

Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o Vazamento de Pior Caso do FPSO Fluminense, nos Campos de Bijupirá e Salema, Bacia de Campos

Revisão 01
Set/2007



ASA SOUTH AMERICA
Rua Purpurina, 155, cj 95
Vila Madalena – São Paulo –SP
CEP 05435-030



Shell

SHELL Brasil
Av. das Américas, 4.200 – Blocos 5 e 6
Barra da Tijuca - Rio de Janeiro, RJ
CEP 22640-102

**MODELAGEM DO TRANSPORTE E DISPERSÃO DE
ÓLEO NO MAR PARA O VAZAMENTO DE PIOR CASO DO
FPSO FLUMINENSE, NOS CAMPOS DE BIJUPIRÁ E SALEMA,
BACIA DE CAMPOS**

Equipe Técnica **ASA SOUTH AMERICA:**

ANA CAROLINA DA ROCHA LAMMARDO	(Nº IBAMA : 325047)
CARLOS EDUARDO SIMÃO	(Nº IBAMA : 434226)
EDUARDO AYRES YASSUDA	(Nº IBAMA : 94066)
ERIKA NAOMI DE SOUZA TOMINAGA	(Nº IBAMA : 980855)
FÁBIO LUCIANO PINCINATO	(Nº IBAMA : 1821519)
GABRIEL CLAUZET	(Nº IBAMA : 1031373)
HEMERSON EVERALDO TONIN	(Nº IBAMA : 1658739)
JOSÉ EDSON PEREIRA	(Nº IBAMA : 326336)
MARCO ANTONIO CORRÊA	(Nº IBAMA : 434236)
MARIA REGINA F. GUIMARÃES	(Nº IBAMA : 434231)
MAURÍCIO PERSON LAMMARDO	(Nº IBAMA : 272165)
PAULA LAMOSA NUNES	(Nº IBAMA : 241848)
PEDRO FABIANO M. SARMENTO	(Nº IBAMA: 1800416)
RAFAEL BONANATA DA ROCHA	(Nº IBAMA : 434269)
TIAGO NICOLSI BOMVENTI	(Nº IBAMA: 1939722)

Estagiários **ASA SOUTH AMERICA:**

ANDRÉ PAIM FERRAZ RODRIGUES
BRENO MENDES QUINTANILHA SIERRA
PEDRO LUIS BARBOSA DE ALMEIDA

Revisão 01
Setembro / 2007



ÍNDICE GERAL

RESUMO	1
I INTRODUÇÃO	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO	I-2
I.1.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DA REGIÃO	I-3
I.1.2 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO DA REGIÃO	I-6
II MODELO HIDRODINÂMICO	II-1
II.1 DESCRIÇÃO DO MODELO E SUAS HIPÓTESES	II-1
II.1.1 EQUAÇÕES BÁSICAS DO POM	II-3
II.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS.....	II-6
II.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL	II-7
II.3 DOMÍNIO MODELADO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	II-7
II.3.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E BATIMETRIA.....	II-7
II.3.2 DADOS DE VENTO E MARÉ	II-9
II.3.3 ESTRUTURA TERMOHALINA	II-10
II.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	II-11
II.4.1 VALIDAÇÃO PARA O NÍVEL DO MAR	II-12
II.4.2 VALIDAÇÃO PARA AS CORRENTES	II-13
II.5 RESUMO DA BASE HIDRODINÂMICA UTILIZADA	II-16
III MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO	III-1
III.1 MODELO OILMAP	III-1
III.1.1 FORMULAÇÃO DO MODELO.....	III-4
III.2 DADOS DE ENTRADA.....	III-16
III.2.1 CAMPOS DE CORRENTES.....	III-17
III.2.2 DADOS DE VENTO.....	III-18
III.2.3 PONTO DE RISCO E VOLUMES.....	III-21
III.2.4 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO UTILIZADO	III-21
III.3 CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES.....	III-22
III.4 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS.....	III-22



IV	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	IV-1
IV.1	SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS	IV-1
IV.2	CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS.....	IV-22
V	CONCLUSÕES	V-1
VI	BIBLIOGRAFIA	VI-1



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos dados de entrada do Parallel Ocean Climate Model (POCM)...	II-7
Tabela 2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento NCEP para o ano de 1992, na Bacia de Campos, no período de verão.	III-20
Tabela 3 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento NCEP para o ano de 1992, na Bacia de Campos, no período de inverno.....	III-20
Tabela 4 - Coordenadas (SAD 69) do ponto de risco que representa o FPSO Fluminense, localizado na Bacia de Campos.....	III-21
Tabela 5 - Características do óleo tipo Bijupirá/Salema.....	III-22
Tabela 6 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames do óleo para o FPSO Fluminense.....	III-23
Tabela 7 - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso, para o FPSO Fluminense, ocorrendo durante os meses de verão.	IV-21
Tabela 8 - Extensão da linha de costa com probabilidade de ser atingida pelo derrame de óleo a partir do FPSO Fluminense, em condições de inverno.....	IV-21
Tabela 9 - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso, para o FPSO Fluminense, ocorrendo durante os meses de inverno.	IV-21
Tabela 10 - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de derrame de óleo de inverno, nos Campos de Bijupirá e Salema.	IV-22
Tabela 11 - Resumo do cenário determinístico crítico de verão para o FPSO Fluminense.....	IV-23
Tabela 12 - Resumo do cenário determinístico crítico de inverno para o FPSO Fluminense.....	IV-23



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do ponto de risco (FPSO Fluminense) na Bacia de Campos.	I-2
Figura 2 - Médias de 12 anos (1990 - 2001) do vento NCEP a 10 m no período de verão (janeiro a março).	I-3
Figura 3 - Médias de 12 anos (1990 - 2001) do vento NCEP a 10 m no período de inverno (junho a agosto).	I-4
Figura 4 - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos das reanálises do NCEP para o dia 1º de junho de 2003 (situação de bom tempo).	I-5
Figura 5 - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos das reanálises do NCEP para o dia 15 de junho de 2003, às 18GMT (deslocamento de um sistema frontal).	I-5
Figura 6 - Média climatológica da velocidade baroclínica calculada pelo OCCAM.	I-8
Figura 7 - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Campos.	II-8
Figura 8 - Batimetria discretizada do domínio considerado na Bacia de Campos.	II-9
Figura 9 - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) temperatura no verão; (b) temperatura no inverno, (c) salinidade no verão e (d) salinidade no inverno.	II-10
Figura 10 - Série temporal de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.	II-12
Figura 11 - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho).	II-13
Figura 12 - Espectros de amplitude das componentes u (E-W) (azul) e v (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.	II-14
Figura 13 - Séries temporais do sinal de baixa freqüência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho), entre os dias 14 e 19 de agosto de 1992.	II-15
Figura 14 - Séries temporais do sinal de baixa freqüência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.	II-16
Figura 15 - Exemplo ilustrativo de campo de velocidades obtidos com o modelo hidrodinâmico.	II-17
Figura 16 - Grade definindo os contornos de terra (grade <i>land-water</i>) para a modelagem de deriva de óleo na Bacia de Campos.	III-17



- Figura 17** - Diagrama *stick plot* dos valores médios diários de dados de vento NCEP durante o período de janeiro a dezembro de 1992 (convenção vetorial)..... III-18
- Figura 18** - Histograma direcional dos vetores de vento para (a) verão (janeiro a março) e (b) inverno (junho a agosto), Bacia de Campos..... III-19
- Figura 19** - Cenário FPSO-F_VER_8_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m³ após 30 dias de simulação. IV-2
- Figura 20** - Cenário FPSO-F_VER_200_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m³ após 30 dias de simulação..... IV-3
- Figura 21** - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_6H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 6 horas de simulação. IV-4
- Figura 22** - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_12H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 12 horas de simulação. IV-5
- Figura 23** - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_36H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 36 horas de simulação. IV-6
- Figura 24** - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_60H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 60 horas de simulação. IV-7
- Figura 25** - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_96H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 96 horas de simulação. IV-8
- Figura 26** - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação. IV-9



- Figura 27** - Cenário FPSO-F_INV_8_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m³ após 30 dias de simulação. IV-10
- Figura 28** - Cenário FPSO-F_INV_200_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ após 30 dias de simulação..... IV-11
- Figura 29** - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_6H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 6 horas de simulação. IV-12
- Figura 30** - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_12H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 12 horas de simulação..... IV-13
- Figura 31** - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_36H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 36 horas de simulação..... IV-14
- Figura 32** - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_60H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 60 horas de simulação..... IV-15
- Figura 33** - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_96H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 96 horas de simulação..... IV-16
- Figura 34** - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação. IV-17
- Figura 35** - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_30D_SHORE. Probabilidades de toque na costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação. IV-18
- Figura 36** - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_30D_OLEOMED. Volume médio de óleo por km de costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação. IV-19



- Figura 37** - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_30D_OLEOMAX. Volume máximo de óleo por km de costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação. IV-20
- Figura 38** - Cenário determinístico crítico para um derrame ocorrido a partir do FPSO Fluminense, no período de verão. IV-24
- Figura 39** - Contornos de tempo para o cenário determinístico crítico de verão para um derrame ocorrido a partir do FPSO Fluminense. IV-25
- Figura 40** - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no verão, a partir do FPSO Fluminense..... IV-26
- Figura 41** - Cenário determinístico crítico para um derrame ocorrido a partir do FPSO Fluminense, no período de inverno..... IV-27
- Figura 42** - Contornos de tempo para o cenário determinístico crítico de inverno para um derrame ocorrido a partir do FPSO Fluminense. IV-28
- Figura 43** - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no inverno, a partir do FPSO Fluminense..... IV-29
- Figura 44** - Diagrama stick plot dos vetores de vento para o cenário determinístico crítico de inverno, a partir do início da simulação até o primeiro toque na costa. IV-29
- Figura 45** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo durante o período de simulação do cenário determinístico crítico de inverno, após o início da simulação até o toque na costa, para o instante inicial. IV-30
- Figura 46** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo durante o período de simulação do cenário determinístico crítico de inverno, após o início da simulação até o toque na costa, para o instante intermediário... IV-31
- Figura 47** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo durante o período de simulação do cenário determinístico crítico de inverno, após o início da simulação até o toque na costa, para o instante de primeiro toque. IV-32



RESUMO

Este relatório apresenta a revisão do estudo de modelagem numérica de derrame de óleo na Bacia de Campos, em função da alteração do volume de pior caso (volume total de óleo em tanques somado com inventário estimado de tubos e equipamentos de processo a bordo).

O sistema de modelos OILMAP da **Applied Science Associates (ASA), Inc.** foi utilizado para definir a área potencialmente ameaçada por derramamentos de petróleo, decorrentes das atividades de perfuração de poços petrolíferos marítimos, na Bacia de Campos, a partir de simulações de derrame de petróleo do FPSO Fluminense, localizado nos Campos de Bijupirá e Salema.

As condições meteorológicas e oceanográficas da Bacia de Campos mostram que, sobre a plataforma, o padrão de circulação predominante está relacionado ao campo de vento e à maré, com eventuais intrusões da Corrente do Brasil (CB). A partir do talude, e em oceano profundo, os mesmos padrões são observados, mas com predomínio sensível de correntes médias superficiais para sul-sudoeste, relacionadas à presença da CB.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida a partir da combinação dos resultados de dois modelos. O primeiro, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), implementado para simular as condições na plataforma continental, e o segundo baseado no *Parallel Ocean Climate Model* (POCM) para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

Foram conduzidas simulações probabilísticas, contemplando situações de verão e inverno, para determinar contornos de probabilidade da mancha atingir a área de estudo a partir de três classes de derrame, como definido na Resolução do CONAMA nº 293/01: pequeno, com 8 m³; médio, com 200 m³; e pior caso, com 225.009,1 m³. A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram selecionados os cenários determinísticos críticos para verão e inverno, utilizando como critério o menor tempo de chegada do óleo na costa. No verão,



como não houve toque na costa, o critério utilizado foi a menor distância da mancha em relação à costa.

O critério de parada adotado nas simulações foi o tempo de 30 dias para o acompanhamento de cada partícula. Além deste critério de parada propriamente dito, foi adotado o corte de espessuras inferiores a 300 nm nas simulações e apresentações de resultados.

Os resultados da modelagem revelaram uma forte correlação entre a trajetória de uma mancha simulada e o padrão de circulação na região. Para uma condição de derrame do volume de pior caso simulado, o óleo não chegaria à costa no período de verão, e no inverno a probabilidade é inferior a 20%.



I INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte a ECOLOGUS/SHELL no desenvolvimento de Estudos Ambientais na Bacia de Campos, apresenta-se a revisão da modelagem computacional da trajetória e intemperismo de óleo, decorrente de um potencial acidente com derramamento de petróleo a partir do FPSO Fluminense, localizado nos Campos de Bijupirá e Salema. Neste trabalho foi considerando o novo volume de pior caso, calculado somando-se o volume total de óleo em tanques com o inventário estimado de tubos e equipamentos de processo a bordo.

As modelagens foram conduzidas através da utilização de um sistema de modelos conhecido como OILMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** A **ASA** tem mais de 20 anos de experiência com utilização de ferramentas computacionais para estudos de impacto ambiental causados por acidentes com petróleo.

Para estudos de modelagem como o realizado neste trabalho, são necessários: (a) um conhecimento detalhado das características geomorfológicas do local (morfologia da linha de costa e fundo oceânico), (b) padrões de circulação local e em larga escala, (c) séries temporais de vento de longa duração (preferencialmente de bóias *offshore* e/ou estação meteorológica costeira), e (d) características físico-químicas dos produtos a serem simulados.

Para a modelagem de transporte da mancha de óleo foram utilizados dados de vento provenientes do modelo global NCEP/NCAR¹. O NCEP disponibiliza um conjunto de resultados provenientes de aproximadamente 30 anos de análises globais de campos atmosféricos para suprir as necessidades de pesquisa na área de clima, sendo um conjunto de dados dos mais confiáveis disponíveis.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi realizada a partir de resultados de um modelo desenvolvido pela equipe da **ASA SOUTH AMERICA**, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), para simular as condições na plataforma continental, e resultados do *Parallel Ocean Climate Model* (POCM) para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

¹ National Centers for Environmental Prediction do National Center for Atmospheric Research.

O Capítulo I apresenta os objetivos deste estudo e fornece informações sobre a área em questão. O Capítulo II descreve a modelagem hidrodinâmica e a calibração da mesma. O Capítulo III descreve o modelo OILMAP utilizado na modelagem dos cenários acidentais de óleo, as simulações realizadas, suas características e os dados de entrada. Os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas são apresentados no Capítulo IV.

I.1 ÁREA DE ESTUDO

A Figura 1 apresenta a localização do FPSO Fluminense, nos Campos de Bijupirá e Salema, Bacia de Campos, para o qual foram realizadas simulações de um potencial acidente com derrame de petróleo.

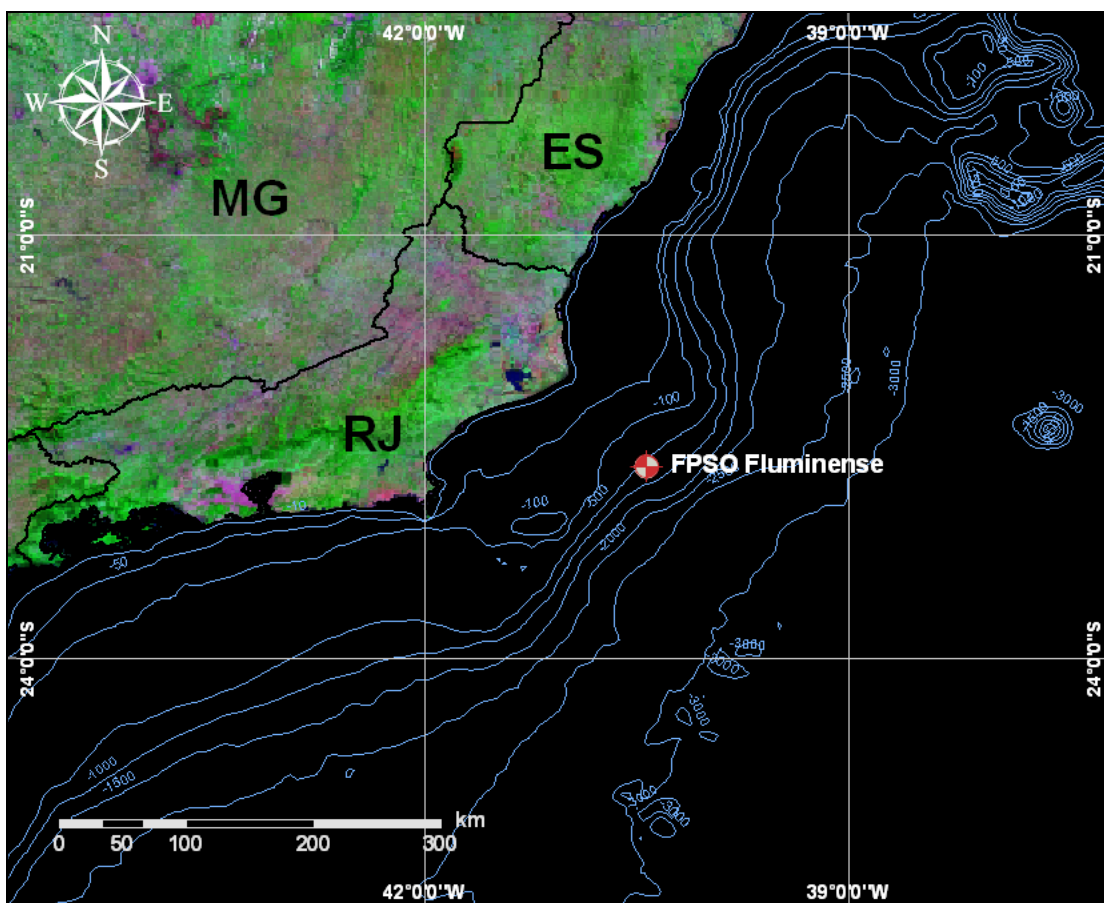


Figura 1 - Localização do ponto de risco (FPSO Fluminense) na Bacia de Campos.

1.1.1 Características Meteorológicas da Região

Para a região da Bacia de Campos, o padrão característico da atmosfera na grande escala é dominado pelo Anticiclone (semi-permanente) do Atlântico Sul (AAS), também conhecido como Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), e pelo Anticiclone Polar Móvel (APM).

A variabilidade sazonal no regime de ventos da costa sudeste do Brasil ocorre, principalmente, devido à variação do tamanho e do posicionamento da ASAS. No verão, o vento predominante da costa sudeste é de nordeste, ao passo que no inverno, o vento predominante é de leste-nordeste. Este padrão é ilustrado na Figura 2 e na Figura 3, que apresentam o comportamento sazonal da circulação atmosférica obtida através da média de 12 anos (1990 – 2001) das reanálises do modelo de circulação geral do NCEP/NCAR, para o campo de vento a 10 m, acompanhando o relevo.

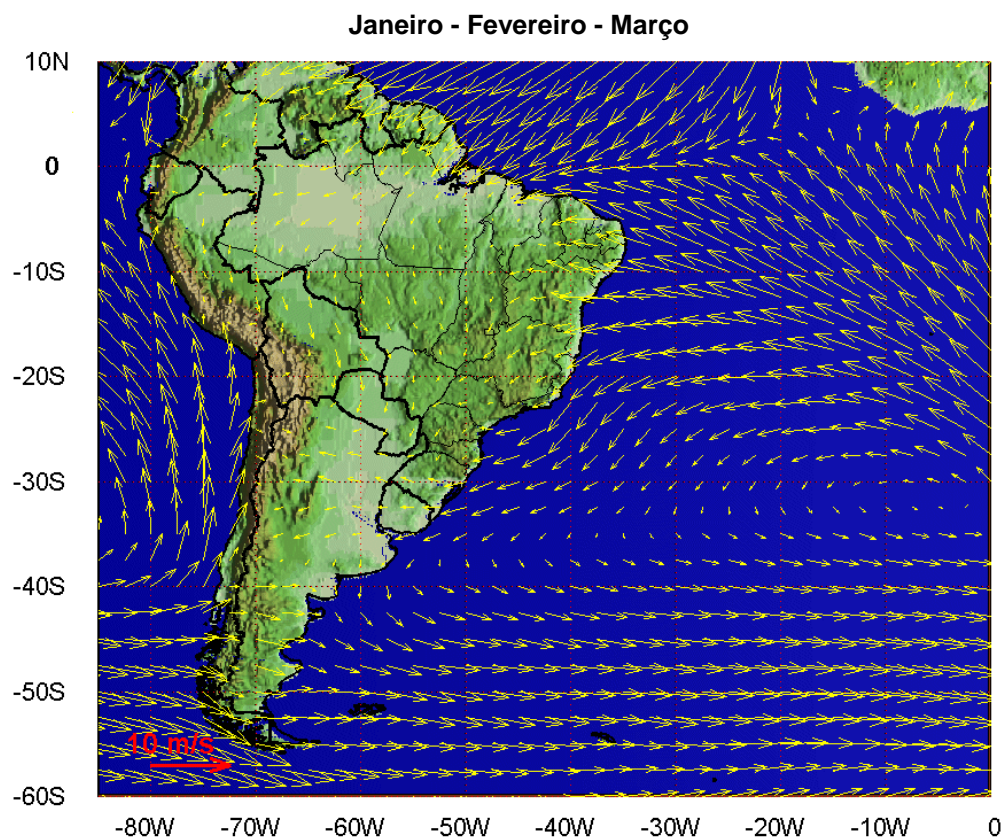


Figura 2 - Médias de 12 anos (1990 - 2001) do vento NCEP a 10 m no período de verão (janeiro a março).

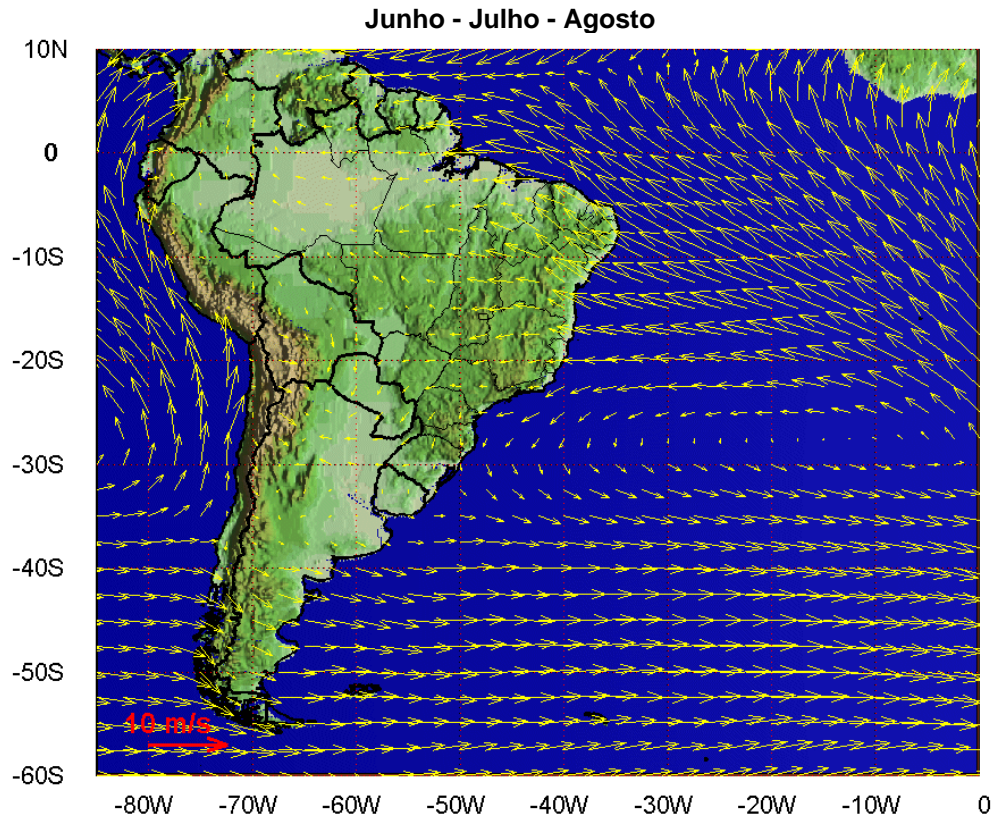


Figura 3 - Médias de 12 anos (1990 - 2001) do vento NCEP a 10 m no período de inverno (junho a agosto).

Periodicamente, a situação de bom tempo induzida pelo AAS, caracterizada por ventos moderados vindos de nordeste, é perturbada pelo deslocamento de sistemas frontais forçados pelo APM. Estes sistemas frontais formam-se, geralmente, sobre o Oceano Pacífico Sul, dirigem-se para leste até encontrarem os Andes, e, entre 40 e 20°S, seguem no sentido sudoeste-nordeste ao longo da costa leste sul americana. A Figura 4 e Figura 5 ilustram instantâneos do vento NCEP/NCAR a 10 m de altura para a América do Sul, em situação de bom tempo e de deslocamento de um sistema frontal, respectivamente.

Os sistemas frontais atuam durante o ano todo sobre todo o Atlântico Sul, com frequências maiores nas latitudes mais altas e menores nas latitudes mais baixas. As perturbações geradas são essenciais para a determinação das variabilidades intra-anuais na superfície oceânica.

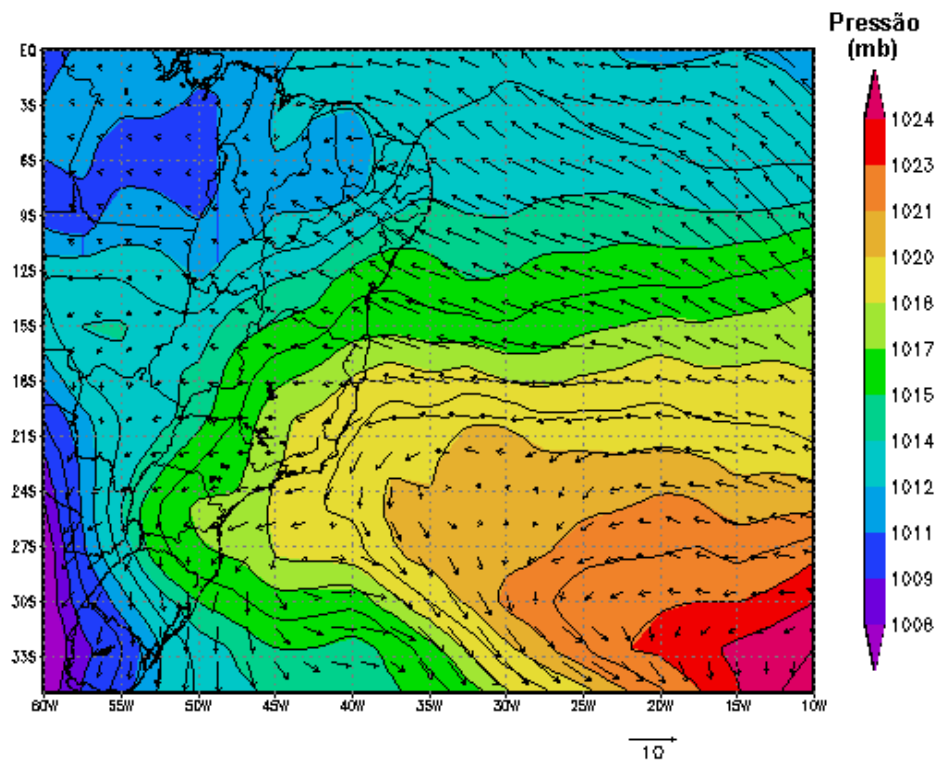


Figura 4 - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos das reanálises do NCEP para o dia 1º de junho de 2003 (situação de bom tempo).

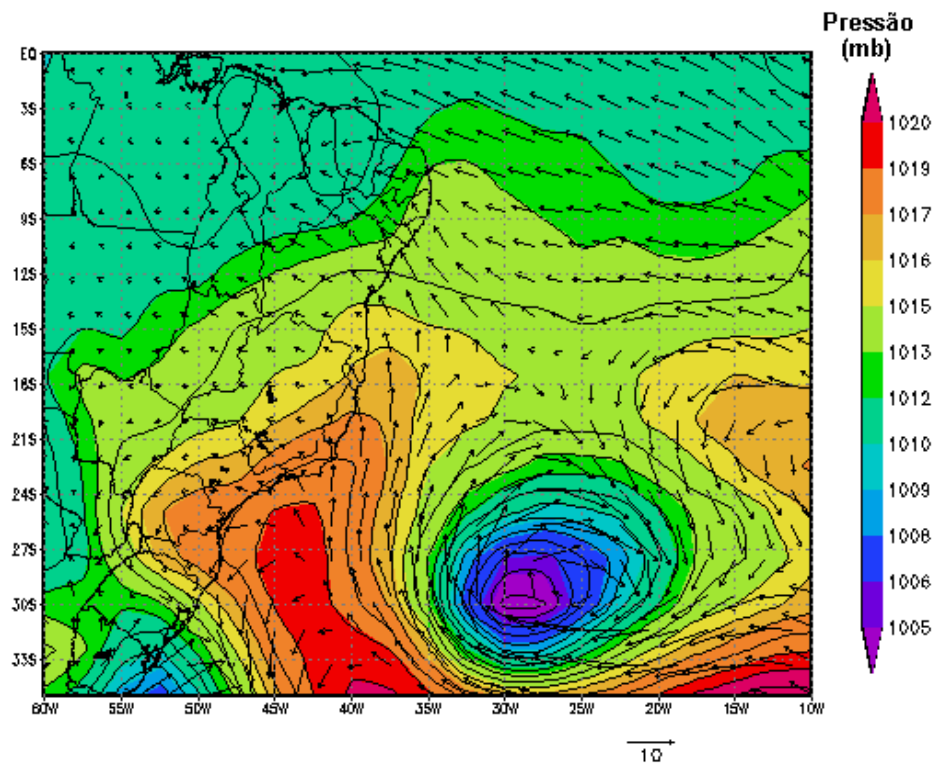


Figura 5 - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos das reanálises do NCEP para o dia 15 de junho de 2003, às 18GMT (deslocamento de um sistema frontal).

De acordo com a estatística de sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil entre os anos de 1975 a 1984 e 1987 a 1995, apresentada pelo Boletim de Monitoramento e Análise Climática (Climanálise, 1996), a média mensal desses sistemas atuando sobre a costa sudeste brasileira é de quatro sistemas nos meses de verão e sete sistemas nos meses de inverno.

O deslocamento desses sistemas está associado ao escoamento ondulatório de grande escala. A intensificação ou dissipação dos mesmos está relacionada com as características atmosféricas sobre o continente. Algumas regiões do Brasil, tais como as Regiões Sul e Sudeste são regiões frontogenéticas, *i.e.* as frentes podem se formar ou se intensificar nessas regiões (Satyamurty & Mattos, 1989).

Em meso e micro escalas, a variabilidade meteorológica induzida pelas brisas marinhas e terrestres também é significativa, principalmente nos padrões dinâmicos da circulação observada sobre a plataforma continental.

1.1.2 Padrões de Circulação da Região

A circulação oceânica na área de estudo é determinada por forçantes variadas, que se sobrepõem de modo diferenciado, dependendo de fatores morfológicos e dinâmicos locais. Sobre a plataforma há amplificação natural do sinal de maré e intensificação dos padrões meteorológicos locais, *i.e.*, brisa marinha. Sobreposto a estes sinais, existe a presença energética da passagem de frentes, com pronunciada causalidade remota. No oceano profundo a composição da passagem de frentes e do fluxo determinado pela Corrente do Brasil (CB) é preponderante. Considerando-se o relativo conhecimento existente sobre a circulação da maré na região, o principal padrão no oceano a ser descrito é a CB.

As primeiras medições diretas foram feitas por Evans & Signorini (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. Esta mudança afeta significativamente a CB, induzindo a formação de vórtices e meandros.

O volume estimado transportado pela CB na região da quebra da plataforma e do talude na latitude de 22°S é de $5,5 \pm 2,6$ Sv (Lima, 1997). Algumas regiões sobre o talude continental podem apresentar velocidades de correntes maiores que 1,0 m/s (Castro & Miranda, 1998).

Parte significativa do fluxo da CB passa através dos canais dos Bancos de Abrolhos e se divide em dois ramos. Um deles flui afastado da costa, além da isóbata de 3.000 m (Stramma *et al.*, 1990), enquanto o outro flui seguindo a linha de quebra da plataforma (Signorini, 1978).

A corrente que flui para sudoeste durante o verão é reforçada pelos ventos que provêm principalmente de nordeste nessa estação devido à influência da ASAS. Outra consequência do predomínio dos ventos de NE é a ressurgência de águas frias (Água Central do Atlântico Sul – ACAS) em regiões costeiras. Esses eventos são muito comuns na região de Cabo Frio. 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 & Miranda, 1998).

Vários modelos numéricos globais reproduzem o sistema de correntes em larga escala nesta região. O processo de *warm up* do modelo hidrodinâmico utilizado neste trabalho foi baseado nos resultados de uma simulação de 14 anos do modelo OCCAM², disponibilizados pela Universidade de Southampton.

O OCCAM foi elaborado com base no MOM³ do GFDL⁴, incluindo uma superfície livre e esquemas de advecção melhorados. A grade, para o Oceano Atlântico Sul, é regular (1/4 de grau), com 36 níveis (variando de 20 m de espessura, próximo à superfície, a 255 m em 5.500 m de profundidade). Este modelo foi inicializado com médias anuais de temperatura e salinidade do LEVITUS⁵, forçado na superfície com dados de vento do ECMWF⁶ (médias

² Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling Project - Southampton Oceanography Centre.

³ Modular Ocean Model.

⁴ Global Fluid Dynamics Laboratory.

⁵ <http://ingrid.ldgo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94>.

⁶ European Centre for Medium-range Weather Forecast.

mensais) e relaxado para os campos sazonais de temperatura e salinidade do LEVITUS.

A Figura 6 ilustra uma média climatológica da velocidade baroclínica calculada pelo OCCAM. Nota-se o ramo sul da Corrente Sul Equatorial atingindo a costa do Brasil em torno de 15°S, bifurcando-se e originando a CNB, fluindo para norte, e a CB, fluindo para sul.

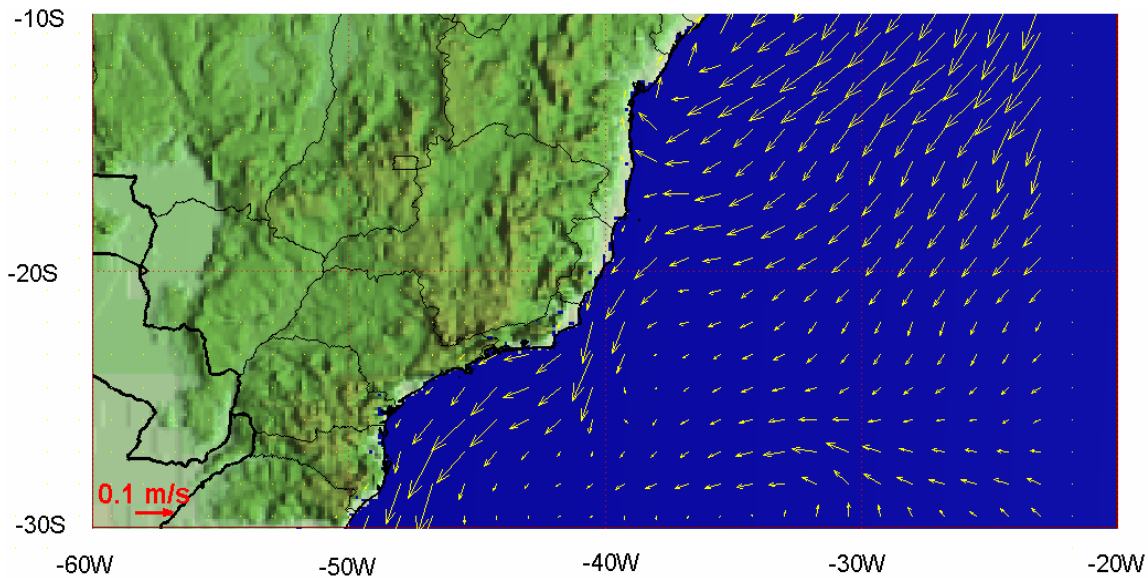


Figura 6 - Média climatológica da velocidade baroclínica calculada pelo OCCAM.



II MODELO HIDRODINÂMICO

Nesta etapa do trabalho foi implementada uma estrutura numérica (*i.e.* modelos hidrodinâmicos), visando simular os campos de correntes na plataforma e talude continentais da costa sul-sudeste brasileira, englobando as bacias do Espírito Santo, Campos e Santos. Neste intuito, foi utilizado o código baseado no POM para simular as condições na plataforma continental e resultados do POCM para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

O campo de correntes obtido foi o resultado de uma soma ponderada dos vetores de velocidade obtidos a partir de simulações com o POM e o POCM, para os períodos de verão e inverno. Em região de plataforma continental foi considerado um peso maior aos resultados do POM, que diminuiu em direção à região de águas profundas, onde o peso maior foi dado aos resultados do POCM.

II.1 DESCRIÇÃO DO MODELO E SUAS HIPÓTESES

O modelo numérico hidrodinâmico utilizado para a simular as condições na plataforma continental foi baseado no POM, desenvolvido por Blumberg & Mellor (1987), e implementado pelo grupo de modelagem da **ASA SOUTH AMERICA**. O código fonte desse modelo é de domínio público, obtido via Internet no endereço: www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom.

A formulação deste modelo possui estrutura tridimensional, não linear, com as equações hidrodinâmicas escritas na forma de fluxo, sob as aproximações de Boussinesq e hidrostáticas. Este modelo permite também a utilização de grades curvilíneas, de coordenadas σ na vertical e a resolução das camadas turbulentas de superfície e de fundo, por meio de um submodelo de fechamento turbulento de 2ª ordem.

No sistema de coordenadas σ , a coordenada z é escalonada de acordo com a profundidade da coluna d'água local, conforme mostra a equação abaixo, onde D é a profundidade local, η a elevação da superfície e H a profundidade média local:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{D} \quad (1)$$

onde

$$D(x, y, t) = H(x, y) + \eta(x, y, t).$$

Nesta formulação também está incluído um submodelo de fechamento turbulento, para o cálculo dos coeficientes de mistura turbulenta vertical. O fechamento turbulento de 2ª ordem utiliza os resultados das equações da energia cinética turbulenta e da escala de comprimento de turbulência, no cálculo dos coeficientes cinemáticos de viscosidade e de difusão turbulenta de calor e sal na vertical (Mellor & Yamada, 1982). Esses cálculos são efetuados com base em relações empíricas, que utilizam constantes estabelecidas em experimentos de laboratório e em observações de campo. Com o fechamento turbulento de 2ª ordem, o modelo reproduz de maneira mais realística as camadas de Ekman, de superfície e de fundo.

Além dos aspectos específicos acima mencionados, o modelo adota soluções largamente utilizadas na literatura, como gradeamento do tipo C de Arakawa e métodos de integração diferentes na horizontal e na vertical – integração horizontal e temporal explícita e vertical implícita. Por meio desses procedimentos, elimina-se a restrição temporal na vertical, permitindo o uso de maior resolução nas camadas de Ekman de superfície e de fundo.

O modelo apresenta uma superfície livre e dois intervalos de tempo distintos, um para o modo de oscilação externo e outro para o interno. O modo externo (barotrópico) usa um intervalo de tempo menor, baseado na condição de estabilidade computacional de Courant-Friedrichs-Levy (CFL). O modo interno (baroclínico) usa um intervalo de tempo mais longo (*splitting mode*).

II.1.1 Equações Básicas do POM

O modelo hidrodinâmico aqui descrito é baseado em uma formulação tridimensional prognóstica com aproximação hidrostática. As variáveis potencialmente prognósticas são: as três componentes da velocidade (u, v e w), a temperatura (T), a salinidade (S), a energia cinética turbulenta ($q^2/2$), a escala turbulenta (l), e a elevação da superfície (η).

O conjunto de equações básicas utilizadas no código é descrito abaixo. Consideremos um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais, com x crescendo para Leste, y para Norte e z para cima, no qual as coordenadas horizontais (*i.e.* x, y) referem-se ao espaço computacional. A superfície livre está localizada em $z = \eta(x, y, t)$ e o fundo em $z = -H(x, y)$. Neste sistema as equações de conservação e a equação de estado são escritas como:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Equação de Reynolds para conservação da quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$



$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (5)$$

Conservação de Temperatura Potencial:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + U \frac{\partial \Theta}{\partial x} + V \frac{\partial \Theta}{\partial y} + W \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + F_{(H)} \quad (6)$$

Conservação de Salinidade:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (7)$$

Equação de Estado:

$$\rho = \rho(S, \Theta, P) \quad (8)$$

Equação da Energia Cinética Turbulenta:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^2}{\partial t} + U \frac{\partial q^2}{\partial x} + V \frac{\partial q^2}{\partial y} + W \frac{\partial q^2}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2K_M \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] \\ + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2q^3}{B_1 l} + F_{q^2} \end{aligned} \quad (9)$$

Equação da Turbulência em Macro Escala:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (q^2 l) + U \frac{\partial}{\partial x} (q^2 l) + V \frac{\partial}{\partial y} (q^2 l) + W \frac{\partial}{\partial z} (q^2 l) = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_q \frac{\partial}{\partial z} (q^2 l) \right] \\ + l E_1 K_M \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{l E_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{q^3}{B_1} \tilde{W} + F_{q^2 l} \end{aligned} \quad (10)$$

sendo,

$$F_{q^2, q^2 l} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial y} \right) \quad (11)$$

$$\tilde{W} \equiv 1 + E_2 \left(\frac{l}{kL} \right)^2 \quad (12)$$

$$(L)^{-1} \equiv (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1} \quad (13)$$

onde

U, V, W = componentes do vetor velocidade (m/s);

f = parâmetro de Coriolis (s^{-1});

ρ_0 = densidade de referência (kg/m^3);

ρ = densidade *in situ* (kg/m^3);

P = pressão (N/m^2);

K_M = coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulenta (m^2/s);

K_H = coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta de calor e sal (m^2/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

Θ = temperatura potencial ($^{\circ}C$);

S = salinidade (PSU);

A_M = coeficiente cinemático horizontal de viscosidade turbulenta (m^2/s);

A_H = coeficiente cinemático horizontal de difusão turbulenta de calor e sal (m^2/s);

F_H, F_S = parametrização (em termos de processos de mistura horizontal) para processos de pequena escala não resolvidos diretamente pela grade do modelo.

$q^2/2$ = energia cinética turbulenta;

l = escala característica de comprimento para o movimento turbulento;

- \tilde{W} = função proximidade-do-contorno;
- k = constante de von Karman ($k=0,4$);
- F_{q^2, q^2l} = termos horizontais de mistura para q^2 e q^2l .

II.1.2 Condições de Contorno Adotadas

As condições de contorno naturais do modelo são dadas pela velocidade normal nula nos contornos terrestres. Em áreas com aporte fluvial significativo para a escala do domínio, os valores de vazão, temperatura e salinidade dos rios são diretamente especificados nos contornos. Na superfície livre, além das condições dinâmicas locais (Mellor & Yamada, 1982), é também considerada a tensão de cisalhamento do vento. Opcionalmente, fluxos de calor e sal (evaporação) podem ser incluídos. No fundo, são aplicadas as condições dinâmicas descritas em Mellor & Yamada (op. cit.). A velocidade de arrasto é calculada como uma função empírica da energia cinética turbulenta, por sua vez decorrente do fechamento turbulento de segunda ordem.

Nos contornos artificiais são aplicadas, ao modelo, condições de contorno para a definição do comportamento das propriedades modeladas nos limites oceânicos do domínio estudado. Essas condições de contorno são definidas para elevação da superfície do mar, velocidades do modo externo (2D), velocidades do modo interno (3D), temperatura, salinidade, velocidade vertical e energia cinética turbulenta.

Nas componentes perpendiculares à fronteira são aplicadas condições radiacionais em função da elevação, do tipo $H\bar{U} \pm C_e \eta = BC^2$, onde $C_e = \sqrt{gH}$ é a velocidade de fase da onda que chega ao sistema, η é a elevação do nível do mar e B, um coeficiente, empírico. Nos casos da temperatura e da salinidade, disponibiliza-se esquema que permita advecção através da fronteira, condição esta descrita por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (\text{condição análoga aplicada à salinidade}) \quad (14)$$



II.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL

O modelo hidrodinâmico utilizado para fornecer o campo de correntes no talude continental e oceano profundo foi o POCM, desenvolvido pelo Office of Naval Research dos Estados Unidos. Este modelo utiliza como forçantes fluxos de calor e ventos gerados pelo ECMWF⁷.

O modelo POCM é considerado pela comunidade oceanográfica do WOCE⁸ o mais sofisticado para descrever a circulação oceânica, sendo capaz de reproduzir os fluxos da CB que afetam diretamente a região sudeste. A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados de entrada utilizados pelo modelo POCM.

O modelo POCM apresenta uma resolução global média de 0,25° e já foi utilizado em vários artigos publicados, como em Tokmakian & Challenor (1999).

Tabela 1 - Resumo dos dados de entrada do Parallel Ocean Climate Model (POCM).

DADOS DE ENTRADA	DESCRIÇÃO
Fluxos de Calor	Dados de reanálise do ECMWF.
Ventos	Dados de reanálise do ECMWF.
Temperatura e Salinidade da água	Interpolados da Climatologia LEVITUS ⁹ , e depois simulado por um período de 33 anos para ajuste dos campos termohalinos

II.3 DOMÍNIO MODELADO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO

II.3.1 Discretização do Domínio e Batimetria

A grade final gerada para a região da Bacia de Campos possui dimensão horizontal máxima de 70x100 pontos, com resolução média de aproximadamente 3 km (Figura 7). A grade geral implementada representou um compromisso entre os objetivos do projeto, a capacidade computacional para o período de execução do modelo e a descrição dos processos hidrodinâmicos relevantes para a região

⁷ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

⁸ World Ocean Circulation Experiment.

⁹ <http://ingrid.ldgo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94>.

de interesse (forçantes de maré e ventos sobre a plataforma continental, e Corrente do Brasil no talude continental).

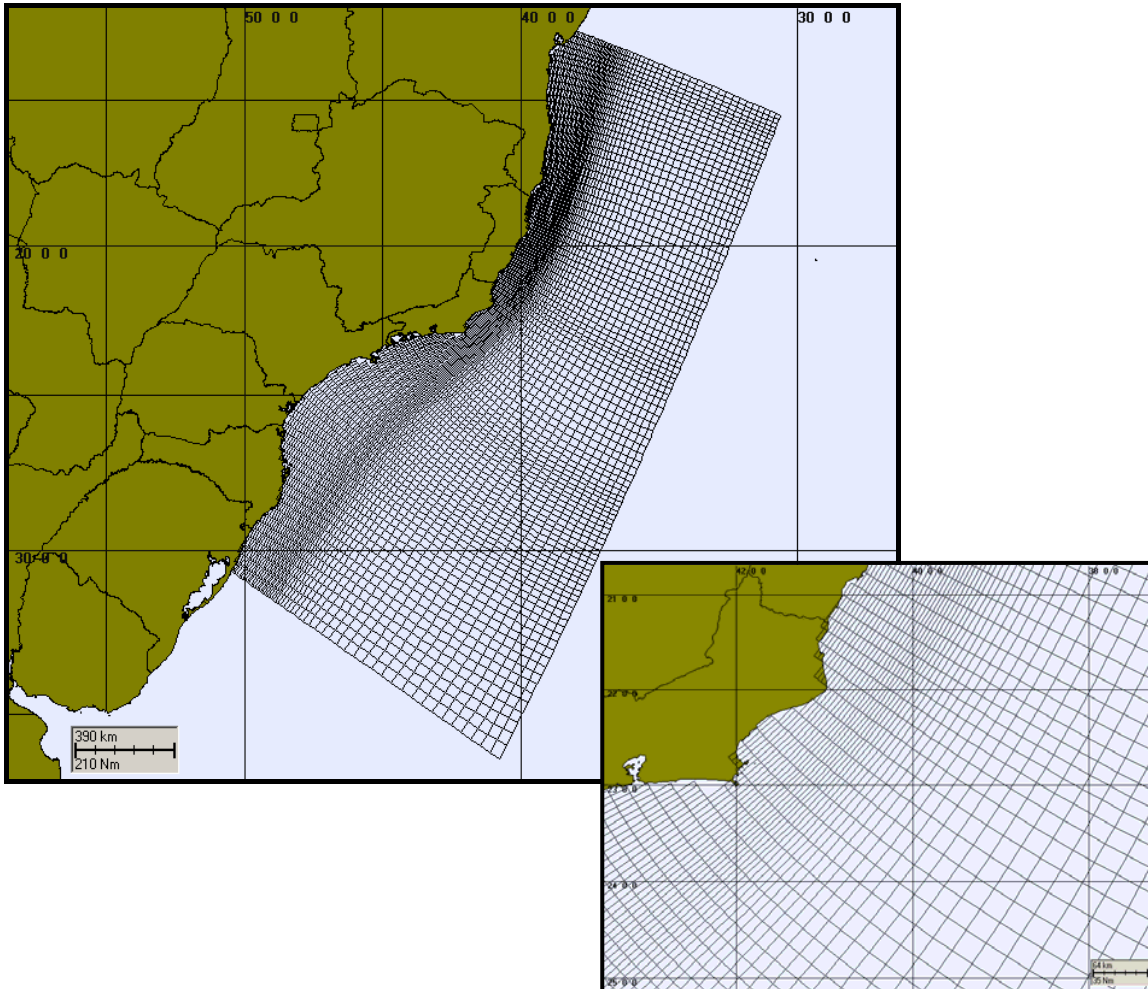


Figura 7 - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Campos.

Para a região da plataforma, os dados de profundidade foram obtidos através da digitalização dos valores batimétricos das cartas náuticas da DHN¹⁰, n^{os} 70, 1.100, 1.131, 1.400, 1.420, 1.700, 1.800, 1.820 e 1.824. Para a representação topográfica da região do talude e planície abissal foi também utilizada a base de dados batimétricos extraída do ETOPO 2 obtido no NGDC¹¹, reamostradas para um espaçamento de 10'. Visando o ajuste fino da batimetria à linha de costa e as

¹⁰ Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha.

¹¹ National Geophysical Data Center da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

camadas de sistemas de informações geográficas (SIG) utilizadas pelos modelos matemáticos implementados na região, foram utilizadas também informações provenientes de imagens de satélite, complementando a base de dados batimétricos da **ASA SOUTH AMERICA** na área. Os resultados finais da discretização da área e projeção da batimetria estão ilustrados na Figura 8.

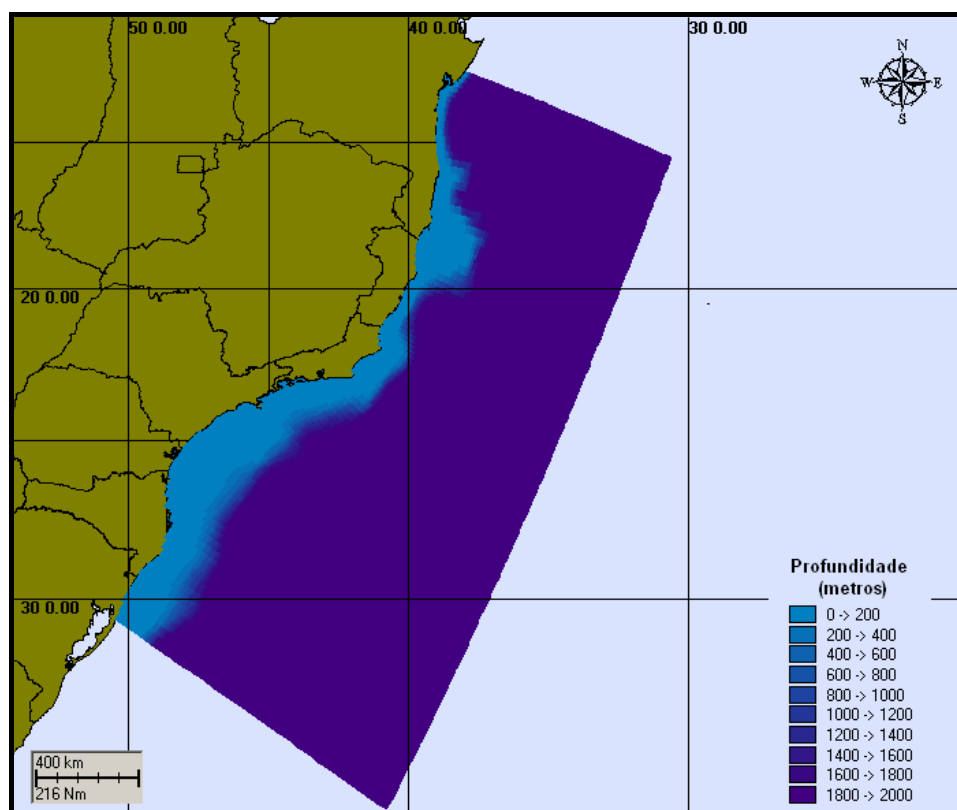


Figura 8 - Batimetria discretizada do domínio considerado na Bacia de Campos.

II.3.2 Dados de Vento e Maré

A modelagem hidrodinâmica utilizou dados de vento provenientes de reanálises do NCEP para o ano de 1992, interpolados na grade. Nos contornos abertos foram utilizados campos (provenientes do CSR3¹²) com variação espacial de amplitude e fase das componentes de maré mais significativas na região, com energia superior a 10% da energia da M_2 .

¹² Center for Space Research da Universidade do Texas.

II.3.3 Estrutura Termohalina

Os campos de temperatura e salinidade usados para inicialização do campo baroclínico do POCM foram obtidos através da Climatologia LEVITUS. A Figura 9 ilustra estes dados para a superfície, nos períodos de verão e inverno.

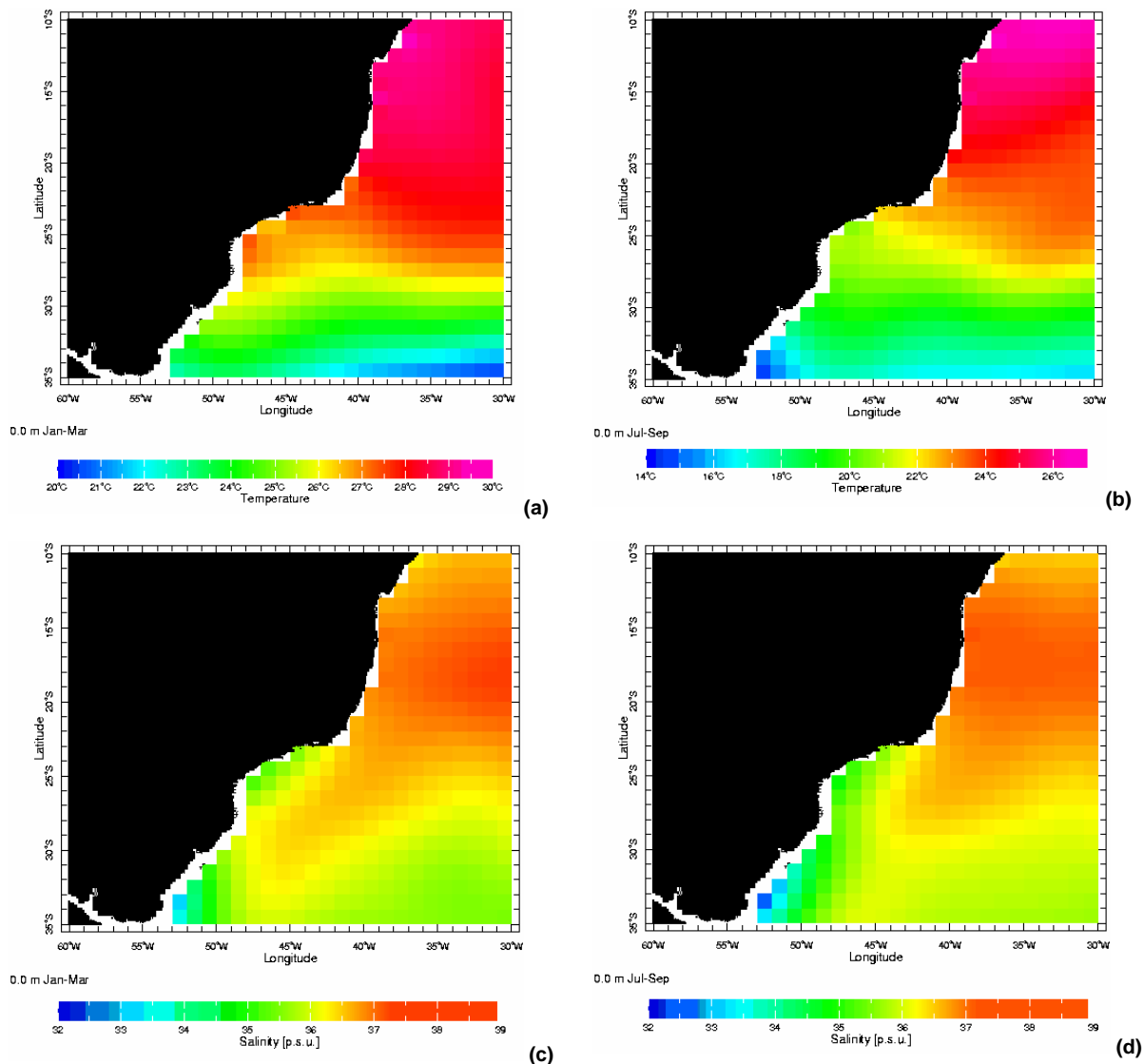


Figura 9 - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) temperatura no verão; (b) temperatura no inverno, (c) salinidade no verão e (d) salinidade no inverno.

II.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A metodologia de calibração fundamenta-se essencialmente na avaliação do modelo quanto à sua capacidade de reprodução da circulação observada em conjuntos de dados disponíveis para a região de interesse.

Para comparação com os resultados do modelo, foram utilizados dados de corrente pertencentes ao banco de dados da PETROBRAS. Estes dados foram coletados na Bacia de Campos, nas coordenadas 22°43'0,12"S e 41°16'0,12"W, e abrangem o período de 12 de julho a 2 de setembro de 1992.

Para a calibração do nível do mar foi utilizada uma série obtida através de reconstituição harmônica, a partir de constantes fornecidas pela FEMAR¹³ para a região do Cabo de São Tomé, nas coordenadas 22°07'42"S e 41°03'12"W.

Foi adotada a seguinte metodologia para calibração:

- (1) como no sinal de corrente a energia contida na baixa frequência corresponde a 83,6% da energia da corrente total, optou-se por inicialmente verificar o ajuste do modelo para a baixa frequência;
- (2) a seguir verificou-se o erro percentual para a corrente residual média (comparação entre as médias) e, finalmente,
- (3) verificou-se o ajuste do modelo para a alta frequência associada aos períodos de maré.

Por baixa frequência entendem-se os sinais com período acima de 25 horas, incluindo, assim, a influência de sistemas frontais; e por alta frequência os sinais com período entre 11 horas e 13 horas, sendo influenciado principalmente pela componente de maré.

O coeficiente de ajuste para as séries foi baseado em Hess & Bosley (1992), cuja formulação é comumente utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries com periodicidades relativamente definidas. O coeficiente é definido pela normalização do erro quadrático médio:

¹³ Fundação de Estudos do Mar.

$$\frac{RMS}{\bar{A}} \quad (15)$$

onde

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

\bar{A} = range médio do dado;

P = previsão;

O = observação.

II.4.1 Validação para o Nível do Mar

Para a calibração do nível do mar, foi realizada uma previsão a partir da tabela de constantes harmônicas da FEMAR para o Cabo de São Tomé. O coeficiente de ajuste obtido para o período de 19 a 21 de agosto de 1992 (Figura 10) foi de 13,70%, segundo a Equação 15.

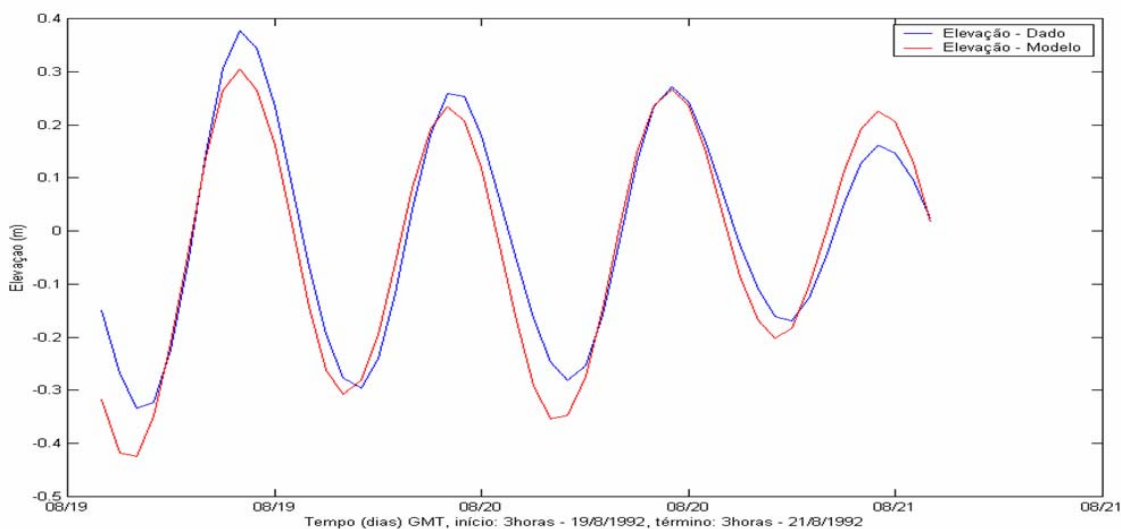


Figura 10 - Série temporal de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.

II.4.2 Validação para as Correntes

Estão reproduzidas, na Figura 11, as séries temporais dos dados *versus* os resultados do modelo. São apresentados os campos de corrente (componentes u (E-W) e v (N-S)) e, também, a comparação dos resultados de elevação do modelo e a recomposição harmônica da maré.

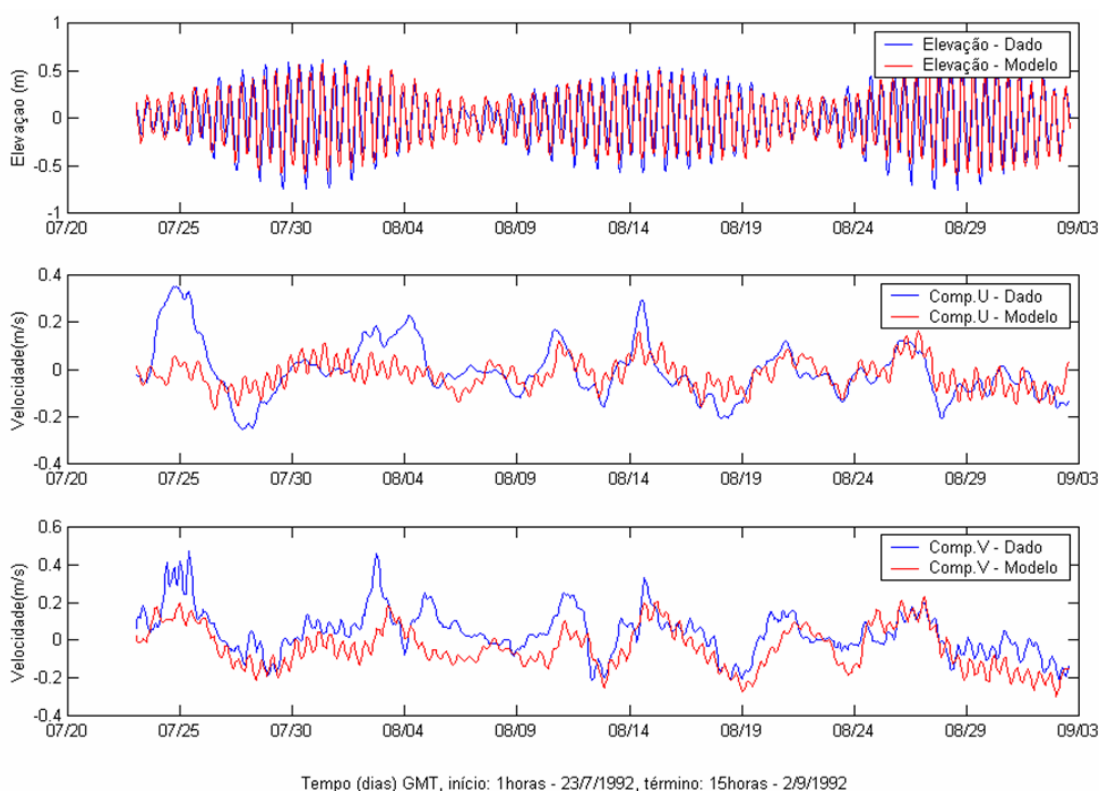


Figura 11 - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho)

Especificamente no ponto de medição (PC), o sinal da corrente de baixa frequência, associada à passagem de sistemas frontais, contém 83,6% da energia total do sinal. Sinais de alta frequência (maré semidiurna) são menos intensos em águas profundas, como pode ser observado na Figura 12.

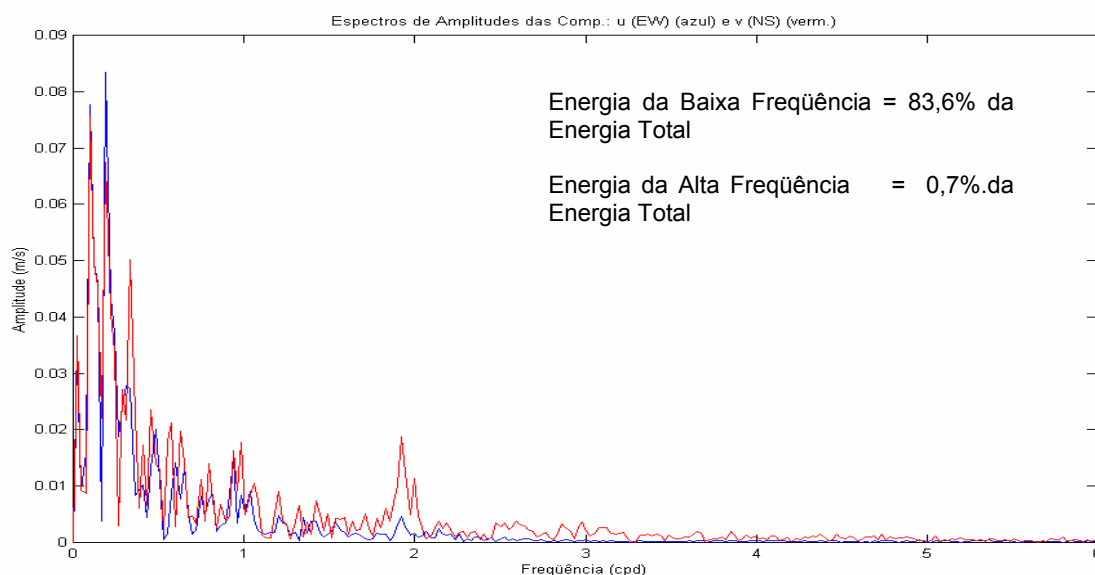


Figura 12 - Espectros de amplitude das componentes u (E-W) (azul) e v (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.

Deste modo, priorizou-se o ajuste do modelo na baixa frequência. Os coeficientes de ajuste (Equação 15) foram de 28,47% para a componente u e 16,91% para a componente v , considerando o período de 5 dias compreendido entre 14 e 19 de agosto de 1992 às 18 horas (Figura 13).

Na calibração do modelo para a corrente residual média considerou-se a diferença entre a corrente residual média do modelo e dos dados (para o período que se dispunha de dados), e calculou-se o erro percentual relativo à corrente média residual dos dados. Os ajustes obtidos foram de 1,46% para a componente zonal e 7,67% para a meridional. Tal resultado encontra-se ilustrado na Figura 14.

Embora com baixa energia relativa neste ponto, observa-se presença significativa do sinal da maré nos dados fornecidos. Para validar o modelo também nessa frequência, foram isolados os sinais de alta frequência (marés) dos dados e do modelo. A comparação para um período de 48 horas, compreendido entre 19 e 21 de agosto de 1992 às 3 horas, forneceu um coeficiente de ajuste de 24,18% para a componente zonal e 18,47% para a componente meridional, conforme a Equação 15.

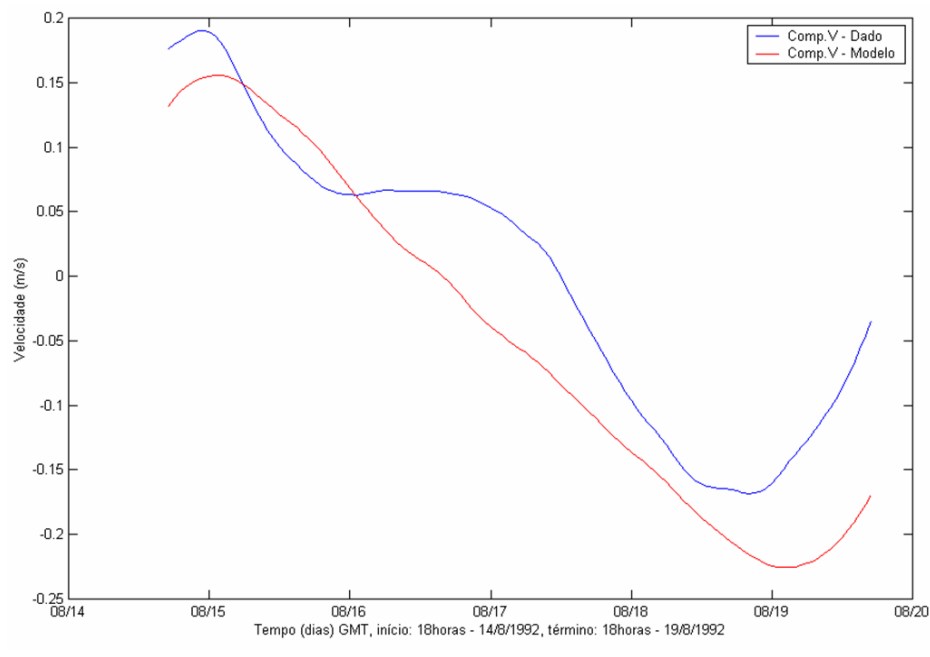
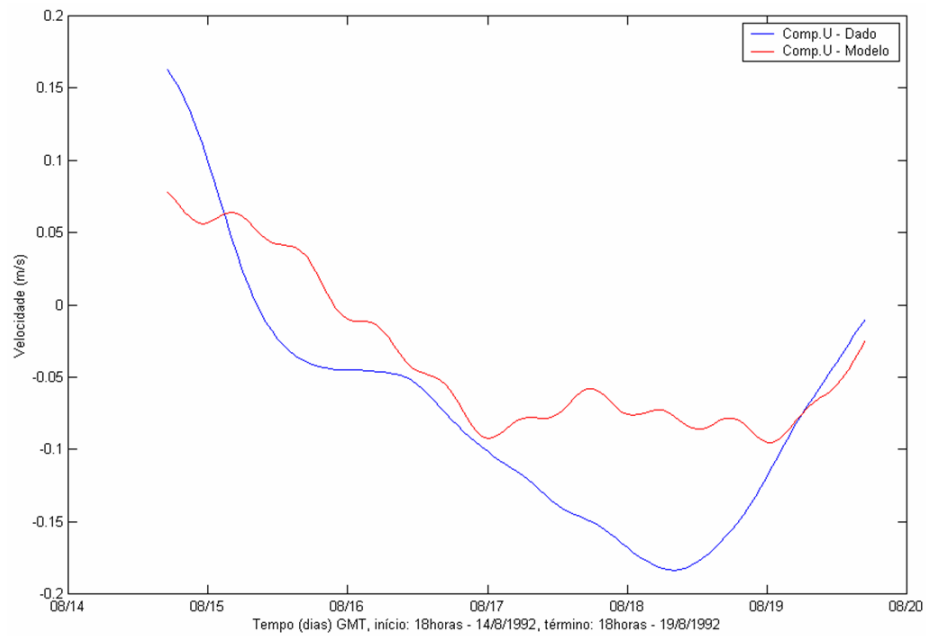


Figura 13 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho), entre os dias 14 e 19 de agosto de 1992.

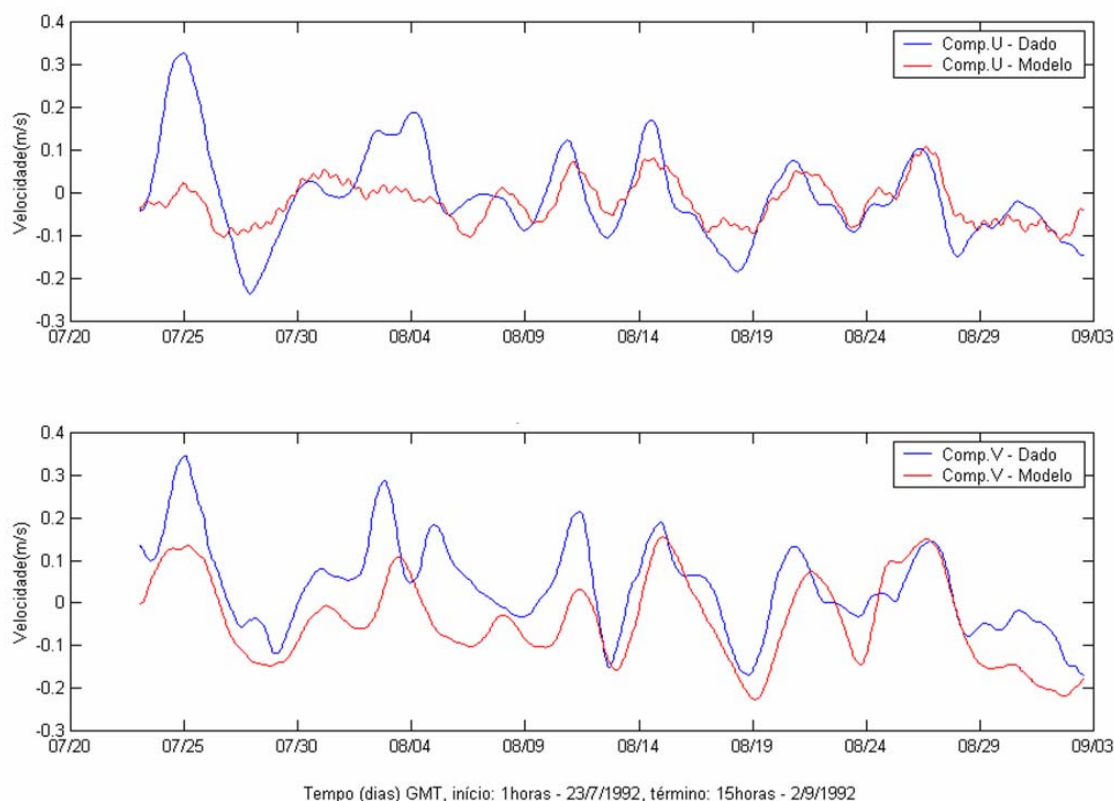


Figura 14 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.

II.5 RESUMO DA BASE HIDRODINÂMICA UTILIZADA

Os resultados obtidos através da simulação numérica na Bacia de Campos encontram-se resumidamente representados na Figura 15, que apresenta um instantâneo da corrente de superfície no período considerado para as simulações com o modelo de óleo.

Estes resultados consideram as principais forçantes locais e remotas que apresentam influência significativa nos padrões de circulação observados sobre a plataforma continental e em oceano profundo.

Eles são resumidos basicamente pelas forçantes de bordas artificiais – maré e campos médios de velocidade (efeito remoto) – e sobre o domínio completo, *i.e.* vento (superfície), campo termohalino (na coluna d'água).

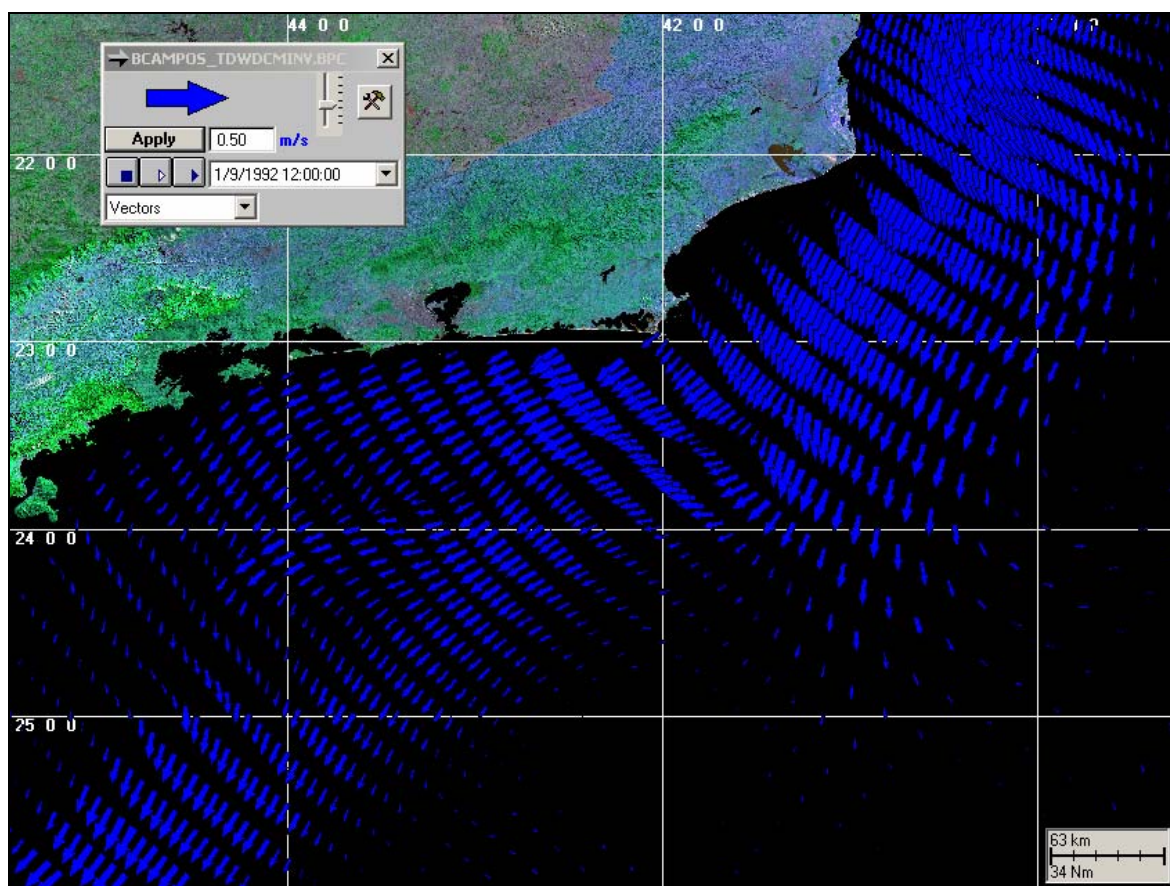


Figura 15 - Exemplo ilustrativo de campo de velocidades obtidos com o modelo hidrodinâmico.

Os índices de ajuste obtidos no processo de calibração, fato válido para qualquer estudo envolvendo modelagem numérica no oceano, devem ser compreendidos e analisados dentro de margens de erro pouco mensuráveis. Esses limites, usuais em qualquer simulação hidrodinâmica, são decorrentes da complexidade da circulação numa região específica, aliada à quantidade de informação anterior existente e ao fato da comparação entre os resultados do modelo e as medições realizarem-se sempre em pontos restritos no espaço e no tempo.



Embora se tenha conseguido bom ajuste do modelo hidrodinâmico à região, deve-se lembrar que seus resultados são específicos para um dado período e determinados pelo atual nível de conhecimento na área de estudo. A extrapolação desses resultados no espaço e no tempo é sempre possível, sendo esta uma das vantagens da utilização de ferramentas numéricas. No entanto, é recomendável manterem-se margens de segurança suficientes na análise dos resultados.



III MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO

Na modelagem de derrame de óleo foi utilizado o modelo OILMAP, desenvolvido pela **ASA**. Este modelo é uma ferramenta utilizada para o acompanhamento e previsão do deslocamento e intemperismo (*trajectory and fates*) de qualquer tipo de óleo derramado em acidentes com petróleo.

O OILMAP é um sistema de modelos, que pode ser utilizado em Planos de Contingência (Lima *et al.*, 2003, ASA 2003a,b,c), Planos de Emergência com acompanhamento em tempo real (Pereira *et al.*, 2005), Planos de Emergência Individuais (ASA, 2003d, 2004), Relatório de Controle Ambiental (ASA, 2005a) e Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) no Brasil (ASA, 2005b) e em qualquer região do mundo (Jayko & Howlett, 1992; Spaulding *et al.*, 1992a,b).

III.1 MODELO OILMAP

O OILMAP foi projetado em uma configuração modular de forma que diferentes tipos de modelos, bem como um conjunto de ferramentas sofisticadas de dados ambientais, podem ser acoplados dependendo do problema e da situação em estudo. Através de sua interface gráfica, o OILMAP permite 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 georreferenciados (SIG); e determinar o impacto ambiental em recursos naturais. As funções do SIG permitem ao usuário a entrada, manipulação e exibição de objetos na tela através de pontos, linhas, e polígonos georreferenciados ao domínio definido pelo cenário. A cada objeto podem ser atribuídos dados em formato de texto, valores numéricos ou arquivos a partir de *links* externos.

O sistema OILMAP inclui os seguintes modelos: um modelo de deriva e intemperismo (*trajectory and fates*) para óleo de superfície e subsuperfície, um modelo de resposta a derramamento de óleo, modelo probabilístico, e um modelo



receptor que através do método inverso localiza a origem do derramamento a partir de informações da posição da mancha.

Para elaboração de cenários de deriva para acidentes com petróleo deve ser definido um conjunto de duas grades computacionais, sobrepostas ao mapa digital da área de estudo. Uma das grades, compreendendo apenas a região de água, define o campo de circulação, podendo neste caso ser baseada em resultados de um modelo hidrodinâmico implementado na região de estudo. A outra grade (*land-water*) define quais as células ou blocos correspondem à área de terra e quais à área de água, com a interface definida pela linha de costa. A linha de costa é representada por uma série de blocos que limita a extensão em que a mancha de óleo pode se movimentar em uma determinada direção, dependendo do tipo de costa (e.g. manguezais, costões rochosos, praias).

O modelo de deriva de óleo prevê o transporte e intemperismo do óleo a partir de derrames instantâneos e contínuos. As estimativas demonstram a localização e concentração do óleo de superfície *versus* o 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* o 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.

A advecção e a dispersão são os processos físicos associados ao deslocamento e espalhamento do óleo, resultantes da ação combinada do vento, das ondas, da maré e dos fluxos induzidos por gradiente de densidade. O processo de advecção é modelado usando uma formulação lagrangiana e o processo de dispersão é modelado usando uma formulação do tipo *random walk*. A dispersão e o espalhamento da mancha são representados no modelo pela formulação espesso-fino de Mackay *et al.* (1980a, 1982), utilizando-se a abordagem de mancha espessa dos mesmos autores.



O processo de evaporação baseia-se na formulação analítica parametrizada em termos de exposição à evaporação (Mackay *et al.*, 1980b, 1982). O modelo de Exposição à Evaporação (Stiver & Mackay, 1984) é uma aproximação analítica para a previsão do volume evaporado. O modelo utiliza informações da curva de destilação para estimar os parâmetros necessários à equação analítica.

Os processos de entranhamento e arrastamento são modelados utilizando-se a formulação de Delvigne & Sweeney (1988) que, explicitamente, representa índices de injeção de óleo para dentro da coluna d'água por gotículas de óleo. O coeficiente de entranhamento ou arrastamento, como uma função da viscosidade do óleo, baseia-se em Delvigne & 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.* (1980a, 1982) e depende da composição do óleo e do estado do mar. O método de emulsificação de Mackay *et al.* (1982) é implementado pelo usuário através dos valores dos parâmetros de entrada do coeficiente de viscosidade do *mousse* e uma taxa de emulsificação que podem ser usados para diminuir a taxa em que a emulsificação está prevista para ocorrer.

A interação do óleo com o litoral e a linha de costa é modelada com base em uma versão simplificada de Reed *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.

Utilizando-se o OILMAP em modo probabilístico, é possível considerar a variabilidade das forçantes ambientais. As simulações de derrame são realizadas através da variação aleatória do início do mesmo dentro do período para o qual se dispõe de dados meteorológicos e oceanográficos. 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). As probabilidades de presença de óleo e tempo de deslocamento da mancha podem ser correlacionadas a recursos naturais armazenados no banco de dados (SIG), de forma a auxiliar na avaliação de impactos ambientais em termos da probabilidade da presença de óleo em recursos importantes.



III.1.1 Formulação do Modelo

O sistema OILMAP inclui um modelo de trajetória e intemperismo (*trajectory and fates*) para óleo de superfície que prevê o transporte e a degradação do óleo a partir de derrames instantâneos e contínuos.

No OILMAP, a mancha de óleo é considerada como um conjunto de partículas lagrangianas contendo, cada uma delas, massa conhecida. O vetor posição (\vec{X}_t) de uma dada partícula, num determinado instante t , é definido como:

$$\vec{X}_t = \vec{X}_{t-\Delta t} + \Delta t \vec{U}_{oil} \quad (16)$$

onde

Δt = passo de tempo (s);

$\vec{X}_{t-\Delta t}$ = posição em $t - \Delta t$;

\vec{U}_{oil} = velocidade da mancha (m/s).

A velocidade advectiva da partícula, \vec{U}_{oil} (m/s), é definida por:

$$\vec{U}_{oil} = \vec{U}_w + \vec{U}_t + \vec{U}_r + \alpha \vec{U}_e + \beta \vec{U}_p \quad (17)$$

onde

\vec{U}_w = componente da velocidade devido ao vento e às ondas (m/s);

\vec{U}_t = componente da velocidade devido às correntes de maré (m/s);

\vec{U}_r = componente da velocidade devido ao fluxo residual (m/s);

\vec{U}_e = componente da velocidade devido ao fluxo de Ekman (m/s);

\vec{U}_p = componente da velocidade devido ao *blowout* (m/s);

α = 0 para derrame de superfície, 1 para subsuperfície;

β = 0 para derrame sem *blowout*, 1 para *blowout*.

A componente da velocidade advectiva devida às correntes de maré, \vec{U}_t , e ao fluxo residual, \vec{U}_r , são provenientes do modelo hidrodinâmico. A velocidade de



deriva devida ao vento, u_{wc} e v_{wc} (m/s), componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, são:

$$u_{wc} = C_1 u_w \quad (18)$$

$$v_{wc} = C_1 v_w \quad (19)$$

onde

u_w = componente Leste-Oeste da velocidade do vento (m/s);

v_w = componente Norte-Sul da velocidade do vento (m/s);

C_1 = fator de deriva (%).

O fator de deriva, C_1 , é constante (Lange & Hühnerfuss, 1978), podendo variar entre 1,0 e 4,5%, baseado em observações. Valores de 3 a 3,5% são mais frequentemente utilizados para ventos moderados em áreas de mar aberto. Valores menores são mais utilizados em zonas costeiras protegidas, como estuários e baías. O valor *default* no modelo é 3,5%. Se as correntes de superfície, fornecidas pelo modelo hidrodinâmico (ou dados observacionais), já são forçadas pelo vento, então o fator de deriva deve ser reduzido.

O ângulo de deriva é no sentido anti-horário da direção do vento (hemisfério Sul). Assim, a velocidade de deriva devida ao vento, u_{wd} e v_{wd} (m/s), componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, são:

$$u_{wd} = u_{wc} \cos \theta + v_{wc} \sin \theta \quad (20)$$

$$v_{wd} = u_{wc} \sin \theta + v_{wc} \cos \theta \quad (21)$$

onde

u_{wd} = componente Leste-Oeste da velocidade devida à deriva do vento (m/s);

v_{wd} = componente Norte-Sul da velocidade devida à deriva do vento (m/s);

θ = ângulo de deriva ($^\circ$) constante ($\theta = C_c$). O valor *default* é zero.

Utilizando a formulação *random walk* para a dispersão horizontal, é possível simular os processos dispersivos que ocorrem numa escala de movimento inferior à escala de resolução do campo de corrente fornecido pelos dados e ou modelo

hidrodinâmico (Okubo, 1971; Okubo & Ozmidov, 1970). As componentes da velocidade de dispersão da mancha, u_{dd} e v_{dd} , (m/s), são definidas (Bear & Verruijt, 1987) por:

$$u_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{6D_x}{\Delta t}} \quad (22)$$

$$v_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{6D_y}{\Delta t}} \quad (23)$$

onde

D_x = coeficiente de dispersão horizontal na direção Leste-Oeste (m²/s);

D_y = coeficiente de dispersão horizontal na direção Norte-Sul (m²/s);

Δt = passo de tempo (s);

γ = número aleatório entre (-1) e (1).

Os coeficientes de dispersão horizontal nas direções Leste-Oeste (D_x) e Norte-Sul (D_y) são, geralmente, iguais.

O processo de espalhamento da mancha é representado pela formulação espesso-fino de Mackay *et al.* (1980a,b, 1982), utilizando-se a abordagem de mancha espessa. O OILMAP modela apenas a mancha espessa que contém mais de 90% da massa associada a mancha. A taxa de mudança da área superficial para o espalhamento da mancha espessa (Mackay *et al.*, 1980a), \bar{A}_{tk} (m²/s), é definido por:

$$\bar{A}_{tk} = \frac{dA_{tk}}{dt} = K_1 A_{tk}^{1/3} \left(\frac{V_m}{A_{tk}} \right)^{4/3} \quad (24)$$

onde

A_{tk} = área superficial da mancha (m²);

K_1 = taxa de espalhamento constante (s⁻¹);

V_m = volume da superfície da mancha (m³);

t = tempo (s).

A análise de sensibilidade deste algoritmo demonstrou que a solução é sensível ao número de partículas utilizadas. Com o objetivo de minimizar esta dependência, Kolluru (1992) derivou uma formulação, normalizando a solução para diferentes números de partículas superficiais.

A taxa de mudança da área superficial de uma única partícula (m^2/s), é dada por:

$$\tilde{A}_{tk} = \frac{dA_{tk}}{dt} = K_1 A_{tk}^{1/3} \left(\frac{V_m}{A_{tk}} \right)^{4/3} \left(\frac{R_s}{R_e} \right)^{4/3} \quad (25)$$

onde

A_{tk} = área superficial de uma partícula (m^2);

K_1 = taxa de espalhamento constante (s^{-1});

V_m = volume de óleo de uma partícula (m^3);

R_s = raio de uma partícula (m);

R_e = raio efetivo da superfície da mancha (m).

O raio efetivo da superfície da mancha R_e (m), (Kolluru, 1992) é dado por:

$$R_e \left[\left(\frac{1}{\pi} \right) \sum_{n=1}^N A_{tk} \right]^{1/2} \quad (26)$$

onde

A_{tk} = área superficial de uma partícula (m^2);

N = número de partículas usadas para representar a superfície da mancha.

O processo de evaporação baseia-se na formulação analítica parametrizada em termos de exposição à evaporação (Mackay *et al.*, 1980b, 1982).

O modelo de Exposição à Evaporação (Stiver & Mackay, 1984) é uma aproximação analítica para a previsão do volume evaporado. O modelo utiliza informações da curva de destilação do óleo (curva PEV) para estimar os



parâmetros necessários a esta equação analítica. A fração evaporada, F_v , é definida por:

$$F_v = \frac{\ln[1 + B(T_G/T)\theta \exp(A - BT_0/T)]}{[T/BT_G]} \quad (27)$$

onde

- T_0 = ponto de ebulição inicial (K);
- T_G = gradiente da curva de destilação modificada;
- T = temperatura do ambiente (K);
- A, B = constantes adimensionais;
- θ = exposição à evaporação.

A exposição à evaporação, θ , é definida por:

$$\theta = \left(\frac{K_m A_t}{V_0} \right) \quad (28)$$

onde

- K_m = coeficiente de transferência de massa (m/s);
- A = área da mancha (m²);
- t = tempo (s);
- V_0 = volume do derrame de óleo (m³).

Dados da curva de destilação (T_0 , T_G , A , B), para óleo cru, podem ser obtidos no *Environment Canada's Oil Catalog* (Whiticar et al., 1992), ou através dos seguintes procedimentos:

1. T_0 (ponto de ebulição inicial) e T_G (gradiente) são obtidos plotando-se a temperatura de ebulição (T_B) com a fração do volume destilado (F_v) para um determinado tipo de óleo, como se segue:

$$T_B = T_0 + T_G F_v \quad (29)$$

2. A (ponto de intersecção com o eixo y) e B (declividade) são obtidos plotando-se o logaritmo natural da constante da Lei de Henry, H , com a temperatura de ebulição (T_B). A constante da Lei de Henry, H , é definida como a razão da concentração do óleo na fase de vapor com a fase líquida. É uma constante adimensional obtida através de experimentos em laboratórios e definida por:

$$H = PV / RT \quad (30)$$

onde

P = pressão do vapor do óleo (atm);

V = volume do óleo (m³);

R = constante universal dos gases;

T = temperatura ambiente (K).

H é comumente fornecido em unidades de atm - m³/mol, devendo ser dividido por RT para adimensionalizá-lo. A relação entre H e T_B é:

$$\ln H = A - B \left(\frac{T_B}{T} \right) \quad (31)$$

Os valores de A e B são fornecidos no banco de dados do OILMAP e variam de 1 a 20 e de 7 a 18, respectivamente.

Os processos de entranhamento e arrastamento são modelados utilizando-se a formulação de Delvigne & Sweeney (1988) que, 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 & Hulsén (1994).

Delvigne & Sweeney (1988) desenvolveram uma relação para a taxa de entranhamento do óleo como uma função do tamanho da partícula de óleo, Q_d (kg/m²s), expressa como:

$$Q_d = C * D_d^{0,57} SFd^{0,7} \Delta d \quad (32)$$



onde

C^* = constante empírica de entranhamento que depende do tipo de óleo e do estado do tempo;

D_d = energia dissipada da arrebentação da onda por unidade de área superficial (J/m^2);

S = fração da superfície do mar coberta pelo óleo;

F = fração da superfície do mar atingida pela arrebentação das ondas;

d = diâmetro da partícula de óleo (m);

Δd = intervalo de diâmetro da partícula de óleo (m).

A constante de entranhamento, C^* , foi ajustada aos dados relatados em Delvigne & Hulsen (1994) como:

$$C^* = \exp(a \ln(\mu / \rho) + b) \quad (33)$$

onde

μ = viscosidade do óleo (cP);

ρ = densidade do óleo (g/cm^3);

$a = -0,1023$, $b = 07,572$ para $(\mu / \rho) < 132$ cSt;

$a = -1,8927$, $b = 16,313$ para $(\mu / \rho) > 132$ cSt.

O diâmetro médio da partícula, d_{50} (μm), é definido por:

$$d_{50} = 1818(E)^{-0,5} \left(\frac{\mu}{\rho_0} \right)^{0,34} \quad (34)$$

onde

E = taxa de dissipação da energia da onda por unidade de volume (J/m^3s), com 10^3 a 10^4 para ondas em zona de arrebentação, 1 a 10 para camada superficial, 10^{-1} a 1 para estuários e 10^{-4} a 10^{-2} para oceano profundo;

μ = viscosidade do óleo (cP);

ρ = densidade do óleo (g/cm^3).



O processo de entranhamento é muito sensível aos valores mínimo (d_{\min}) e máximo (d_{\max}) do diâmetro da partícula (μm), sendo:

$$d_{\min} = 0,1d_{50} \quad (35)$$

$$d_{\max} = 2,0d_{50} \quad (36)$$

A energia dissipada da onda, D_d (J/m^2), é:

$$D_d = 3,4 \times 10^{-3} \rho_w g H^2 \quad (37)$$

onde

ρ_w = densidade da água (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

H = raiz quadrada média da altura da arrebentação da onda (m).

A fração da superfície marinha impactada pela arrebentação das ondas por unidade de tempo, F , é:

$$F = 0,032(U_w - U_t)/T_w \quad (38)$$

onde

U_w = velocidade do vento 10 m acima da superfície do mar (m/s);

U_t = valor limite do vento para a quebra da onda ($\sim 5 \text{ m}/\text{s}$);

T_w = período de onda significativo (s).

O total da massa que sofre entranhamento na coluna d'água, M_e (kg), é:

$$M_e = A dt \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} Q_d dd \quad (39)$$

onde

A = área superficial da mancha (m^2);

dt = passo de tempo (s);

Q_d = taxa de entranhamento ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).



A profundidade de intrusão, z_m (m), é:

$$z_m = 1,5H_b \quad (40)$$

onde

H_b = altura da quebra da onda (m).

A velocidade de ascensão para cada tamanho de gotícula, W_i (m/s), é:

$$W_i = d_i^2 g (1 - \rho_0 / \rho_w) / 18\nu_w \quad (41)$$

onde

d_i = diâmetro da gotícula (m);

g = constante gravitacional (m/s^2);

ρ_0 = densidade do óleo (kg/m^3);

ρ_w = densidade da água (kg/m^3);

ν_w = viscosidade da água (m^2/s).

Esta relação usa a Lei de Stokes e é válida para baixos valores de números de Reynolds ($Re < 20$).

A profundidade de mistura para cada tamanho de partícula, Z_i (m), é:

$$Z_i = \max\left(\frac{D_v}{W_i}, Z_m\right) \quad (42)$$

onde

D_v = coeficiente de dispersão vertical (m^2/s).

O coeficiente de dispersão vertical, D_v (m^2/s), é definido como:

$$D_v = 0,0015W_{10} \quad (43)$$

onde

W_{10} = velocidade do vento a 10 m de altura (m/s).

A fração da massa que volta à superfície para cada tamanho de partícula, R_i , é dada por:

$$R_i = \frac{W_i dt}{Z_i} \quad (44)$$

onde

dt = passo de tempo (s).

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.* (1980a, 1982) e depende da composição do óleo e do estado do mar.

O método de emulsificação de Mackay *et al.* (1982) é implementado pelo usuário através dos valores dos parâmetros de entrada do coeficiente de viscosidade do *mousse* e uma taxa de emulsificação, que podem ser usados para diminuir a taxa em que a emulsificação está prevista para ocorrer.

O aumento exponencial do algoritmo da formação do *mousse* é apresentado em Mackay *et al.* (1980a, 1982). A taxa de água que é incorporada ao óleo, \tilde{F}_{wc} (s^{-1}), é dada por:

$$\tilde{F}_{wc} = \frac{dF_{wc}}{dt} = C_1 U_w^2 \left(1 - \frac{F_{wc}}{C_2} \right) \quad (45)$$

onde

U_w = velocidade do vento (m/s);

C_1 = constante empírica (2×10^{-6} para o óleo emulsificado; 0 para outros);

C_2 = constante que controla a quantidade máxima de água (0,7 para óleo combustível pesado e óleo cru);

F_{wc} = fração máxima de água no óleo (valor de entrada para caracterização do óleo) (s^{-1}).

A viscosidade do óleo emulsificado, μ (cP), é dada por:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{2,5 F_{wc}}{1 - C_0 F_{wc}} \right) \quad (46)$$



onde

μ_0 = viscosidade inicial do óleo (cP);

F_{wc} = fração máxima de água no óleo;

C_0 = constante de emulsificação (~0,65).

O efeito da evaporação na viscosidade, μ (cP), é dada por:

$$\mu = \mu_0 \exp(C_4 F_v) \quad (47)$$

onde

μ_0 = viscosidade inicial do óleo (cP);

C_4 = constante (1 para óleo leve e 10 para óleo pesado);

F_v = fração evaporada da superfície da mancha.

A interação do óleo com o litoral e linha de costa é modelada com base em uma versão simplificada de Reed *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. Estes processos foram parametrizados no OILMAP da seguinte forma:

- A grade que representa a linha de costa do OILMAP (grade *land-water*) pode conter diferentes informações sobre as capacidades de retenção de óleo para cada elemento de grade. A deposição ocorre quando uma partícula de óleo cruza a linha de costa e termina quando a capacidade de absorção da superfície especificada é atingida. As partículas de óleo que posteriormente atingem um elemento de grade costeira já saturada não permanecem na superfície da costa;
- O óleo depositado na linha de costa é exponencialmente removido com o tempo, retornando à coluna d'água numa maré enchente suficientemente alta para umedecer a superfície com o óleo, aliada a ação do vento;

- A fração de massa disponível para deposição na linha de costa, F_{sh} , é:

$$F_{sh} = \frac{A_{lg}}{A_s} \quad (48)$$

onde

A_{lg} = área de um elemento de grade;

A_s = área de uma partícula na superfície.

- A massa é depositada na grade costeira apenas se o total de massa acumulada é menor do que a capacidade de absorção de determinado elemento de grade. Esta capacidade de absorção para um determinado tipo de costa i , $M_{h,i}$ (kg), é:

$$M_{h,i} = \rho_0 t_i W_i L_{gi} \quad (49)$$

onde

i = parâmetro do tipo de costa;

ρ_0 = densidade do óleo depositado (kg/m^3);

t_i = espessura máxima do óleo que pode ser depositada na costa (varia de acordo com o tipo de costa e viscosidade do óleo);

W_i = largura do elemento de grade atingido pelo óleo;

L_{gi} = comprimento do elemento de grade atingido pelo óleo.

- A massa de óleo restante na costa em qualquer instante, M_R (kg), é

$$M_R = M_0 (1 - \exp[-t/T]) \quad (50)$$

onde

M_0 = massa inicial do óleo depositado na costa (kg);

t = tempo (dias);

T = tempo de remoção dependente do tipo de costa (dias).



III.2 DADOS DE ENTRADA

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são:

- ✓ localização geográfica do ponto de derrame;
- ✓ data e horário;
- ✓ duração do derrame;
- ✓ volume derramado;
- ✓ tipo de óleo;
- ✓ duração da simulação;
- ✓ opções de resposta (e.g., barreiras, sobrevôo, dispersantes);
- ✓ campo de correntes;
- ✓ arquivo de dados meteorológicos;
- ✓ opções de saída;
- ✓ parâmetros de simulação:
 - número de partículas,
 - fator de vento,
 - coeficiente de dispersão horizontal,
 - passo de tempo do modelo,
 - passo de tempo do arquivo de saída.

Os resultados de cada simulação correspondem, então, a um único cenário, definido pelo arquivo de entrada de dados e parâmetros do modelo.

III.2.1 Campos de Correntes

Os campos de correntes utilizados na modelagem do transporte e dispersão de óleo foram gerados a partir da modelagem hidrodinâmica, como descrito no Capítulo II. Para avaliar a sazonalidade das forçantes ambientais nos padrões de circulação e transporte, foram definidos dois campos hidrodinâmicos de 3 meses: verão (janeiro a março) e inverno (junho a agosto). A grade *land-water* utilizada (Figura 16) possui dimensões de 250x250 pontos.

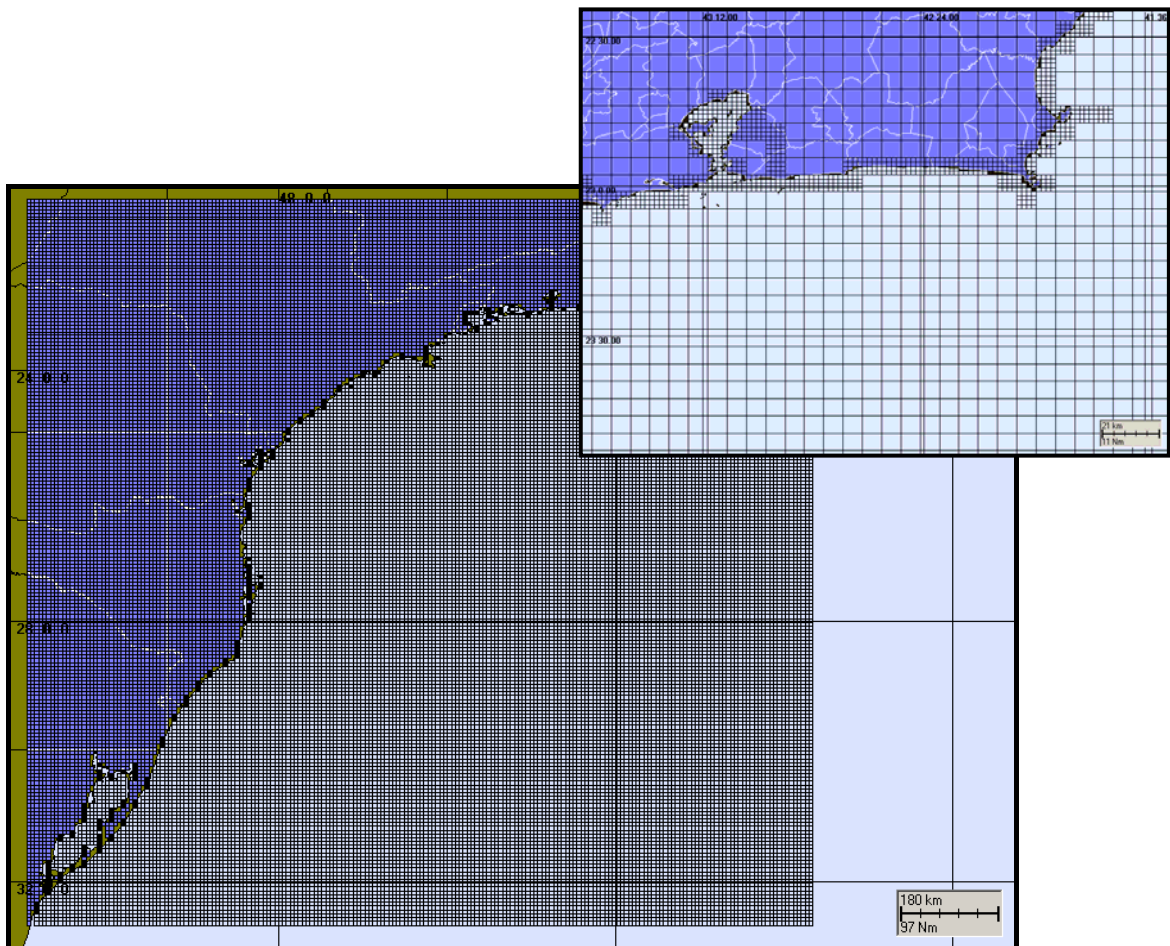


Figura 16 - Grade definindo os contornos de terra (*grade land-water*) para a modelagem de deriva de óleo na Bacia de Campos.

III.2.2 Dados de Vento

Para a modelagem de deriva de óleo foi utilizado um conjunto de dados de vento proveniente das reanálises dos modelos meteorológicos NCEP/NCAR. Estes dados possuem, originalmente, uma resolução espacial de $2,5^\circ$ (que corresponde a aproximadamente 277,8 km).

Os dados utilizados são referentes ao período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 1992. A Figura 17 apresenta o *stick plot* dos valores médios diários dos dados referentes à posição $21,9^\circ\text{S}$ e $39,4^\circ\text{W}$.

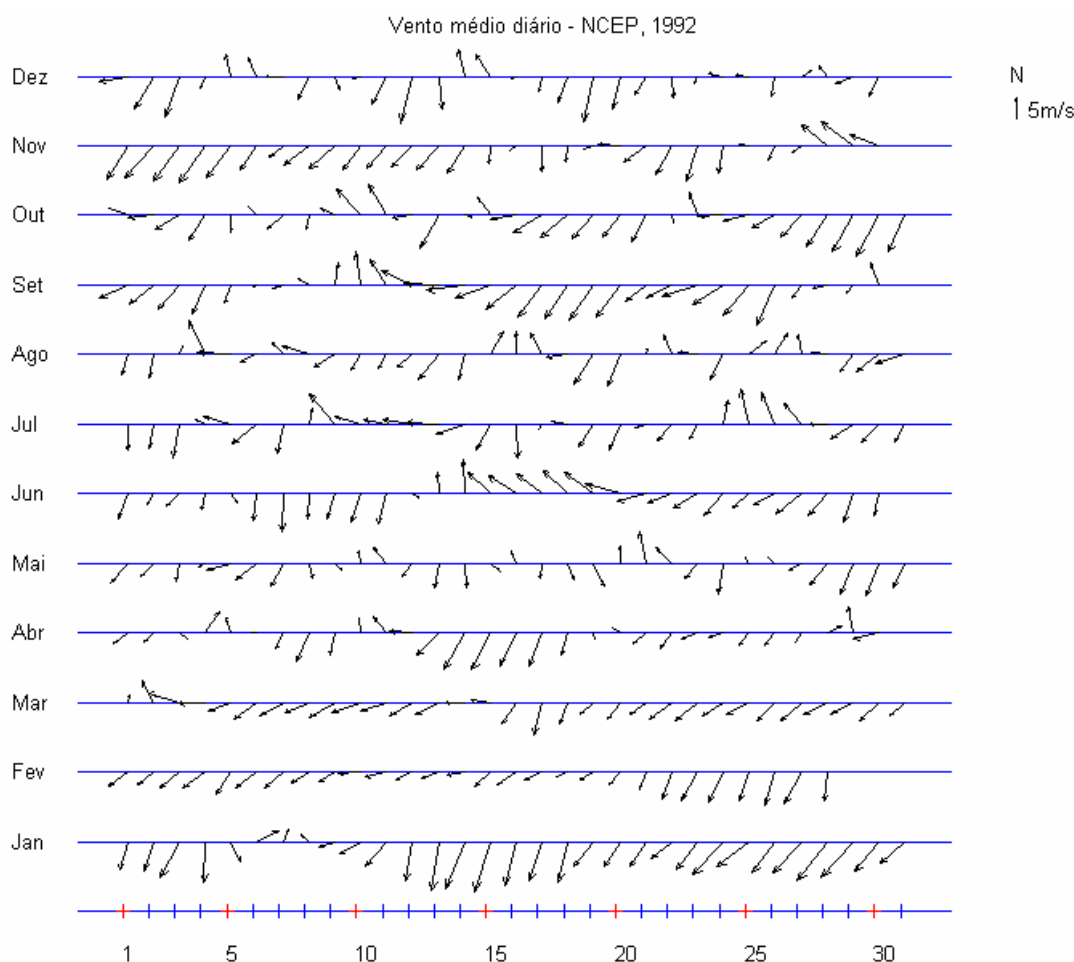


Figura 17 - Diagrama *stick plot* dos valores médios diários de dados de vento NCEP durante o período de janeiro a dezembro de 1992 (convenção vetorial).

A Figura 18 (a) e (b) apresentam os histogramas direcionais dos dados de vento (NCEP) na posição 21,9°S e 39,4°W para os períodos de (a) verão, janeiro a março, e (b) inverno, junho a agosto. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica. A intensidade é apresentada em (m/s) e a escala de cores representa o número de observações (N.Obs.).

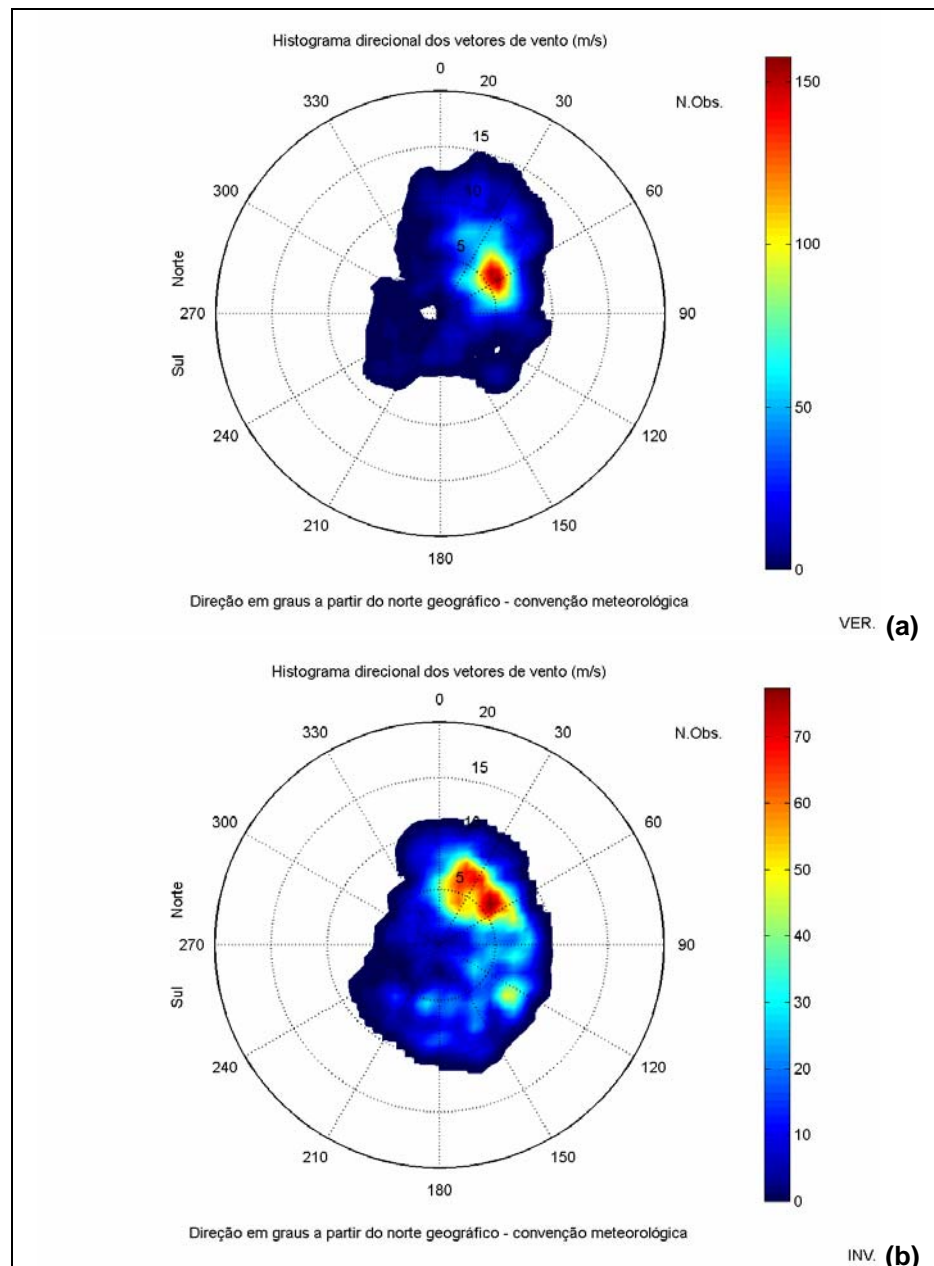


Figura 18 - Histograma direcional dos vetores de vento para (a) verão (janeiro a março) e (b) inverno (junho a agosto), Bacia de Campos.



A Tabela 2 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento para o período de verão. As intensidades estão em (m/s) e as direções são apresentadas em graus a partir do Norte geográfico seguindo a convenção meteorológica. Observa-se que os ventos mais freqüentes são provenientes das direções NNE NE e ENE (22,4%, 32,3% e 21,6%). Os ventos mais fortes registrados foram provenientes de NNE (13,4 m/s).

Tabela 2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento NCEP para o ano de 1992, na Bacia de Campos, no período de verão.

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 (de onde o vento vem).

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	Porc.	Dir. méd.
0,0- 1,0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,1	48
1,0- 2,0	0	1	0	0	4	0	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0,6	131
2,0- 3,0	3	7	13	5	18	6	6	7	2	1	2	0	2	1	1	5	79	3,6	74
3,0- 4,0	9	36	38	28	23	8	2	7	6	3	0	1	0	0	3	3	167	7,6	57
4,0- 5,0	6	31	83	74	31	8	0	4	7	2	1	5	0	1	0	5	258	11,8	58
5,0- 6,0	3	34	130	160	33	1	0	1	0	3	4	2	4	4	0	2	381	17,4	56
6,0- 7,0	27	63	157	138	48	0	4	0	0	1	3	2	0	0	0	1	444	20,3	51
7,0- 8,0	22	80	110	58	20	7	14	0	0	0	5	0	0	0	0	2	318	14,6	46
8,0- 9,0	14	70	54	6	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	154	7,1	32
9,0-10,0	30	61	46	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	142	6,5	28
10,0-11,0	27	37	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	117	5,4	27
11,0-12,0	12	34	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	2,9	23
12,0-13,0	4	26	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	1,6	21
13,0-14,0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0,4	21
Total	158	490	706	472	186	30	29	25	15	10	15	10	6	6	4	22	2184		
Porc.	7,2	22,4	32,3	21,6	8,5	1,4	1,3	1,1	0,7	0,5	0,7	0,5	0,3	0,3	0,2	1,0			
Vel. méd.	8,2	7,8	6,8	5,8	5,2	4,6	5,5	3,0	3,7	4,5	5,9	5,1	4,4	4,8	3,1	5,1			
Vel. máx.	12,1	13,4	12,3	9,5	8,3	7,8	8,0	5,3	4,2	6,6	7,7	6,7	5,4	5,5	3,7	9,9			
Percts. (0,9)	10,7	11,0	10,0	7,0	7,0	7,0	7,0	4,0	4,0	5,5	7,0	6,0	5,0	5,0	3,0	8,3			

A Tabela 3 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento para o período de inverno. Os ventos mais freqüentes são de NNE (18,4%) e os ventos mais intensos observados são provenientes de NNE (10,2 m/s) e SSE (10,6 m/s).

Tabela 3 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento NCEP para o ano de 1992, na Bacia de Campos, no período de inverno.

Ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do Vento.
Obs.: a direção é medida em graus a partir do Norte geográfico, convenção meteorológica.

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	Porc.	Dir. méd.
0,0- 1,0	2	1	0	1	0	0	0	3	1	2	1	2	2	0	3	1	19	0,9	254
1,0- 2,0	3	5	0	0	2	4	5	0	0	3	4	2	4	3	2	2	38	1,7	304
2,0- 3,0	6	14	13	6	0	4	12	0	0	2	3	1	2	5	2	6	76	3,4	34
3,0- 4,0	21	34	35	15	12	26	9	3	4	4	1	0	0	4	8	3	179	8,1	51
4,0- 5,0	32	46	42	34	14	19	22	11	15	2	0	2	1	3	3	13	259	11,7	55
5,0- 6,0	50	64	85	44	29	16	19	22	29	25	11	2	0	0	2	7	405	18,3	62
6,0- 7,0	35	99	54	63	32	31	23	21	17	11	13	0	0	0	0	1	445	20,2	60
7,0- 8,0	28	84	101	61	45	34	38	28	9	9	1	2	0	0	0	5	400	18,1	70
8,0- 9,0	33	35	21	14	26	40	44	17	34	10	2	0	0	0	0	6	282	12,8	96
9,0-10,0	14	19	10	0	4	12	11	14	0	0	0	0	0	0	0	1	85	3,8	77
10,0-11,0	0	6	0	0	0	0	0	12	2	0	0	0	0	0	0	0	20	0,9	138
Total	224	407	361	238	160	178	184	129	125	65	35	13	7	16	21	45	2208		
Porc.	10,1	18,4	16,3	10,8	7,2	8,1	8,3	5,8	5,7	2,9	1,6	0,6	0,3	0,7	1,0	2,0			
Vel. méd.	6,0	6,2	5,9	6,1	6,3	6,2	6,5	7,0	6,8	6,0	5,3	3,6	1,9	2,9	3,1	5,1			
Vel. máx.	9,8	10,2	9,8	8,7	8,8	9,3	9,6	10,6	10,1	9,0	8,2	8,0	4,5	4,2	3,5	9,9			
Percts. (0,9)	8,0	8,0	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0	9,0	9,0	8,0	6,0	7,0	3,6	4,0	4,4	8,0			



III.2.3 Ponto de Risco e Volumes

As coordenadas do ponto de risco foram especificadas pela ECOLOGUS/SHELL conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Coordenadas (SAD 69) do ponto de risco que representa o FPSO Fluminense, localizado na Bacia de Campos.

PONTO DE RISCO	LATITUDE	LONGITUDE	LÂMINA D'ÁGUA (m)
FPSO Fluminense	22°38'23"S	40°25'48"W	792

Fonte: ECOLOGUS/SHELL.

Os volumes utilizados nas simulações foram definidos segundo a Resolução CONAMA¹⁴ nº 293/01 (Brasil, 2001):

- Pequeno: 8 m³;
- Médio: 200 m³;
- Pior caso: 225.009,1 m³.

O volume de pior caso considerado é a soma do volume total de óleo em tanques (224.528,0 m³) com o inventário estimado de tubos e equipamentos de processo a bordo (481,1 m³). Nas simulações com todos os volumes considerou-se o vazamento de todo o volume de óleo instantaneamente, ou seja, no instante inicial da simulação.

III.2.4 Características do Produto Utilizado

Com base nas informações disponíveis para a área em estudo foram realizadas simulações com um óleo cru (Tabela 5), aqui denominado: Bijupirá/Salema.

¹⁴ Conselho Nacional do Meio Ambiente.

**Tabela 5 - Características do óleo tipo Bijupirá/Salema.**

PARÂMETRO	VALOR
Nome do óleo	<i>Bijupirá/Salema</i>
API	28,79
Densidade	0,8823 g/cm ³
Viscosidade dinâmica a 25°C	31,46 cP
Tensão interfacial	30,00 din/cm
Conteúdo máximo de água	1%
Ponto de ebulição inicial	400 K
Gradiente da curva de evaporação	620
Constante de evaporação A	7,5
Constante de evaporação B	11,9

III.3 CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES

O critério de parada adotado nas simulações foi o tempo de 30 dias para o acompanhamento de cada partícula. Além deste critério de parada propriamente dito, foi adotado o corte de espessuras inferiores a 300 nm nas simulações e apresentações de resultados (espessura limite da mancha de óleo segundo IBAMA/ANP, 2002).

III.4 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

As simulações para a determinação da dispersão de óleo foram realizadas utilizando-se o modelo OILMAP no modo probabilístico. Neste modo é considerada a variabilidade das forçantes ambientais, assim as simulações de comportamento da pluma são realizadas através da variação das condições meteorológicas e oceanográficas, divididas em duas condições principais correspondendo aos períodos de verão e inverno. Para que se pudesse incorporar a variabilidade dessas forçantes foi realizada com o modelo OILMAP uma série de 300 simulações em cada cenário probabilístico. A Tabela 6 apresenta os cenários simulados neste estudo para o FPSO Fluminense.



Tabela 6 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames do óleo para o FPSO Fluminense.

CENÁRIOS	PRODUTO (PETRÓLEO)	VOLUME (m ³)	ESTAÇÃO DO ANO	TEMPO
FPSO-F_VER_8_30D	BIJUPIRA/SALEMA.	8	Verão	30 dias
FPSO-F_VER_200_30D	BIJUPIRA/SALEMA.	200	Verão	30 dias
FPSO-F_VER_PIORCASO_6H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Verão	6 horas
FPSO-F_VER_PIORCASO_12H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Verão	12 horas
FPSO-F_VER_PIORCASO_36H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Verão	36 horas
FPSO-F_VER_PIORCASO_60H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Verão	60 horas
FPSO-F_VER_PIORCASO_96H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Verão	96 horas
FPSO-F_VER_PIORCASO_30D	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Verão	30 dias
FPSO-F_INV_8_30D	BIJUPIRA/SALEMA.	8	Inverno	30 dias
FPSO-F_INV_200_30D	BIJUPIRA/SALEMA.	200	Inverno	30 dias
FPSO-F_INV_PIORCASO_6H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Inverno	6 horas
FPSO-F_INV_PIORCASO_12H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Inverno	12 horas
FPSO-F_INV_PIORCASO_36H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Inverno	36 horas
FPSO-F_INV_PIORCASO_60H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Inverno	60 horas
FPSO-F_INV_PIORCASO_96H	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Inverno	96 horas
FPSO-F_INV_PIORCASO_30D	BIJUPIRA/SALEMA.	225.009,1	Inverno	30 dias



IV RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

IV.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

O modelo OILMAP foi utilizado para simular os cenários descritos no Item III.4 e produzir as curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da área de estudo.

Da Figura 19 até a Figura 37 são apresentados os contornos de probabilidade da presença de óleo na água e na costa, além dos volumes médios e máximos por quilômetro de costa, para os cenários de acidentes a partir do FPSO Fluminense, ocorrendo durante os meses de verão e inverno. Praticamente em todas as simulações a mancha se deslocou para SSW e SW, seguindo a orientação da CB.

Cabe aqui ressaltar que todas as simulações realizadas não levam em conta as ações provenientes de Planos de Contingência e Planos de Ações Emergenciais, e que em todas as ilustrações de contornos de probabilidade de óleo na água, o valor correspondente ao limite superior dos intervalos da escala de cores está incluído na classe. Assim, por exemplo, no intervalo de probabilidade de 10-20% estão incluídas as probabilidades superiores a 10% e menores ou iguais a 20%.

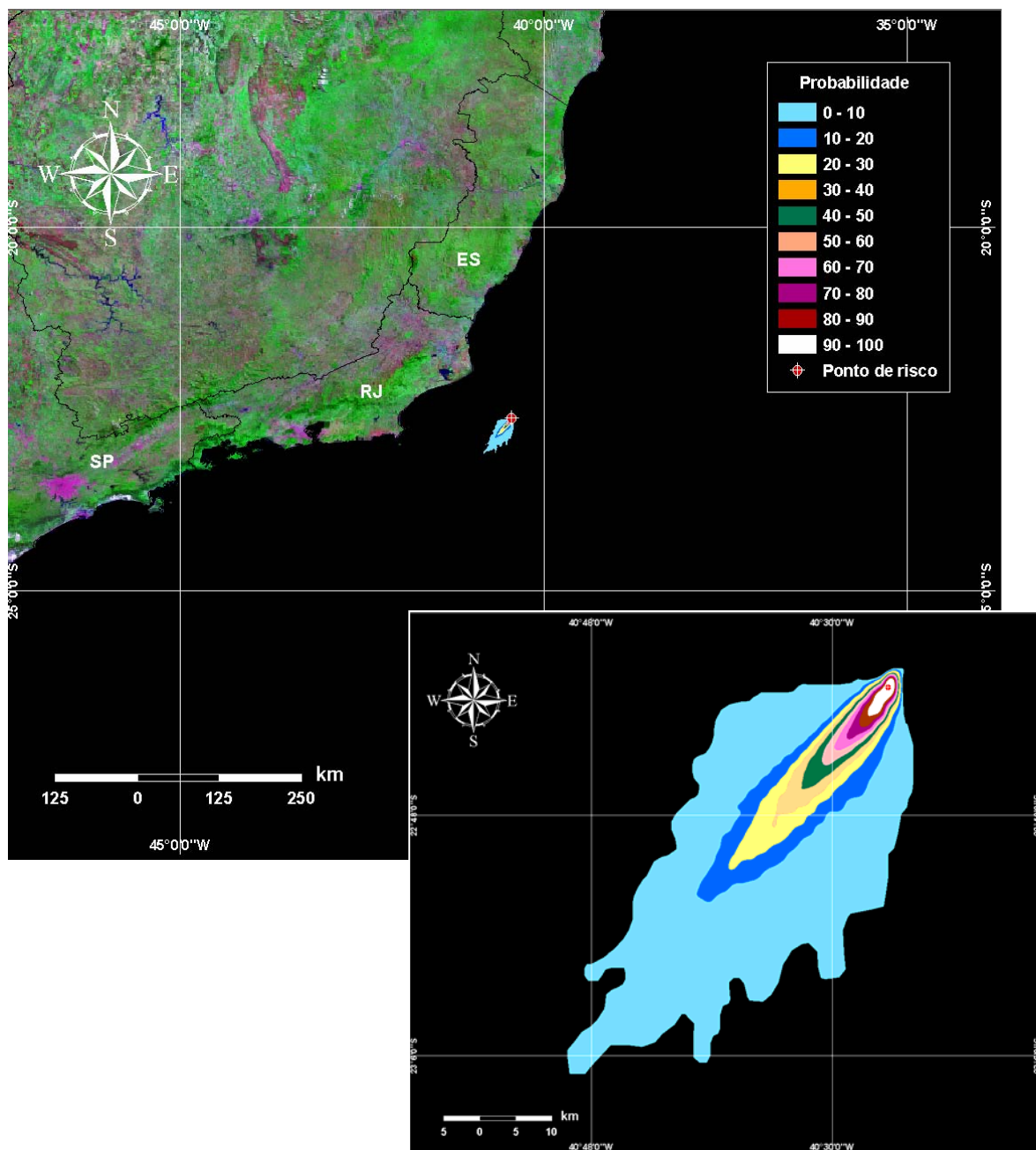


Figura 19 - Cenário FPSO-F_VER_8_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m³ após 30 dias de simulação.

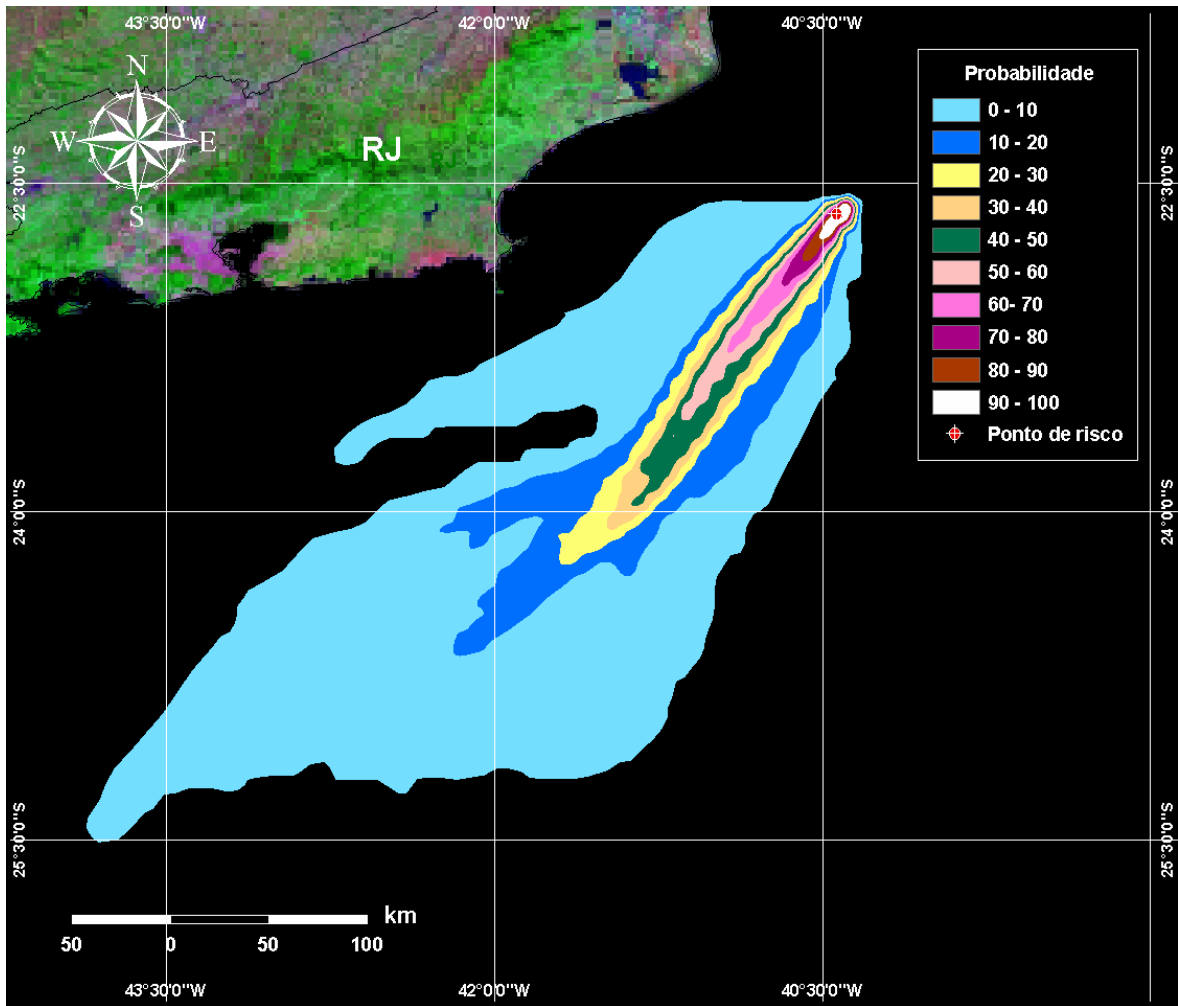


Figura 20 - Cenário FPSO-F_VER_200_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m³ após 30 dias de simulação.

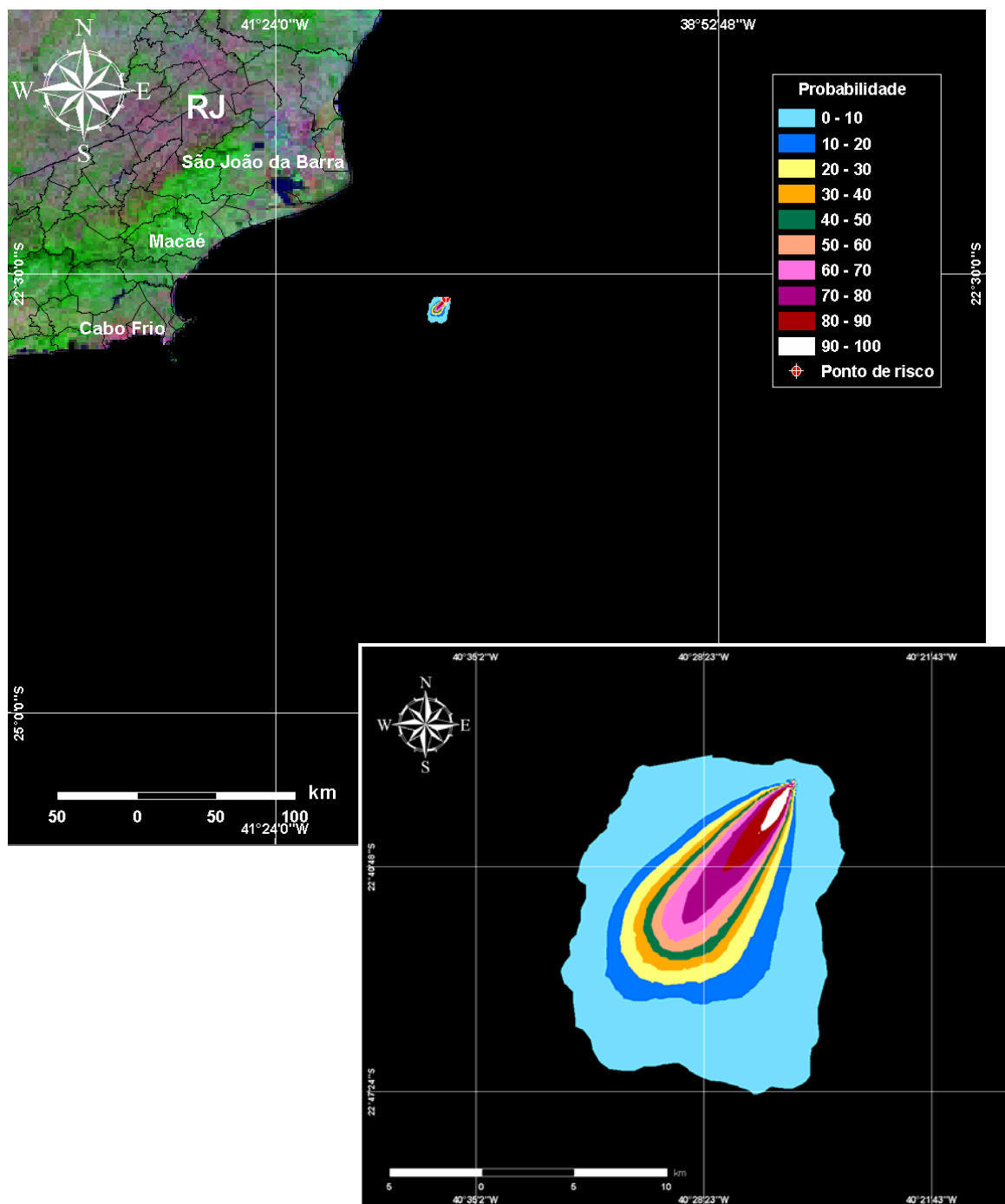


Figura 21 - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_6H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 6 horas de simulação.

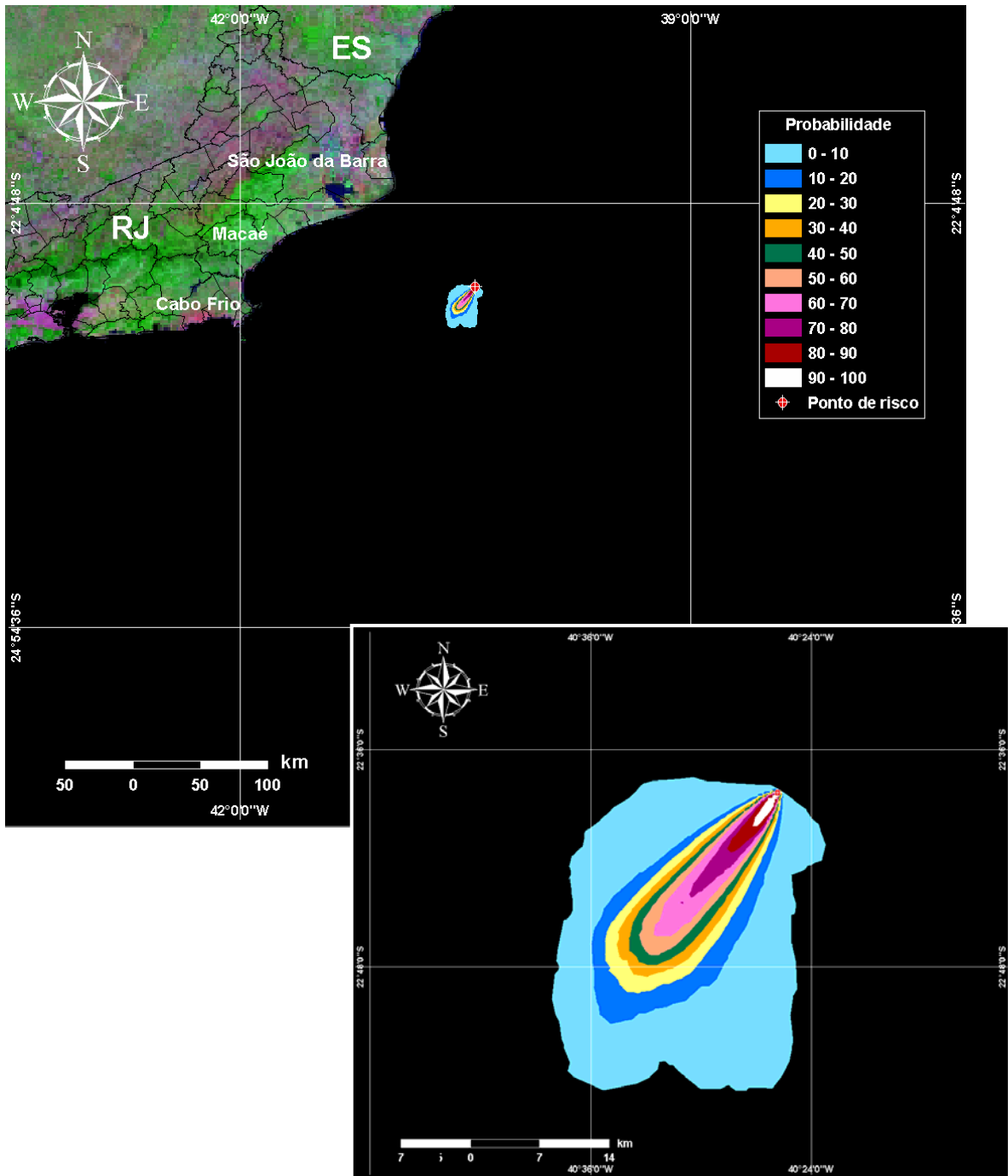


Figura 22 - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_12H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 12 horas de simulação.

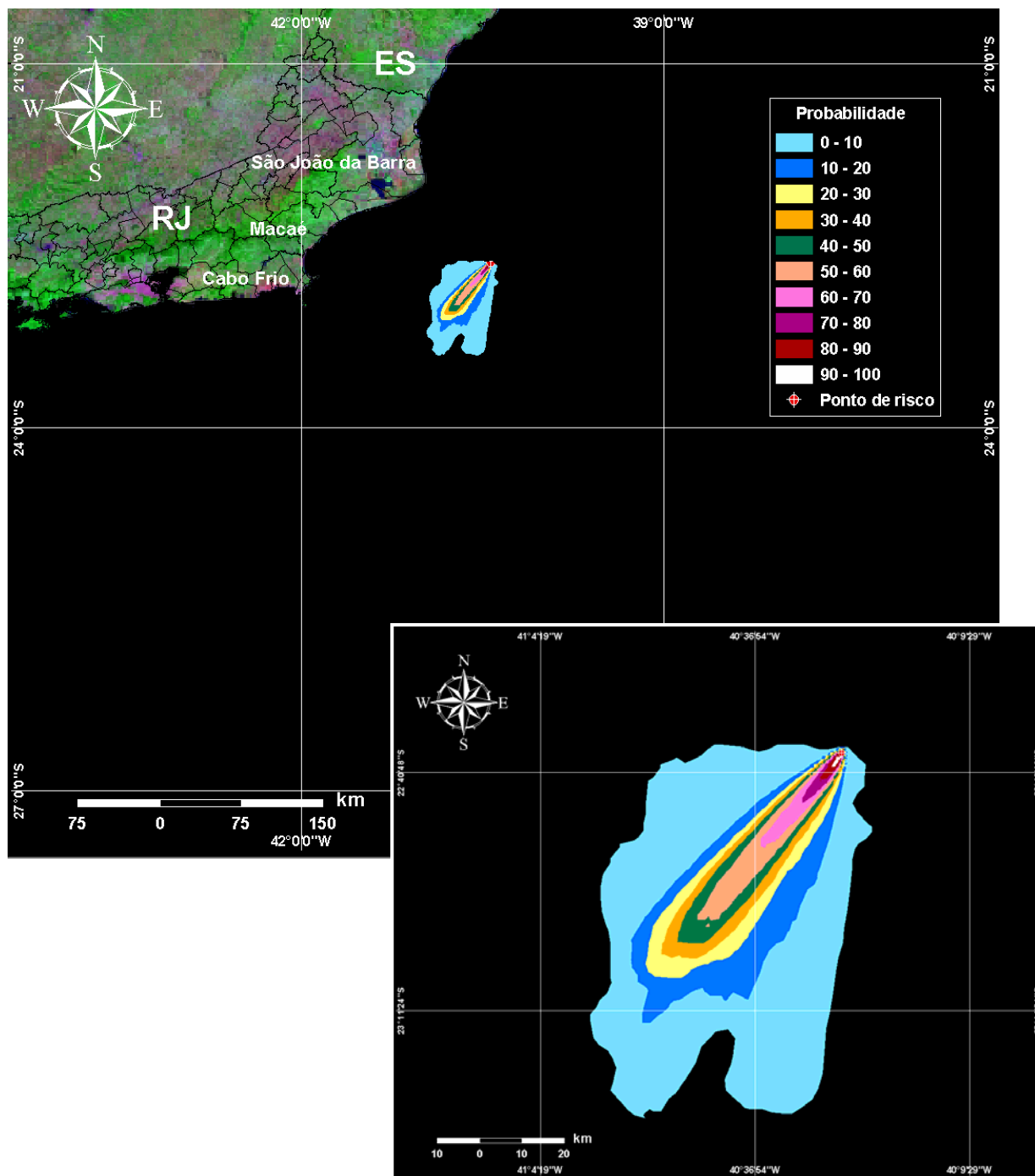


Figura 23 - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_36H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 36 horas de simulação.

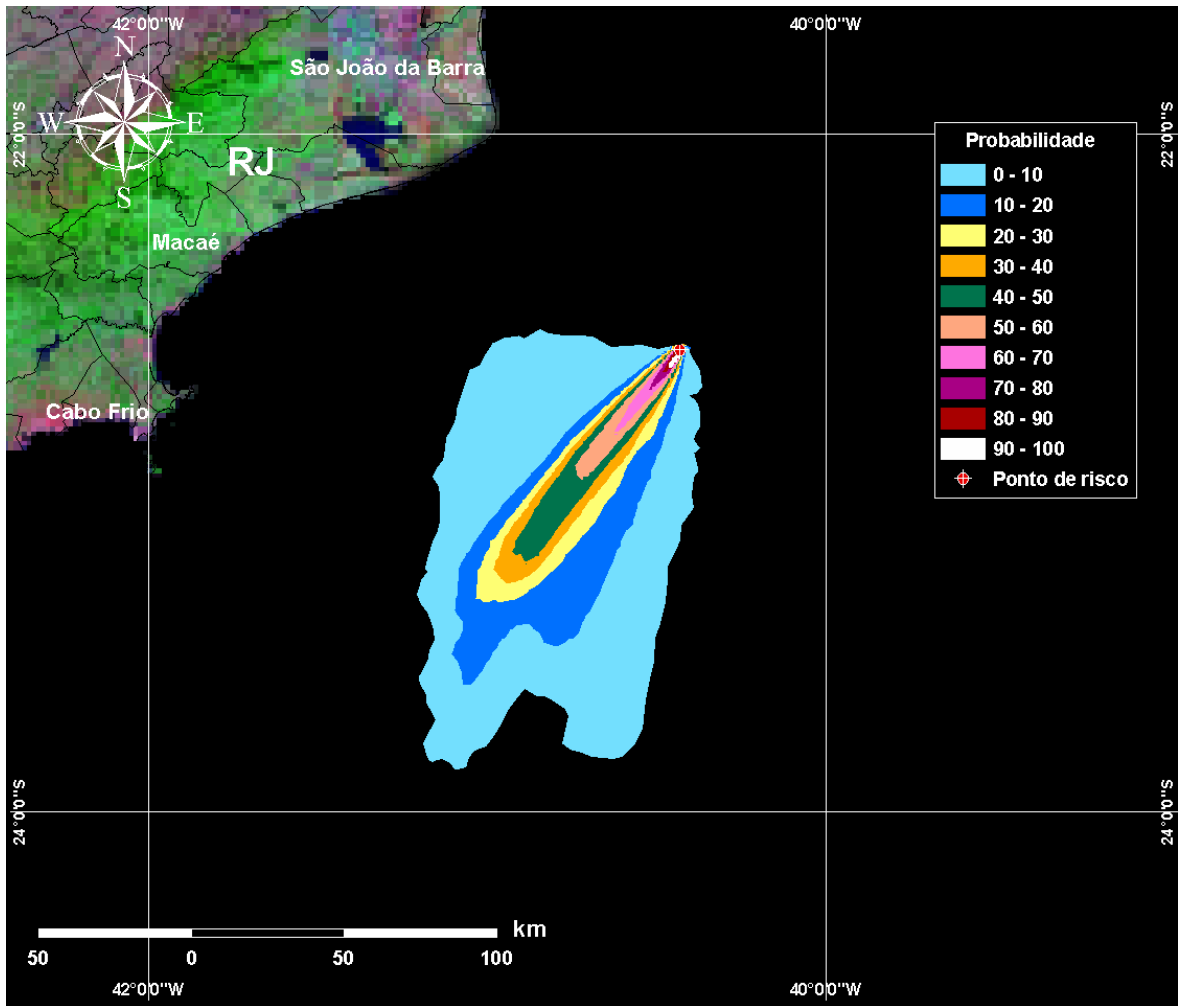


Figura 24 - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_60H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 60 horas de simulação.

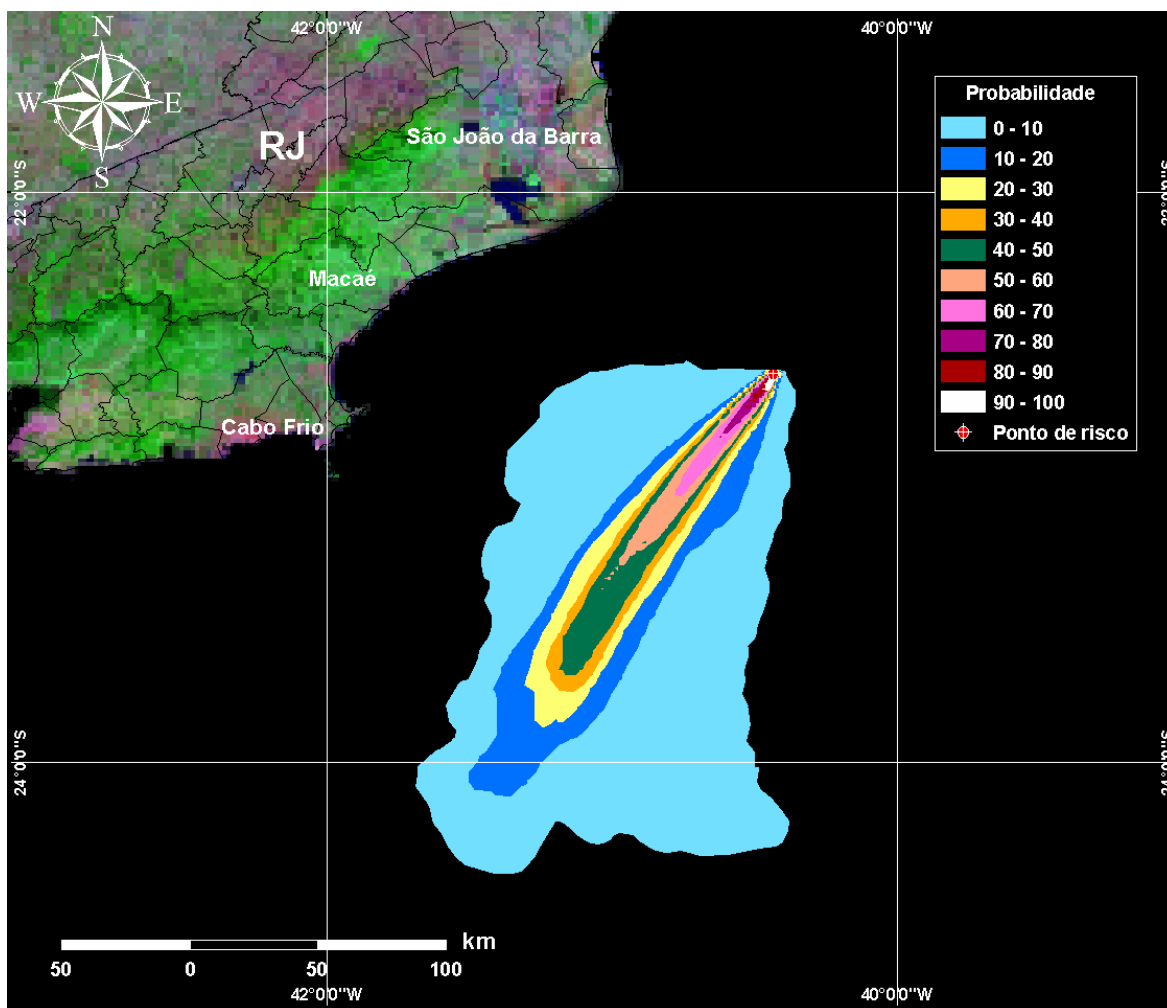


Figura 25 - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_96H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 96 horas de simulação.

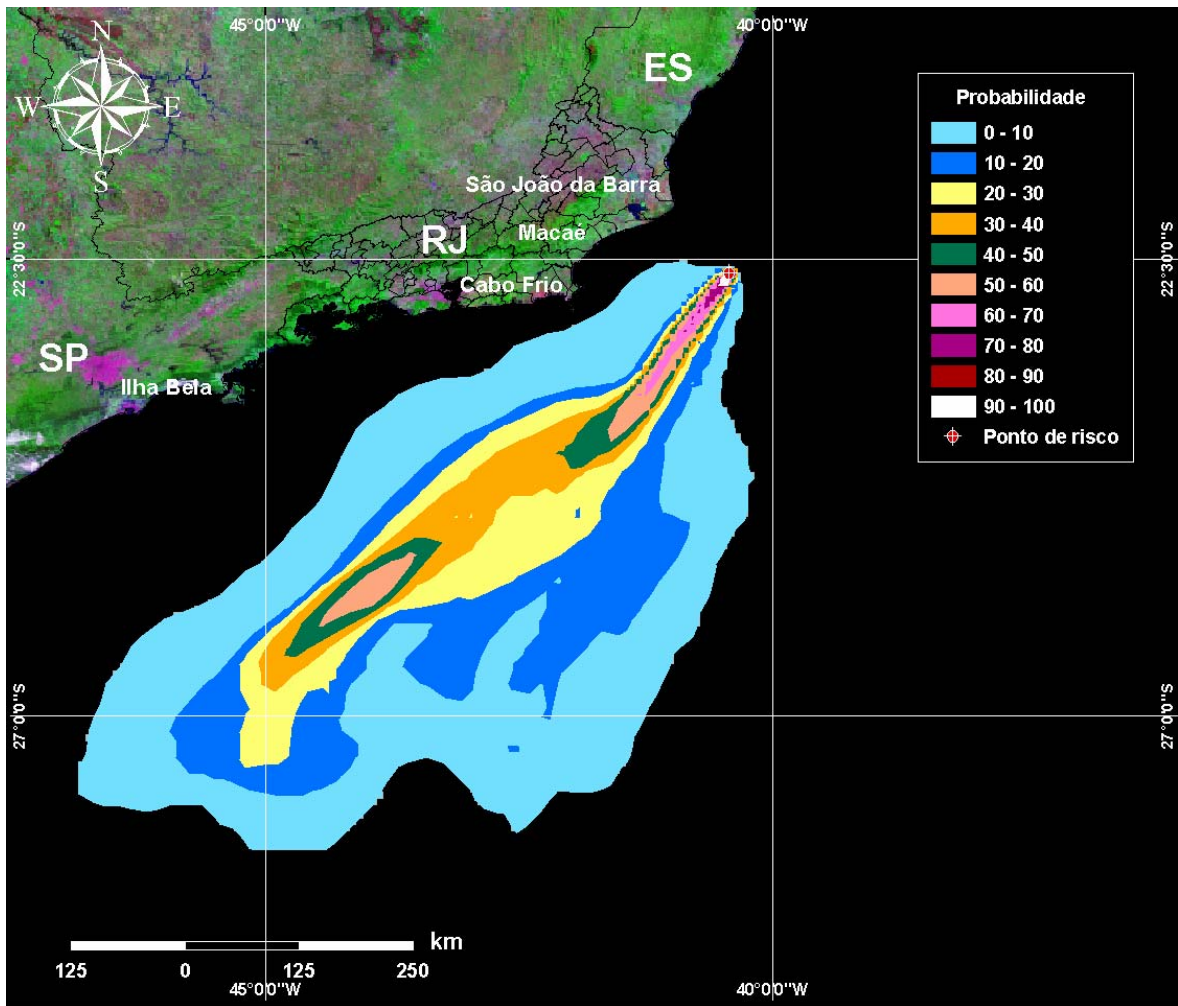


Figura 26 - Cenário FPSO-F_VER_PIORCASO_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação.

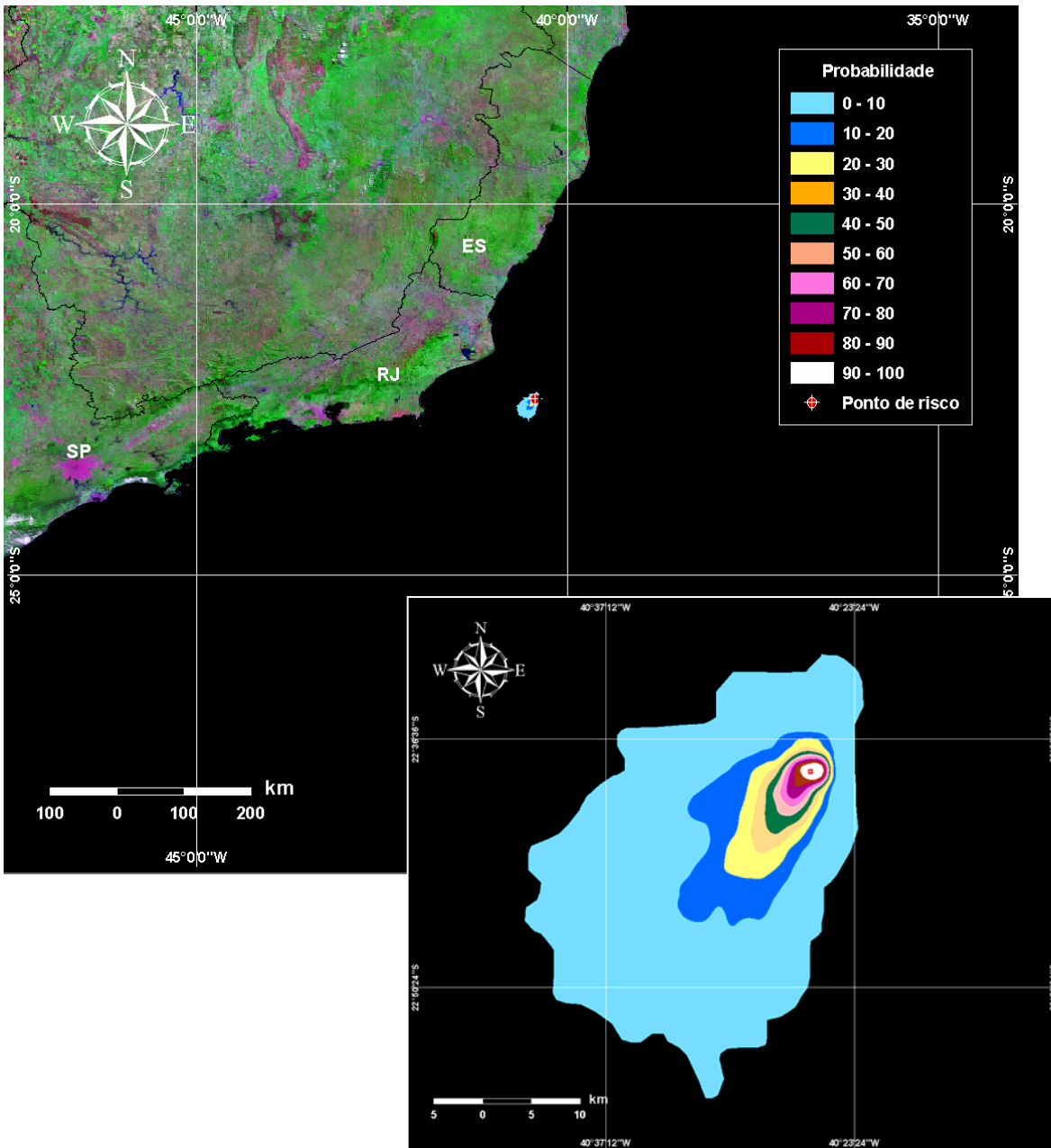


Figura 27 - Cenário FPSO-F_INV_8_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m^3 após 30 dias de simulação.

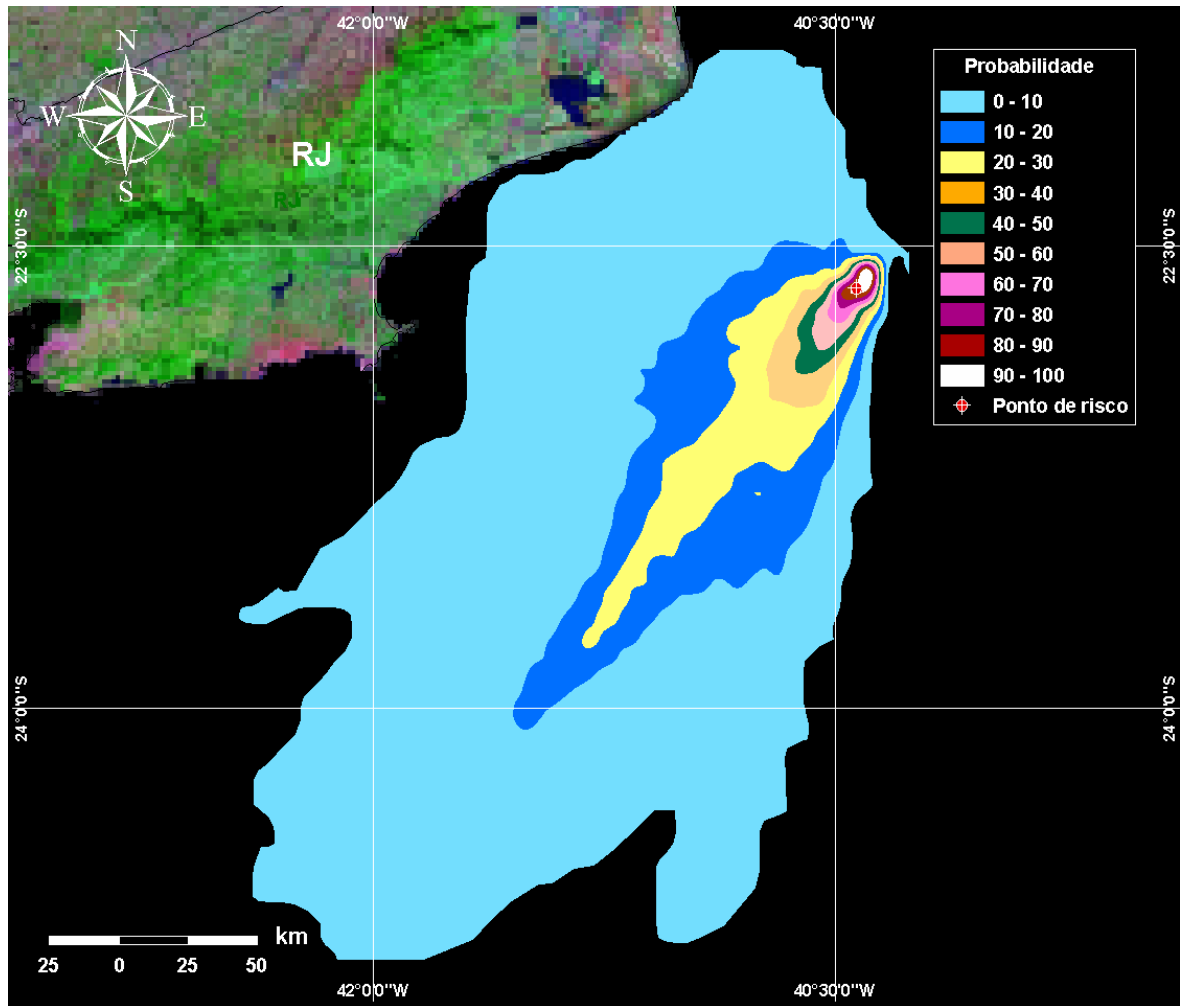


Figura 28 - Cenário FPSO-F_INV_200_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ após 30 dias de simulação.

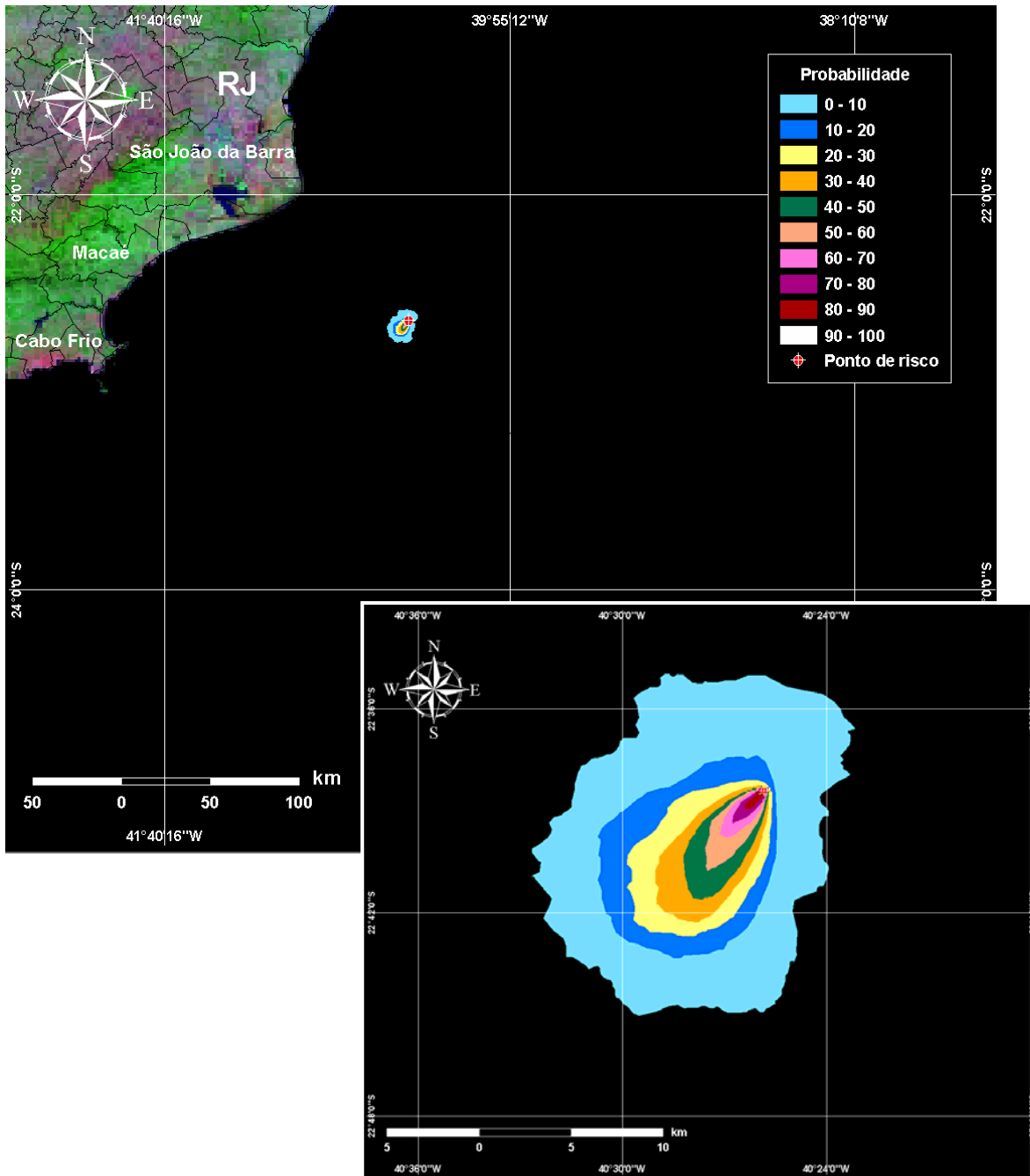


Figura 29 - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_6H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 6 horas de simulação.

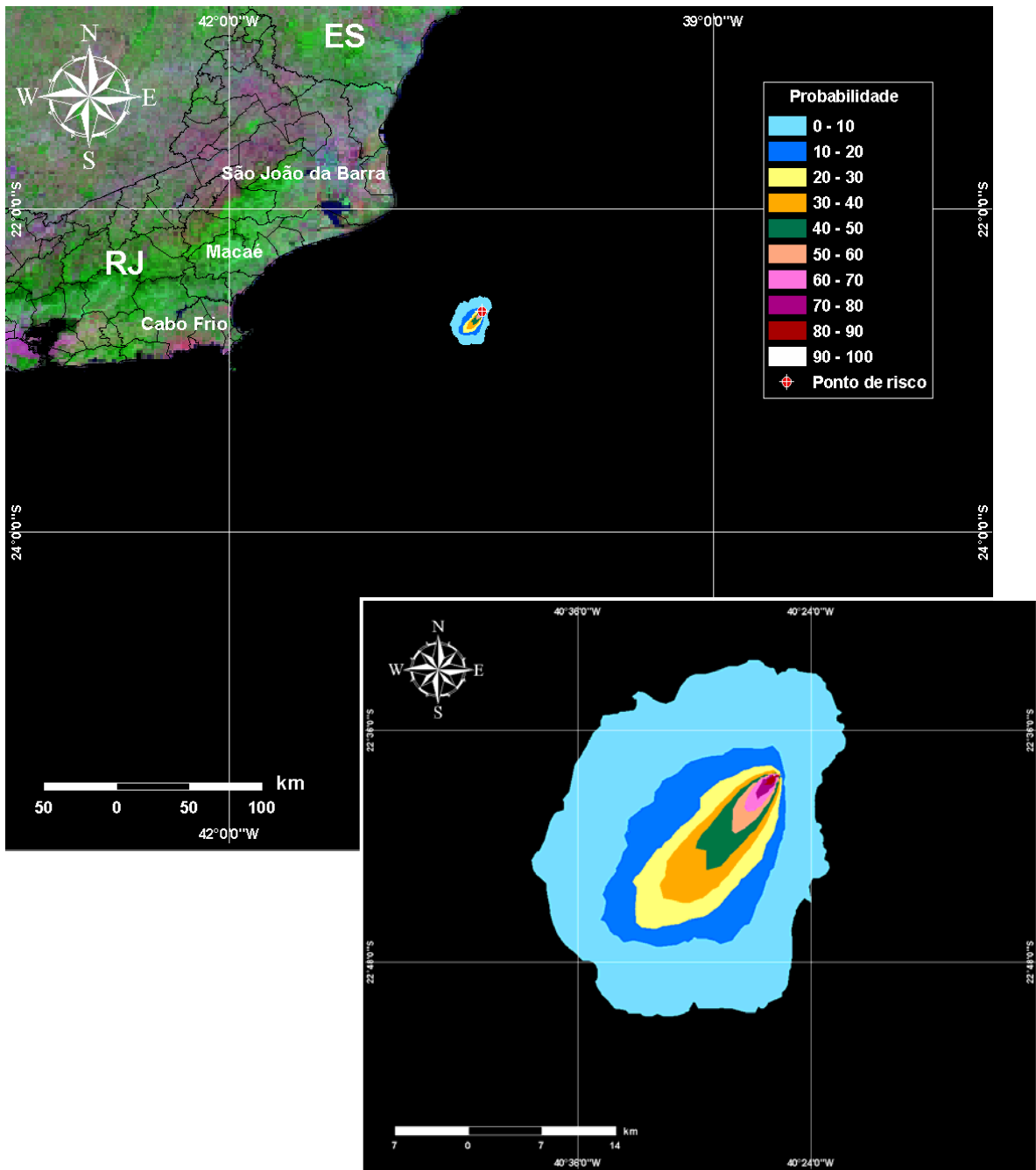


Figura 30 - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_12H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 12 horas de simulação.

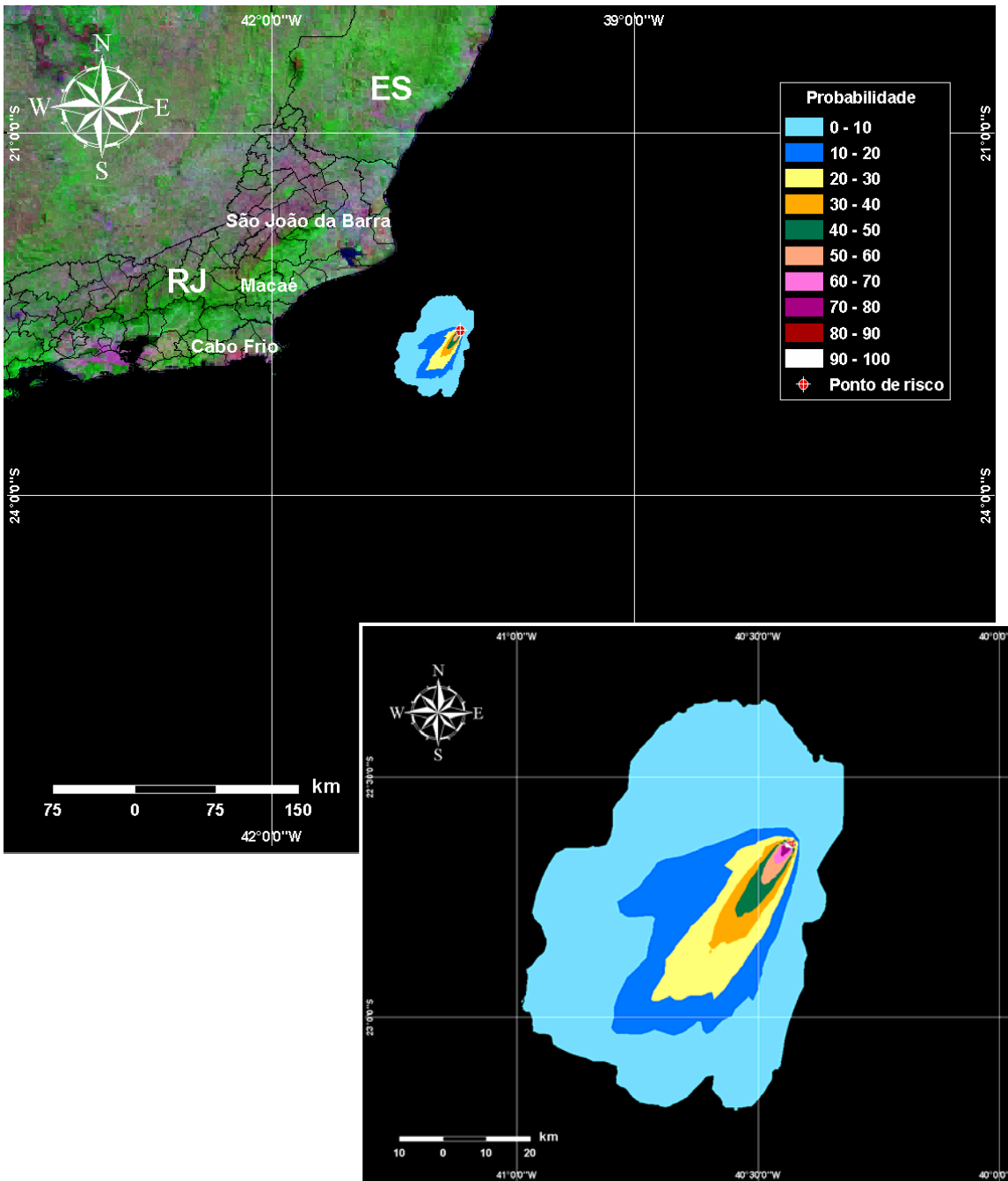


Figura 31 - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_36H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 36 horas de simulação.

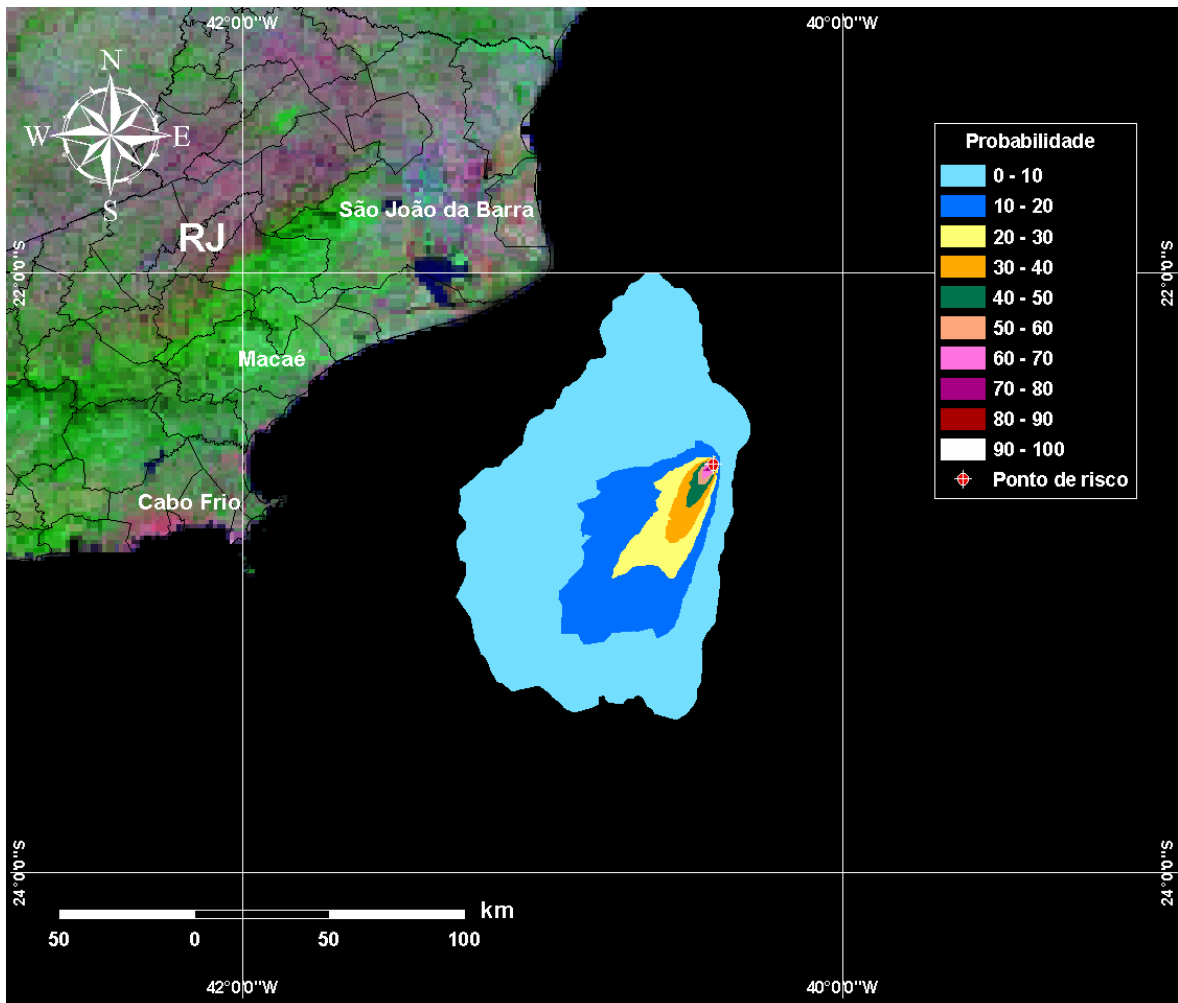


Figura 32 - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_60H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 60 horas de simulação.

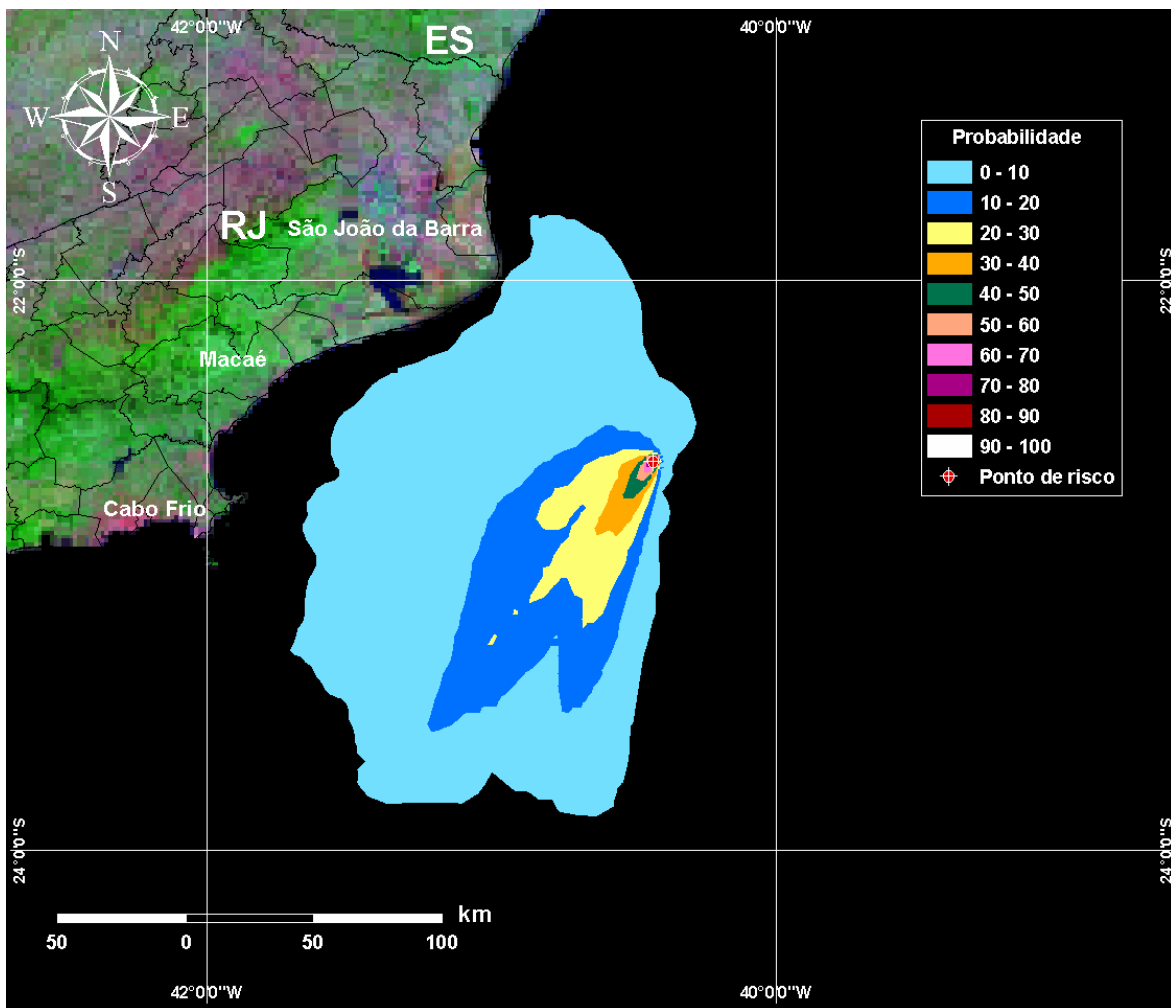


Figura 33 - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_96H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 96 horas de simulação.

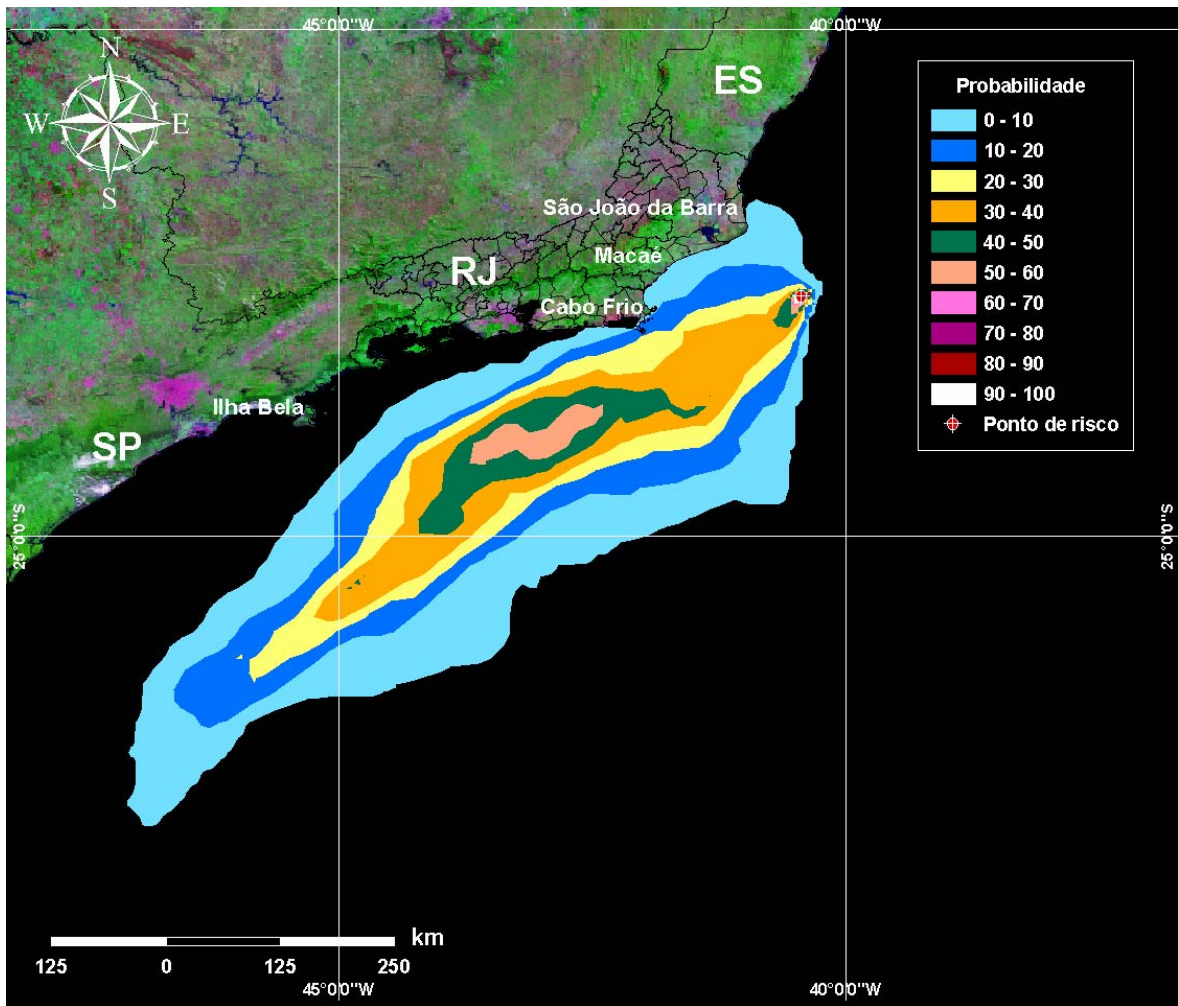


Figura 34 - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação.

Na Figura 35 é apresentada a linha de costa com probabilidade de toque, em condições de inverno. Observa-se que a probabilidade de toque na costa engloba uma área que se estende por cerca de 243 km no Estado do Rio de Janeiro, desde o município de São João da Barra até Saquarema. Observa-se ainda que os municípios de Armação dos Búzios, Cabo Frio e Arraial do Cabo apresentam as maiores probabilidades de toque na costa, entre 10-20%.

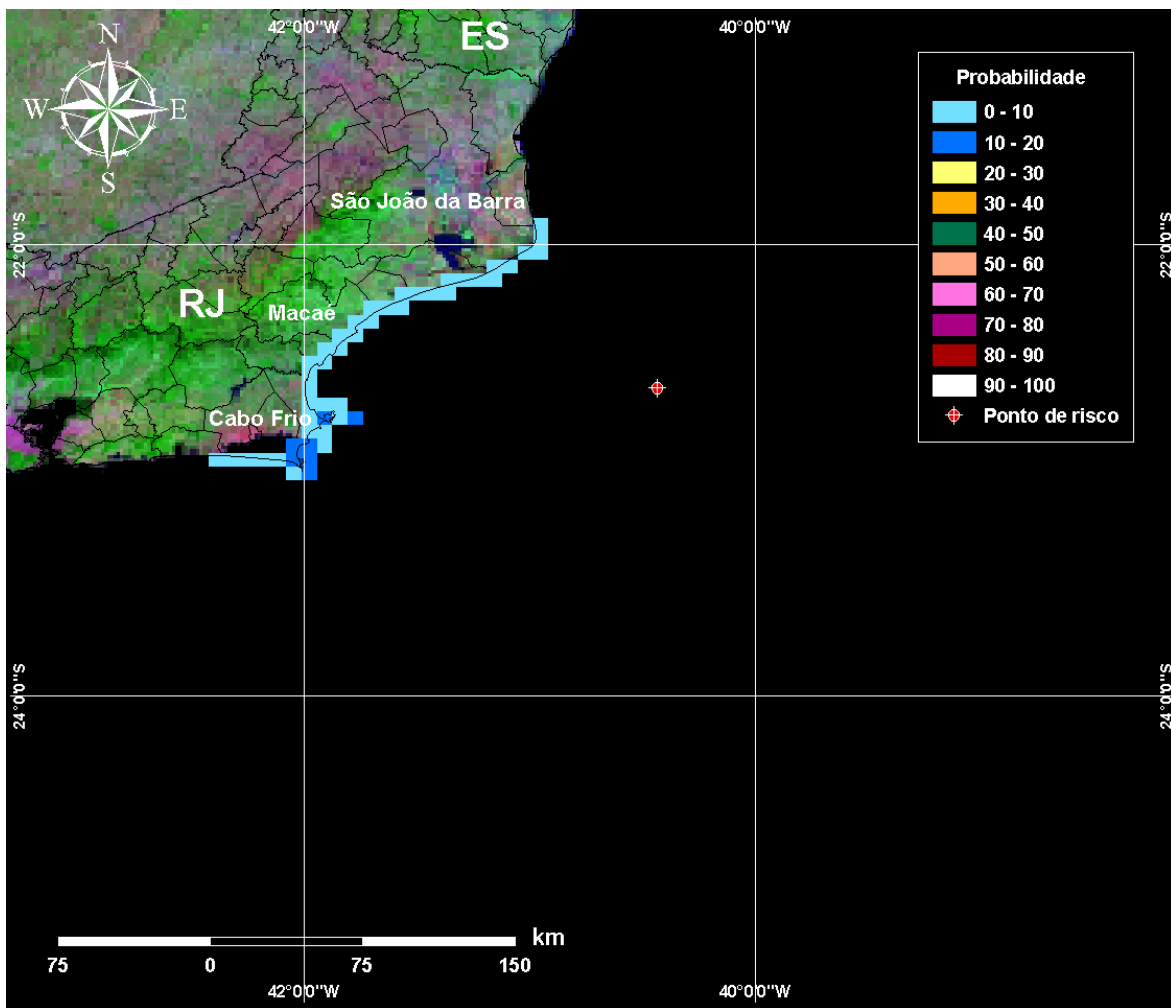


Figura 35 - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_30D_SHORE. Probabilidades de toque na costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação.

A Figura 36 apresenta o volume médio de óleo por km de costa atingida para simulações em condições de inverno e após 30 dias de simulação. O maior volume médio de óleo por km de costa é observado nos municípios de Campos dos Goytacazes, Quissamã, Carapebus e Armação dos Búzios (RJ), com um volume de cerca de 1.031,0-1.143 m³.

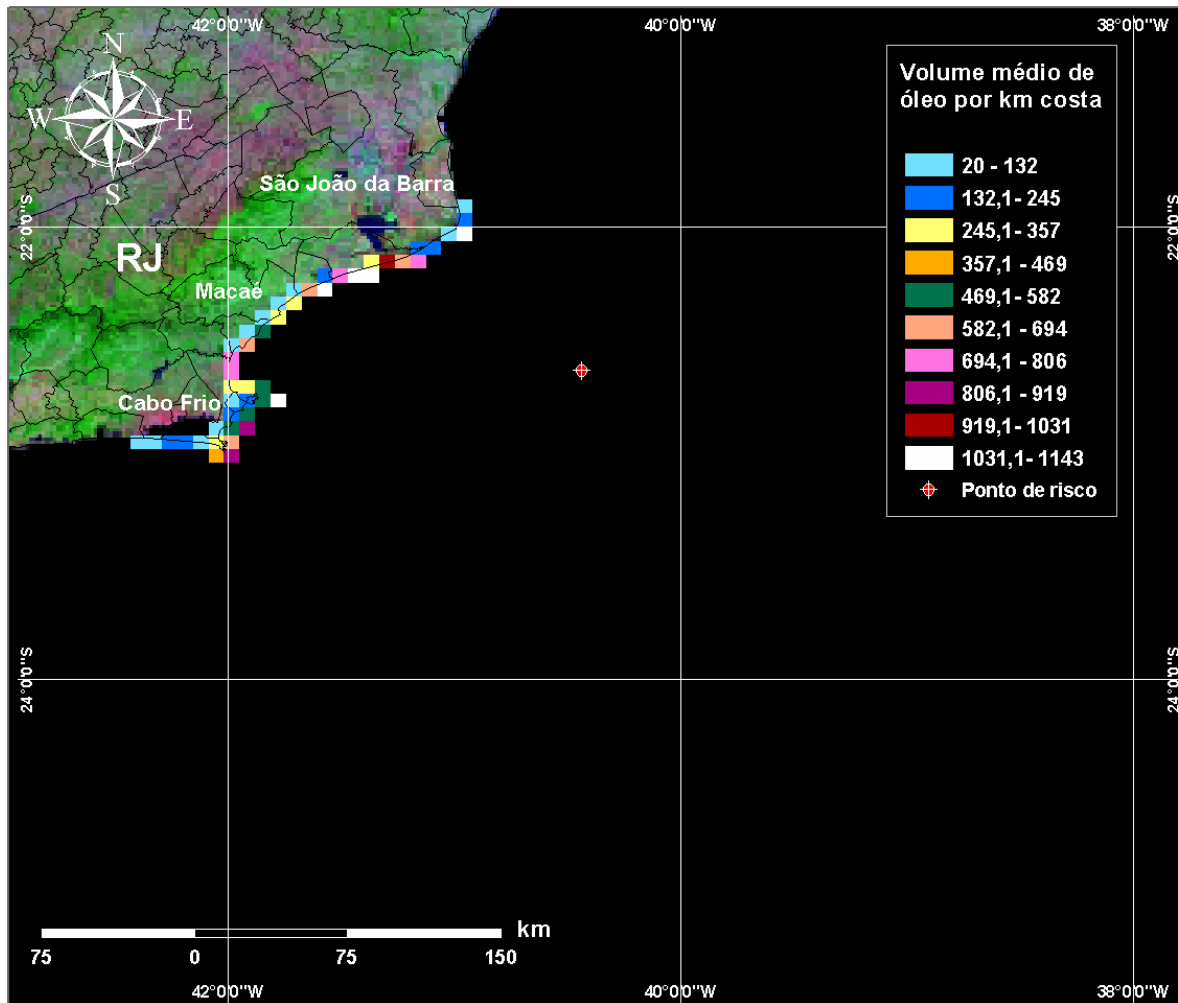


Figura 36 - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_30D_OLEOMED. Volume médio de óleo por km de costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação.

A Figura 37 apresenta o volume máximo de óleo por km de costa atingida para simulações em condições de inverno e após 30 dias de simulação. Observa-se nos municípios de Quissamã e Carapebus (RJ) a ocorrência do maior volume de óleo, entre 4.992-6.953 m³.

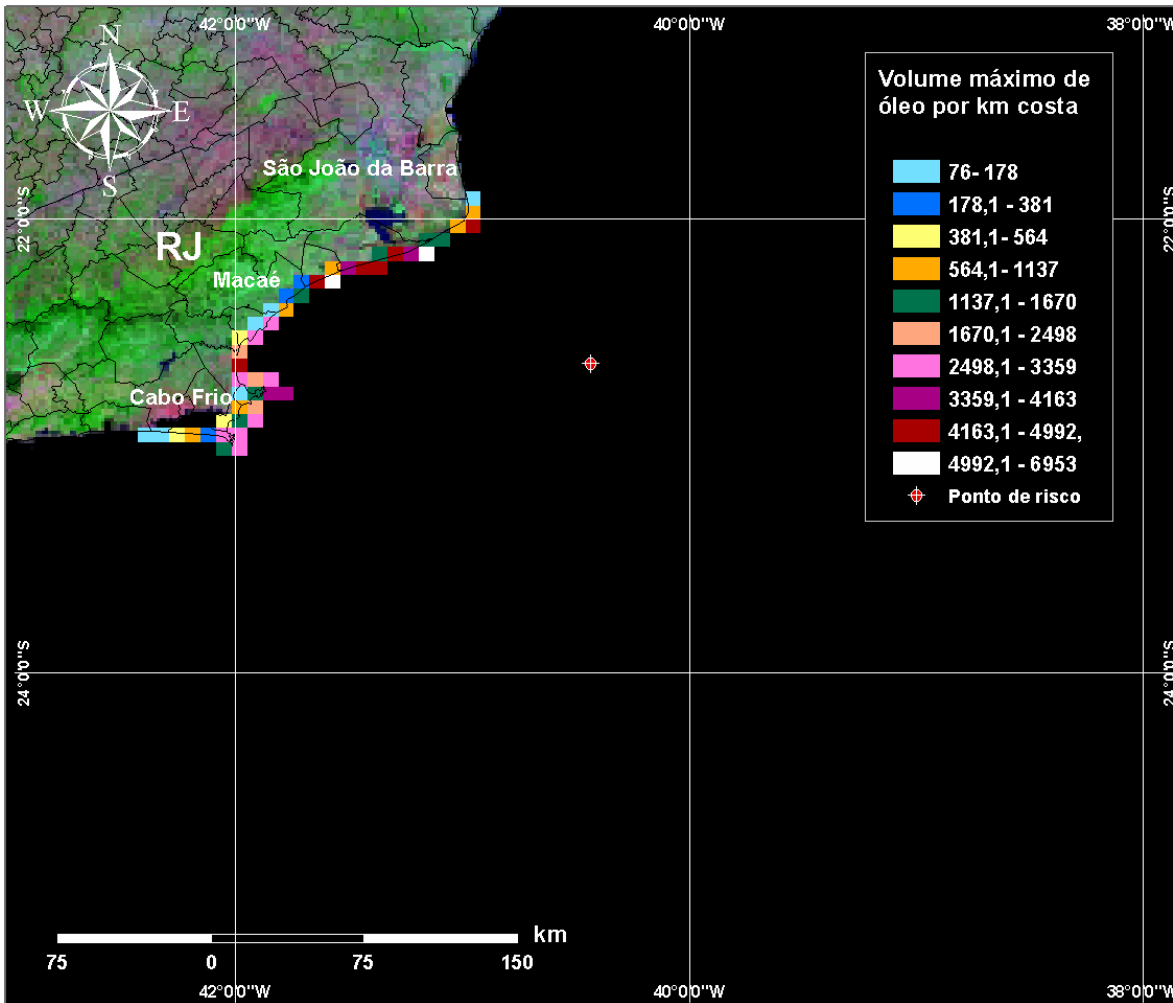


Figura 37 - Cenário FPSO-F_INV_PIORCASO_30D_OLEOMAX. Volume máximo de óleo por km de costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Fluminense, Campos de Bijupirá e Salema, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 225.009,1 m³ após 30 dias de simulação.

A Tabela 7 apresenta a menor distância que o óleo atingiu em relação à costa, nos derrames de óleo, simulados a partir do FPSO Fluminense, Bacia de Campos, durante os meses de verão. Já a Tabela 8 apresenta a extensão de linha de costa atingida nos derrames simulados durante os meses de inverno.



Tabela 7 - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso, para o FPSO Fluminense, ocorrendo durante os meses de verão.

CENÁRIOS	MENOR DISTÂNCIA DA COSTA (km)
FPSO-F_PIORCASO_VER_30D	14 (Arraial do Cabo)

Tabela 8 - Extensão da linha de costa com probabilidade de ser atingida pelo derrame de óleo a partir do FPSO Fluminense, em condições de inverno.

CENÁRIOS	EXTENSÃO DE LINHA DE COSTA COM PROBABILIDADE DE TOQUE (km)
FPSO-F_INV_PIORCASO_30D	243

A Tabela 9 apresenta o menor período, o tempo médio e a porcentagem de simulações que atingiram a costa, para os acidentes simulados durante os meses de inverno.

Tabela 9 - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso, para o FPSO Fluminense, ocorrendo durante os meses de inverno.

CENÁRIOS	TEMPO MÍNIMO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	TEMPO MÉDIO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	PERCENTAGEM DE SIMULAÇÕES COM TOQUE NA COSTA (%)
FPSO-F_PIORCASO_INV_30D	105	225	24

A Tabela 10 apresenta a probabilidade de toque e o tempo mínimo de toque na linha de costa para os municípios com probabilidade de toque, durante os meses de inverno.

Tabela 10 - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de derrame de óleo de inverno, nos Campos de Bijupirá e Salema.

NOME DO MUNICÍPIO	PROBABILIDADE (%)	TEMPO MÍNIMO DE TOQUE (HORAS)
São João da Barra	0-10	105
Campos dos Goytacazes	0-10	105
Quissamã	0-10	105
Carapebus	0-10	117
Macaé	0-10	124
Rio das Ostras	0-10	128
Casemiro de Abreu	0-10	148
Cabo Frio	10-20	145
Armação dos Búzios	10-20	123
Arraial do Cabo	10-20	146
Araruama	0-10	429
Saquarema	0-10	450

IV.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS

A análise dos resultados das simulações probabilísticas permitiu identificar os cenários determinísticos críticos de verão e inverno. Para essas simulações foram considerados como mais críticos os cenários que apresentaram o menor tempo para o primeiro toque do óleo na costa. Porém, para o cenário de verão, como esta situação não ocorreu, considerou-se como cenário crítico a menor distância que o óleo atingiu da costa. Em ambos os cenários, foram considerados vazamentos instantâneos de 225.009,1 m³, simulados por 30 dias.

A Tabela 11 e Tabela 12 apresentam um resumo dos cenários críticos de verão e de inverno obtidos para um derrame a partir do FPSO Fluminense, respectivamente.

Tabela 11- Resumo do cenário determinístico crítico de verão para o FPSO Fluminense.

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO	MENOR DISTÂNCIA DA COSTA (km)
FPSO-F_PIORCASO_VER_30D	29/02/1992 - 10:00h	14,0

Tabela 12- Resumo do cenário determinístico crítico de inverno para o FPSO Fluminense.

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO	VOLUME FINAL DE ÓLEO QUE CHEGA À COSTA (m ³)	TEMPO PARA CHEGAR À COSTA (HORAS)
FPSO-F_PIORCASO_INV_30DIAS	13/06/1992 - 03:00h	31.098,0	105,0

Na Figura 38 e Figura 41 são apresentados os contornos de espessura no instante em que a mancha mais se aproximou da costa para a simulação de verão e no instante de primeiro toque na costa para a simulação de inverno, respectivamente. Nestas figuras são destacados os limites de 0,0003 mm (limite para ambientes sensíveis), e 0,05 mm (limite de recolhimento). A cor cinza representa a região por onde a mancha se deslocou durante os 30 dias de simulação e, portanto, não está associada a uma espessura. A mancha no instante no qual esta mais se aproximou na costa (ou de primeiro toque) é aquela representada pela escala de cores indicada nas legendas.

Na simulação determinística crítica de verão (Figura 38), observa-se que a menor distância da mancha de óleo em relação à costa (município de Arraial do Cabo, RJ) é de, aproximadamente, 14 km.

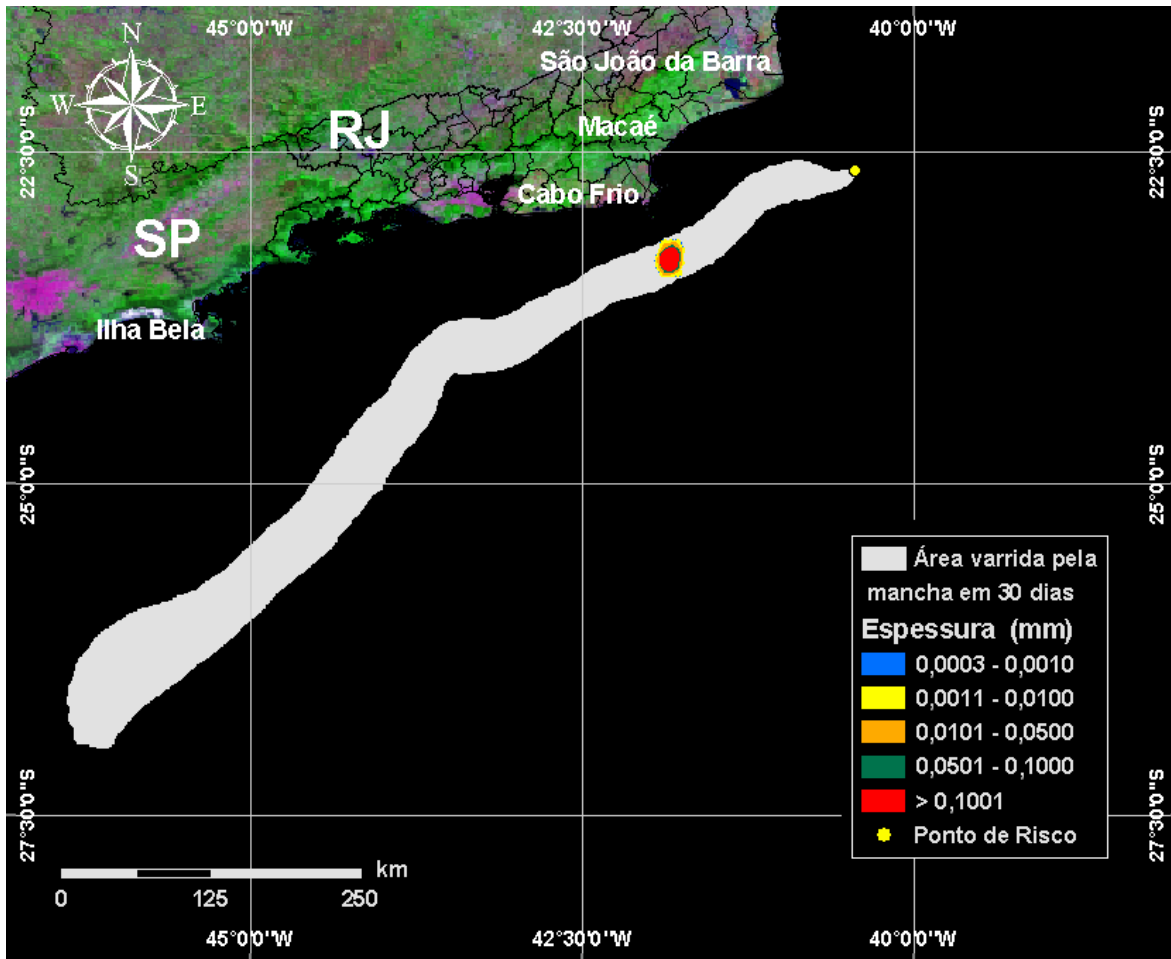


Figura 38 - Cenário determinístico crítico para um derrame ocorrido a partir do FPSO Fluminense, no período de verão.

Na Figura 39 são apresentados os contornos de tempo da simulação determinística crítica de verão para o FPSO Fluminense.

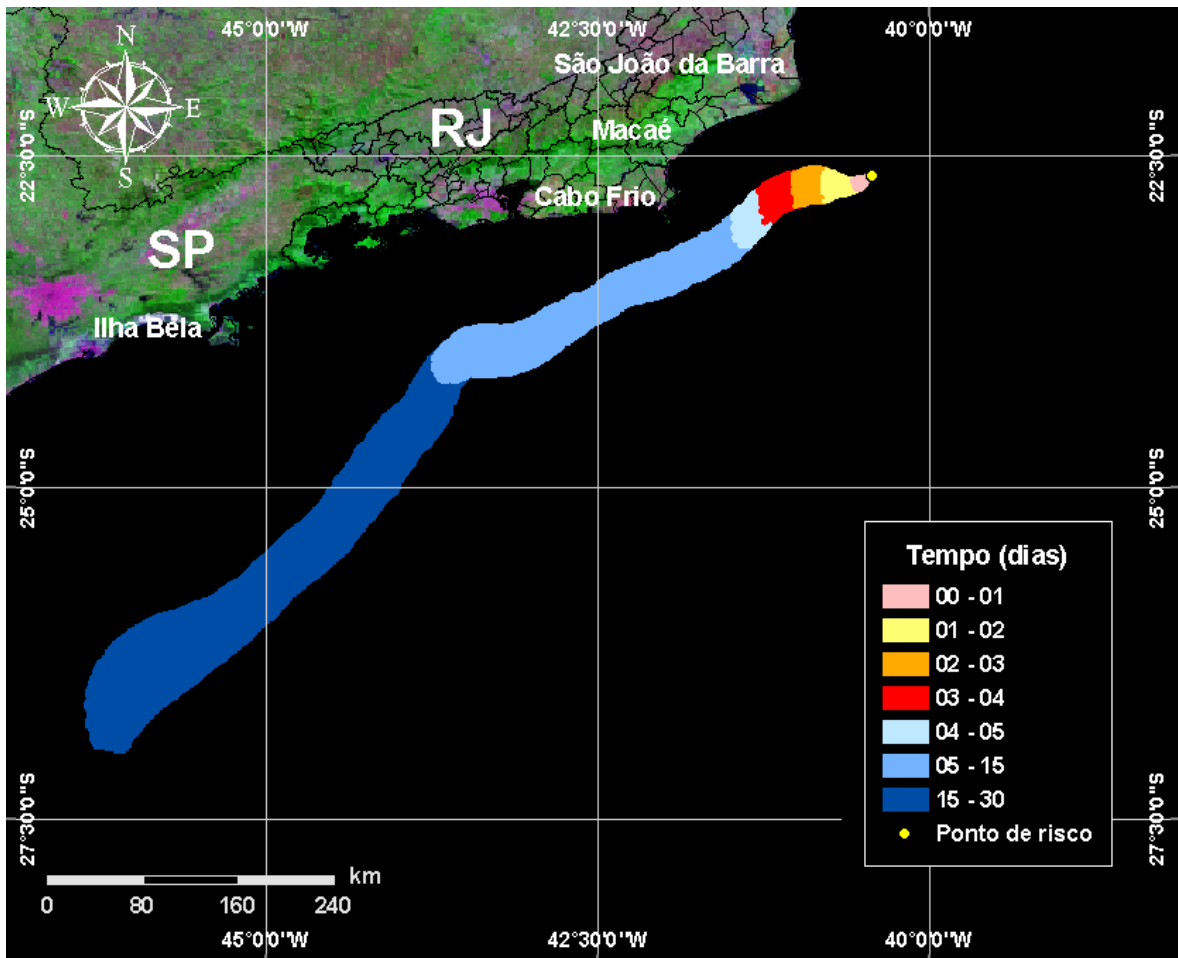


Figura 39 - Contornos de tempo para o cenário determinístico crítico de verão para um derrame ocorrido a partir do FPSO Fluminense.

A Figura 40 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, na coluna d'água e evaporado) para a simulação de pior caso no período de verão. Observa-se que a evaporação e o entranhamento são os principais processos que atuam na redução da massa de óleo na água nesse período.

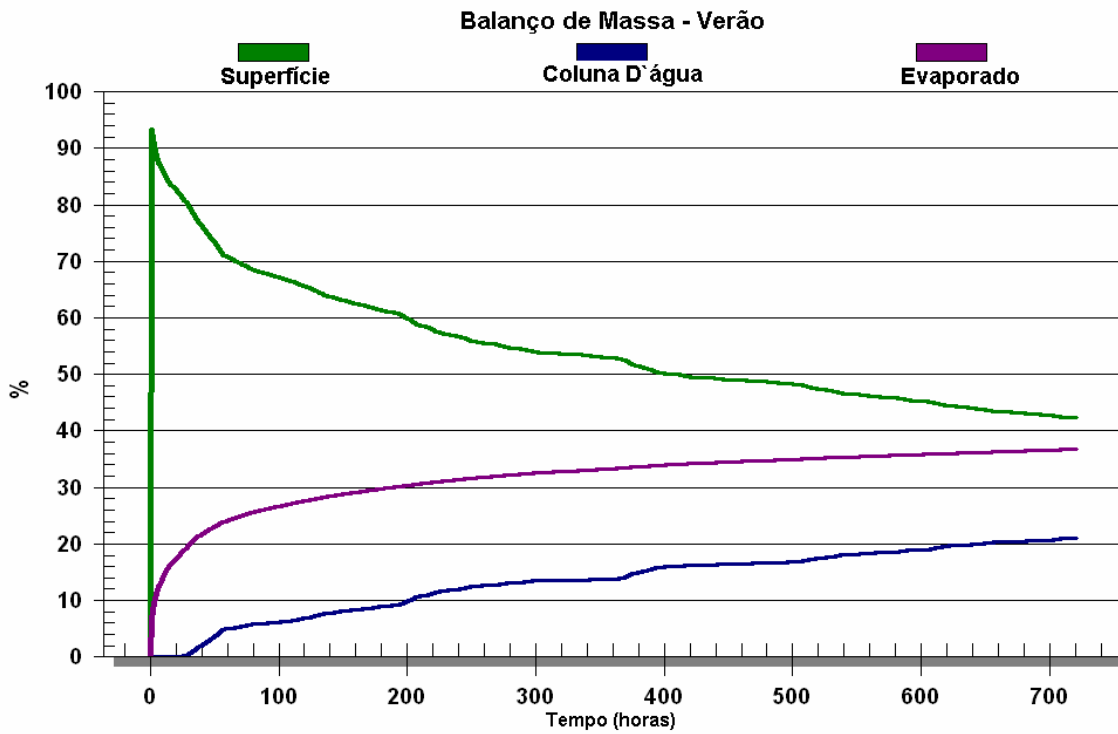


Figura 40 - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no verão, a partir do FPSO Fluminense.

Na simulação determinística crítica de inverno (Figura 41), observa-se que o primeiro toque na costa ocorre no município de Quissamã (RJ), cerca de 105 horas após o início da simulação.

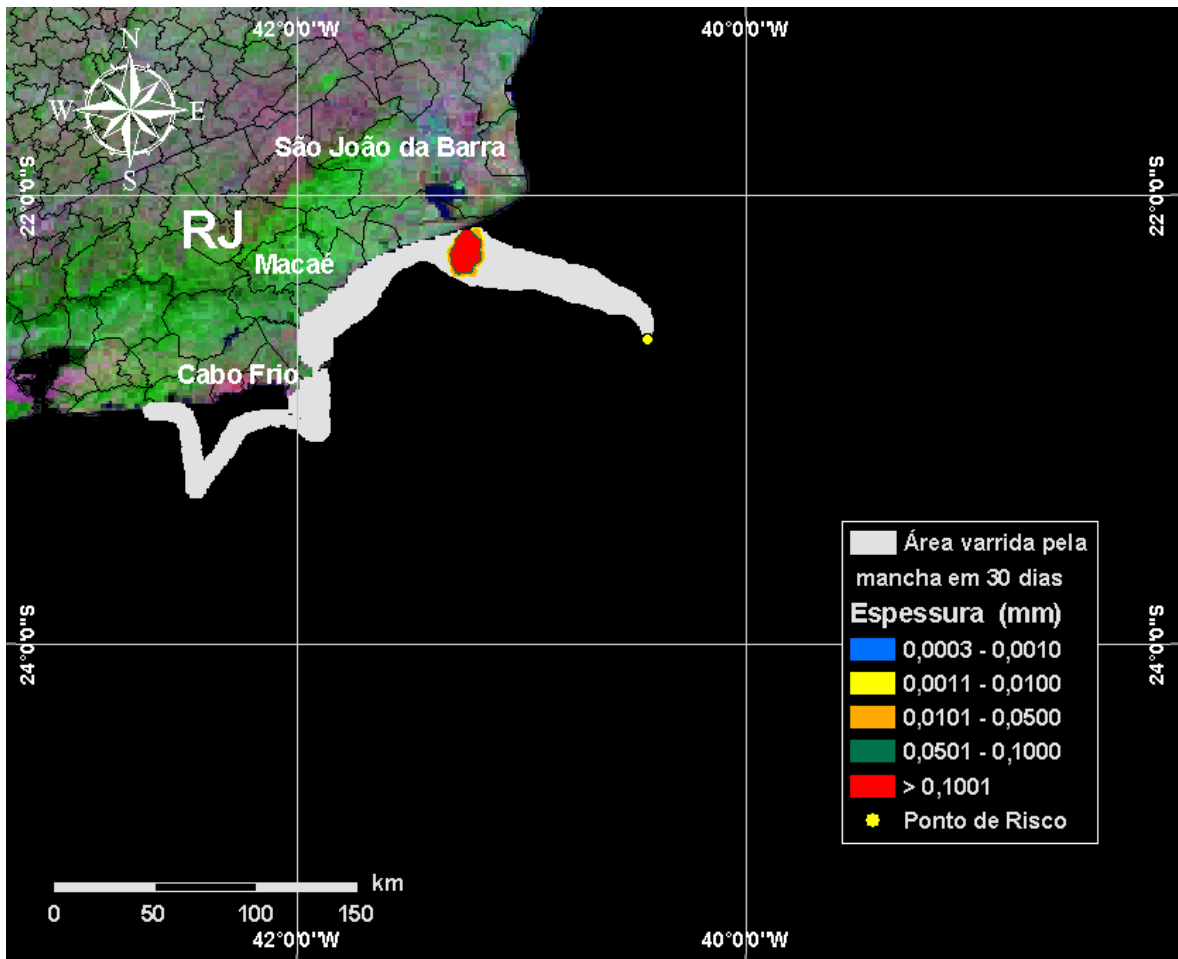


Figura 41 - Cenário determinístico crítico para um derrame ocorrido a partir do FPSO Fluminense, no período de inverno.

Na Figura 42 são apresentados os contornos de tempo da simulação determinística crítica de inverno para o FPSO Fluminense.

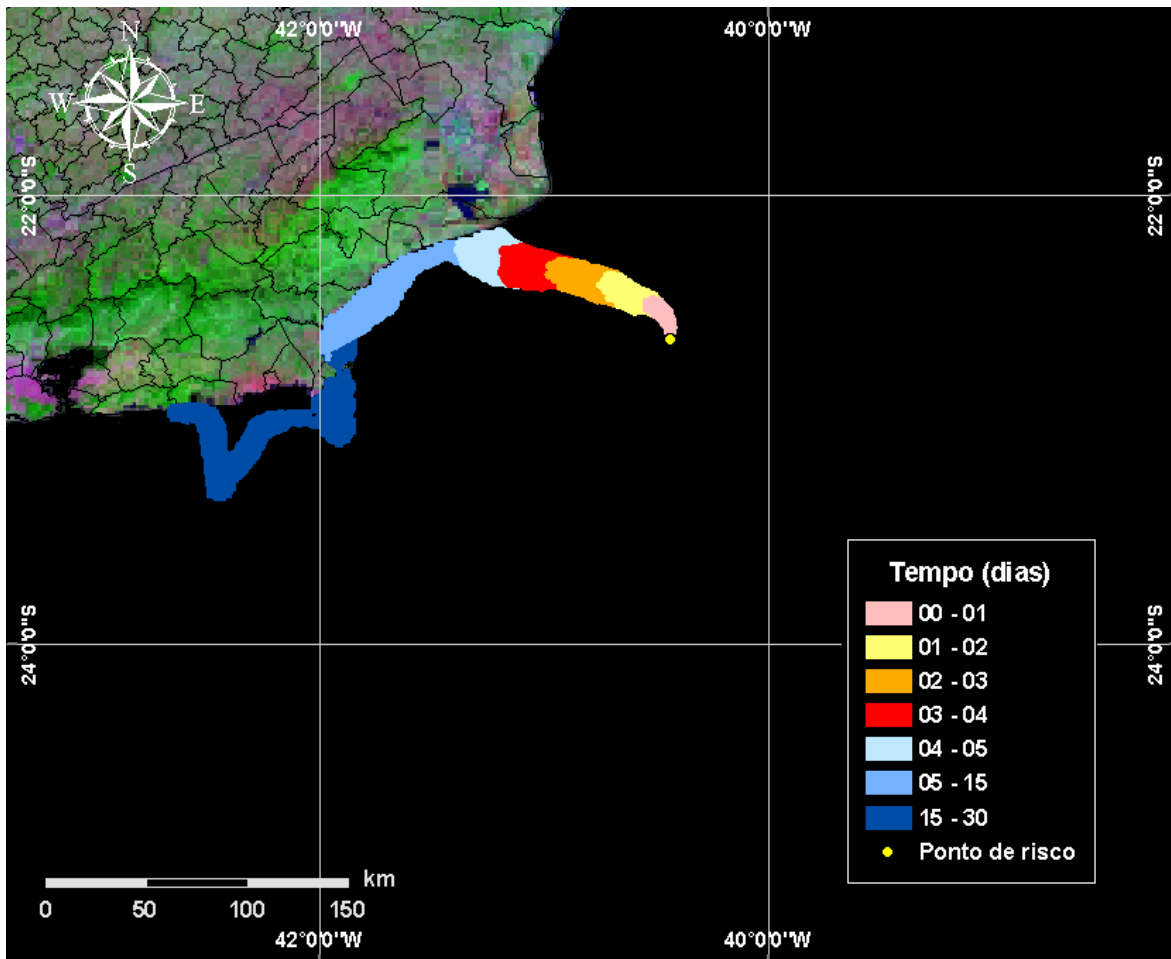


Figura 42 - Contornos de tempo para o cenário determinístico crítico de inverno para um derrame ocorrido a partir do FPSO Fluminense.

A Figura 43 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, na coluna d'água e evaporado) para a simulação de pior caso no período de inverno. Observa-se que a evaporação e o entranhamento são os principais processos que atuam na redução da massa de óleo na água nesse período.

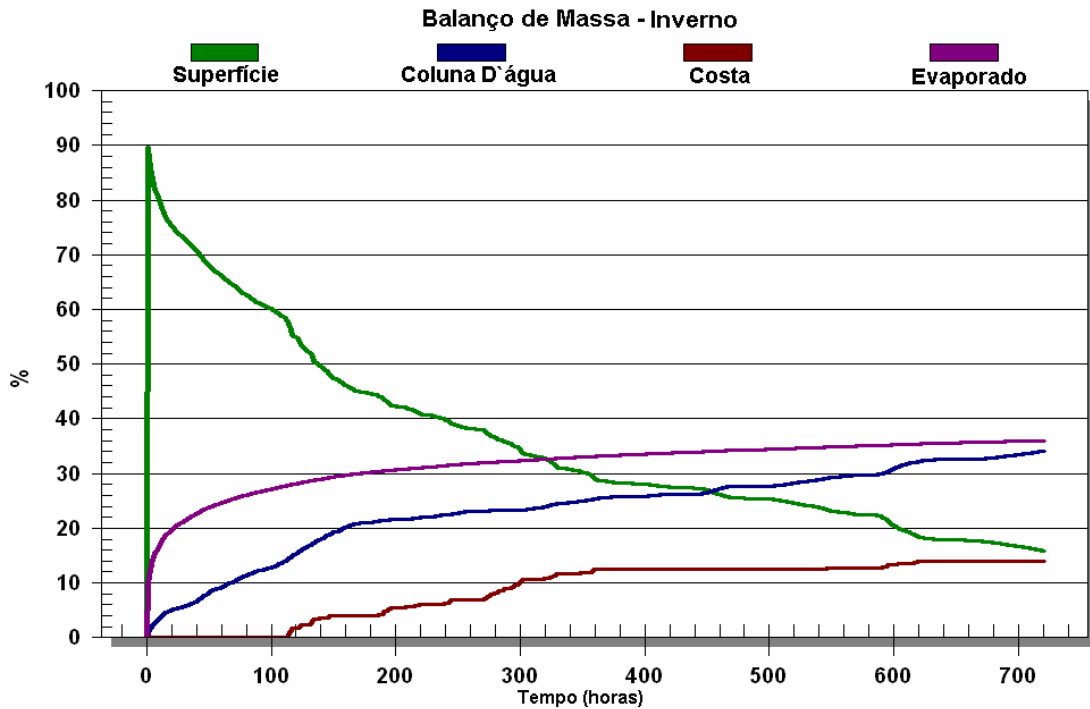


Figura 43 - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no inverno, a partir do FPSO Fluminense.

A Figura 44 apresenta o diagrama tipo *stick plot* para o período de 105 horas, a partir do início da simulação até o primeiro toque na costa, para o cenário determinístico crítico de inverno. Observa-se que neste período houve a passagem de um sistema frontal, onde os vetores indicam ventos provenientes do quadrante sul, condição esta que proporcionou o toque da mancha na costa em menor tempo.



Figura 44 - Diagrama *stick plot* dos vetores de vento para o cenário determinístico crítico de inverno, a partir do início da simulação até o primeiro toque na costa.

A Figura 45 até a Figura 47 apresentam ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de inverno, a partir do início do derrame até o primeiro toque na costa.

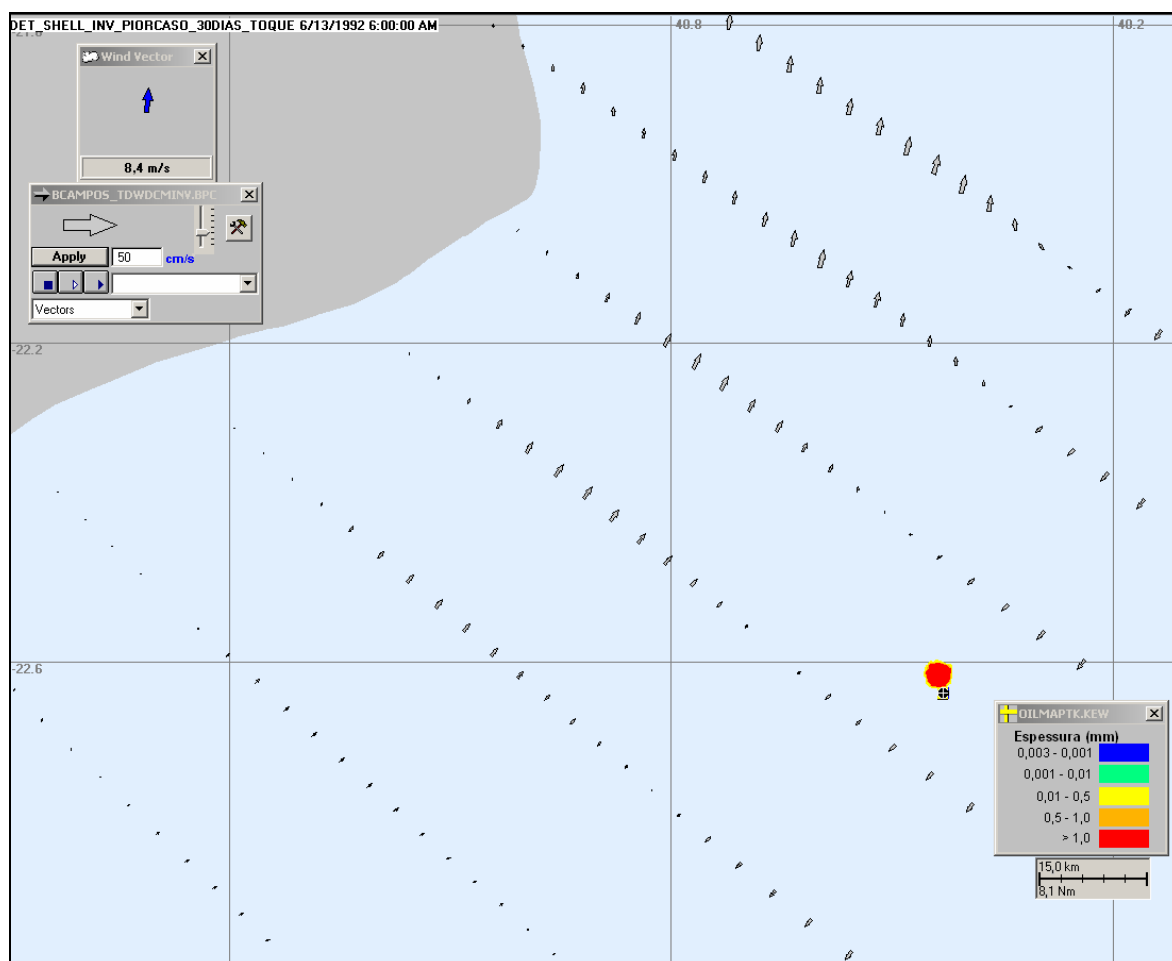


Figura 45 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo durante o período de simulação do cenário determinístico crítico de inverno, após o início da simulação até o toque na costa, para o instante inicial.

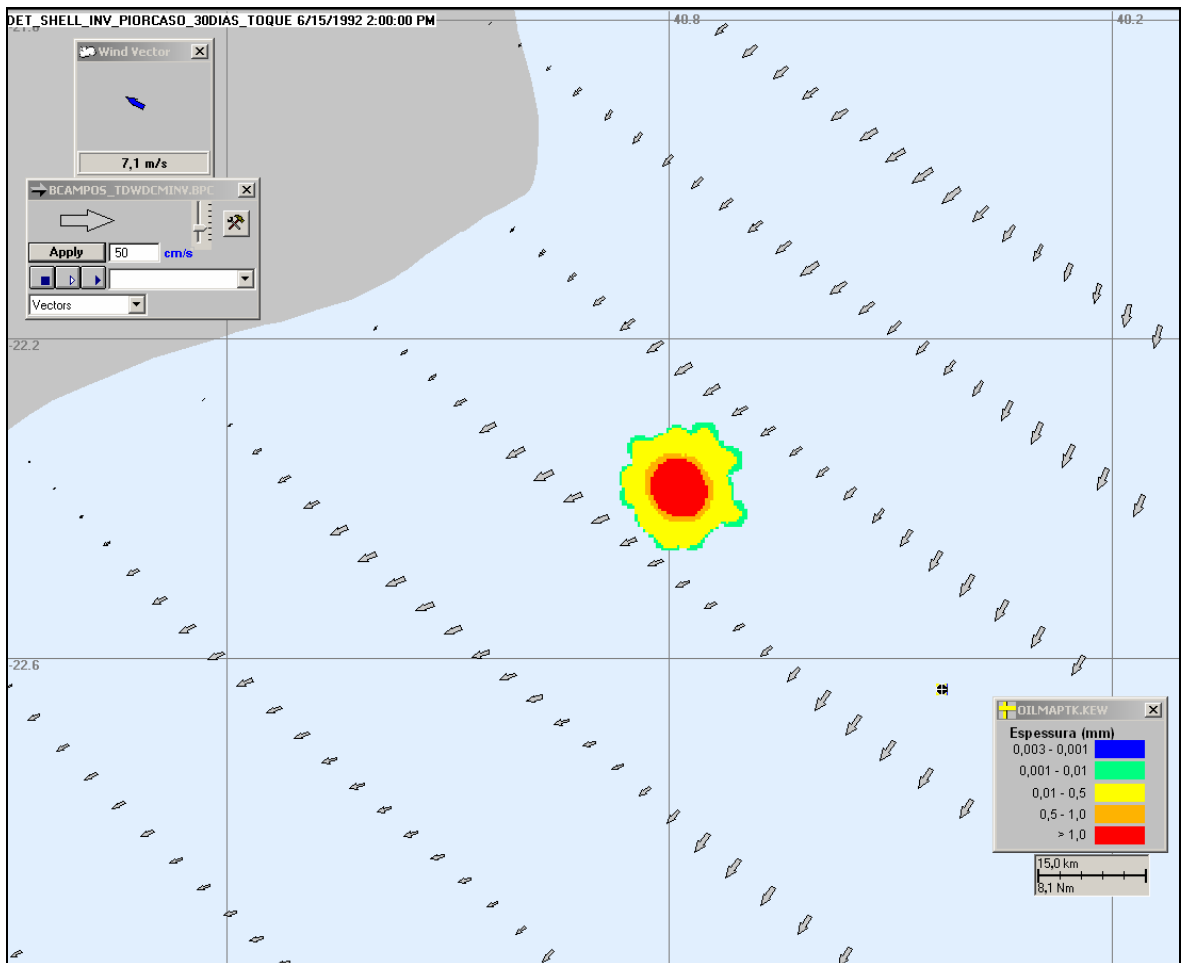


Figura 46 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo durante o período de simulação do cenário determinístico crítico de inverno, após o início da simulação até o toque na costa, para o instante intermediário.

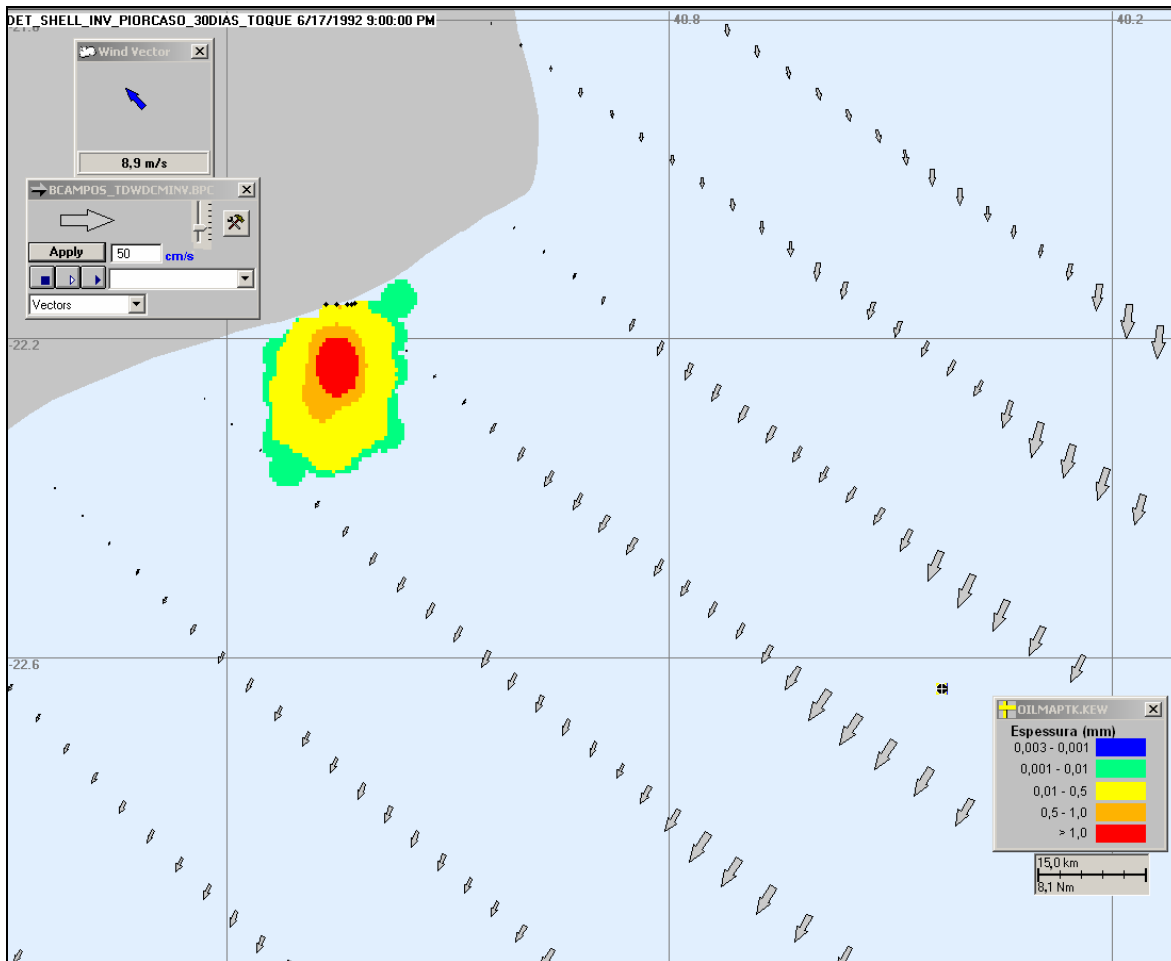


Figura 47 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo durante o período de simulação do cenário determinístico crítico de inverno, após o início da simulação até o toque na costa, para o instante de primeiro toque.



V CONCLUSÕES

Neste relatório apresenta-se a revisão da modelagem computacional da trajetória e intemperismo de óleo, decorrente de um potencial acidente com derramamento de petróleo a partir do FPSO Fluminense, localizado nos Campos de Bijupirá e Salema. Neste trabalho foi considerando o novo volume de pior caso, calculado somando-se o volume total de óleo em tanques com o inventário estimado de tubos e equipamentos de processo a bordo.

Foram realizadas simulações de cenários probabilísticos considerando-se três classes de derrame, como definido na Resolução do CONAMA nº 293/01: pequeno, com 8 m³; médio, com 200 m³; e pior caso, com 225.009,1 m³. A partir dos resultados das simulações probabilísticas, foram realizadas simulações determinísticas críticas utilizando como critérios a menor distância da mancha em relação à costa (para o verão) e o menor tempo de chegada do óleo à costa (para o inverno).

O critério de parada adotado nas simulações foi o tempo de 30 dias para o acompanhamento de cada partícula. Além deste critério de parada propriamente dito, foi adotado o corte de espessuras inferiores a 300 nm nas simulações e apresentações de resultados.

Os resultados da modelagem revelaram uma forte correlação entre a trajetória de uma mancha simulada e o padrão de circulação na região. As condições meteorológicas e oceanográficas da Bacia de Campos mostram que, sobre a plataforma, o padrão de circulação predominante está relacionado ao campo de vento e à maré, com eventuais intrusões da CB. A partir do talude, e em oceano profundo, os mesmos padrões são observados, mas com predomínio sensível de correntes médias superficiais para sul-sudoeste, relacionadas à presença da CB.



Os resultados das simulações mostraram que, para um potencial derramamento de óleo a partir do FPSO Fluminense, considerando o volume de pior caso e espessuras iguais ou maiores que 300 nm, não há probabilidade de toque na linha de costa no verão, e no inverno a probabilidade é inferior a 20%.

Finalmente, nas simulações apresentadas neste estudo, não foram consideradas quaisquer medidas de resposta ou controle para os potenciais acidentes simulados.



VI BIBLIOGRAFIA

ASA (Applied Science Associates South America), 2003a. Cenários de Acidentes com Petróleo no Terminal de Alemoa (SP). Relatório Técnico (janeiro de 2003). 57pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2003b. Cenários de Acidentes com Petróleo no Terminal de Paranaguá (PR). Relatório Técnico (janeiro de 2003). 51pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2003c. Cenários de Acidentes com Petróleo na Refinaria de Presidente Bernardes – RPBC (SP). Relatório Técnico (dezembro de 2003). 47pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2003d. Estudos de Deriva para Acidentes com Produtos Derivados de Petróleo no Terminal de São Luís (MA). Relatório Técnico (dezembro de 2003). 196pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2004. Estudos de Deriva para Acidentes com Produtos Derivados de Petróleo na Base Vila do Conde (PA). Relatório Técnico (janeiro de 2004). 207pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2005a. Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o Bloco BM-CAL-6. Relatório Técnico, Revisão 01 (outubro de 2005). 212pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2005b. Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o FPSO Capixaba, Campo de Golfinho, Bacia do Espírito Santo. Relatório Técnico (abril de 2005). 107pp.

BEAR, J. & A. VERRUIJT, 1987. Modeling groundwater flow and pollution with computer programs for sample cases. Kluwer Academic Publishers.



- BLUMBERG, A.F. & G.L. MELLOR, 1987.** A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N.S. Heaps (Ed.), *Coastal and Estuarine Sciences 4: Three-dimensional Coastal Ocean Models*. American Geophysical Union, pp. 1-16.
- BRASIL, 2001.** Resolução CONAMA nº 293, de 12 de dezembro de 2001. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 29 abr. 2002.
- CASTRO FILHO, B.M.C. & L.B. MIRANDA, 1998.** Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 4°N and 34°S. *The Sea*. John Wiley & Sons, Inc. 11: p. 209-251.
- CLIMANÁLISE, 1996.** Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Edição comemorativa de 10 anos. Outubro.
- DELVIGNE, G.A.L. & C.E. SWEENEY, 1988.** Natural dispersion of oil. *Oil & Chemical Pollution* 4 (1988): p. 281-310.
- DELVIGNE, G.A.L. & 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.
- EVANS, D.L. & S.R. SIGNORINI, 1985.** Vertical structure of the Brazil Current. *Nature*, 315, p. 48-50.
- HESS, K.W. & K.T. BOSLEY, 1992.** Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p. 83-94.
- IBAMA/ANP (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis/Agência Nacional do Petróleo), 2002.** Workshop Diretrizes Técnicas para Modelagem do Derramamento de Óleo no Mar.



- JAYKO, K. & E.HOWLETT, 1992.** OILMAP an interactive oil spill model. In: OCEANS 92, October 22-26, 1992, Newport, RI.
- KOLLURU, V.S., 1992.** Influence of number of spilllets on spill model predictions. Applied Science Associates internal report, Narragansett, RI.
- LANGE, P. & H. HÜHNERFUSS, 1978.** Drift response of mono-molecular slicks to wave and wind action. *Journal of Physical Oceanography*, v. 8, p. 142-150.
- 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.
- LIMA, J.A.; A. SARTORI, E.A. YASSUDA, J.E. PEREIRA & E. ANDERSON, 2003.** Development of oil spill scenarios for contingency planning along the brazilian coast. In: International Oil Spill Conference, 2003, Vancouver, BC, Canada.
- MACKAY, D., S. PATERSON. & K. TRUDEL, 1980a.** A mathematical model of oil spill behavior, Department of Chemical Engineering, University of Toronto, Canada, 39pp.
- MACKAY, D., S. PATERSON & K. TRUDEL, 1980b.** Oil spill processes and models Report EE-8, Environmental Protection Service, Canada.
- MACKAY, D., W. SHUI, K. HOUSSAIN, W. STIVER, D. McCURDY & 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.
- MELLOR, G.L. & T. YAMADA, 1982.** Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, n. 4, p. 851-875.



OKUBO, A., 1971. Oceanic diffusion diagrams. *Deep Sea Research*, v. 8, p. 789-802.

OKUBO, A. & R.V. OZMIDOV, 1970. Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion on the ocean in the scale of the phenomenon in question. *Atmospheric and Ocean Physics*, 6(5): p. 534-536.

PEREIRA, J.E.; YASSUDA, E.A. & CAMPOS, E., 2005. Development of an operational metocean modelling system, with applications in South America. In: 9th International Conference on Estuarine and Coastal Modelling, 2005. Charleston, SC, USA.

REED, M., E. GUNDLACH, & T. KANA, 1989. A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies, *Oil and Chemical Pollution*, Vol. 5, p. 411-449.

SATYAMURTI, P. & L.F. MATTOS, 1989. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. *Mon. Wea. Rev.*, 108:410-520.

SIGNORINI, S.S., 1978. On the Circulation and volume transport of the Brazil Current between Cape of São Tomé and Guanabara Bay. *Deep Sea Res.*, 25, p. 481-490.3.

SPAULDING, M. L., HOWLETT, E., ANDERSON, E. & JAYKO, K., 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. HOWLETT, E. ANDERSON & K. JAYKO, 1992b. Oil spill software with a shell approach. *Sea Technology*, April 1992. P. 33-40.



STIVER, W. & D. MACKAY, 1984. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. *Environmental Science and Technology*, 18:834-840.

STRAMMA, L.; Y. IKEDA. & R.G. PETERSEN, 1990. Geostrophic transport in the Brazil Current region, *Deep-Sea. Res.*, 37(12): p. 1875-1886.

TOKMAKIAN. R.T. & P.G CHALLENGOR, 1999. On the joint estimation of model and satellite sea surface height anomalies. *Ocean Modelling*, 1, 39-52.

WHITICAR, S., M. BOBRA, M. FINGAS, P. JOKUTY, P. LIUZZO, S. CALLAGHAN, S. ACKERMAN & J. CAO, 1992. A catalogue of crude oil and oil product properties 1992 (edition), Report #EE-144, Environment Canada, Ottawa, Canada.

