado.

Plataforma ou Poço	Volume Pior Caso (m ³ /30d)	Grau API	Tipo de óleo	Latitude	Longitude	Datum
Plataforma de Merluza	1912,5	55,1	Condensado de Merluza	25°15'56"S	45°15'14"W	SAD-69

A Tabela -3 apresenta os parâmetros e premissas utilizadas.

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	Merluza
Temperatura da superfície da água	Temperatura média superficial da água do mar para o domínio simulado.	26°C – verão 21,0°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 – cenários de 8 m3 20 min – cenários de 200 m3 20 min – cenários de “pior caso”
Número de partículas	Quantidade de partículas utilizada para representar o vazamento	1000 – cenários de 8 m3 1000 – cenários de 200 m3 1000 – cenários de “pior caso”

A Tabela -4 apresenta as características do óleo Condensado de Merluza.

Tabela -4 - Características do óleo condensado de Merluza.

Característica	Valor	Unidade
Densidade	55,1	(°API)
Densidade relativa (a 20/4°C)	0,7540	-
Viscosidade (a -20,0 °C)	1,442	mm2/s
Viscosidade (a 0 °C)	1,032	mm2/s
Viscosidade (a 20,0 °C)	0,8006	mm2/s

A Tabela -5 apresenta os cenários modelados utilizados e os critérios de parada para a Plataforma de Merluza. Nas simulações foram considerados vazamentos instantâneos para os cenários de 1 a 7, e vazamentos contínuos para os cenários 7 e 8.

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 Merluza fazem com que ele atinja a concentração de 20 mg/L após 28,2 horas para um vazamento de 8 m3 e após 38,8 horas para 200 m3. Em ambos os casos, os vazamentos são considerados instantâneos.

Tabela -5 - Cenários considerados para a Plataforma de Merluza.

CENÁRIO	VOLUME (M ³)	ESTAÇÃO DO ANO	CRITÉRIO DE PARADA
1	8	Verão	Até 20 mg/L (28,2 horas)
2	8	Inverno	Até 20 mg/L (28,2 horas)
3	200	Verão	6 horas
4	200	Inverno	6 horas
5	200	Verão	Até 20 mg/L (38,8 horas)
6	200	Inverno	Até 20 mg/L (38,8 horas)
7	1912,5	Verão	30 dias
8	1912,5	Inverno	30 dias

Resultados

A seguir serão apresentados os resultados das simulações probabilísticas, mostrando os contornos de probabilidade de ocorrência de mancha ao considerar 100 simulações com diferentes combinações de forçantes. Como no caso de Merluza, não houve toque na costa em nenhuma das simulações probabilísticas, as simulações determinísticas não foram realizadas.

Simulações Probabilísticas

As Figuras -9 a 16 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para a Plataforma de Merluza, conforme os cenários listados na Tabela -5.

A Figura -9 representa a probabilidade de um vazamento acidental de 8 m³, no verão, com critério de 20 mg/l, ou seja, 28,2 horas. Para este caso a área atingida encontra-se entre as latitudes de 25°10'S e 25°30'S e longitudes de 45°10'W e 45°30'W, prevalecendo uma direção NE-SW. Na -10 está representada a mesma vazão e critério de parada, porém predominam condições de inverno. A

direção do vazamento passa para NNE-SSW, atingindo uma área mais ao sul, chegando a 25°35'S.

Para o caso de 200 m³, verão e critério de parada de 6 h baseados na Resolução CONAMA nº293/01 (Figura -11) a área atingida mostrou-se pequena, permanecendo compreendida entre as latitudes de 25°12'S e 25°20'S e longitudes 45°13'W e 45°20'W. Para o inverno (Figura -12) tem-se a área levemente mais extensa para SW, chegando a 25°21'S e 45°21'W. Considerando o critério de parada de 20mg/l, a área atingida pela mancha está compreendida entre as coordenadas 25°09' e 25°35' de latitude sul e 45°14' e 45°36' de longitude oeste para o período de verão (Figura -13), e entre 25°08' e 25°42' de latitude sul e 45°11' e 45°36' de longitude oeste para o período de inverno (Figura -14).

Nas Figuras -13 e 14 encontram-se as representações probabilísticas dos vazamentos acidentais de pior caso, com 1912,5 m³, contínuo ao longo de 30 dias, para verão e inverno respectivamente. No verão o vazamento abrange as latitudes de 25°20'S a 28°30'S e as longitudes de 45°20'W a 48°20'W e no inverno de 25°20'S a 28°30'S e longitude de 45°20'W a 47°50'W, ambas na direção NE-SW, evidenciando a influência da Corrente do Brasil, cujo fluxo predominante é para sul/sudoeste ao longo de todo o ano na região. Observou-se uma extensão de 370 km no inverno e 415 km, no verão.

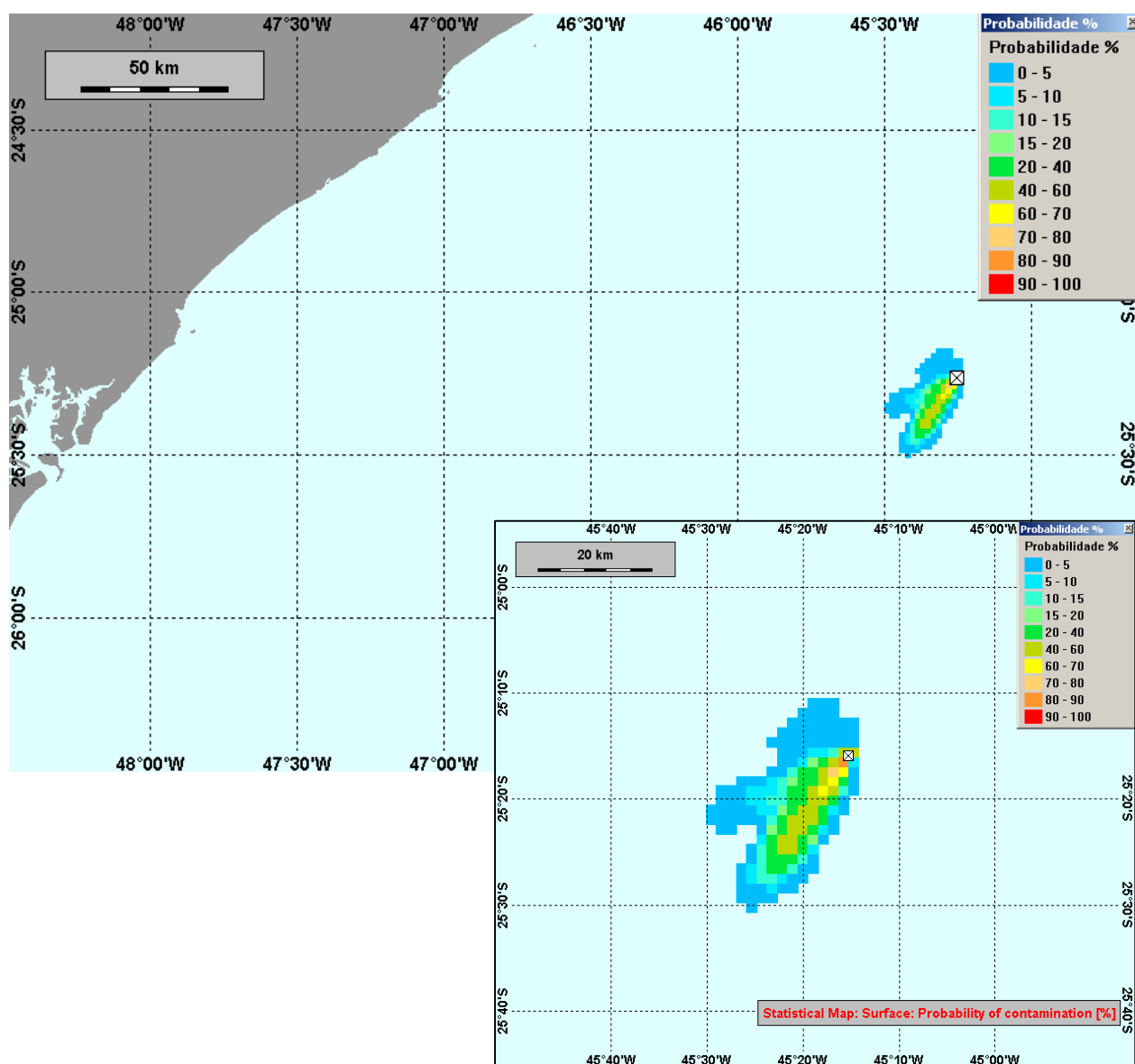


Figura -9: Contornos de probabilidade supondo vazamento accidental e zoom da área atingida - Plataforma de Merluza - CENÁRIO 1 (vazamento instantâneo de 8 m³, verão, critério de parada – 20 mg/L).

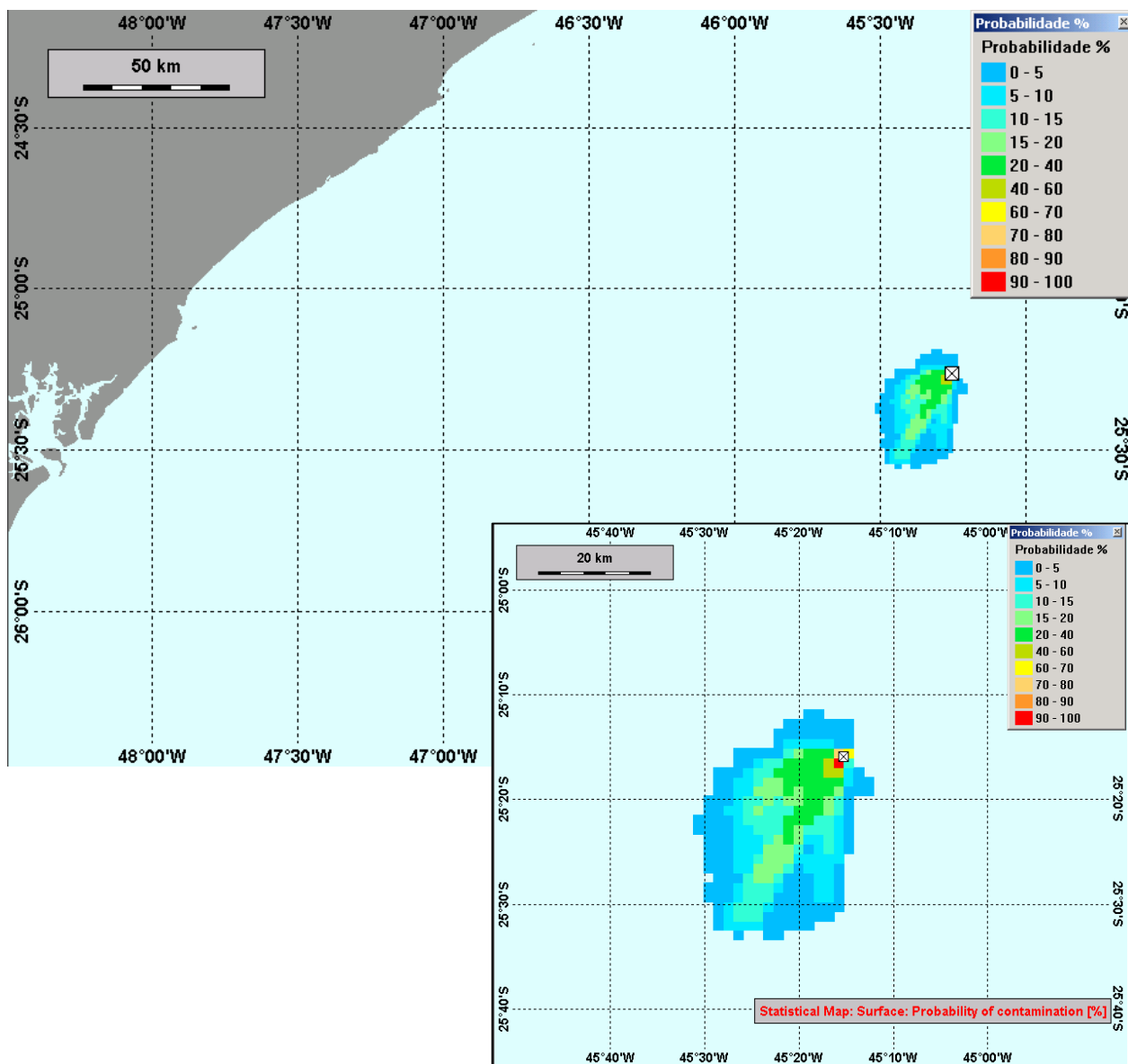


Figura -10: Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental e zoom da área atingida - Plataforma de Merluza - CENÁRIO 2 (vazamento instantâneo de 8 m³, inverno, critério de parada – 20 mg/L).

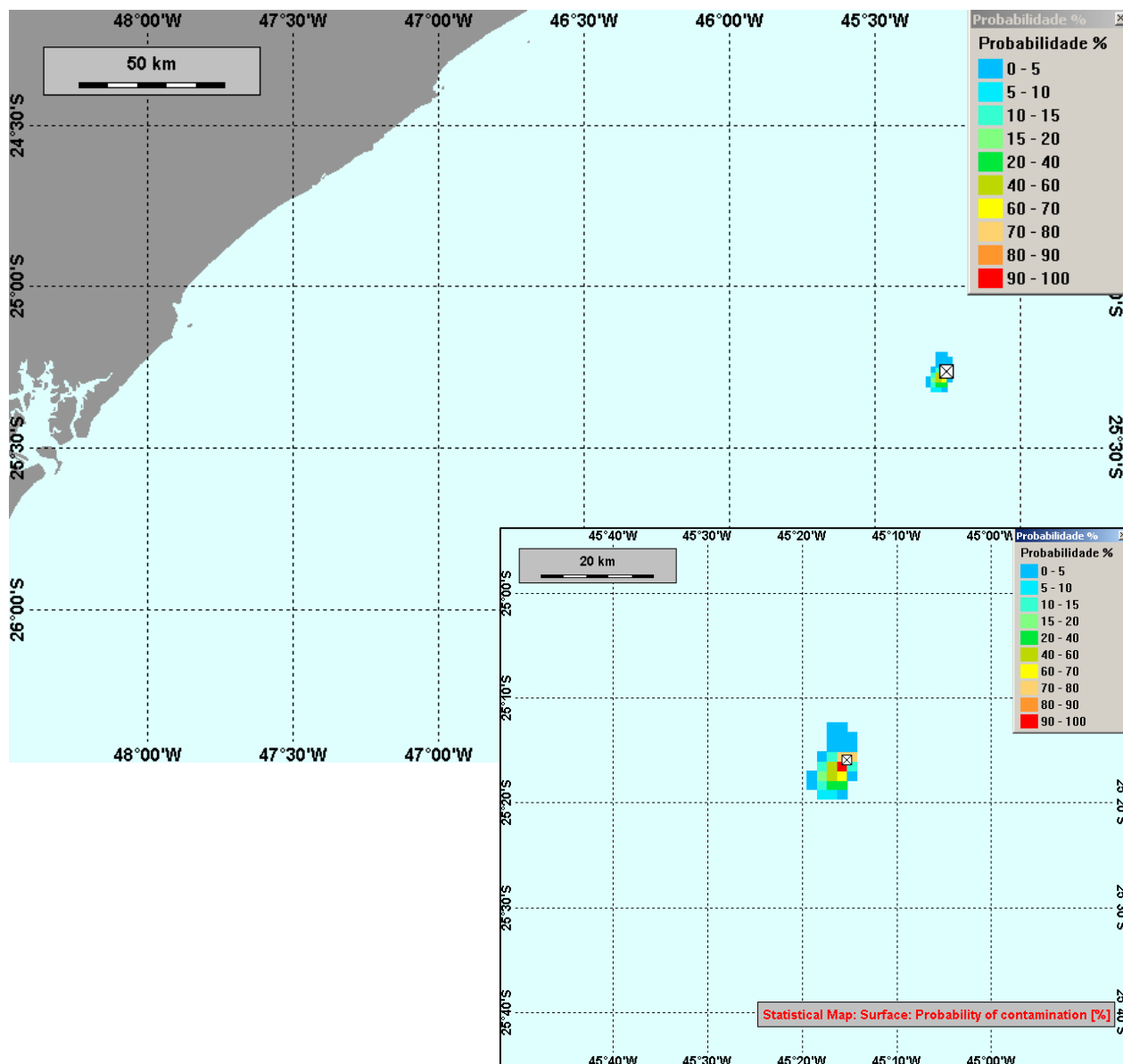


Figura -11: Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental e zoom da área atingida - Plataforma de Merluza - CENÁRIO 3 (vazamento instantâneo de 200 m³, verão, critério de parada – 6 horas).

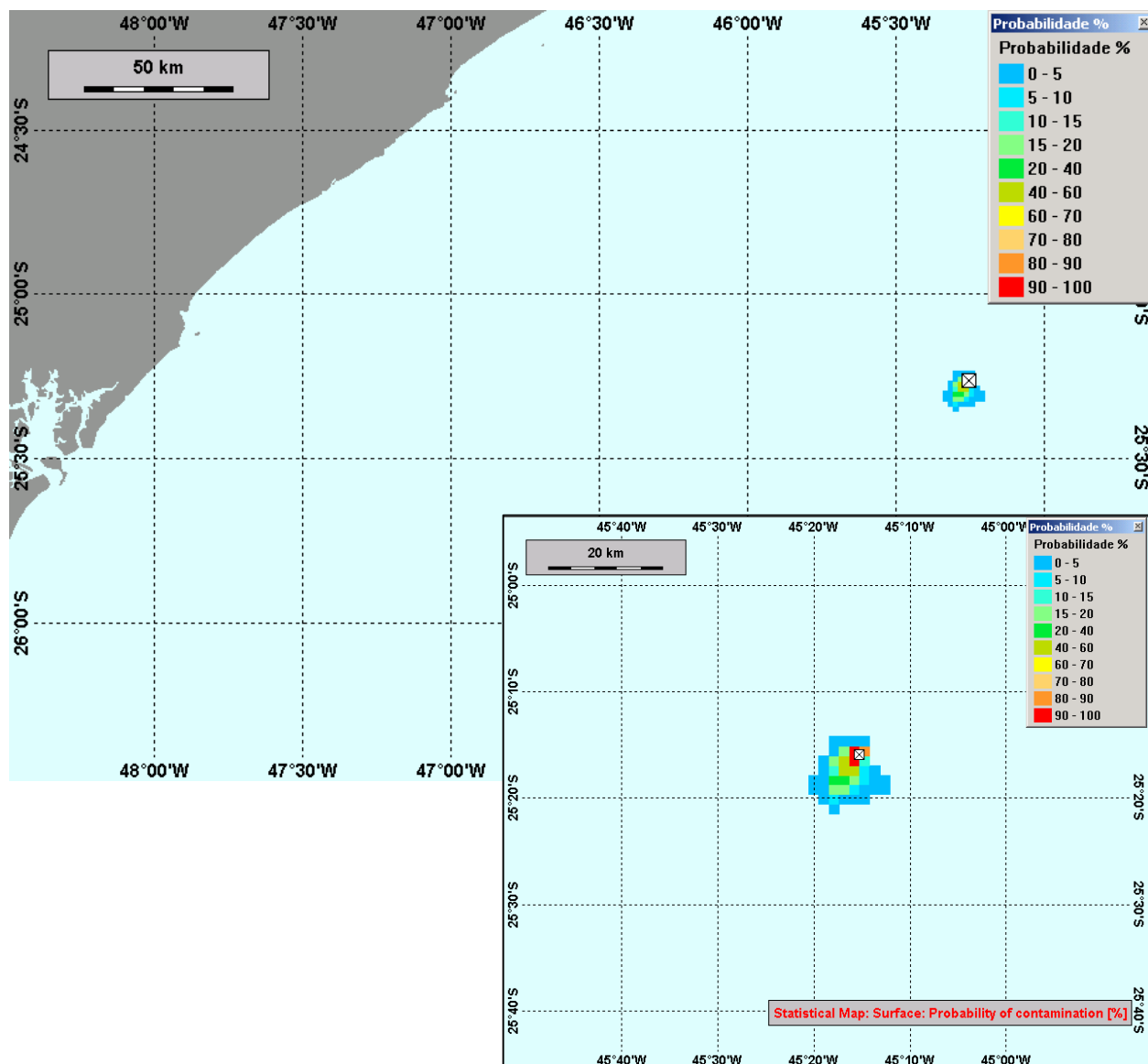


Figura -12: Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental e zoom da área atingida - Plataforma de Merluza - CENÁRIO 4 (vazamento instantâneo de 200 m³, inverno, critério de parada – 6 horas).

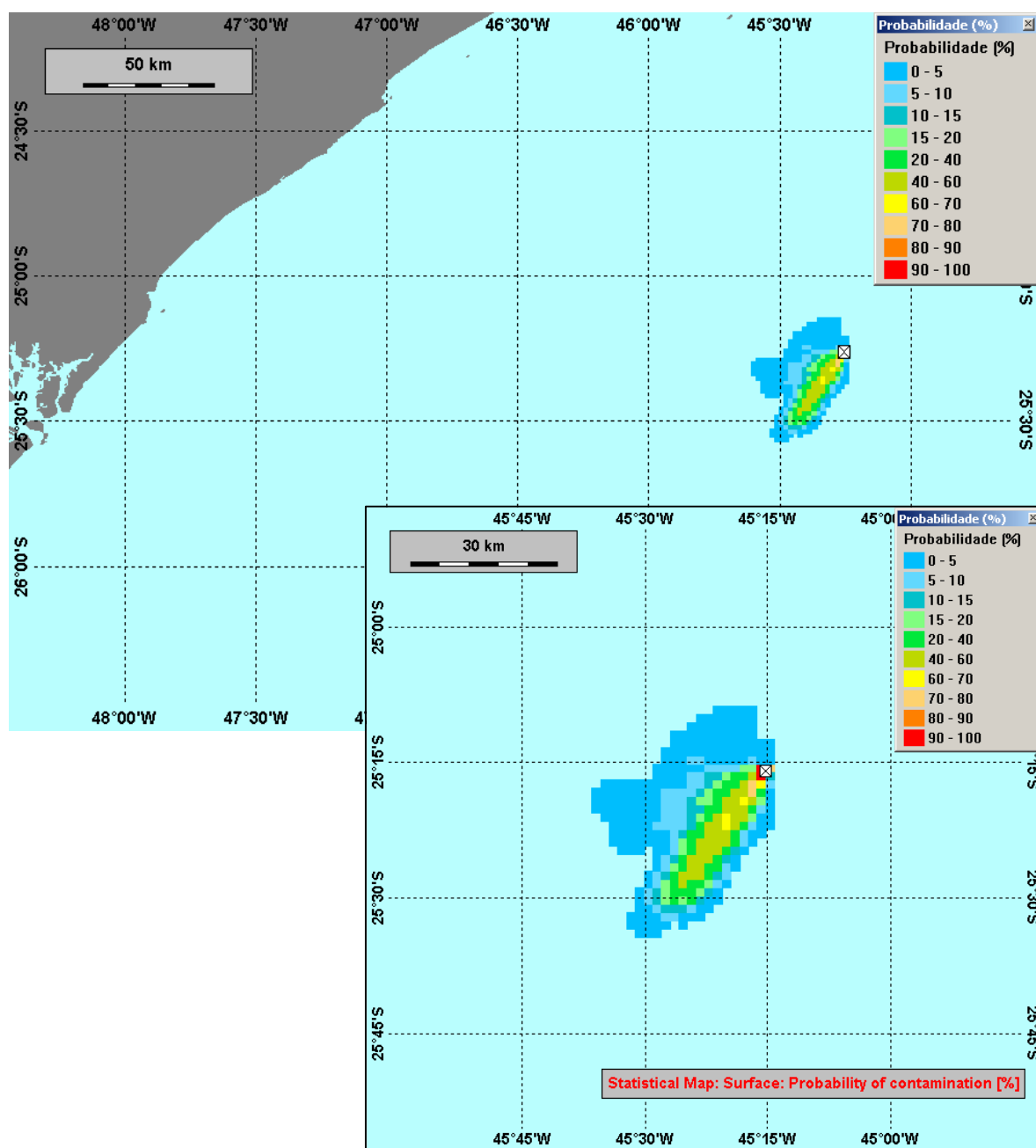


Figura -13: Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental e zoom da área atingida - Plataforma de Merluza - CENÁRIO 5 (vazamento instantâneo de 200 m³, verão, critério de parada – 20 mg/L).

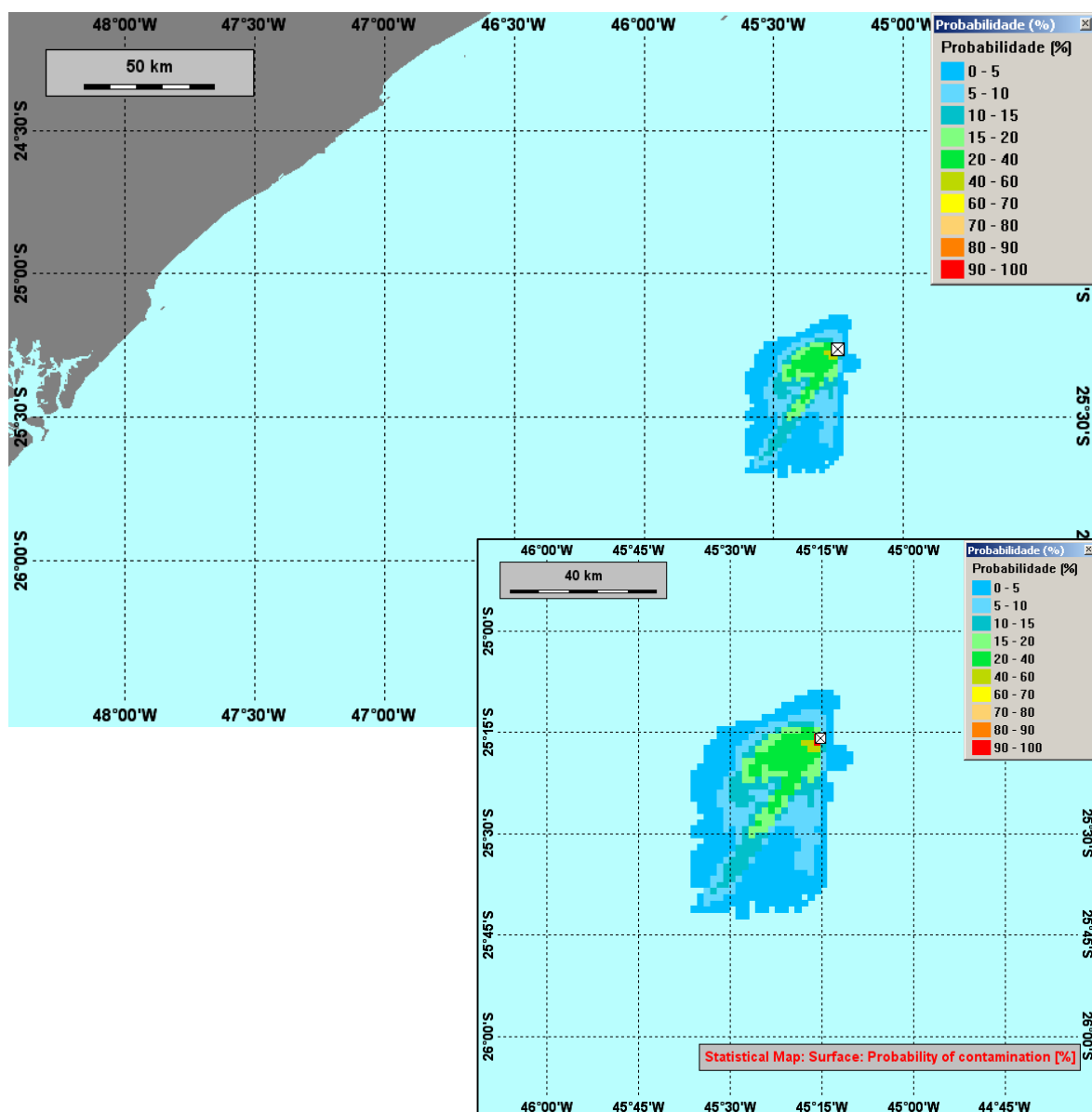


Figura -14: Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental e zoom da área atingida - Plataforma de Merluza - CENÁRIO 6 (vazamento instantâneo de 200 m³, inverno, critério de parada – 20 mg/L).

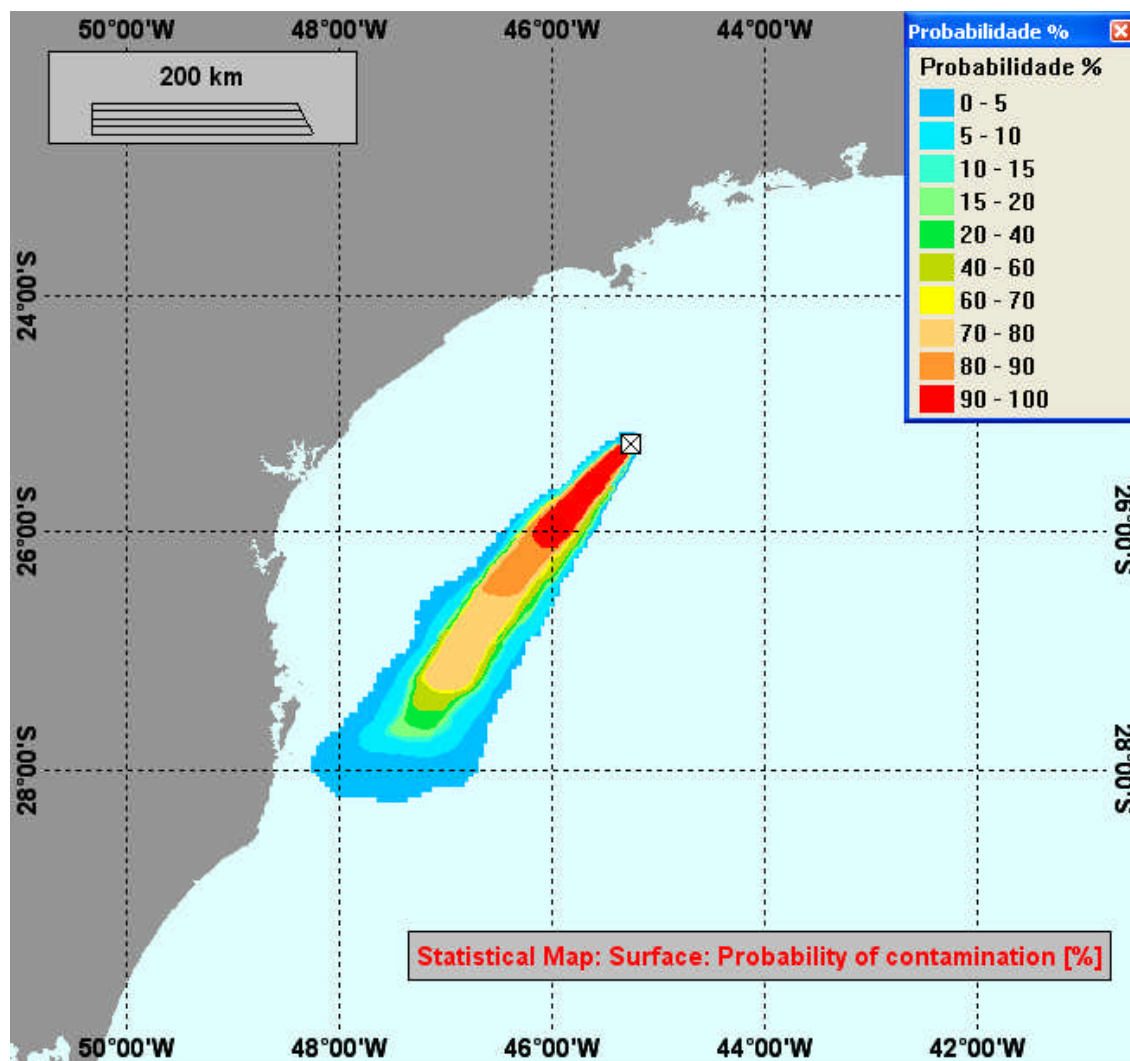


Figura -15: Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental - Plataforma de Merluza - CENÁRIO 5 (1912,5 m³, verão, critério de parada – 30 dias).

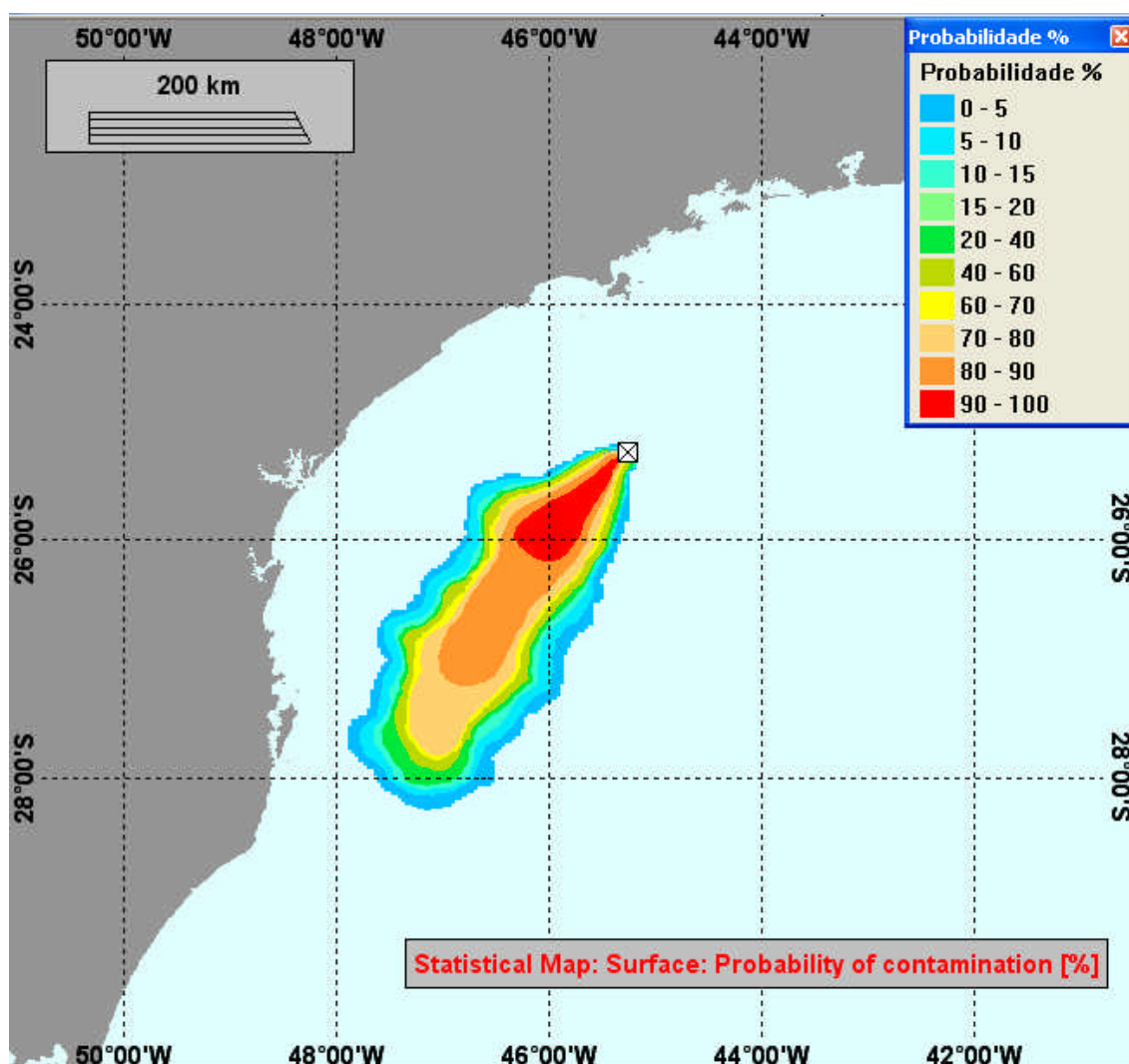


Figura -16: Contornos de probabilidade supondo vazamento acidental - Plataforma de Merluza - CENÁRIO 6 (1912,5 m³, inverno, critério de parada – 30 dias).

Conclusão

O relatório apresentado aqui demonstra a aplicabilidade do modelo de dispersão e transporte de óleo OSCAR para a região de estudo e sua eficiência quando usado em conjunto com a base hidrodinâmica do modelo POM.

Como em qualquer modelo matemático, os resultados do POM são dependentes dos dados de *input* usados para inicializar e forçar o modelo. Da mesma forma, a validação dos seus resultados depende dos dados de calibração que, no caso deste estudo, são dados de correntes e elevação do nível do mar. Em função disto, procura-se sempre utilizar dados de *input* que sejam de boa qualidade e representativos das condições oceanográficas da região de estudo, incluindo as variações sazonais. No caso da simulação hidrodinâmica utilizada neste trabalho, o intervalo de tempo considerado foi de 30 dias para cada período (verão e inverno). Sendo assim, as flutuações na circulação causadas por ventos e marés são mais evidentes do que aquelas que ocorrem nos campos de temperatura e salinidade modelados.

Os resultados probabilísticos apresentados neste relatório para a Plataforma de Merluza evidenciaram que em nenhum dos cenários realizados o óleo atingiu a costa.

Na simulação para o caso médio de vazamento, 200 m³, as áreas atingidas são as menores tanto no verão quanto no inverno, que ocorre provavelmente devido ao menor critério de parada, 6h.

No geral, os comprimentos das áreas de vazamento no verão estão maiores e as larguras menores que no inverno. Isto indica que no verão as condições meteoceanográficas não variaram tanto quanto no inverno.

Os cenários 7 e 8, Figuras -15 e 16, se apresentaram como os mais críticos, uma vez que o óleo atingiu uma maior área. No inverno o vazamento chegou a atingir uma extensão de 370 km e no verão 415 km.

- Modelagem de Dispersão de Água De Produção

Introdução

Este relatório apresenta as premissas teóricas, a abordagem metodológica, os dados utilizados e os resultados da modelagem da água de produção gerada pelas atividades da Plataforma de Merluza (45° 15' 14 "W e 25° 15' 56" S), da Petrobras, na bacia de Santos. O planejamento da atividade de perfuração vem ao encontro das demandas dos órgãos ambientais reguladores. Este trabalho objetivou estimar, através de modelos numérico-analíticos, a massa, a concentração e a evolução temporal das plumas originadas do descarte da água de produção.

Metodologia

O modelo empregado neste trabalho é o 'Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model' (OCC), desenvolvido pela Exxon Production Research Company (EPR) (Brandsma, 1999).

O Modelo OCC é um programa computacional que possibilita prever o comportamento de água de produção, fluido de perfuração e de lama/cascalho descarregado no meio ambiente.

As fases da dispersão da pluma de descarte

Na aplicação do Modelo OCC assume-se que o material descarregado é originado de uma fonte única em um local específico. O lançamento ocorre para um ambiente que é caracterizado por parâmetros específicos de temperatura, densidade e correntes. O material descarregado pode ter flutuabilidade positiva ou negativa, podendo ser descarregado e direcionado para cima ou para baixo.

Após ser descarregado, o material segue três regimes distintos de fluxo (Figura -17). O primeiro é a fase convectiva (ou de jato), onde o material é dominado pelo momentum da descarga inicial, entranhamento e por arrasto, onde o efluente entra ativamente no fluído ambiente. O segundo regime é a fase de

colapso dinâmico, onde o material se ajusta à profundidade de equilíbrio, onde a advecção (do jato e do meio) e os gradientes de densidade são as principais forças atuantes. O estágio final é o da dispersão passiva na qual a pluma de descarga perdeu seu caráter dinâmico e os fenômenos de difusão e advecção do meio são os principais mecanismos de transporte. Assim, o transporte do material descarregado devido à ação das correntes e do assentamento, ocorre durante todas as fases do desenvolvimento da pluma.

No contexto deste trabalho, diferentes tipos de plumas podem ser discretizadas. O termo pluma ou nuvem refere-se ao material descarregado na coluna d'água, sob ação dos regimes de descida convectiva, colapso dinâmico, ou dispersão passiva. O termo pluma dinâmica refere-se somente à ação dos regimes da fase de jato e colapso dinâmico.

A pluma na fase de jato (convectiva) insere-se no fluido em função da ação do fluxo do jato e das correntes do ambiente. A fase de jato termina e o colapso dinâmico começa quando a pluma encontra o seu nível neutro de flutuabilidade, ou quando ocorre impacto com o fundo, ou aflora na superfície. Neste ponto o movimento vertical é retardado e o espalhamento horizontal se torna dominante.

À medida que a pluma diminui de espessura na direção vertical, a tendência ao colapso diminui. A turbulência no ambiente tende a cessar o caráter coerente da pluma. A fase de colapso continua até que o espalhamento devido aos mecanismos dinâmicos se torne menor que a taxa de espalhamento causado pela dispersão turbulenta do meio.

Neste ponto, a fase de dispersão passiva se inicia, no qual são formadas 'nuvens' de partículas no fim da pluma dinâmica. Estas 'nuvens' consistem em pequenos grupos de partículas sólidas. Cada 'nuvem' possui sua própria distribuição de concentração no espaço e no tempo, onde a sobreposição da distribuição de diferentes nuvens de partículas pode ocorrer.

O Modelo OCC calcula a concentração dos componentes da descarga em um dado ponto, somando as contribuições de todas as 'nuvens' de um dado componente, localizadas dentro de um intervalo de três desvios-padrão do ponto de interesse.

As 'nuvens' são transportadas pela corrente e se expandem com o tempo de maneira difusiva. O Modelo OCC analisa cada 'nuvem' até o final da simulação,

ou até que esta esteja completamente depositada no fundo. O sistema de coordenadas pode ser observado na Figura -18.

A parte do modelo que trata das fases dinâmicas (descida convectiva e colapso dinâmico) é baseada nas formulações de Koh e Chang (1973). Em relação à dispersão passiva, emprega-se um método Lagrangeano explícito desenvolvido para o OCC.

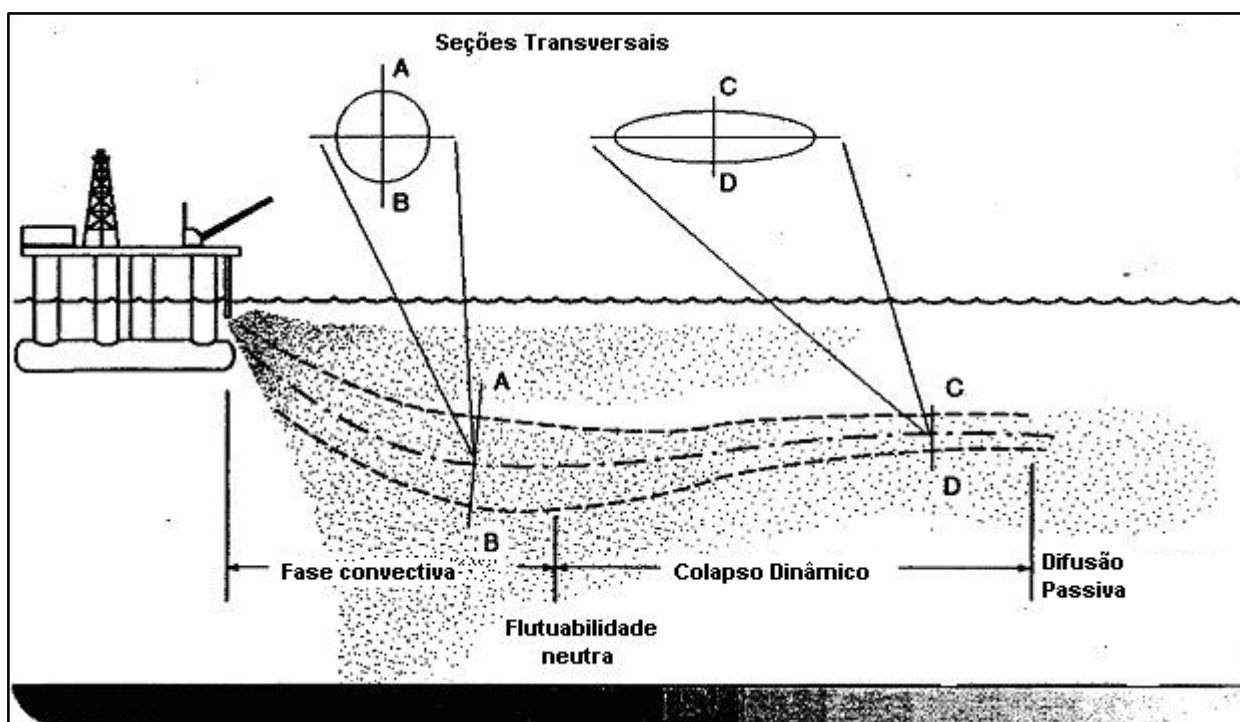


Figura -17: Etapas da descarga do efluente de perfuração.

As fases de Jato e de Colapso dinâmico

Na fase inicial do descarte a taxa de mudança do fluxo de massa é igual à taxa de entranhamento do jato no fluido ambiente, menos a massa perdida por deposição ao longo do arco descrito por este. Na fase de jato a equação governante do fluxo de massa é:

$$\frac{d}{ds}(\mathbf{r}Q) = E\mathbf{r}_a - \sum_i (S_i \mathbf{r}_i) \quad \text{Eq.(1)}$$

onde:

ds	o incremento ao longo do comprimento do arco do jato
\mathbf{r}	a densidade do jato
$Q = \mathbf{p} \, b^2 \, \vec{U}$	a vazão
b	o raio do jato
\vec{U}	a velocidade do jato
E	o entranhamento
\mathbf{r}_a	densidade do ambiente
S	o coeficiente de deposição

A quantidade de movimento ao longo do eixo do jato é igual ao fluxo de fluabilidade, mais o entranhamento de movimento, menos a taxa de deposição de movimento, mais a força de arrasto.

A taxa de mudança do fluxo de movimento pode ser descrita pela equação:

$$\frac{d}{ds}(\mathbf{r}Q\vec{U}) = \mathbf{p} \, b^2 \, g(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a) \vec{J} + E \mathbf{r}_a \vec{U}_a - \sum_i (S_i \mathbf{r}_i \vec{U}) + \vec{F}_D' \quad \text{Eq.(2)}$$

onde:

G	a aceleração gravitacional
J	o vetor unitário na direção vertical
\vec{U}_a	a velocidade no ambiente
$F_D = C_D \mathbf{r}_a b(U_a \sin g)^2$	a força de arrasto
C_D	o coeficiente de arrasto
γ	o ângulo entre o arco do jato e o vetor velocidade ambiente

A conservação do fluxo de fluabilidade ao longo do eixo do jato pode ser equacionada da seguinte maneira: o entranhamento menos a parcela que sai da região do jato. Correspondendo a seguinte equação:

$$\frac{d}{ds}(Q(\mathbf{r}_a(0) - \mathbf{r})) = E(\mathbf{r}_a(0) - \mathbf{r}_a) - \sum_i S_i(\mathbf{r}_a(0) - \mathbf{r}_i) \quad \text{Eq.(3)}$$

A taxa de variação do iésimo constituinte ao longo do eixo do jato é igual à taxa do volume do constituinte saindo da pluma por unidade de comprimento.

$$\frac{dP_i}{ds} = -S_i \quad \text{Eq.(4)}$$

Ainda nesta fase tem-se a separação de alguns componentes do efluente, estes se separam da parte principal da pluma por dois mecanismos, a velocidade de queda diferenciada ou ainda pela diferença de densidade entre o meio e efluente associada às velocidades de descarga. Essa razão entre o momentum (quantidade de movimento) da pluma e sua fluabilidade em relação ao meio é chamada de número densimétrico de Froude (Eq. 5). Para números de Froude pequenos têm-se grandes diferenças entre a densidade do efluente e do meio associadas a baixas taxas de descarga, e o contrário para números de Froude grandes.

$$F_r = \frac{\left| \vec{U} - \vec{U}_a \cos \mathbf{g}_a \right|}{\sqrt{gb \frac{\Delta \mathbf{r}}{\mathbf{r}_a(0)}}} \quad \text{Eq.(5)}$$

E que o coeficiente de entranhamento é dependente;

$$C_e = \frac{0.0806 + 0.7835 \sin j_a}{1 + 5 \left| \vec{U} \right| \cos g \cos j_a} \frac{h F_r}{\left| \vec{U} \right| - \left| \vec{U}_a \right| \cos g \cos j_a} \quad \text{Eq.(6)}$$

E por fim o entranhamento que está intrinsecamente ligado ao coeficiente de entranhamento;

$$E = 2pbC_e \left| \vec{U} \right| - \left| \vec{U}_a \right| \cos g \cos j_a \quad \text{Eq.(7)}$$

onde:

j_a	Ângulo no plano horizontal entre a linha central do jato e o vetor velocidade ambiente.
η	Constante de proporcionalidade, no caso com valor de 2.25 polegadas.

Fase de dispersão passiva

O esquema de dispersão utilizado nesta etapa é um modelo lagrangeano. O transporte se dá através de uma dada classe de partículas, ou fluido, que sae da fase dinâmica da pluma (fases de Jato e de Colapso), as chamadas nuvens de partículas, são perseguidas ao longo do tempo e do espaço, onde ficam a deriva da advecção e da difusão dos campos hidrodinâmicos do meio.

Para cada nuvem individual assume-se uma distribuição Gaussiana nas três dimensões. Cada uma é advectada, difundida e depositada independente do passo de tempo global, tendo relação com as correntes do ambiente, com os coeficientes de dispersão e as velocidades de decantação. O resultado é uma distribuição de nuvens de partícula variável no tempo, da qual pode-se calcular a concentração em qualquer ponto, através da soma das contribuições das nuvens.

A concentração é calculada como uma distribuição de uma nuvem Gaussiana:

$$C = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} s_x s_y s_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-x_0)^2}{s_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{s_y^2} + \frac{(z-z_0)^2}{s_z^2} \right) \right] \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde se considera que o eixo principal da nuvem esteja alinhado com o sistema de coordenadas; e x, y, z são as coordenadas do ponto de interesse; x_0, y_0, z_0 são as coordenadas do centróide da nuvem; s_x^2, s_y^2, s_z^2 são as variâncias da nuvem e m é a massa contida na nuvem.

A nuvem é advectada horizontalmente de acordo com as correntes locais. Não havendo componente vertical da advecção. A advecção da nuvem é calculada da seguinte maneira:

$$X_{novo} = X_{antigo} + u_a \Delta t \quad \text{Eq.(9)}$$

$$Z_{novo} = Z_{antigo} + w_a \Delta t \quad \text{Eq.(10)}$$

Onde X, Z são as coordenadas horizontais da nuvem, u_a, w_a são as velocidades ambientes locais e Δt é o passo de tempo. O sistema de coordenadas pode ser observado na Figura -18.

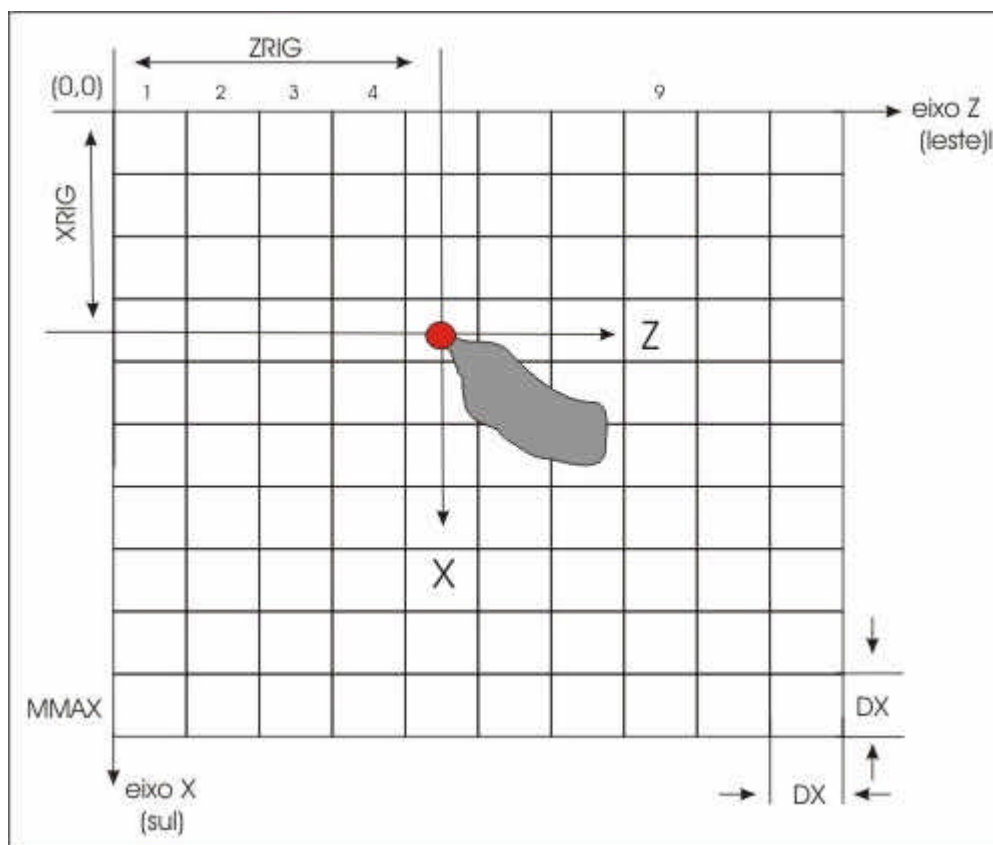


Figura -18: Sistema de coordenadas do Modelo OOC.

Condições e requisitos para a modelagem

O Modelo OOC utiliza como dados de entrada valores relacionados às características da descarga, da plataforma e variáveis ambientais. Portanto parâmetros e pré-definições devem ser estabelecidos para entrada no modelo OCC, a saber (Tabela -6):

Tabela -6: Requisitos de entrada no modelo OOC

Profundidade (m)	Profundidade da lâmina de água
Profundidade de descarte (m)	Profundidade na qual é realizado o descarte
Raio (cm) e angulação do bocal (°)	Características do bocal de descarte
Volume da água de produção (m ³)	Volume da descarga
Volume de óleo (m ³)	Volume de óleo envolvido na descarga
Diâmetro da classe de gotículas de óleo (mm)	Diâmetro(s) médio(s) da(s) classe(s) de gotículas de óleo(s) constituinte(s)
Densidade do óleo (g/cm ³)	Densidade(s) do(s) óleo(s) constituinte(s)
Fração do óleo (%)	Fração do(s) volume(s) do(s) óleo(s) constituinte(s)
Temperatura (°C) e salinidade da água de produção	Características do descarte
Duração do descarte (hora)	Tempo de duração da descarga
Altura significativa da onda (m)	Parâmetro estatístico de onda
Período (s)	Período de pico da onda significativa
Velocidade do vento (m/s)	Velocidade do vento (média)
Temperatura do ar (°C)	Temperatura do ar (média)
Perfil de densidade da água do mar	Características ambientais do local que recebe o descarte
Perfil de correntometria da água do mar	Características ambientais do local que recebe o descarte

Alguns parâmetros podem ser substituídos como é o caso do perfil de densidade do ambiente, perfis de temperatura e salinidade são parâmetros conservativos e pode-se calcular a partir destes, o perfil de densidade do meio.

A batimetria pode ser definida por um plano 2-D (X-Z), ou por uma profundidade constante especificada em pés. Perfis de velocidade e direção de corrente podem ser fornecidos com o estabelecimento das camadas de profundidades.

O modelo também leva em consideração especificações do estado do mar, como estabelecimento dos parâmetros de altura significativa de onda; período correspondente; velocidade do vento e temperatura do ar.

Em relação aos efeitos de turbulência gerados pela plataforma, o modelo introduz flutuações aleatórias durante a dispersão. Os efeitos são calculados com base nas dimensões das estruturas da plataforma (extensão, tamanho e diâmetro das estruturas submersas e o espaçamento entre estas estruturas). Estes cálculos são realizados de forma aproximada.

Dados utilizados

O descarte da água de produção foi simulado durante 1 dia, sob uma lâmina d'água de aproximadamente 130 m, a uma profundidade de 33 m e com um bocal emissor de raio igual a 6,1 cm.

O efluente foi modelado com uma vazão de 1,04 m³/h, temperatura de 40° C e salinidade de 7,1771. Considerou-se uma fração única de óleo inclusa, com densidade de 0,758 g/cm³ e partículas com diâmetro em torno de 1 cm, correspondendo a 0,00158% do volume da água de produção. A densidade do óleo foi calculada através da fórmula do grau API (American Petroleum Institute);

$$g = \frac{141,5}{(131,5 + ^\circ API)} \quad \text{Eq.(11)}$$

onde:

g	densidade relativa do petróleo a 15° C
$^\circ API$	55,1

A velocidade vertical das partículas de óleo foi calculada através da lei de Rubey modificada (Watson, 1969) em função dos dados referentes às partículas, como diâmetro e densidade, e ao meio, como densidade e viscosidade (Equação 12). A velocidade calculada para as partículas de óleo foi de -0.0611 cm/s.

$$V = \frac{\sqrt{9Z^2 m^2 + \frac{4}{3}WR^3(r_{part} - r_{flui})g - 3Zm}}{WRr_{flui}} \quad \text{Eq.(12)}$$

Onde:

V	Velocidade de queda (cm/s)
Z	Coeficiente de arrasto viscoso (adimensional) 0,622
W	Coeficiente de arrasto de pressão (adimensional) 0,5305
μ	Viscosidade dinâmica do meio (poise, dina-sec/cm ²)
ρ	Densidade (g/cm ³)
G	Aceleração da gravidade (980 cm/s ²)
R	Raio da partícula (cm)

Em relação aos parâmetros oceanográficos; no perfil de corrente (Tabela -7) foi utilizada uma série de intensidade e direção obtida do fundeio C2 (200 m) do Projeto Coroas (1999) e os perfis de salinidade e de temperatura (Tabela -8), foram obtidos com base na campanha de inverno do mesmo projeto.

Tabela -7: Valores de intensidade e direção de corrente

PROFUNDIDADE (M)	VELOCIDADE (CM/S)	DIREÇÃO (°)
0	60,0	215
31	48,0	194
74	41,0	185
127	26,0	193
130	26,0	193

Tabela - 8: Valores de temperatura e salinidade

PROFUNDIDADE (M)	TEMPERATURA (°C)	SALINIDADE
0	19,5	34,25
20	20,5	34,60
50	21,5	35,15
70	21,5	35,60
100	19,0	35,90
130	18,0	36,00

Quanto às condições de estado do mar, considerou-se uma altura significativa de onda de 2,0 m e um período de 10 segundos e em relação às condições atmosféricas, foi utilizada uma intensidade de vento de 5,77 m/s e temperatura do ar de 28° C, esses valores tiveram como base os dados do BNDO/DHN.

A densidade da água de produção é de 1,0029 g/cm³.

Resultados

Concentração da pluma dinâmica de água de produção na coluna de água

A Figura -19 apresenta a vista tridimensional da concentração da água de produção na fase de pluma dinâmica. O material se ajusta à profundidade de equilíbrio 136,65 segundos após o descarte, na profundidade de 31,72 m, em uma distância de 15,45 m a oeste e 63,09 m a sul do ponto de descarte.

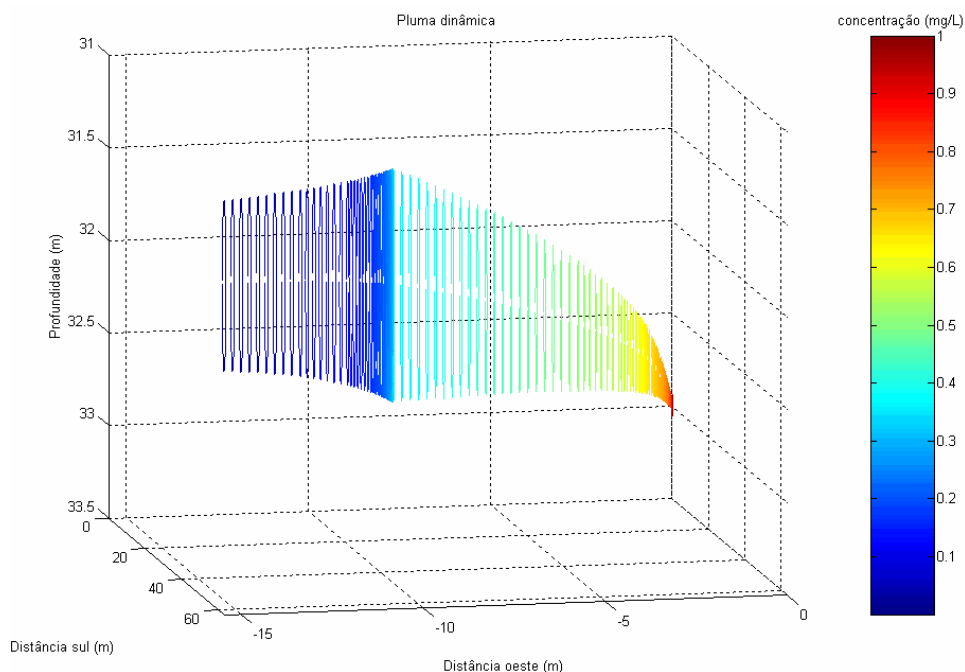


Figura -19: Vista tridimensional da concentração da água de produção na pluma dinâmica.

As figuras -19 e 20 apresentam vistas longitudinais da concentração do óleo descartado na coluna d'água, em diferentes instantes do processo de descarte. A Figura -19 apresenta o perfil na coluna d'água inteira, enquanto que a Figura -20 representa o mesmo perfil, mas em uma visão aproximada da pluma. A figura -6 apresenta uma visão planar da massa total de óleo na coluna d'água.

Foram considerados os limites de 0,001 mg/L para os resultados de concentração de óleo na coluna d'água e de 0,005 Kg para a massa total de óleo na coluna d'água.

Concentração de Óleo na Coluna de Água

A simulação considerou uma concentração inicial de óleo de 12 ppm de óleo descartado, de acordo com o laudo da água de produção (AMA 022/2004) do CENPES. Este material foi coletado na saída SAO 533201, às 12 horas de 03/02/2004.

De acordo com a resolução CONAMA 20; a concentração máxima permitida em águas Classe 5, para óleos minerais é de 20 ppm e para óleos e gorduras vegetais, é de 50 ppm. No caso da água produzida nas plataformas marítimas da PETROBRAS, a concentração máxima de óleo descartado é de 15 ppm, pois a empresa possui um dispositivo de alerta, o qual cessa o descarte na presença de concentrações maiores.

As Figuras -19 e 20 mostram a simulação do descarte, 24 horas após o início, o maior valor de concentração encontrado foi de 0,0851 mg/L, entre 19 e 50 m do ponto de descarte, no intervalo de profundidade de 31 a 33 m. O menor valor de concentração representado foi o de 0,001 mg/L, a uma distância máxima de 700 m do ponto de descarte e entre as profundidades de 28 a 34 m.

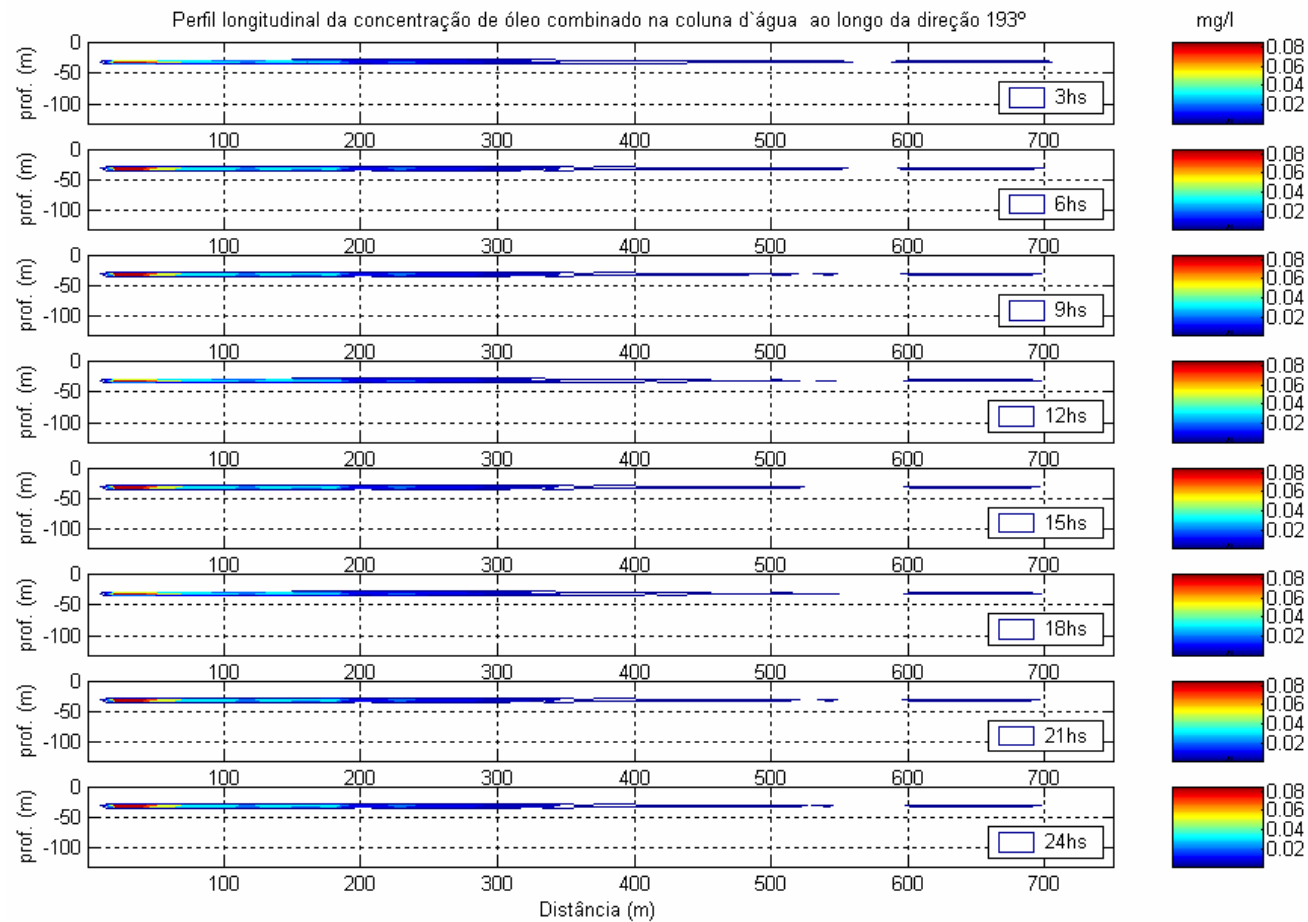


Figura -19: Vista longitudinal da concentração de óleo na coluna d'água durante 24 horas de descarte contínuos, em intervalos de 3 horas.

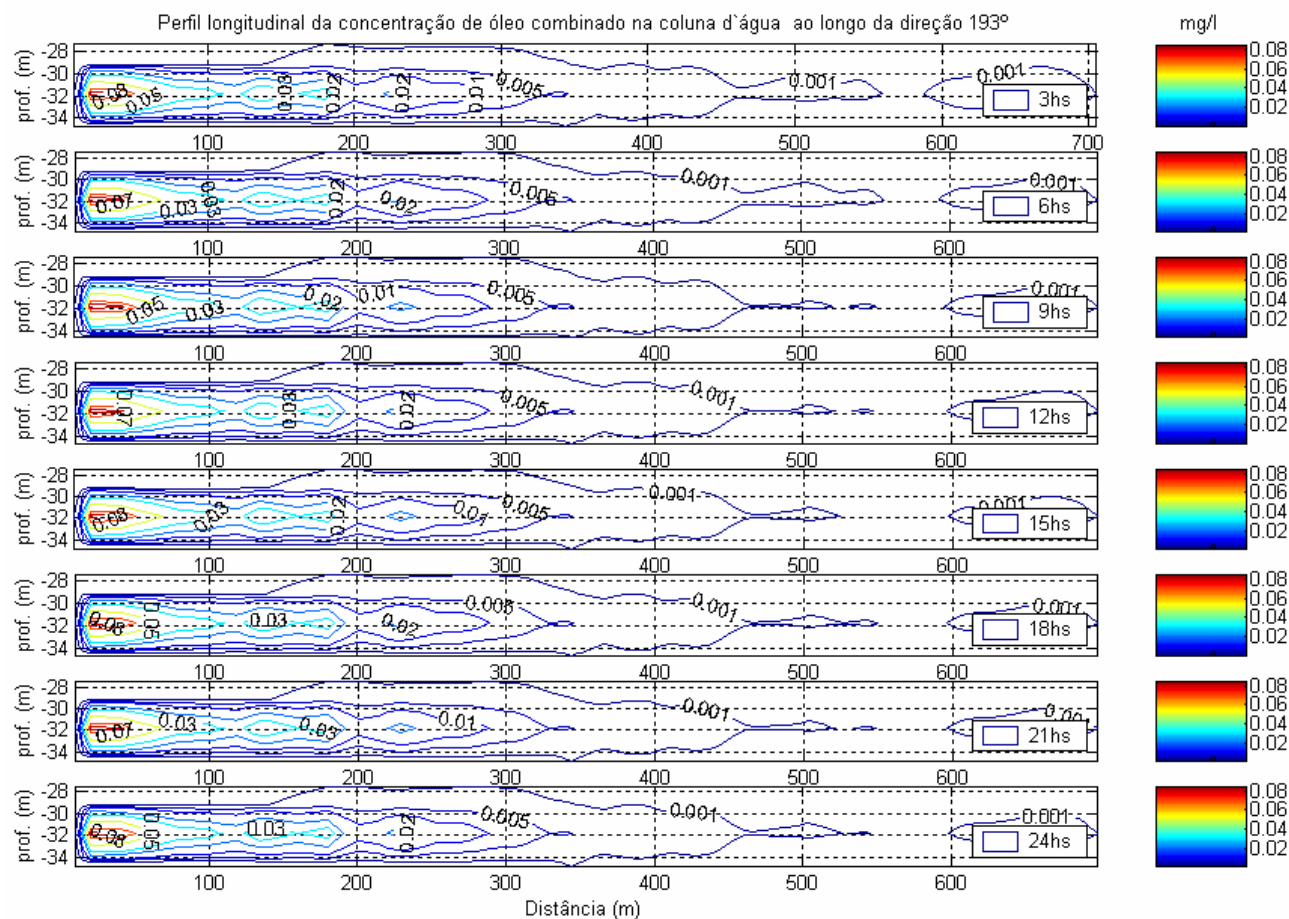


Figura -20: Aproximação da vista longitudinal da concentração de óleo na coluna d'água durante 24 horas de descarte contínuos, em intervalos de 3 horas.

Massa Total do Óleo na Coluna de Água

A Figura -21 apresenta a massa total do óleo na coluna d'água, 24 horas após o início do descarte. Pode-se observar uma gradação dos valores (maiores nas proximidades do ponto de lançamento, em torno de 0,02 kg) no sentido NE-SW.

Considerando a escala utilizada na Figura -21 (de 0,005 a 0,02 kg), a pluma apresentou uma extensão total de 950 m, com os maiores valores de massas se concentrando até aproximadamente 590 m do ponto de origem. A isolinha de 0,02 Kg apresenta uma área de 65,21 m². A pluma não apresenta grande variação no eixo radial.

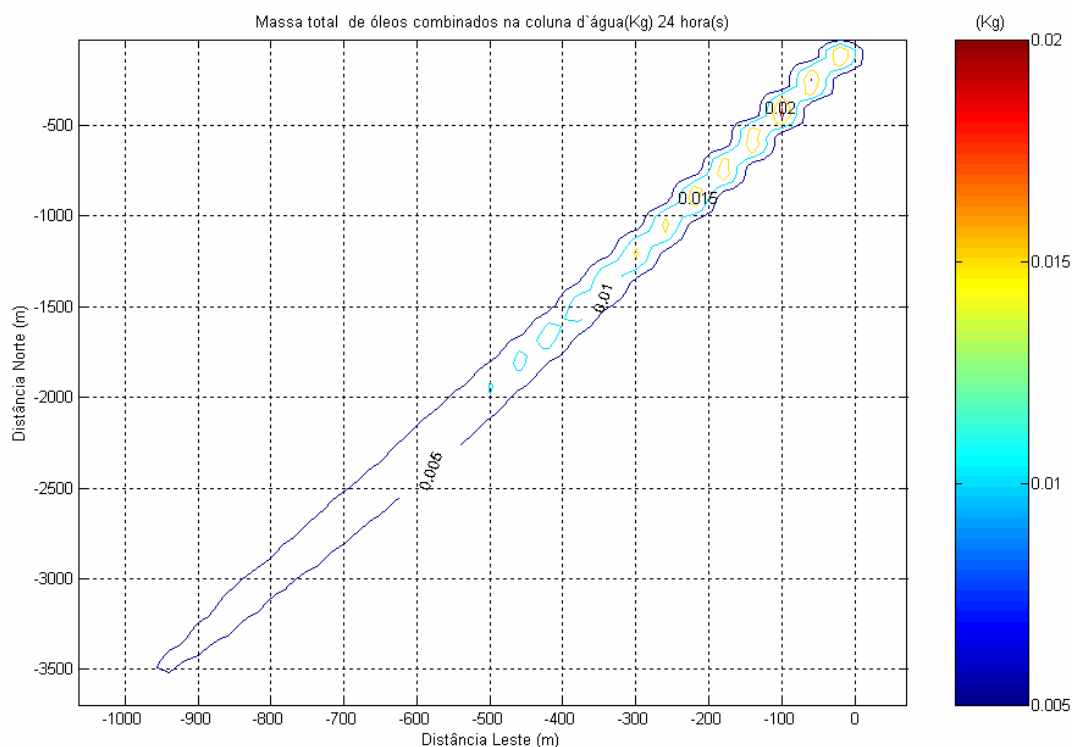


Figura -21: Vista planar da massa total de água de produção na coluna d'água, 24 horas após o descarte.