

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA FÍSICA QUÍMICA E GEOLÓGICA

Estudo do transporte de manchas de óleo por um modelo lagrangeano de partículas na Bacia de Pelotas.

Fernando Nogueira Azambuja Alves

Dissertação apresentada à Comissão de
Pós-Graduação do Curso de Oceanografia
Física, Química e Geológica/FURG
para obtenção do grau de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Dias Soares

Rio Grande, Agosto de 2006

Resumo

A área de estudo fica localizada na Bacia de Pelotas entre as latitudes 28° e 36° Sul e longitudes 043° e 054° Oeste e compreende a Plataforma Continental (Sul Brasileira), entre o Cabo de Santa Marta e o Chuí. Nas águas da região existem dois locais onde ocorre maior movimentação de navios que transportam petróleo: o Porto de Rio Grande e o Terminal Marítimo Almirante Soares Dutra. O risco de acidentes no transporte do óleo e a poluição crônica de esgotos urbanos e parques industriais são ameaças aos ambientes costeiros e marinhos da região, a pesca e aos turismo dos Balneários . Um modelo (lagrangeano) de transporte de manchas de óleo baseado na movimentação de partículas foi criado para simular eventuais derrames durante o verão em diferentes pontos na Bacia de Pelotas. Através de simulações de derrames em situação de verão em três diferentes locais da área de estudo, foi investigado a trajetória e o destino do óleo. O modelo de óleo foi forçado com correntes de um modelo hidrodinâmico **3-D** (Princeton Ocean Model) e ventos das análises do modelo atmosférico proveniente do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (**CPTEC/INPE**). O modelo hidrodinâmico foi forçado com vento, marés e saídas (temperatura, salinidade e elevação do nível do mar) do modelo oceânico global **OCCAM** (“Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling Project”). A partir dos resultados obtidos, foi analisado a magnitude das forçantes vento e corrente no transporte de um óleo desconsiderando a dispersão vertical e a horizontal turbulenta do óleo. Foram gerados cenários probabilísticos da trajetória das manchas nos dez dias iniciais e também cenários do destino final das manchas determinando as áreas mais suscetíveis a contaminação em caso de acidente. As forçantes na região contribuem para aproximar o óleo da costa levando o mesmo para o Sul da fonte. A orientação da linha de costa em relação ao vento predominante mostra-se um fator importante na determinação das área mais atingidas pelo óleo. Na plataforma continental as simulações mostraram um transporte de óleo residual para o Sudoeste em

direção a costa sendo o vento a principal forçante. Embora o transporte médio das manchas foi para o Sul em algumas ocasiões a passagem de sistemas meteorológicos frontais levaram as manchas para o Norte do local fonte de óleo. Na região oceânica próximo ao talude o transporte preferencial segue a corrente do Brasil, portanto nessa região o transporte é dominado por correntes.

Agradecimentos

Agradeço:

ao meu orientador amigo Ivan Dias Soares que teve papel fundamental na conclusão deste trabalho,

ao pessoal do Laboratório de Oceanografia Física,

ao programa PRH-27 e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e n pelo financiamento,

ao CPTEC/INPE e a estação de Praticagem da Barra de Rio Grande pelos dados,

a banca examinadora pelas sugestões e críticas.

Agradeço em especial aos meus pais minha irmã e minha família pelo amor durante todos os anos de minha vida e pelo apoio nas minhas decisões,

a minha namorada

e a todos meus grandes amigos que fiz aqui ao longo dos anos.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Área de Estudo	26
1.2	Importância do estudo.	30
1.3	Objetivos	33
1.3.1	Objetivos gerais	33
1.3.2	Objetivos específicos	33
1.4	Antecedentes	33
1.4.1	Aspectos oceanográficos na área de estudo	33
1.4.2	Modelos de circulação implementados na região de estudo.	34
1.4.3	Estudos relacionados ao Petróleo	36
1.5	Características do Petróleo.	37
1.5.1	Processos relacionados ao comportamento do petróleo no meio marinho.	40
1.5.2	Processos de transporte.	40
1.5.3	Modelagem de manchas de óleo	41
2	Metodologia	45
2.1	Grade numérica do modelo hidrodinâmico.	47
2.2	Modelo hidrodinâmico de Princeton(POM).	48
2.3	Forçantes da simulação hidrodinâmica.	52
2.3.1	Os ventos.	52
2.3.2	Os campos de temperatura, salinidade e elevação.	52
2.3.3	Modelo global OCCAM.	53
2.3.4	A maré.	53
2.4	Simulação Numérica Hidrodinâmica.	57
2.4.1	Condições de contorno de fundo e superfície.	57

2.4.2	Condições de contorno abertas modo externo.	58
2.5	Modelo de óleo.	59
2.5.1	Espalhamento	60
2.5.2	Advecção por vento e correntes	61
2.5.3	Simulações do modelo de transporte de óleo baseado em partículas.	61
3	Análise do vento.	64
3.1	Comparação das análises do modelo atmosférico global com os dados da bóia(PNBÓIA).	64
3.2	Vento usado para forçar o POM	66
3.3	A contribuição direta do vento na movimentação do óleo no ambiente marinho.	73
4	Resultados e discussão.	77
4.1	Modelo hidrodinâmico.	77
4.1.1	Comparação do modelo hidrodinâmico com os dados da régua a partir da elevação da superfície e modelos teóricos.	77
4.1.2	Limitações do modelo hidrodinâmico.	80
4.1.3	Séries de correntes nos pontos de estudo geradas pelo POM.	82
4.1.4	Campo médio da contribuição do vento e correntes no deslocamento do óleo	85
4.2	Análise dos resultados do modelo de óleo.	90
4.2.1	Movimentação do óleo com a fonte localizada próxima a desembocadura da Laguna.	90
4.2.2	Movimentação do óleo com a fonte localizada nas monobóias(P3)	115

4.2.3	Movimentação do óleo com a fonte localizada próxima a desembocadura da Laguna sem a componente direta do vento com correntes em 3m abaixo do nível	126
4.2.4	Movimentação do óleo com a fonte localizada próxima aos blocos licitados pela ANP.	133
4.3	O aumento do tempo de atualização da posição das partículas.	142
4.4	Considerações finais	145
5	Conclusões.	150

Lista de Tabelas

1	Estimativas mundiais de despejos de petróleo no Oceano em milhões de toneladas $\times 10^3$	16
2	Componentes de maré usadas para forçar o modelo hidrodinâmico e os respectivos períodos	54
3	Coefficientes e parâmetros usados no modelo hidrodinâmico.	55
4	Parâmetros estatísticos entre as análises do modelo atmosférico global e as observações.	66
5	Estatísticas do vento usado para forçar o modelo, fonte localizada no ponto de análise 2, o qual foi definido na metodologia (P2).	71
6	Normais climatológicas provisórias da Estação Meteorológica #83995, de Rio grande no período de 1991 até 2001. O zero é referenciado no Norte crescendo no sentido anti-horário. Fonte: <i>Krusche et al.</i> (2002)	71
7	Parâmetros estatísticos das componentes da contribuição do vento na movimentação do óleo nos pontos de análise determinados na metodologia.	75
8	Parâmetros estatísticos das correntes (ms^{-1}) em 1m abaixo do nível do mar nos pontos de análise.	84

Lista de Figuras

1	Número de acidentes, com a quantidade de óleo derramada acima de 700 toneladas, de 1970 até 2005. São considerados apenas as manchas causadas por acidentes de navios não resultantes de atos de guerra.	18
2	Quantidade de óleo derramado no mar, em toneladas, de 1970 a 2005. São considerados apenas as manchas causadas por acidentes de navios não resultantes de atos de guerra.	19
3	Aumento da produção de Petróleo por região.	21
4	Aumento do consumo de óleo por região.	22
5	Evolução da produção de Petróleo, no Brasil, por localização(terra mar), em milhão de barris por dia. Fonte:Agência Nacional do Petróleo(ANP).	25
6	Localizações dos blocos ofertados pela ANP em rosa e dos blocos adquiridos pela PETROBRAS em verde.	27
7	Posição do Porto do Rio Grande e Refinarias da área de estudo.	28
8	Orla do Rio Grande do Sul e a localização das praias e dos faróis. A praia do Cassino fica aproximadamente entre o Terminal e a Querência.	32
9	Fluxograma esquemático da implementação dos modelos.	46
10	Batimetria(m) interpolada e filtrada. Pontos de análise das séries temporais em asteriscos vermelhos.	49
11	Batimetria(m) da área de estudo proveniente do GEBCO e os limites da grade mostrados a cada três pontos.	50
12	Campo inicial de temperatura($^{\circ}C$), do modelo global OCCAM, no primeiro nível sigma interpolado para a grade numérica.	54
13	Campo inicial de Salinidade, do modelo global OCCAM, no primeiro nível sigma interpolado para a grade numérica	55

14	Campo inicial de elevação do nível(m), do modelo global OCAAM, interpolado para a grade numérica	56
15	Séries temporais dos dados de vento(ms^{-1}) da bóia contra os dados de vento(ms^{-1}) das análises do modelo atmosférico global.	65
16	Diagrama de dispersão de vento(ms^{-1}) das análises do MGCA contra a bóia nos sensores 1 e 2 nas componentes u e v. Em azul a reta de regressão linear entre as observações e o modelo.	66
17	Séries de vento(ms^{-1}) nos pontos de análise no período de modelagem. . .	68
18	Séries temporais da componente u do vento(ms^{-1}) nos pontos de análise determinados na metodologia.	69
19	Séries temporais da componente v do vento(ms^{-1}) nos pontos de análise determinados na metodologia.	69
20	Direção, freqüência e intensidade dos ventos do período de modelagem localizados no P2	70
21	Histograma da porcentagem de freqüência da direção dos ventos localizados no P2	70
22	Desvio padrão do índice de oscilação Sul.	72
23	Séries temporais da contribuição(3,5% do valor) do vento(ms^{-1}) para trazer ou afastar o óleo(componente OC) da costa nos pontos determinados na metodologia.	74
24	Séries temporais da contribuição(3,5% do valor) do vento na movimentação do óleo ao largo da costa (componente PC) nos pontos determinados na metodologia.	75
25	Séries temporais de elevação(m) das observações, modelo e ambos subtraídos da média.	77

26	Diagrama de dispersão da altura do nível(ms^{-1}) entre as observações e o POM	78
27	Média(244h-284h) da anomalia do nível(m) do mar e correntes(ms^{-1}) no primeiro nível sigma.	80
28	Média(1400h-1432h) da anomalia do nível(ms^{-1}) do mar e correntes(ms^{-1}) no primeiro nível sigma.	81
29	Séries de velocidades(ms^{-1}) de correntes nos pontos determinados na metodologia (ver Figura 10).	83
30	Séries de correntes(ms^{-1}) em 1, 5 e 10m, abaixo do nível do mar, no P2	86
31	Campo da média da contribuição(3.5 % do valor) do vento(ms^{-1}) no período de modelagem.	87
32	Campo da média das correntes(ms^{-1}) em 1m abaixo do nível	89
33	Campo médio das correntes(ms^{-1}) na plataforma em 1m abaixo da superfície.	90
34	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no P2 na passagem de um sistema frontal as 340h horas de modelagem.	91
35	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no P2 no começo da passagem de um sistema frontal as 390h horas de modelagem.	92
36	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no P2 na passagem de um sistema frontal as 440h horas de modelagem.	93
37	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no P2 na passagem de um sistema frontal as 460h horas de modelagem.	94
38	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no P2 na passagem de um sistema frontal as 470h horas de modelagem.	95
39	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no P2 na passagem de um sistema frontal as 490h horas de modelagem.	96

40	Evolução temporal de um derrame simulado na passagem de um sistema frontal na costa da Flórida.	99
41	Mancha causada pelo naufrágio do navio mercante Argo no dia 19/12/1979.	100
42	Posição final das manchas de óleo do modelo probabilístico com a fonte localizada próxima a desembocadura da laguna.	101
43	A Figura mostra a probabilidade da trajetória do óleo num derrame com 10 dias de duração, na simulação em que a fonte era localizada no P2 . . .	102
44	Porcentagem do campo de massa (óleo) final do modelo probabilístico com a fonte localizada próxima a desembocadura da Laguna.	103
45	Correntes (ms^{-1}) do modelo hidrodinâmico, 1m abaixo da superfície em 320h de modelagem.	106
46	Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 320h de modelagem.	107
47	Correntes(ms^{-1}) do modelo hidrodinâmico 1m abaixo da superfície em 340h de modelagem.	108
48	Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 340h de modelagem.	109
49	Correntes(ms^{-1}) do modelo hidrodinâmico, 1m abaixo da superfície em 430h de modelagem.	110
50	Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 430h de modelagem.	111
51	Correntes(ms^{-1})do modelo hidrodinâmico, 1m abaixo da superfície em 444h de modelagem.	112
52	Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 444h de modelagem.	113
53	Correntes(ms^{-1})do modelo hidrodinâmico, 1m abaixo da superfície em 460h de modelagem.	114
54	Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 460h de modelagem.	115
55	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no P2 na passagem de um sistema frontal em 320h de modelagem.	118

56	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada nas monobóias de Tramandaí na passagem de um sistema frontal 340h de modelagem.	119
57	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada nas monobóias de Tramandaí na passagem de um sistema frontal as 390h de modelagem.	120
58	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada nas monobóias de Tramandaí na passagem de um sistema frontal em 460h de modelagem.	121
59	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no P2 na passagem de um sistema frontal em 470h de modelagem.	122
60	Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no P2 na passagem de um sistema frontal em 530h de modelagem.	123
61	Posição final das manchas de óleo do modelo probabilístico com a fonte localizada no P3	124
62	Porcentagem do campo de massa(óleo) do modelo probabilístico com a fonte localizada no P3	125
63	Probabilidade da trajetória do óleo num derrame de 10 dias com a fonte localizada no P3	126
64	Posição da mancha de óleo em 490 h, a fonte está localizada próxima a desembocadura. Nesse experimento não existe efeito do vento e a profundidade do óleo é de 5m.	129
65	Posição da mancha de óleo em 640 h, a fonte está localizada próxima a desembocadura. Nesse experimento não existe efeito do vento e a profundidade do óleo é de 5m.	130
66	Posição final da mancha de óleo, a fonte está localizada próxima a desembocadura. Nesse experimento não existe efeito do vento e a profundidade do óleo é de 5m.	131

67	Probabilidade da trajetória do óleo num derrame de 10 dias com a fonte localizada no P2 sem o efeito direto do vento com o óleo posicionado 3m abaixo do nível do mar.	132
68	Porcentagem do campo de massa(óleo) do modelo probabilístico com a fonte localizada no P2	133
69	Posição da mancha de óleo em 480 horas. Fonte localizada próxima aos blocos da Petrobras.	134
70	Posição da mancha de óleo em 1050 horas. Fonte de óleo localizada próxima aos blocos da Petrobras.	135
71	Correntes(ms^{-1})do modelo hidrodinâmico, 1m abaixo da superfície em 1008h de modelagem.	136
72	Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 1008h de modelagem.	137
73	Posição das partículas em 1210 horas. Fonte localizada próxima aos blocos da PETROBRAS.	138
74	Posição final das manchas de óleo do modelo probabilístico. Fonte localizada próxima aos blocos da PETROBRAS.	139
75	Probabilidade da trajetória do óleo num derrame de 10 dias com a fonte localizada no P5	140
76	Porcentagem do campo de massa(óleo) do modelo probabilístico.	142
77	Comparação das posições das manchas de óleo para M1(azul) e M2(vermelho) na hora 490, a fonte está próxima a desembocadura da Laguna.	144
78	Comparação das posições das manchas de óleo para M1(azul) e M2(vermelho) na hora 490h.	145
79	Vulnerabilidade da costa(RG) resultante da integração das variáveis geomorfológica e urbanização.	148

1 Introdução

A poluição por óleo é uma consequência inevitável de um rápido crescimento populacional numa sociedade dependente do petróleo. O uso desse bem é impossível sem perdas as quais ocorrem na extração, transporte, refino e uso (*Blumer, 1969*).

A contaminação marinha por hidrocarbonetos do petróleo é um assunto preocupante e atrai grande atenção de pesquisadores e órgãos ambientais, sendo de grande importância por estar diretamente ligada ao gerenciamento e conservação de ecossistemas marinhos. Essa classe de contaminantes é complexa e bastante heterogênea. O petróleo é uma complexa mistura de hidrocarbonetos cuja toxicidade varia com a composição. As diferenças na concentração dos compostos possibilitam a existência de diversos tipos de óleos. Os óleos crus também podem ser fracionados resultando em uma infinidade de compostos mais simples com propriedades diferentes (*Clark, 2001*).

Por ser um poluente oriundo de diversas fontes, que muitas vezes são difusas, existe dificuldade no cálculo da quantidade total do óleo que é despejada no ambiente, e também no controle das emissões. Esses fatos aumentam a importância de estudos desses tipos de contaminantes.

Esses contaminantes mesmo quando despejados em terra, por causa da drenagem e da lixiviação, acabam na maioria das vezes tendo os oceanos como destino final. Existem estimativas sobre a quantidade de óleo que entra no oceano e as diferentes fontes; entretanto os números são incertos e a quantificação é difícil de ser realizada.

Segundo o relatório da Organização Marítima internacional, *MARPOL* (1998), foi estimado, para o ano de 1979, uma entrada de 3.290.000 toneladas métricas de óleo no ambiente marinho(www.imo.org).

O Conselho Nacional de Pesquisa da Academia de Ciência Norte Americana (NRC, 1985) estimou um despejo anual de 3,2 milhões de toneladas de hidrocarbonetos de

petróleo nos oceanos; entretanto o valor poderia chegar até 8,8 milhões de toneladas.

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos por diversos autores, assim como a origem das fontes publicados pelo Grupo Internacional de Especialistas em Proteção Ambiental Marinha-(*GESAMP*, 1993). Segundo *Clark* (2001) metade da produção mundial de óleo, que é estimada em 3 milhões de toneladas por ano, é transportada pelo mar.

Tabela 1: Estimativas mundiais de despejos de petróleo no Oceano em milhões de toneladas $\times 10^3$.

Fontes	NRC(1975)	Kornberg(1981)	Baker(1983)	NRC(1985)
Fontes Naturais	600	600	300(50-500)	200(20-2.000)
Extração	80	60	50(40-70)	50(40-60)
Transporte	1.580	1.110	1.150	1.250
Navios-tanque	300	300	390(160-640)	400 (300-400)
Descargas operacionais	1.080	600	710(440-14.500)	700 (400-1.500)
Produtos Refinados	200	60	100(60-6.000)	
Efluentes Costeiros	150	50(30-80)	50(50-200)	
Consumo	3.850	2.900	1.770	1.700
Esgotos Urbanos	2.500	2.100	1.430(700-2.800)	1.080 (500-2.500)
Navios	750	200	340(160-6.400)	320(200-6.000)
Deposição atmosférica	600	600	300(50-500)	300(50-500)
Total	6.110	4.670	3.270	3.200
Porcentagem dos totais				
Fontes Naturais	10%	13%	9%	6%
Extração	1%	1%	2%	2%
Transporte	26%	24%	35%	39%
Consumo	63%	62%	54%	53%

Fonte: Conselho Nacional de Pesquisa da Academia de Ciência Norte Americana(2002).

O Conselho Nacional de Pesquisa da Academia de Ciência Norte Americana-(*NRC*, 2002) estimou em 1,3 milhões de toneladas por ano o despejo de óleo no mar, embora essa quantia pudesse variar entre 470 mil toneladas e 8,4 milhões de toneladas por ano.

Acidentes com navios tanque, refinarias costeiras e plataformas não são as principais fontes de contaminação no meio marinho; contudo são responsáveis por um percentual considerável. Mesmo sendo esporádicos e localizados, esses acidentes podem introduzir grande quantidade de óleo no meio. Através disso geram impactos locais, causando

grandes prejuízos e danos tanto sociais como ecológicos (*Baars, 2002; Miraglia, 2002; Goodlad, 1986; Holme 1969*). Dependendo da sensibilidade do local ao óleo, importância ecológica e econômica do ambiente, o óleo pode causar verdadeiros desastres ambientais como reportado por *Linden et al. (2004)*.

Conforme o tipo de óleo e a capacidade de depuração do local atingido, os hidrocarbonetos persistem por anos (*Wanga et al., 2001*). A recuperação do ambiente pode levar dezenas de anos e os danos podem ser irreversíveis, pois as substâncias tóxicas podem causar efeitos crônicos ao longo de anos (*Burns et al., 1994*).

Outro problema relacionado a grandes manchas, que é motivo de preocupação, é que o local de ação do contaminante é incerto. A ação do poluente pode chegar em áreas distantes do local fonte de lançamento como descrito por *Irvine et al. (2006)*.

Acidentes desse tipo despertam o interesse do público em geral e conseqüentemente a atenção da mídia. O impacto é visível, alterando o aspecto do local e impressionando a população. Além disso, a comunidade local é afetada de forma direta.

Até os anos 50, a contaminação por óleo no ambiente marinho era totalmente desconsiderada, uma vez que os oceanos foram considerados tão grandes que poderiam depurar qualquer forma de poluição. Leis sancionando as operações navais que largavam óleo no mar existiam apenas nos EUA e na Inglaterra.

A poluição por óleo foi motivo de atenção internacional na conferência OILPOL (International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil) em 1954. A contaminação e os danos causados pelas manchas de óleo no ambiente passou a chamar atenção a partir de um grande acidente envolvendo o primeiro navio-tanque, que na época era capaz de transportar 120.000 toneladas de óleo cru. Nesse acidente, o navio *Torrey Canyon* naufragou em 1967 ao Sul da costa inglesa, causando um grande desastre ambiental. Após o acidente o governo inglês passou a organizar um encontro inter-governamental para a discussão de mudanças nas leis internacionais regulamentando a navegação (www.oceansatlas.com).

Ao longo do tempo, leis de navegação internacionais mais rígidas, aumento das multas cobradas sobre os responsáveis e inovações tecnológicas, fizeram com que os acidentes causadores de grandes manchas de óleo no mar fossem diminuindo.

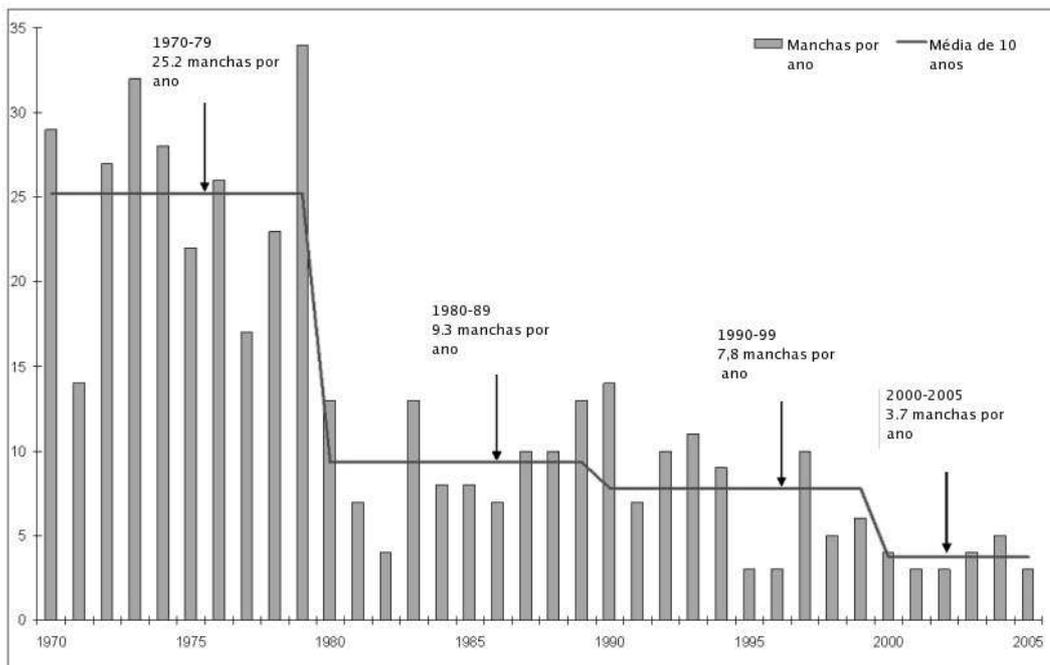


Figura 1: Número de acidentes, com a quantidade de óleo derramada acima de 700 toneladas, de 1970 até 2005. São considerados apenas as manchas causadas por acidentes de navios não resultantes de atos de guerra.

Fonte: ITOPF(www.itopf.com)

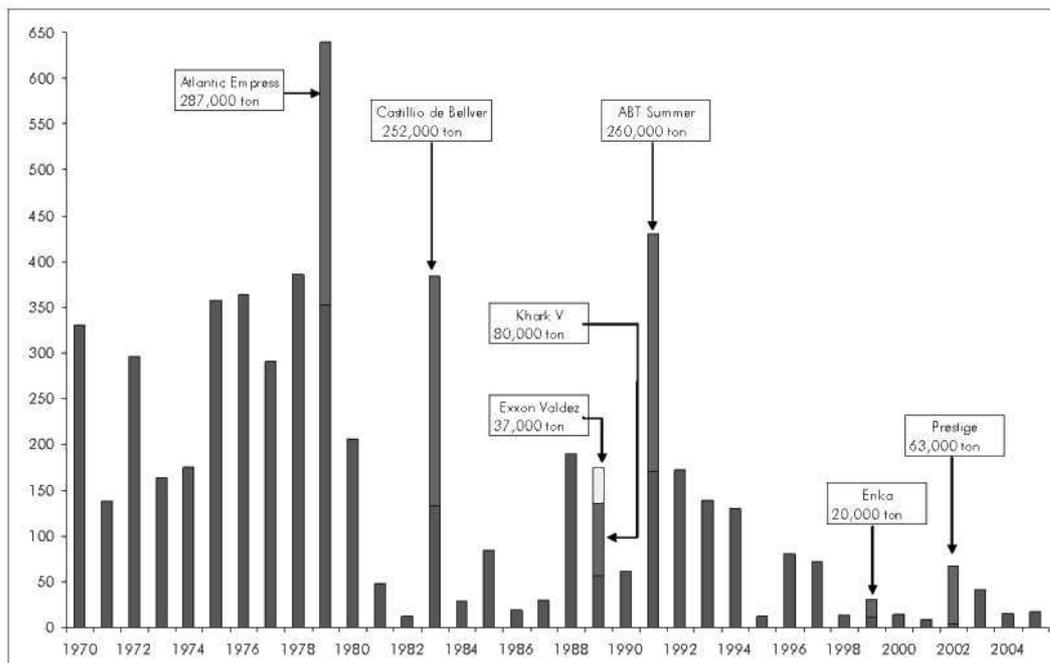


Figura 2: Quantidade de óleo derramado no mar, em toneladas, de 1970 a 2005. São considerados apenas as manchas causadas por acidentes de navios não resultantes de atos de guerra.

Fonte: ITOPF(www.itopf.com)

A diminuição do número de acidentes (Figura 1) e da quantidade de óleo derramado(Figura 2) foi drástica entre os anos 70 e 80, entretanto tende a estabilização, uma vez que erros humanos e acidentes sempre vão acontecer independente do avanço da tecnologia e das medidas de segurança.

Segundo um relatório da National Oceanic and Atmospheric Administration-*NOAA* (2001) , entre 1967 e 1991 foram registrados 112 acidentes que causaram manchas de óleo, sendo que 2 ocorreram no Brasil, 1 em São Sebastião-SP e outro no Rio de Janeiro-RJ. Ambos causaram sérios danos ao ambiente. Na publicação foram relatados os principais acidentes, sendo registrados apenas os acidentes que:

- excederam 1000.000 barris de óleo(bbl) em águas internacionais.
- excederam 10.000 barris de óleo(bbl) em águas Norte-americanas.

- envolveram o uso de dispersantes.
- envolveram o uso de bio-remediação.
- causaram sérios danos ambientais incluindo: a identificação da morte de mais de 500 pássaros e 100 mamíferos, e a fecho da pescaria local.

Recentemente no Brasil, dois graves acidentes em oleodutos da PETROBRAS aconteceram no ano de 2000 e causaram grandes vazamentos na Baía da Guanabara e no Paraná. Acidentes envolvendo grandes derrames de óleo, como os ocorridos na Baía da Guanabara e no Paraná, levaram a avanços no processo de planejamento de emergência brasileiro. Estas melhorias podem ser verificadas através do avanço da legislação, citando-se como exemplo a Resolução CONAMA 293, de 12 de dezembro de 2001, que introduziu o conceito de um conteúdo mínimo no Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos ou plataformas, bem como suas respectivas instalações de apoio, além de orientar também a sua elaboração antes da ocorrência desses incidentes (*Silva, 2003*).

Apesar de todo o revés, como os altos preços do barril de petróleo, as políticas de racionamento da OPEP (Organization of the Petroleum Exporting Countries) e o uso de fontes alternativas, tanto a produção quanto o consumo de petróleo aumentam mundialmente (Figuras 3 e 4) como mostra a Revisão Estatística Mundial de Energia da “British Petroleum”- (*BP, 2005*).

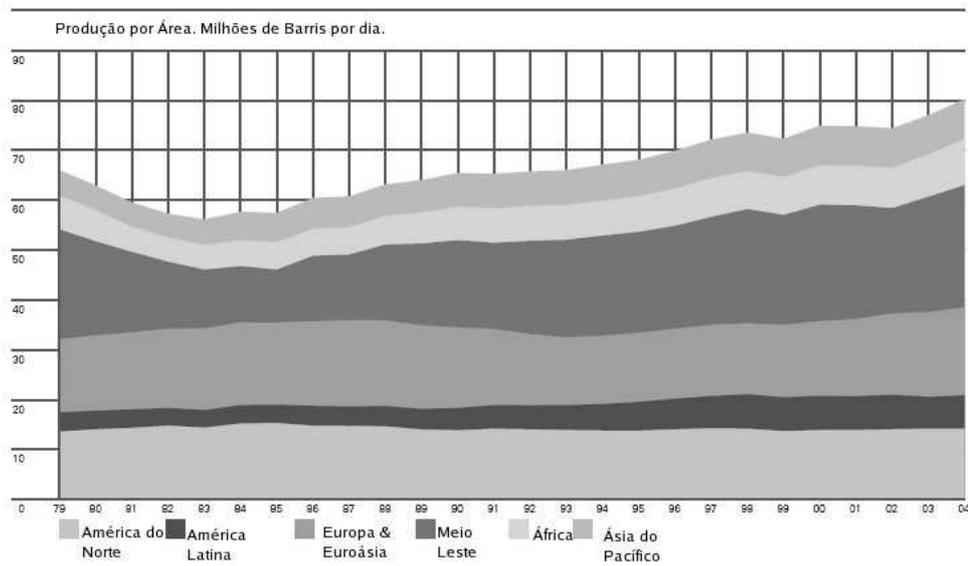


Figura 3: Aumento da produção de Petróleo por região.
 Fonte: ITOPF (International Tanker Owners Pollution Federation)

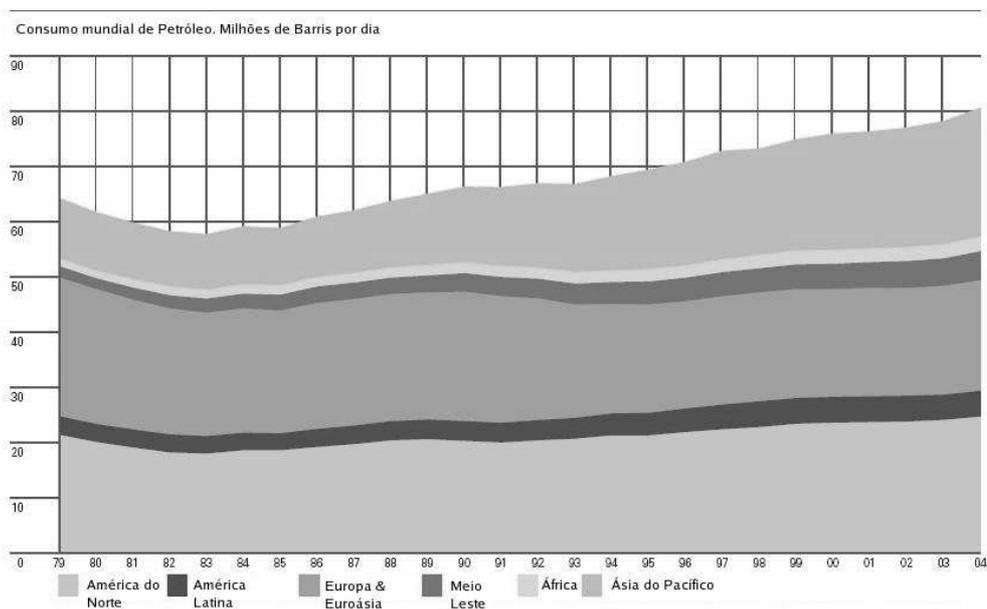


Figura 4: Aumento do consumo de óleo por região.
 Fonte: ITOPF (International Tanker Owners Pollution Federation)

O Brasil é um grande produtor e consumidor de Petróleo e conseqüentemente possui rotas marítimas de transporte do produto. Assim como no cenário mundial, a produção de petróleo no Brasil cresce (Figura 5) sendo que principais áreas de produção são localizadas no mar.

Existem poucos estudos nacionais publicados sobre a trajetória do óleo no ambiente marinho, riscos das áreas de produção nacionais e as principais rotas dos navios cargueiros, os quais oferecem riscos para as regiões adjacentes. Se ainda considerarmos os 7.367km de linha da costa, há uma carência de estudos sobre o comportamento e os riscos que eventuais acidentes trazem para a zona costeira que cobre 3 milhões e 500 mil quilômetros quadrados.

A maioria dos estudos são realizados por empresas particulares para o licenciamento ambiental. Essas empresas adquirem licenças para usar modelos de transporte e transformação

de óleo que têm código fechado. O estudo realizado por outras entidades pode servir de base para comparação e avaliação dos modelos, sendo usado por órgãos de fiscalização ambientais.

Não foram encontrados trabalhos sobre a trajetória de poluentes de petróleo na Bacia de Pelotas, que além de ser uma área de risco devido ao transporte na região, tem potencial para exploração de petróleo e de gás natural. A região tem diversos recursos ambientais que são importantes para a comunidade em geral.

O estudo do comportamento e trajetória do óleo no ambiente é importante para minimizar os impactos ambientais de eventuais acidentes, assim como no gerenciamento ambiental e na análise de poluição crônica de fontes conhecidas, como áreas de produção e parques Industriais.

O local de destino do óleo é de difícil previsão, uma vez que envolve diversos processos físicos e químicos que se interrelacionam. As equações envolvidas que descrevem o fenômeno são de difícil solução e ainda não se tem conhecimento das formas analíticas de resolução de todo o conjunto de equações. Alguns processos, como a dispersão e a emulsificação, ainda não são bem compreendidos.

Um dos meios usados para se estimar a trajetória e as transformações do óleo no meio aquoso é a aplicação de métodos numéricos na resolução de um conjunto de equações que resolvam o transporte e intemperismo do óleo. O uso de modelos numéricos é uma ferramenta barata e de ampla aplicação para fins científicos e práticos que não é somente aplicada no transporte e difusão do óleo, como também para outros poluentes.

Uma boa representação das condições físicas do ambiente, incluindo ventos, correntes, nível do mar, temperatura e salinidade é a base essencial para modelos de qualidade de água e dispersão de poluentes incluindo os modelos de óleo.

Segundo a Informação Técnica ELP/IBAMA (*IBAMA*, 2002), a modelagem de derramamento de óleo define a área de influência indireta da atividade, na qual se baseia todo o diagnóstico

ambiental, bem como, define cenários através das simulações, permitindo a elaboração de estratégias necessárias ao atendimento emergencial de acidentes que envolvem derramamento de óleo no mar , no contexto do Plano de Emergência Individual. Dessa forma, constitui uma ferramenta fundamental na elaboração do estudo e da gestão ambiental das atividades de exploração e produção.

O conhecimento do comportamento e trajetória do óleo no ambiente é essencial para análise dos riscos, tomada de decisões em caso de acidente, medidas preventivas e a localização dos pontos em que acidentes serão mais danosos ao meio-ambiente.

Em 17 de agosto de 2004 foram leiloadas concessões para exploração de petróleo nos lotes localizados da Bacia de Pelotas. A crescente demanda deste produto tende a aumentar o transporte de óleo e a criação de áreas de exploração na plataforma continental do Rio Grande do Sul. Conseqüentemente, também cresce o risco de acidentes ambientais ligados a atividades comerciais com este produto. A Sexta Rodada ofertou blocos (Figura 6) em águas profundas (lâmina de água maior que 400m) nas Bacias de Pelotas, Santos, Campos, Espírito Santo entre outros. A empresa PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.) adquiriu 5 blocos na Bacia de Pelotas.

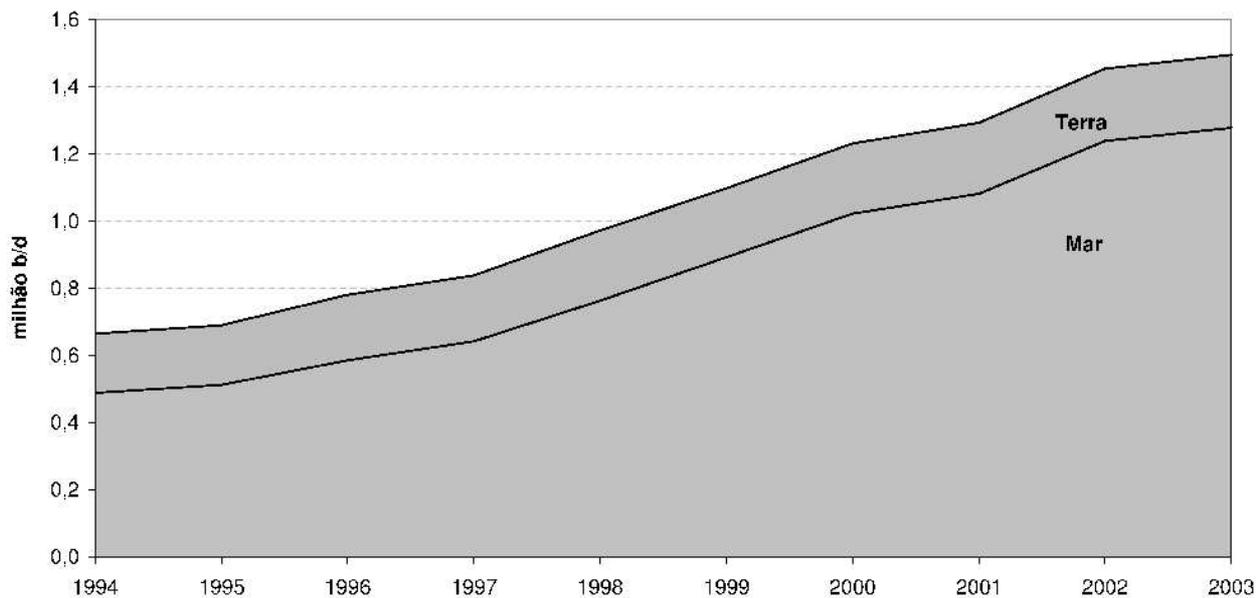


Figura 5: Evolução da produção de Petróleo, no Brasil, por localização(terra mar), em milhão de barris por dia. Fonte:Agência Nacional do Petróleo(ANP).

O Porto de Rio Grande (Figura 7) está situado a 32° 07' 20" de latitude Sul e a 052° 05' 36" de longitude Oeste de Greenwich. É o porto de mar mais meridional do Brasil, localizado na margem Oeste do Canal do Norte, que é o escoadouro natural de toda a bacia hidrográfica da Laguna "Lagoa dos Patos". Dos três Portos Organizados do Estado, Rio Grande é o mais importante, como único porto marítimo, dotado de características naturais privilegiadas, capaz de ser desenvolvido racionalmente em condições de atender à navegação de longo curso, que exige boas profundidades (www.portoriogrande.com.br).

No Porto de Rio Grande a movimentação de granel líquido para o ano 2000 foi de 3.600.000t sendo que desse total boa parte é óleo ciclo/leve, derivados do Petróleo e óleo

combustível. A quantidade de movimentação de granel líquido vem aumentando ao longo dos anos (www.transportes.gov.br).

O Terminal Marítimo Almirante Soares Dutra (TEDUT) tem uma instalação industrial em Osório. Entretanto o acesso marítimo é realizado através de monobóias (Figura 7) localizadas em mar aberto em frente a cidade de Tramandaí. Existem dois oleodutos que ligam a duas monobóias aos tanques do Terminal. Uma é usada para óleo (registro-MN 602) para navios com calado de 19m, e outra para claros (registro-MN 601) para calados de 16 m. A movimentação é de aproximadamente 7.600.000 toneladas por ano, feita através de 214 navios (www.transportes.gov.br).

O Porto de Rio Grande e o TEDUT provavelmente são os locais onde ocorre a maior probabilidade de acontecer acidentes que possam causar derrames de óleo nas águas da região.

Esses locais também estão associados as fontes de poluição crônica de hidrocarbonetos de petróleo na região. A poluição crônica por óleo na região já é percebida pelo piche que pode ser encontrado na praia do Cassino (*Wetzel, 1995*). A quantificação do piche encontrado nas praias pode refletir a contaminação de petróleo do ambiente (*Knap et al., 1986*). Ao longo da costa do Rio Grande do Sul é freqüente a ocorrência de exemplares de Pingüins-de-Magalhães (*Spheniscus magellanicus*) mortos ou contaminados por óleo (*Ruoppolo et al., 2004*) fato que também é reflexo da poluição crônica da região.

1.1 Área de Estudo

A área de estudo (Figura 6) é a região da Bacia de Pelotas que está compreendida entre as latitudes $-28,3^{\circ}$; $-38,7^{\circ}$ e longitudes $-043,1^{\circ}$ e $-054,9^{\circ}$. Apesar de não haver plataformas de petróleo em funcionamento, a região é suscetível a eventuais acidentes que possam vir a causar derrames de óleo. As estruturas ou corporações que estão ligadas diretamente ao transporte e produção de petróleo e derivados são o Porto de Rio Grande,

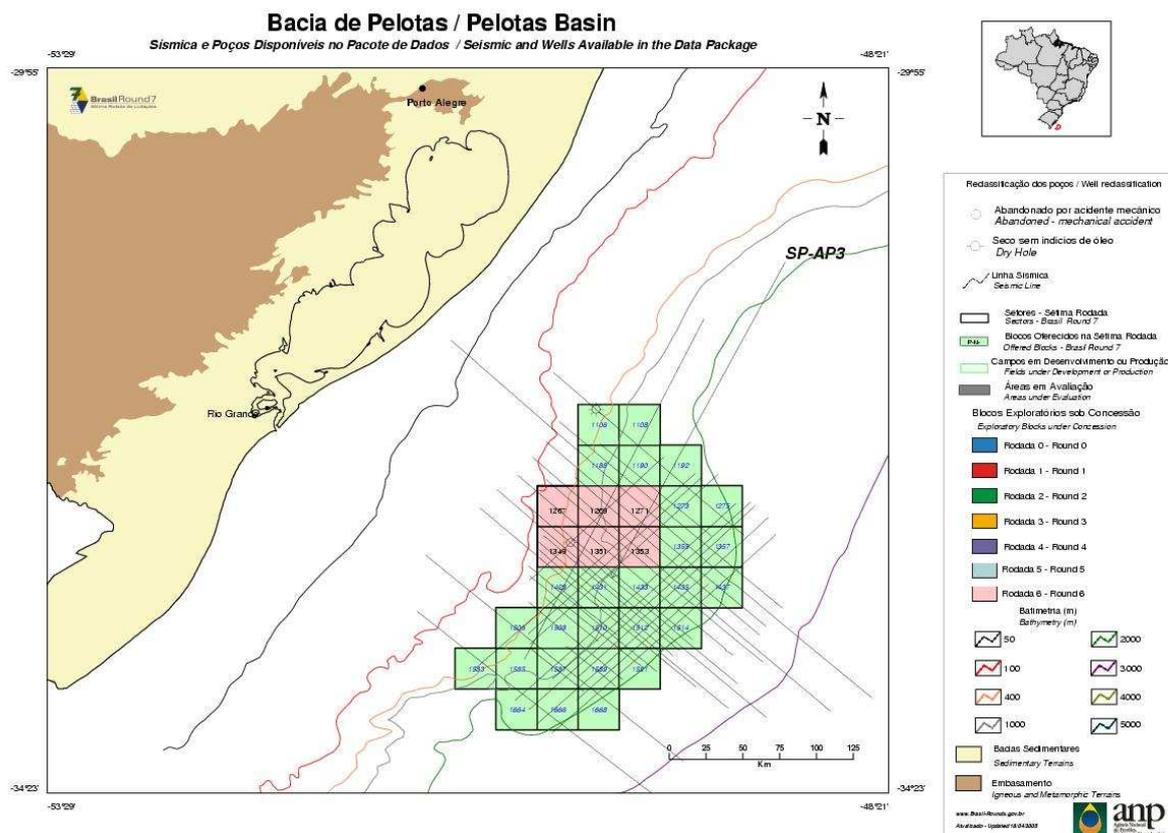


Figura 6: Localizações dos blocos ofertados pela ANP em rosa e dos blocos adquiridos pela PETROBRAS em verde.

Fonte: www.anp.gov.br.

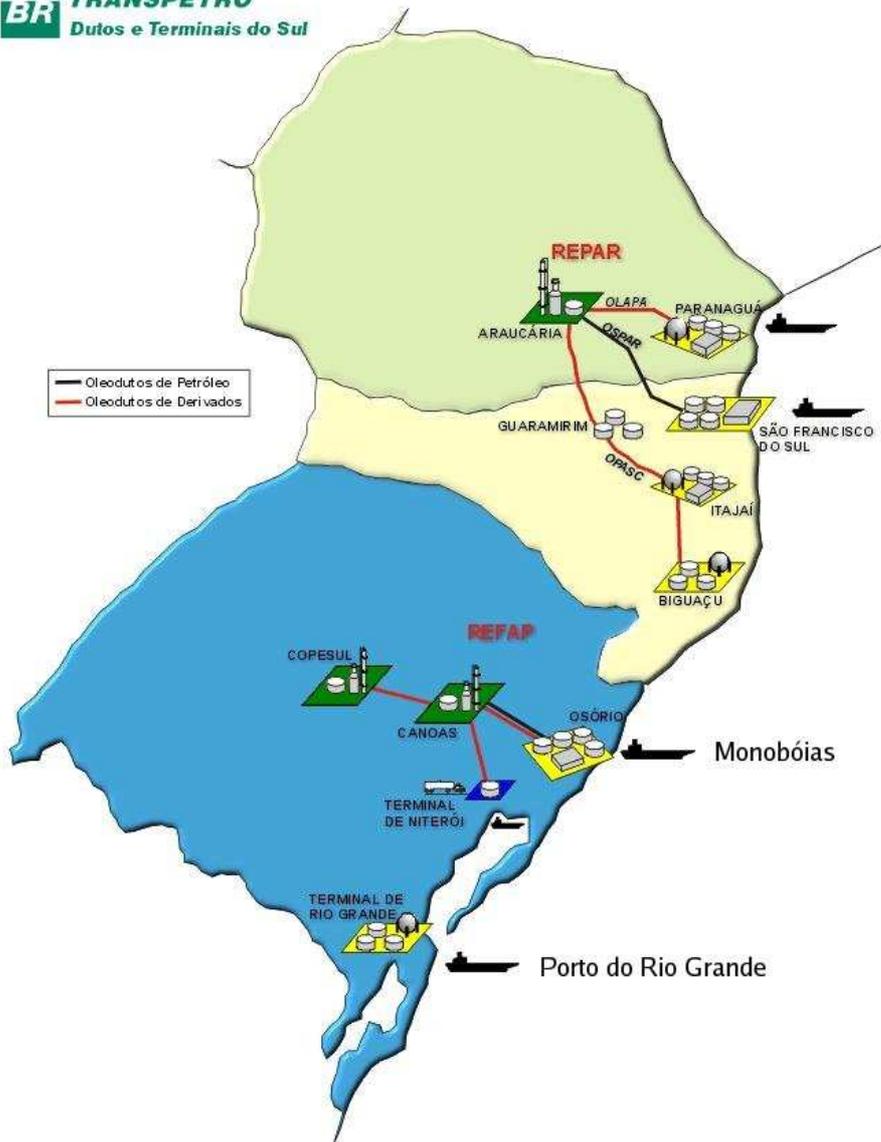


Figura 7: Posição do Porto do Rio Grande e Refinarias da área de estudo.
Fonte: www.transpetro.com.br.

o terminal de Rio Grande e o Terminal de Tramandaí (monobóias).

O limite costeiro e a batimetria da plataforma Sul do Brasil são relativamente suaves. A profundidade da quebra da plataforma está localizada próxima a isóbata de 180m. A plataforma é mais estreita na porção Norte (110km) e mais larga na porção Sul.

A região Sul do Brasil é afetada por sistemas meteorológicos sinóticos, subsinóticos e por fatores associados a circulações locais e de grande escala. Pode-se destacar para escala sinótica: sistemas frontais que se deslocam do Pacífico, passam pela Argentina e seguem para Nordeste; sistemas que se desenvolvem no Sul e Sudeste do Brasil associados a vórtices ciclônicos ou cavados em altos níveis que chegam pela costa Oeste da América do Sul vindos do Pacífico; sistemas que se organizam no Sul e Sudeste com intensa convecção associada a instabilidade causada pelo jato; sistemas que se organizam no Sul resultantes de frontogênese e ciclogênese (*Nobre et al.*, 1986).

A região de estudo está sobre a influência do anticiclone semi-fixo do Atlântico Sul sendo afetada e fortemente influenciada pela passagem de sistemas frontais, ciclones e anticiclones migratórios. Os ciclones são gerados por instabilidade baroclínica em cima da cordilheira dos Andes, no Sul da América do Sul, aproximadamente em 48°S, onde *Berbery e Vera* (1996) identificaram uma “storm track”.

Stech e Lorenzetti (1992) observaram através de cartas sinóticas uma frequência de dois sistemas frontais a cada sete dias na costa Sudeste do Brasil. *Castro e Lee* (1995) viram uma ocorrência de três a cinco frentes frias por mês com intervalo de seis a dez dias para a mesma região.

Para a estação do Rio Grande analisando dados de 1970 a 1982, *Tomazelli* (1992) encontrou predominância de ventos nordeste (NE) 22,3%, seguida de sudoeste (SW) 13,5%. *Lima et al.* (1996) analisando o vento de dados históricos (cartas meteorológicas) do Centro Nacional Climático Americano mostrou que durante o verão os ventos de **NE** são dominantes mudando para **E** com o aumento da Latitude.

1.2 Importância do estudo.

A área de estudo compreende a plataforma sudeste do Brasil que é uma das áreas de pesca mais importantes do Brasil (*Haimovici et al.*, 1989) devido a grande biomassa de fitoplâncton relacionada as descargas do Rio da Prata e Lagoa dos Patos e as ressurgências da quebra de plataforma (*Ciotti et al.*, 1995).

Na orla da Bacia de Pelotas (Figura 8) estão localizados municípios e unidades de conservação ambiental que abrigam diversas espécies.

A maior parte da costa do Rio Grande do Sul é formada por praias arenosas. Elas são habitats de diversas espécies residentes e migratórias entre elas pássaros e invertebrados. Segundo *Gianuca* (1998), a fauna bentônica das praias gaúchas representa o alimento de várias espécies de peixes teleósteos e elasmobrânquios, muitos dos quais são objetos da pescaria comercial.

Desastres ambientais relacionados ao óleo nas praias podem causar danos ambientais devido a complicada teia trófica desses ambientes. Além disso determinadas praias são importantes para o turismo regional dos balneários costeiros com relevante importância social, cultural e econômica para as populações ribeirinhas. A população e o turismo dos balneários aumentam no verão, sendo que nesta época há um maior de pessoas que depende economicamente da região. Portanto um derrame de óleo no verão seria mais prejudicial a economia local.

Na região costeira estão localizadas importantes Unidades de conservação ambiental como o Parque Nacional da Lagoa do Peixe, Ilha do Lobos e a Área de Proteção Ambiental do Molhe Leste.

O Parque Nacional da Lagoa do Peixe tem por função proteger ecossistemas litorâneos e espécies de aves migratórias que dependem da unidade para seu ciclo vital. As aves usam a região para descansar e se alimentar.

A Ilha do Lobos em Torres-RS e a Área de Proteção Ambiental do Molhe Leste marcam o limite Norte da distribuição de leões marinhos (*Otaria sp.*) . Esses locais também são ocupados por lobos marinhos que apesar de terem hábitos mais oceânico, usam o local para descanso.

Uma descrição detalhada dos ecossistemas da região pode ser encontrada em *Seeliger et al.* (1998).

As atividades ligadas ao transporte de óleo na região oferecem riscos a população e aos ecossistemas da região. O conhecimento sobre o comportamento e destino do óleo no ambiente se faz importante para uma avaliação preliminar das regiões que teriam mais chances de serem contaminadas e da quantidade de óleo que atingiria esses locais.

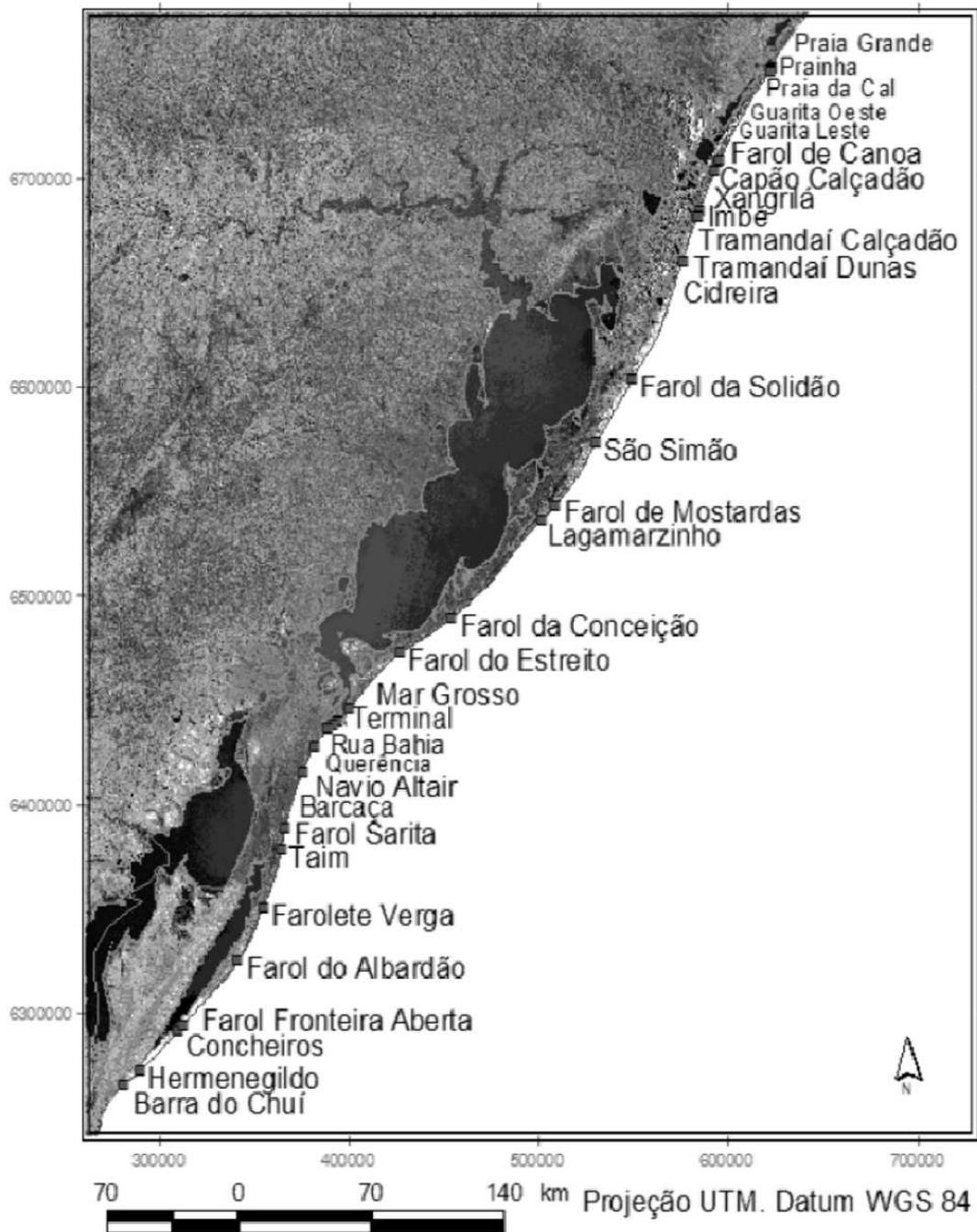


Figura 8: Orla do Rio Grande do Sul e a localização das praias e dos faróis. A praia do Cassino fica aproximadamente entre o Terminal e a Querência.
Fonte: *Pereira* (2005).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

Esse trabalho tem o objetivo de investigar o transporte de manchas de óleo em superfície nas águas da Bacia de Pelotas em situação de verão.

1.3.2 Objetivos específicos

- Elaborar um modelo lagrangeano de transporte de óleo baseado na movimentação partículas.
- Identificar os efeitos de ventos e correntes no modelo de transporte de óleo.
- Identificar a trajetória e os locais preferenciais de destino do óleo a partir dos resultados obtidos.

1.4 Antecedentes

1.4.1 Aspectos oceanográficos na área de estudo

A porção externa da Plataforma Continental Sul Brasileira está sob influência da convergência de duas correntes de contorno Oeste, a Corrente do Brasil e a Corrente das Malvinas. A confluência está normalmente localizada em 36° de latitude (*Gordon, 1981*), em frente a Plataforma Continental Argentina, embora normalmente ocorrem variações sazonais na posição da confluência (*Emilsson, 1959*).

Enquanto as águas tropicais e sub-tropicais, transportadas pela Corrente do Brasil, são as principais massas de água na superfície da plataforma continental externa e no talude, as massas de água da plataforma interna são fortemente influenciadas pela descarga de água doce da Lagoa dos Patos e pela intrusão de águas das Plataformas continentais Uruguiaia e Argentina (*Soares e Möller, 2001*). As massas de água das Plataformas

Uruguia e Argentina por sua vez sofrem grande influência da descarga do Rio Prata (*Piola et al.*, 2005).

A circulação da plataforma continental na área de estudo é complexa e difícil de ser simulada porque é resultante de interações entre diversos fenômenos e forçantes sendo eles as variações sazonais e sinóticas do vento, migrações da Confluência Brasil-Malvinas, processos de Meso-escala da Corrente do Brasil, os ciclos sazonais de descarga do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos e as correntes geradas por maré. A circulação na Plataforma tem caráter sazonal. No verão o fluxo é para o Sul, saindo da costa e no inverno o fluxo é para o Norte em direção a costa (*Lima et al.*, 1996).

Segundo *Möller et al.* (2001) as correntes de maré na Plataforma continental Sul Brasileira são desprezíveis devido a proximidade de um ponto anfidrômico.

Soares (2003) mostrou que na primavera o vento é a forçante dominante na circulação da plataforma. A descarga da Lagoa dos Patos sofre grandes mudanças sazonalmente sendo a máxima em julho (aproximadamente $10.000m^3s^{-1}$) e mínima em janeiro (aproximadamente $1.000m^3s^{-1}$).

O Rio da Prata não tem uma variação sazonal significativa, sua advecção para a Plataforma continental Sul brasileira é fortemente influenciada pelos ventos. Em geral no inverno a contribuição das águas do Prata na Plataforma Sul Brasileira é maior que no verão e primavera onde os ventos impedem o avanço das águas do Prata para o Norte. A corrente do Brasil tem maior influência na Plataforma no verão quando ela alcança seu limite Sul.

1.4.2 Modelos de circulação implementados na região de estudo.

Pereira (1989) usou um modelo analítico simples, estático e hidrostático para representar a Plataforma Continental Brasileira. O modelo era baseado no equilíbrio entre a força de Coriolis, a tensão exercida pelo vento médio, e os gradientes de densidade obtidos

de diversos cruzeiros hidrográficos. A densidade era integrada verticalmente entretanto variava horizontalmente. Os resultados mostraram reversão sazonal na média das correntes costeiras. No inverno as correntes eram Nordeste (**NE**) devido aos ventos Sudoeste (**SW**) que intensificavam as correntes geradas pelo gradiente de densidade. No verão o vento **NE** invertia o sentido das correntes.

Matano e Philander (1993), usaram o modelo hidrodinâmico global de Bryan e Cox (descrito em *Bryan*, 1969) e implementado por *Cox* (1984), calcularam o transporte de massa da Corrente do Brasil. O domínio se estendia da latitude -55° até -25° , e tinha resolução espacial de 1° com 15 níveis verticais. O modelo foi forçado por vento climatológico. Eles concluíram que mudanças no transporte da Corrente do Brasil estavam relacionados com variações na posição meridional da localização da confluência Brasil-Malvinas.

Gan et al. (1998) com o Modelo Oceânico de Princeton (comumente conhecido como **POM**) simularam o Atlântico Sul com uma grade-curvilínea com resolução de 19 a 54km. O modelo foi forçado com médias mensais de vento, fluxo de calor variável também considerando as variações sazonais da Corrente Circumpolar Antártica. Os autores concluíram que a força da Corrente das Malvinas respondia mais as variações prescritas da Corrente Circumpolar Antártica que a tensão cisalhante do vento.

Zavialov et al. (1998) desenvolveram um modelo inverso, baseado na equação de conservação do calor, para estudar a circulação superficial da Plataforma Continental Brasileira. Os resultados mostraram uma corrente para o norte (**N**) na plataforma interna durante todas as estações devido ao gradiente térmico da Pluma do Rio da Prata enquanto na plataforma externa um forte fluxo para o Sul (**S**) devido a Corrente do Brasil.

Soares (2003) através de observações e com o modelo **POM** estudou a influência das descargas de água doce nas correntes da Plataforma Continental Brasileira considerando as descargas do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos, vento, maré e campos de temperatura e

salinidade do Levitus . O autor analisou as correntes geradas por plumas separadamente e depois combinadas com os demais processos. O autor mostra que apesar das marés e das plumas de rio terem importante papel na hidrodinâmica, a força do vento é predominante.

1.4.3 Estudos relacionados ao Petróleo

Wetzel (1995) estudou a ocorrência de piche e resíduos sólidos na Praia do Cassino-RS durante um ano, avaliando sua concentração e variações espaço-temporais. O piche foi encontrado em baixas concentrações. A autora observou a ocorrência de piche no Verão, meados do Inverno e na Primavera.

Lages (2003), com o modelo de transformação de óleo “Automated Data Inquiry for Oil Spills” (ADIOS2), analisou para diferentes cenários, mudanças de viscosidade e densidade do óleo. O autor utilizou ventos de 5, 20 e 24 m/s e uma temperatura de 16° para inverno e 24° para o verão. O aumento da velocidade do vento diminui o tempo necessário para a estabilização do campo de massa . O tempo de estabilização variou de 2 horas quando o vento era de 5m/s até 10 horas quando o vento foi de 24m/s sendo que houve pouca variação com a mudança de temperatura.

Através de revisão bibliográfica e dados complementares de campo, *Pereira* (2005) classificou as praias do Rio Grande do Sul conforme a vulnerabilidade de cada região. O autor levou em consideração fatores como aspectos morfodinâmicos, susceptibilidade do ambiente, a sensibilidade dos organismos ao óleo e os fatores relacionados à capacidade de recuperação.

O autor concluiu que se não considerarmos as áreas urbanizadas, a região de abrangência dos concheiros e planícies arenosas próximas a Lagoa do Peixe são zonas de alta vulnerabilidade. Já as áreas do entorno da desembocadura da Lagoa dos Patos foram as menos vulneráveis. Com a inserção das localidades urbanas, o que se tem é um cenário bem diferente, com

as praias do litoral norte do estado passando a apresentar alta vulnerabilidade.

Proctor et al. (1994) utilizaram um modelo de partículas para simular um grande acidente que despejou quase um milhão de toneladas de óleo no Golfo da Arábia. O modelo era forçado com vento, correntes geradas por vento e maré, além disso, o autor incluiu algoritmos para representar os processos de evaporação, biodegradação e fotólise em cada partícula. O modelo foi comparado com observações aéreas e representou bem a localização do óleo no ambiente.

Sebastião e Soares (1995) fizeram uma revisão da modelagem dos processos de intemperismo incluindo os processos mais significantes e testaram diferentes métodos comparando os resultados obtidos com os da literatura existente. Os autores salientam que diversos processos importantes como a emulsificação e a dispersão são pouco entendidos.

Zhang et al. (1997) simularam manchas de óleo calculando a concentração de massa usando pesos gaussianos. Esse método aplicado junto com a equação de conservação da massa, permite o cálculo da concentração de óleo em qualquer ponto, diminuindo os erros causados pela discretização das manchas em partículas. O algoritmo possui dispersão gaussiana baseada nos coeficientes turbulentos.

Reed et al. (1999) fizeram uma revisão do estado atual da arte de modelagem de óleo. O autores mostraram algumas evoluções dos métodos de cada processo alcançadas nas últimas décadas. Os autores salientam a importância dos dados em tempo real para a melhora no desempenho dos modelos.

1.5 Características do Petróleo.

O petróleo é derivado de matéria orgânica de origem biológica, que depois de sedimentar em lamas argilosas é submetido a transformações aeróbias e anaeróbias por bactérias. O produto degradado, junto com os restos de bactérias, é mais tarde transformado sob alta pressão e a temperaturas que não excedem $150^{\circ}C$. As reações de transformação ocorrem

em sítios catalíticos presentes nas adjacências das superfícies das rochas em presença de água, ácido sulfúrico, enxofre e outros compostos inorgânicos. Durante esses processos o petróleo que está disperso, acumula-se por migração em reservatórios e finalmente formam os poços de petróleo .

O petróleo é uma mistura complexa de inúmeros compostos orgânicos, com predominância quase absoluta de hidrocarbonetos. Sua composição varia de acordo com a matéria orgânica de formação e os processos. Hidrocarbonetos contribuem de 50% a 98% da composição total. Além de carbono(80-87%) e hidrogênio(10-15%) os principais componentes do Petróleo são enxofre(0-10%), nitrogênio(0-15%) e oxigênio(0-5%). Além desses existem uma infinidade de metais traços como ferro, alumínio, níquel entre outros.

Devido a essas condições, cada óleo formado apresentará diferentes características, tanto físicas como químicas. Assim, uma definição precisa da composição do petróleo é impossível, uma vez que não existem dois óleos exatamente iguais .

Uma classificação bastante usada é o grau **API** que define o óleo em categorias conforme sua densidade. O Petróleo pode ser separado em diversas frações que possuem propriedades particulares .

As propriedades físicas e os parâmetros do óleo que influenciam nos processos sofridos pelo óleo no ambiente marinho são densidade, viscosidade, pressão de vapor, solubilidade em água, tensão interfacial, curva de destilação, viscosidade dinâmica e viscosidade cinemática. A seguir serão descritas algumas propriedades.

Densidade:

Num primeiro instante a densidade do óleo aumenta conforme os constituintes mais leves evaporam, embora dificilmente atinja a densidade da água. Esse efeito é parcialmente balanceado pelo aumento de temperatura e pelo ganho de calor latente. Incluindo todos os processos de intemperismo, em geral a densidade do óleo aumenta, principalmente devido a formação de emulsões com a água e associação com minerais em suspensão e matéria

orgânica.

A densidade tem um papel importante no transporte e transformações do óleo em geral. A diferença de densidade entre a água e o óleo determina a extensão em que a mancha fica submersa e o tempo de submersão das gotículas de óleo que podem ser dispersos verticalmente na coluna de água devido a ação de ondas e do vento. Aceita-se que a mancha de óleo intemperizada nunca chega a ter flutuabilidade neutra em relação a água.

Viscosidade :

A viscosidade é a propriedade dos fluidos correspondente ao transporte microscópico de quantidade de movimento por difusão molecular. Ou seja, quanto maior a viscosidade, maior a resistência do fluido ao movimento. A viscosidade pode ser quantificada em duas unidades, a viscosidade dinâmica ($Pa\ s^{-1}$) e a viscosidade cinemática (m^2s^{-1}). A viscosidade aumenta com o intemperismo e diminui com o aumento da temperatura. É uma variável importante no processo de espalhamento na fase gravitacional-viscosa e na emulsificação do óleo.

Pressão de vapor:

Pressão de vapor é a pressão exercida por um vapor quando este está em equilíbrio com o líquido que lhe deu origem. É uma propriedade física que depende do valor da temperatura. A pressão do vapor controla a evaporação e a concentração dos hidrocarbonetos no ar. A pressão de vapor é estimada pela lei de Raoult se conhecermos a composição do óleo.

Solubilidade em água:

A solubilidade do óleo em água é a medida da quantidade do óleo que ficará dissolvida na coluna de água. Essa porção corresponde a menos de 100ppm de toda a massa do óleo embora normalmente seja tóxica aos organismos marinhos.

1.5.1 Processos relacionados ao comportamento do petróleo no meio marinho.

Uma vez que grande quantidade de petróleo é introduzida no ambiente marinho, o óleo - que é menos denso e na sua maior parte imiscível em água - se espalha formando uma fina película na superfície formando as “manchas de óleo” (Fay, 1969). No ambiente ele estará suscetível ao transporte e transformações. Esse processos determinam o destino e as concentrações do contaminante.

Os processos atuam de forma diferente em cada tipo de óleo sendo regulados pelas propriedades físicas inerentes do óleo Clark (2001). Alguns são bem entendidos e possuem algoritmos eficientes para quantificar a mudança das variáveis que mudam ao longo do tempo. Entretanto outros ainda não são bem conhecidos e são de difícil previsão. Como o óleo é formado de diversos compostos com propriedades diferentes, alguns processos podem ser considerados como atuando de forma separada em cada fração do óleo. Os processos podem ser subdivididos em processos de transporte e transformação (intemperismo).

1.5.2 Processos de transporte.

Advecção A advecção é o processo que o óleo sofre devido a influência do vento e das correntes. O processo pode ser subdividido devido a causa do movimento como deriva de Stokes, correntes de Ekman, circulação de Langmuir, correntes geostróficas, correntes de maré, fluxos turbulentos entre outros.

Os processos dominantes na advecção do óleo dependem de fatores como o local do derrame, o tamanho do derrame ou mancha e o tamanho do sistema meteorológico atuante ou a escala onde a maior energia do sistema está concentrada. O tamanho da mancha de óleo em relação ao tamanho do sistema meteorológico vai determinar se o sistema atua na forma de dispersar a mancha (caso esta tenha escala menor que o sistema) ou transportar a mancha de forma intacta (caso o sistema seja maior que mancha) (Murray, 1982).

Para o cálculo do transporte de poluentes normalmente é usado a Equação 1, da advecção difusão. Sendo C a concentração do Poluente, t o tempo, V a velocidade, ∇ o operador diferencial espacial, E o coeficiente de difusão e S o termo fonte.

Porém existe uma infinidade de equações e algoritmos devido a variedade de poluentes e comportamento dos mesmos. (*Murray*, 1982; *James*, 2002). Os algoritmos usados para simular derrames de óleo diferem do método usado para outros poluentes (Equação 1) devido as propriedades particulares do óleo (*James*, 2002).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \cdot \nabla C = \nabla(\cdot E \nabla C) + S \quad (1)$$

Espalhamento O processo de espalhamento é resultante do equilíbrio dinâmico entre a força gravitacional, inércia, atrito, viscosidade e tensão superficial. De acordo com *Fay* (1969), o espalhamento pode ser dividido em três fases .

1. A fase inicial é determinada pela gravidade e a força inercial. Essa fase é a mais rápida e é desconsiderada nos modelos.
2. Na segunda fase o espalhamento é determinado pela gravidade e viscosidade do óleo.
3. A terceira fase é a mais demorada e dominante onde a tensão superficial é balanceada pela viscosidade.

O espalhamento é mais importante nas primeiras horas do derrame, depois de algumas horas a advecção passa a ser dominante no transporte.

1.5.3 Modelagem de manchas de óleo

Simular o transporte de manchas de óleo é uma área da modelagem de poluentes que atrai muita atenção devido aos catastróficos acidentes. Por causa do risco é também uma

área que requer modelagem operacional, para fornecer análise das condições em tempo real assim como previsões da trajetória e intemperismo das manchas. Para se ter bons resultados é necessário um modelo de boa resolução, na área de risco, implementado ou de fácil implementação (James, 2002).

Diferente de outros poluentes, o óleo normalmente não é simulado através da Equação 1. A grande maioria das simulações de manchas de óleo, é baseada em modelos lagrangeanos de partículas. Os modelos de partículas são forçados por velocidades de correntes calculadas de forma euleriana nos modelos hidrodinâmicos e por ventos.

Para resolver a dispersão (do óleo) turbulenta de menor escala são adicionadas velocidades randômicas (Hunter et al., 1993), normalmente para esse cálculo é levado em conta os coeficientes de dispersão turbulenta do modelo hidrodinâmico. Essa técnica faz com que as partículas fiquem mais dispersas. Essa técnica é usada em diversos trabalhos como Proctor et al. (1994), Zhang et al. (1997), Korotenko et al. (2000), Korotenko et al. (2004). Além disso os modelos, conhecidos, que estão hoje no mercado, como o OSCAR, OILMAP e o MOHID também usam traçadores lagrangeanos como base para o cálculo da advecção das manchas.

A primeira geração dos modelos de óleo normalmente incorporava uma ou duas das principais forçantes. Como, por exemplo, o trabalho de Fay (1969) que se limitava apenas ao processo de espalhamento. Esse modelo fica restrito a uma escala temporal pequena sob condições restritas. Sabe-se que em casos práticos como o acidente de “Chevron” ocorrido em 1970 (NOAA, 2001), a dispersão turbulenta e as correntes foram mais importantes que processos como espalhamento e evaporação.

Murray (1972), analisando diversas manchas no mesmo acidente conseguiu prever a geometria e a área das manchas usando apenas correntes, a difusão horizontal turbulenta e a taxa de despejo do óleo. Tanto a evaporação quanto o espalhamento foram desprezados.

Outra forma de modelagem que foi bastante usada, consistia no cálculo do transporte

como sendo apenas 3,5% a velocidade do vento. Para locais onde a ação de ondas não tem grande importância e o vento é fraco essa é uma boa aproximação (*Reed et al.*, 1999). Posteriormente, além do efeito do vento era adicionado correntes calculadas a partir das forçantes predominantes da região como por exemplo as correntes de maré residuais ou correntes de Ekman. Esse modelos são bons para estimar o local final das manchas e quão rápido elas irão se mover. Como esses modelos não consideram processos de dispersão e evaporação a massa final da manchas de óleo é superestimada.

Em presença da costa a simples adição vetorial das correntes de maré e correntes de Ekman se torna imprecisa para simular a hidrodinâmica (*Murray*, 1982). Com o aumento da complexidade da circulação da região, métodos mais robustos são necessários para a representação fiel dos fenômenos mais importantes da circulação. Uma simples adição dos vetores não leva em conta a interação das forçantes que deve ser considerada pra uma boa representação.

Com a evolução da computação e dos modelos hidrodinâmicos se tornou possível uma boa representação das correntes hidrodinâmicas, incluído as principais forçantes, inclusive em regiões mais costeiras. Além disso, os modelos de advecção estão sendo implementados junto aos modelos de intemperismo do óleo o que permite simular as manchas com melhor precisão. Os modelos mais conhecidos e usados não possuem código livre e normalmente são usados por empresas que compram as licenças para realizar licenciamentos ambientais.

Modelos com algoritmos mais simples, chamados de resposta rápida, são usados logo após o acidente com dados de vento e correntes no instante do acidente. Estudos prévios normalmente usam modelos determinísticos estudando derrames sob condições extremas e modelos probabilísticos para o estudo das componentes sazonais. O estudo prévio das condições oceanográficas e meteorológicas do local e do comportamento do óleo no mesmo ajuda na previsão do destino do óleo e na implementação dos modelos de resposta rápida.

Em 1993 aconteceu um acidente nas Ilhas de Shetland, na Escócia, que ficou conhecido

como Braer (*Harris, 1995*). Na época, não havia no local grupos capazes de oferecerem previsões do destino do óleo. Comunidades estrangeiras deram suporte implementando diversos modelos na região embora nenhum conseguisse reproduzir o destino de forma satisfatória. O autor atribui a inexatidão das previsões à falta de informação sobre as propriedades do óleo e velocidade de descarga, falta de medições físicas do local para comparação entre outros (*Proctor e Turner, 1995*). O incidente foi catastrófico devido as condições .

2 Metodologia

Nesse trabalho foram realizadas simulações probabilísticas com um modelo lagrangeano de transporte de óleo baseado na movimentação de partículas. Todas as simulações foram realizadas representando o verão do ano de 2001. A área de estudo foi discretizada em uma grade numérica **2-D** para a implementação do modelo de óleo. Devido a complexidade da hidrodinâmica do ambiente esse trabalho irá simular apenas a circulação de verão sendo esta é a estação quando há o maior número de pessoas usufruindo dos balneários.

O modelo de óleo foi forçado com correntes e com ventos. O destino final do óleo foi analisado e discutido em relação as suas forçantes. Para a visualização dos cenários probabilísticos das posições finais foram calculados os campos de massa das partículas baseados numa distribuição gaussiana conforme *Zhang et al.* (1997). Nesse experimento foram usadas 47.360 partículas.

Foram também determinados cenários probabilísticos da trajetória do óleo simulando derrames contínuos com 10 dias de duração. Nos cenários probabilísticos das trajetórias foram considerados as posições e o número de partículas que passavam em cada elemento de grade em todos os instantes de tempo. Foram simulados 175 derrames com intervalo de 10 horas entre cada um. Para cada um dos derrames foram usadas 7680 partículas.

As correntes usadas neste trabalho são provenientes de um modelo numérico hidrodinâmico **3-D**. A discretização horizontal da grade do modelo hidrodinâmico é igual a do modelo de óleo. Os ventos usados neste trabalho são provenientes de análises de um modelo atmosférico global que tem a resolução espacial diferente dos modelos anteriormente citados. As correntes e os ventos serão analisados em diferentes pontos da área de estudo para se estimar a importância dessas forçantes no transporte de óleo na região.

Os dados das análises do modelo atmosférico foram comparados com os dados da bóia de registro 32056(**ARGOS**) do Programa Nacional de Bóias (**PNBÓIA**) que está

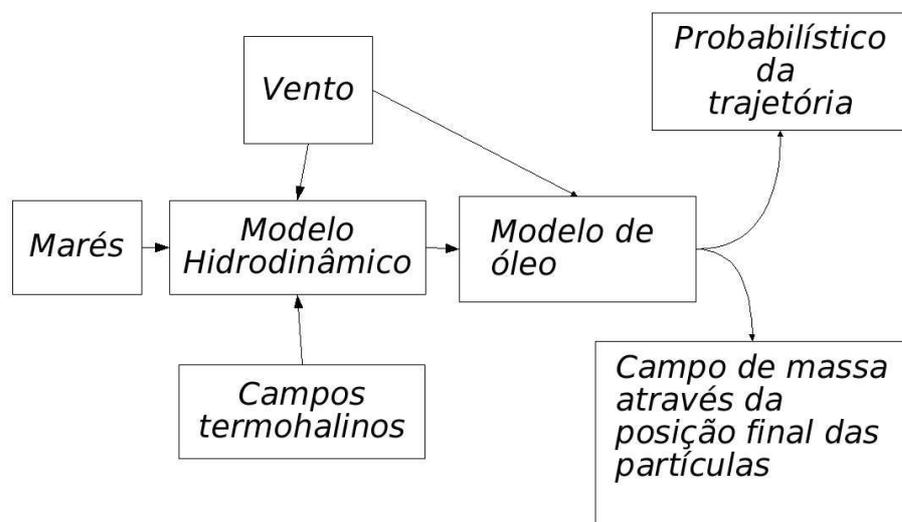


Figura 9: Fluxograma esquemático da implementação dos modelos.

localizada em $32,86^{\circ}S$; $050,8^{\circ}W$. A bóia possui dois sensores (anemômetros RM Young 05106) posicionados nas alturas de $3,95$ e $4,95m$ acima da superfície do oceano. Os dados da bóia têm periodicidade de uma hora, sendo o dado definido pela média dos $10min$ antecessores a medida.

O modelo hidrodinâmico **3-D** foi forçado com:

- Vento variável no tempo e espaço das análises de um modelo atmosférico.
- Maré de um modelo global.
- Campos de temperatura, salinidade e elevação da superfície provenientes de um modelo oceânico global(**OCCAM**).

Um fluxograma esquemático da implementação dos modelos é apresentado na Figura 9.

Os resultados do modelo hidrodinâmico foram validados com dados de uma régua graduada localizada na Estação dos Práticos da Barra de Rio Grande ($32,13^{\circ}S$; $52,10^{\circ}N$).

Os dados são registrados por um observador a cada uma hora.

O vento foi multiplicado por 0,035. Esse valor está entre os valores sugeridos pela literatura (*Murray*, 1982; *Reed et al.*, 1999; *Fernandes*, 2001). O vento multiplicado por 0,035 será chamado daqui em diante de contribuição do vento. Além disso a contribuição do vento foi decomposta na componente ortogonal a linha da costa(**OC**) e na componente paralela a linha da costa(**PC**).

Foram escolhidos 5 pontos da grade (Figura 10) para a análise de séries temporais das correntes e dos ventos que adiante serão referenciados no texto como pontos de análise, sendo que três pontos são mais costeiros, um ponto está localizado próximo a desembocadura da Lagoa dos Patos (**P2**; $-32, 31^{\circ}; -052, 16^{\circ}$), um ao Norte próximo a Tramandaí(**P3**; $-30, 55^{\circ}; -050, 16^{\circ}$) e um ao Sul(**P1**; $-32, 27^{\circ}; -052, 64^{\circ}$). Um dos pontos que restaram está no talude, no local dos blocos licitados pela ANP (**P5**; $-32, 87^{\circ}; -051, 58^{\circ}$) e o outro(**P4**; $-32, 45^{\circ}; -050, 19^{\circ}$) é intermediário ao **P5** e ao **P2** . As inclinações da linha de costa usadas para a decomposição das correntes e da contribuição do vento nos pontos de análise foram 35° , 45° , 20° , 45° e 0° respectivamente para os pontos **P1**, **P2**, **P3**, **P4**, e **P5**.

2.1 Grade numérica do modelo hidrodinâmico.

A grade usada nas simulações é ortogonal-curvilinear tendo 360 linhas e 250 colunas . Os elementos variam entre $3,9km$ até $1,7km$ na direção normal a costa e entre $4,2km$ até $2,5km$ na direção paralela a costa. A batimetria usada nas simulações é proveniente do banco de dados Gebco (General Bathymetric Chart of the Oceans) e tem resolução de 1 minuto.

A batimetria foi interpolada para os pontos da grade (Figura 11) através do método de triangulação de Delaunay. Esse método foi usado para interpolar espacialmente todos os campos bidimensionais deste trabalho. Para minimizar os erros causados pela coordenada

sigma (*Mellor e Blumberg, 1985; Mellor et al., 1999*), a batimetria foi filtrada a partir do talude(200m), região onde a resolução da grade foi aumentada pelo mesmo motivo.

O filtro usa uma média ponderada entre um perfil exponencial e a batimetria real. Todos os pontos com profundidade menor que 10m foram considerados como 10m. E todos os pontos com profundidades maiores que 2000m foram considerados como 2000m. A batimetria interpolada é mostrada na Figura 10.

A grade tem os contornos Norte, Sul e Leste abertos enquanto o contorno Oeste é fechado. No contorno Norte da grade a batimetria foi mantida constante nas 40 últimas linhas. No contorno Sul elas foram mantidas constantes nas últimas 15 linhas, técnica usada para melhorar a eficiência das condições aplicadas nos contornos abertos.

2.2 Modelo hidrodinâmico de Princeton(POM).

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

O código do modelo é de domínio público, e está disponível no endereço <http://www.aos.princeton.edu>. Por ser de domínio público, o **POM** vem sendo utilizado por milhares de usuários, os quais aplicam o modelo para as mais diversas situações, envolvendo desde hidrodinâmica de ambientes lagunares de pequena escala, até hidrodinâmica de bacias oceânicas inteiras. As características responsáveis por tal versatilidade são descritas a seguir.

O **POM** é um modelo de diferenças finitas, que trabalha com superfície livre e com a possibilidade de simulações bi e tridimensionais. Em simulações tridimensionais o modelo decompõe as velocidades em suas componentes barotrópicas (bidimensionais) e baroclínicas (tridimensionais). A elevação da superfície e as velocidades barotrópicas são

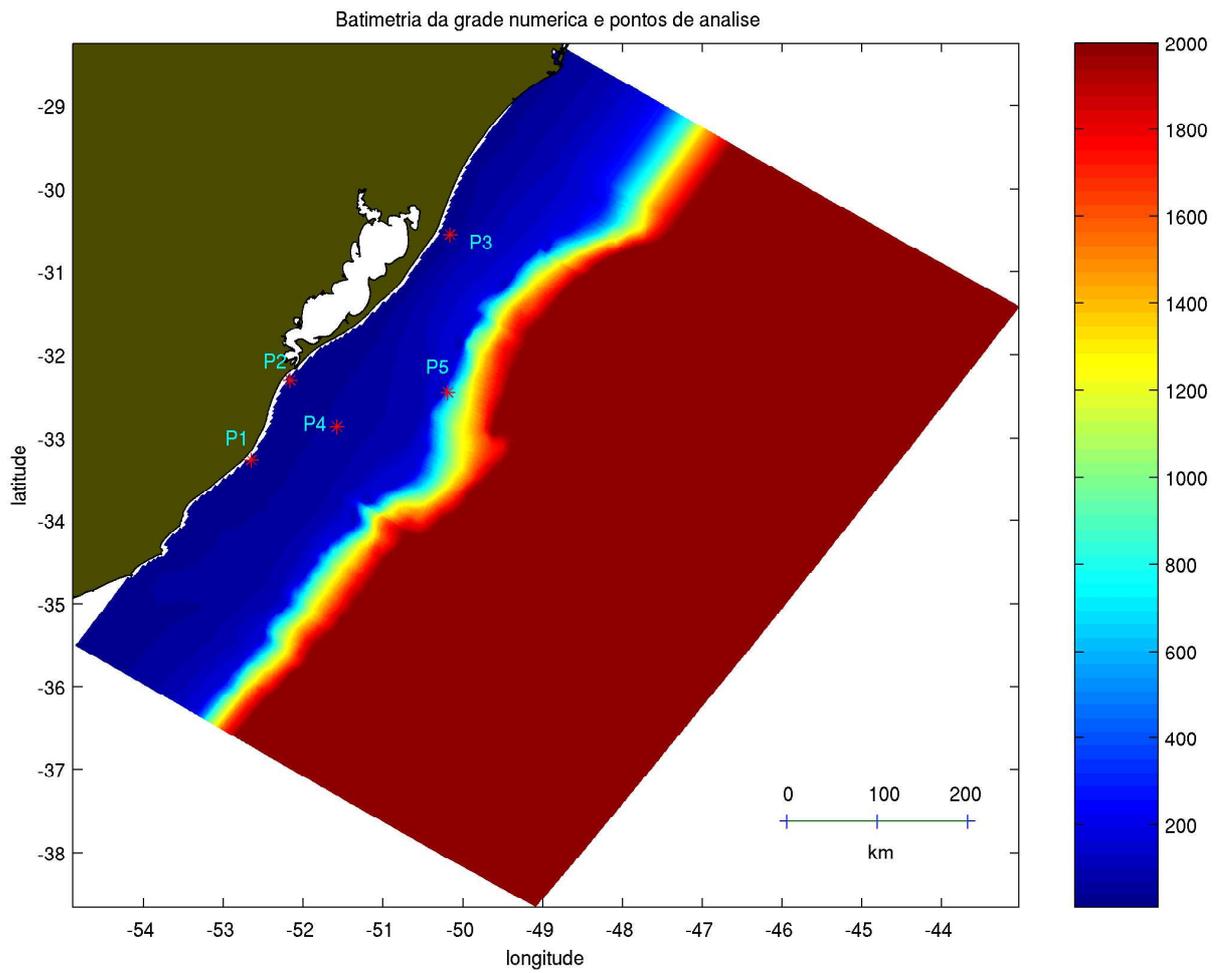


Figura 10: Batimetria(m) interpolada e filtrada. Pontos de análise das séries temporais em asteriscos vermelhos.

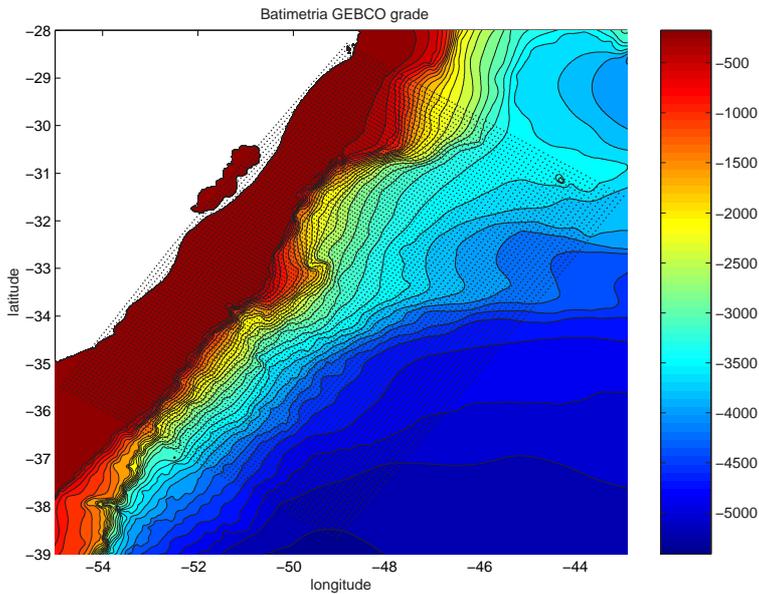


Figura 11: Batimetria(m) da área de estudo proveniente do **GEBCO** e os limites da grade mostrados a cada três pontos.

resolvidas separadamente em um módulo conhecido como módulo externo. As velocidades baroclínicas são resolvidas no módulo interno. Também fazem parte do módulo interno as variáveis temperatura, salinidade, energia cinética turbulenta e a escala da energia cinética turbulenta. Essa técnica de separação das velocidades em módulo externo e interno, conhecida como "mode-splitting", permite a utilização de passos de tempos diferentes para cada módulo, sendo que o módulo interno, que é computacionalmente o mais pesado, utiliza um passo de tempo mais lento. Periodicamente os módulos são ajustados entre si para que não ocorra divergência das respectivas soluções.

Uma das características do **POM**, que corrobora bastante para sua versatilidade, é o uso de coordenadas sigma. A coordenada sigma substitui a coordenada cartesiana usualmente utilizada na direção vertical. Sigma é literalmente definida como uma porcentagem da coluna d'água, variando entre 0, na superfície, e -1 no fundo. Ao invés de trabalharmos com distâncias verticais, trabalhamos com níveis cujas espessuras dependem da profundidade local, sendo que o mesmo número de níveis é utilizado em todos os pontos do domínio.

Assim, níveis mais finos são definidos em áreas rasas da grade numérica, enquanto que níveis mais espessos aparecem nas regiões mais profundas. Essa característica permite boa reprodução da hidrodinâmica de áreas com grande variação topográfica, como a região de quebra de plataforma e talude. No entanto, a coordenada sigma apresenta um erro, que se manifesta nas regiões de grandes gradientes batimétricos como um gradiente de pressão espúrio, o qual causa velocidades numéricas no modelo. Tal erro é minimizado utilizando-se elementos de grade menores nas regiões de grande variação topográfica.

O modelo utiliza-se das aproximações de Boussinesq e hidrostática. A mistura turbulenta vertical é resolvida separadamente em um sub-modelo interno, conhecido como o esquema de fechamento turbulento, o qual foi desenvolvido por *Mellor e Yamada* (1982). Nesse esquema, coeficientes de mistura vertical são calculados a cada passo de tempo, de modo que os mesmos variam espacial e temporalmente de acordo com a dinâmica do meio.

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

Além dos aspectos específicos acima mencionados, o **POM** adota soluções largamente utilizadas na literatura, tais como gradeamento do tipo C de Arakawa, possibilidade de implementação de grades curvilíneas e possibilidade de implementação da aproximação do plano β .

2.3 Forçantes da simulação hidrodinâmica.

2.3.1 Os ventos.

O modelo hidrodinâmico é forçado com o vento de 10m acima do solo das análises do modelo atmosférico global (**MGCA**). O vento usado no **POM**, assim como no modelo de óleo, tem variação no tempo e no espaço. O vento é interpolado espacialmente (triangulação de Delaunay) para a grade do **POM**, uma vez que os modelos têm resoluções espaciais diferentes. O vento é atualizado a cada 6 horas na modelagem hidrodinâmica e interpolado linearmente para cada passo de tempo do **POM**. O momentum do vento é transferido para o **POM** através da condição de contorno da superfície no primeiro nível sigma.

Análises do modelo atmosférico global (MCGA).

As análises do **MGCA** são provenientes do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (**CPTEC/INPE**). Elas têm resolução de 200X200km as 00, 06, 12, e 18Z e são geradas a partir de dados observados e pré-processados com análises objetivas. Elas são usadas como condições iniciais nas previsões numéricas operacionais do **MGCA**. Os dados usados para gerar as análises e uma descrição mais detalhada sobre o **MGCA** podem ser encontrados no endereço eletrônico <http://www.cptec.inpe.br>

2.3.2 Os campos de temperatura, salinidade e elevação.

Para inicialização do **POM** (campos de temperatura, salinidade e elevação da superfície) foram usadas saídas do modelo de circulação global **OCCAM** do dia 2925 de modelagem. Os resultados do modelo global foram interpolados para a grade numérica e são mostrados respectivamente nas Figuras 12, 13 e 14. Eles foram usados como condições iniciais de

elevação da superfície, temperatura e salinidade do modelo e também nas condições de contorno aberto de relaxação das mesmas variáveis.

2.3.3 Modelo global OCCAM.

O **OCCAM** (“Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling Project”) é baseado no modelo de circulação geral de Bryan-Cox-Semtner. As “equações primitivas” do oceano são resolvidas por diferenças finitas usando o método conhecido como “leap-frog” em uma grade do tipo Arakawa-B. O modelo usa as aproximações hidrostática e de Bousinesq para fluidos incompressíveis.

Nesse trabalho foi usado o primeiro experimento principal que tinha resolução horizontal de 0.25 graus com 36 níveis verticais. O tempo de simulação foi 14 anos(5119 dias), os autores recomendam para análise os resultados a partir do dia 2922 até o dia 4383 de simulação.

O **OCCAM** foi inicializado e forçado com a média anual dos campos de temperatura e salinidade dos bancos de dados Levitus 82 e Levitus 94. O “stress” do vento é proveniente das médias mensais do EWCMF (1886 a 1988).

2.3.4 A maré.

Os mapas de amplitude e fase do **FES 9.5** foram interpolados para os pontos de contornos abertos do **POM**. Nesse trabalho são usadas 5 componentes de maré mostradas na Tabela 2. Assim as amplitudes e as fases das marés são forçadas nos contornos abertos através da condição de contorno para elevação do nível.

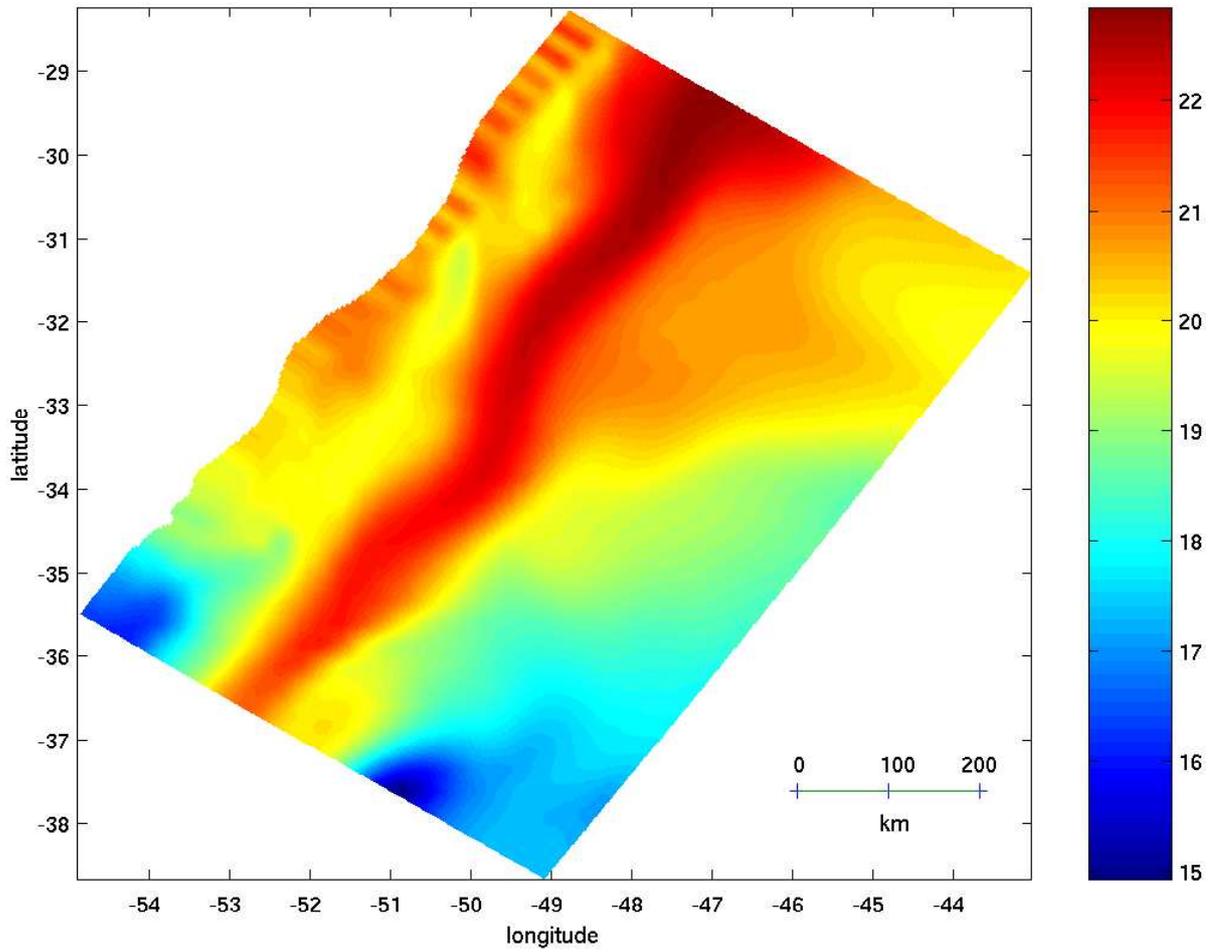


Figura 12: Campo inicial de temperatura($^{\circ}C$), do modelo global OCCAM, no primeiro nível sigma interpolado para a grade numérica.

Tabela 2: Componentes de maré usadas para forçar o modelo hidrodinâmico e os respectivos períodos .

Componentes da maré	Período
M2	28,98h
N2	28,43h
S2	30,00h
O1	13,94h
K1	15,04h

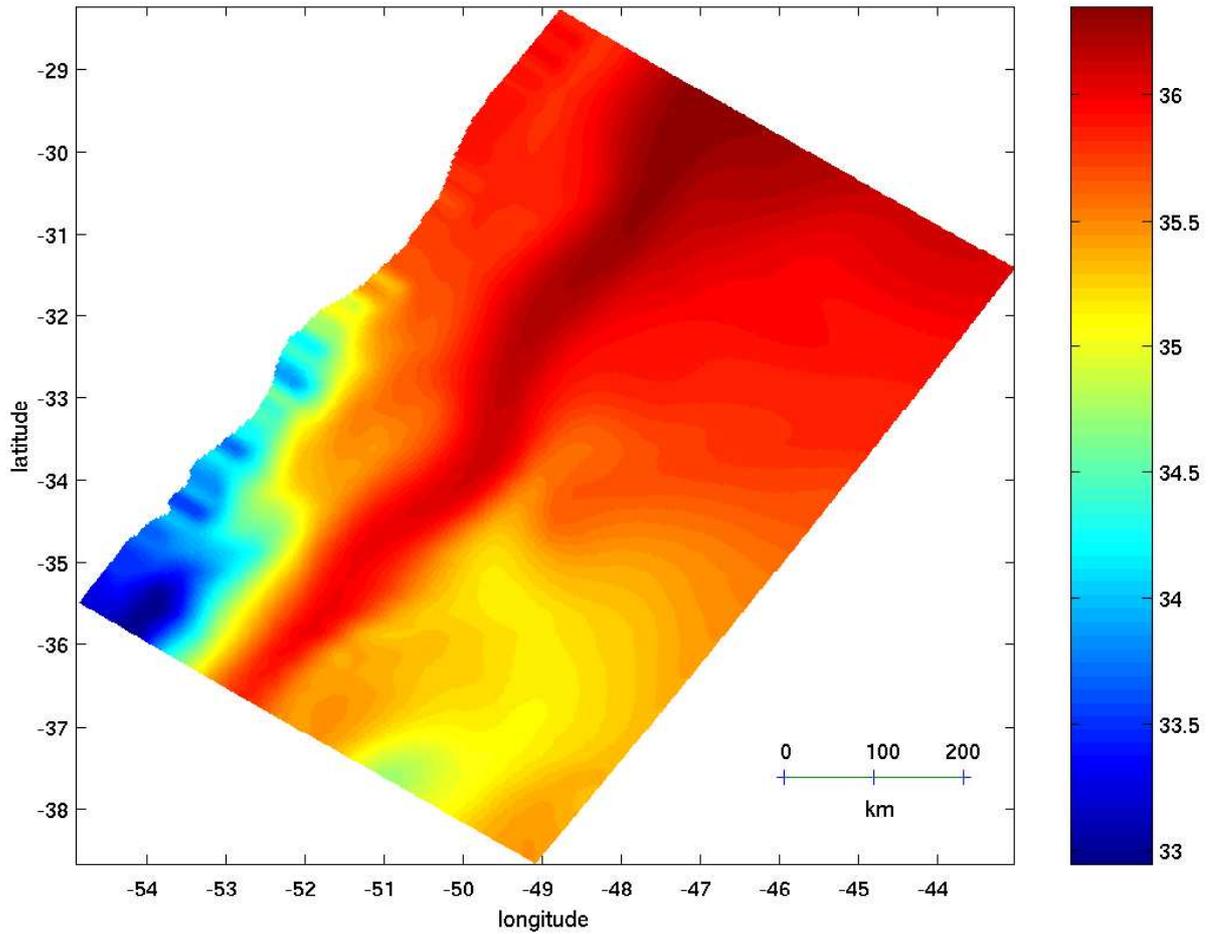


Figura 13: Campo inicial de Salinidade, do modelo global OCCAM, no primeiro nível sigma interpolado para a grade numérica .

Tabela 3: Coeficientes e parâmetros usados no modelo hidrodinâmico.

Parâmetros do POM	Valor usado
Coeficiente de difusividade Smagorinsky (horcorn)	.2
Parâmetro suavizador temporal do filtro de Asselin(α)	0.1
Coeficiente de difusão molecular(umol)	2.e-5
Número de Von-Karman(kappa)	0.4
Rugosidade de fundo(z0b)	0.01
Número de Prandtl Turbulento horizontal inicial(tprni)	1
Coeficiente de viscosidade cinemática inicial(AAM)	1
Esquema de advecção	centrado
Coef. do esquema trapezoidal(eta) pra o gradiente de pressão	0.225
Freq. de atualização de termos advectivos(modos externo)	5
Mínimo valor do termo de fricção	2.5e-3

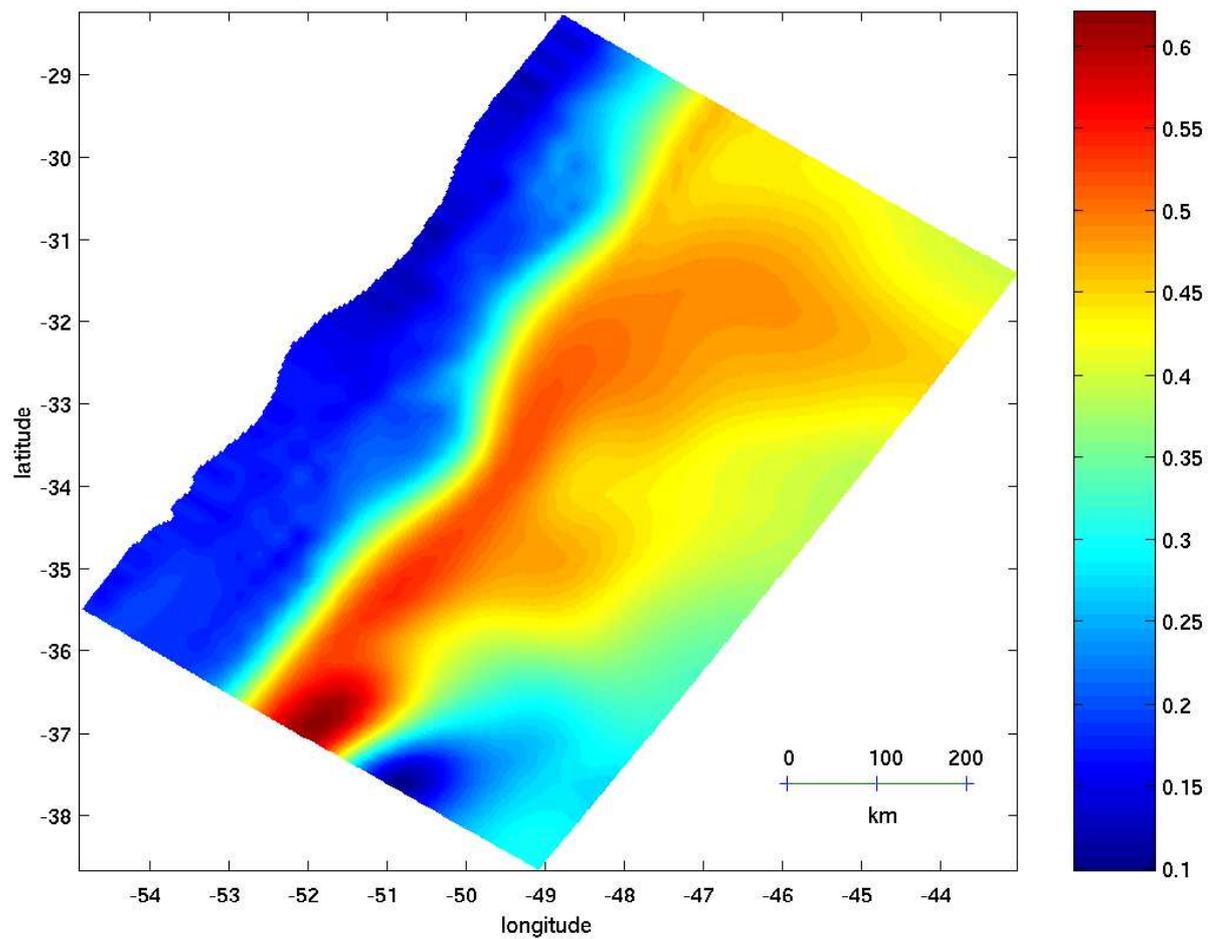


Figura 14: Campo inicial de elevação do nível(m), do modelo global OCAAM, interpolado para a grade numérica .

Modelo global de marés (FES95.2).

Os dados de amplitude e fase das marés, usadas para forçar o **POM**, são provenientes do modelo global **FES** (“Global Finite Element Solution”) versão 5.2.

O modelo **FES** foi forçado assimilando dados de altimetria do Topex/Poseidon, implementados em um modelo numérico para a simulação de marés. O modelo resolve as equações hidrodinâmicas pelo método de solução de elementos finitos conforme *LeProvost et al.* (1994) na versão 94.1. O modelo foi desenvolvido pela equipe de modelagem de Grenoble.

O **FES** 95.2 tem 0.5° de resolução espacial em diversas componentes, a Tabela 2 mostra as 5 componentes que foram usadas no modelo hidrodinâmico deste trabalho.

2.4 Simulação Numérica Hidrodinâmica.

O **POM** foi forçado com ventos do **MGCA**, temperatura e salinidade do **OCCAM** e maré do modelo **FES**. Foi usado a aproximação do plano f . A Tabela 3 mostra os parâmetros e os coeficientes que foram usados na modelagem. O modelo têm 23 níveis sigmas sendo eles: 0.; -0,01; -0,025; -0,05; -0,1; -0,15; -0,2; -0,25; -0,3; -0,35; -0,4; -0,45; -0,5; -0,55; -0,6; -0,65; -0,7; -0,75; -0,8; -0,85; -0,9; -0,95; -1.

O experimento durou 3 meses a partir do dia primeiro de janeiro ao final de março. O modelo hidrodinâmico comparado com observações de elevação do nível que foram realizados com uma régua dentro do canal que comunica a Lagoa dos Patos com o mar.

2.4.1 Condições de contorno de fundo e superfície.

Foram desprezadas as trocas de sal e de calor na superfície e no fundo assim como a radiação por ondas longas. Isso significa que:

- Não há variações na salinidade devido a precipitação e evaporação.
- Não há troca de calor entre o oceano e a atmosfera.

As condições de troca de momento entre o oceano e atmosfera (*wflux*) são calculadas como o negativo do atrito do vento dividido pela massa específica da água (ρ_{agua}), calculado pela equação 2:

$$wflux = -\frac{\rho_{\text{ar}}C_D U_{10}^2}{\rho_{\text{agua}}} \quad (2)$$

Sendo a massa específica do ar ρ_{ar} , U_{10} a velocidade do vento em 10m e C_D o coeficiente de arrasto que é função do módulo do vento calculado pelas equações 3 e 4, segundo *Yelland e Taylor (1996)* e *Yelland et al. (1998)*, recomendado por *Stewart (2004)*.

$$1000C_D = 0,5 + 0,071U_{10} \quad (U_{10} > 6ms^{-1}) \quad (3)$$

$$1000C_D = 0,5 + 0,071U_{10} \quad (U_{10} > 6ms^{-1}) \quad (4)$$

O coeficiente de arrasto é calculado através do termo quadrático da equação 5. Sendo δz a altura do fundo até o nível σ seguinte e z_0 a rugosidade do fundo.

$$C_D = \frac{0,16}{(\log(\frac{\delta z}{z_0}))^2} \quad (5)$$

2.4.2 Condições de contorno abertas modo externo.

Uma das dificuldades persistentes em simular plataformas continentais e estuários está associada às condições de contorno abertas (*Blumber e Khanta, 1985*). Para cada variável foram usadas condições de contorno específicas. A simulação de vários processos exige uma combinação de condições de contorno, para que os modos transientes gerados pelo modelo possam sair através dos contornos e simultaneamente processos externos como a maré e as correntes de larga escala possam ser forçados através dos contornos (*Soares,*

2003).

Elevação da superfície:

Para essa variável usou-se a condição de contorno de *Blumber e Khanta* (1985). O tempo de ajuste, usado no cálculo dos valores de contorno, foi de 120s. Os valores de maré(FES 95.2) eram somados aos dados de nível do mar do **OCCAM**.

Velocidades:

Nas velocidades do modo externo foi aplicado a condição de contorno radiativa de *Sommerfeld* (1949) a qual utiliza velocidades de ondas longas.

Para as velocidades do modo interno foi usado a condição de contorno radiativa de *Orlanski* (1976) modificada por *Chapman* (1985). Essa condição calcula a velocidade de radiação a partir dos valores de velocidade no interior da grade.

Temperatura e salinidade e elevação do nível do mar:

Na temperatura e salinidade utiliza-se uma relaxação espacial (*Martinsen e Engerdahl*, 1987) usando 11 linhas nos contornos e um tempo de ajuste de 12000s. As variáveis foram relaxadas para os valores do modelo **OCCAM**, permitindo a representação da Corrente do Brasil(**CB**).

2.5 Modelo de óleo.

O código do modelo de óleo é escrito na linguagem **FORTRAN77**. O modelo é baseado no transporte lagrangeano de partículas (*Hunter et al.*, 1993; *Sebastião e Soares*, 1995; *Reed et al.*, 1999; *Korotenko et al.*, 2000). O modelo simula apenas o transporte do óleo, portanto não leva em conta as transformações sofridas pelo óleo. Isso significa que há conservação da massa e do volume e a viscosidade do óleo é constante ao longo do tempo.

O modelo desconsidera a dispersão vertical do óleo sendo que a posição do óleo na coluna de água é referenciada ao nível da superfície e é constante ao longo da simulação. A dispersão horizontal de menor escala não é considerada no modelo de óleo portanto não há o uso de números randômicos nos algoritmos para o cálculo da posição das partículas que normalmente é usado nos modelos de óleo. A dispersão horizontal das partículas no modelo é causada apenas devido as correntes e ao vento. Os processos levados em consideração são espalhamento e advecção horizontal devido a ventos e correntes.

O processo de espalhamento é mais rápido e menos importante para os objetivos desse trabalho, devido a escala espacial e temporal. O espalhamento determina a área que as partículas irão ocupar no início da simulação. Depois desse primeiro instante as partículas ficam sujeitas apenas a advecção dos ventos e correntes.

2.5.1 Espalhamento

O espalhamento do modelo é calculado de forma analítica usando um algoritmo similar ao de *Fay* (1969) . O cálculo foi feito com a Equação 6, que foi desenvolvida por *Lehr et al.* (1984) porque a fórmula clássica de Fay subestimava o tamanho das manchas.

O efeito do vento foi desprezado no espalhamento. A área final (A) que é usada no modelo é aproximadamente $6.35e + 6m^2$, que é resultante de um derrame com volume de óleo (V) de $250m^3$; espalhamento com tempo de duração (t) de três dias; sendo a densidade do óleo (ρ_o) de $0,85kg\ m^{-3}$ e a da água do mar(ρ_w) $1kg\ m^{-3}$. As partículas são dispostas nessa área igualmente espaçadas na forma de um quadrado a cada duas horas de modelagem.

$$A = 2227 \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \right) V^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} + 40 \left(\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \right)^{\frac{1}{3}} V^{\frac{1}{3}} W^{\frac{4}{2}} \quad (6)$$

2.5.2 Advecção por vento e correntes

As forçantes usadas para o cálculo da advecção horizontal serão as velocidades de correntes do **POM** e os vento das análises do **MGCA**. Uma nova posição de cada partícula a cada passo de tempo é calculada através da equação 7. Sendo Ds o deslocamento de cada partícula, W a velocidade do vento interpolada linearmente no tempo no ponto de grade da partícula, V a velocidade da corrente no ponto de grade, dt a variação temporal.

$wcoef$ é o coeficiente parametrizado do vento que segundo a literatura (*Murray*, 1982; *Reed et al.*, 1999; *Fernandes*, 2001) pode variar de 2 a 4% e nesses valores estão parametrizados o arrasto do vento sobre o óleo e a deriva de Stokes (*Korotenko et al.*, 2000), muitas vezes esse é um dos fatores mais importantes na determinação da trajetória superficial (*Sebastião e Soares*, 1995).

$$Ds = (W * wcoef + V) * dt \quad (7)$$

O modelo não possui algoritmos para determinar o comportamento do óleo quando ele chega na praia (“beached”). Uma vez em terra as partículas param de se movimentar. O mesmo acontece nos contornos abertos do **POM**.

2.5.3 Simulações do modelo de transporte de óleo baseado em partículas.

O modelo de óleo é inicializado após 200h, que foi aproximadamente o tempo de aquecimento do **POM**. Para identificar o destino do óleo foi realizado uma simulação longa de um derrame contínuo. Essa simulação também permitiu verificar a movimentação do óleo com a passagem dos sistemas frontais. A cada duas horas de modelagem foi introduzido $250m^3$ de óleo numa mancha já espalhada de forma homogênea e discretizada em 64 partículas. Foi usado um total de 47360 partículas. O modelo de transporte de óleo foi parado depois que todas as partículas atingiam a terra ou os contornos abertos. Com a

posição final das partículas foi calculado o campo de massa do óleo para cada elemento de grade, através de pesos gaussianos que foram atribuídos a cada partícula segundo *Zhang et al.* (1997).

Para calcular a probabilidade da trajetória das partículas foi realizado 140 experimentos com 10 dias de duração cada. Em cada um dos experimentos, a cada duas horas de modelagem, foi introduzido $250m^3$ de óleo numa mancha já espalhada de forma homogênea e discretizada em 64 partículas. O derrame de óleo foi contínuo durante os 10 dias. A partir das 200h, a cada 10h de modelagem hidrodinâmica era iniciado um dos 140 experimentos.

O modelo de óleo primeiramente foi implementado como uma sub-rotina do **POM**, simulações que serão chamadas de **M1**. As novas posições das partículas eram calculadas a cada passo de tempo interno do **POM**. Também foi testado um modelo de óleo que era forçado com os resultados do **POM**. Nesse caso as posições das partículas foram calculadas a cada 2 horas de modelagem hidrodinâmica, simulações que serão chamadas **M2**. Em ambos o vento era atualizado a cada seis horas e interpolado linearmente no tempo em que a nova posição das partículas é calculada.

Os derrames foram simulados em três pontos diferentes. Um ponto localizado próximo aos lotes que estão sendo leiloados(**P5**), um ponto próximo a desembocadura do estuário(**P2**), e um ponto próximo as monobóias de Tramandaí(**P3**).

Foram realizadas simulações usando correntes em 1m abaixo da superfície. Para representar um óleo mais pesado foi realizada uma simulação usando correntes de 3m abaixo da superfície e sem o efeito direto do vento. Nesse experimento a fonte de óleo estava localizada no **P2**. Dessa forma pode-se avaliar o efeito que a dispersão vertical causaria caso fosse implementada no modelo de óleo.

M1-Simulações com atualização das correntes igual ao passo de tempo interno do POM.

1. Fonte próxima a desembocadura (**P2**), efeito direto do vento 3,5%, posição do óleo na coluna de água de $1m$ abaixo do nível.
2. Fonte próxima as monobóias de Tramandaí (**P3**), efeito direto do vento 3,5%, posição do óleo na coluna de água de $1m$ abaixo do nível.
3. Fonte próxima a desembocadura, sem o efeito direto do vento, posição do óleo na coluna de água de $3m$ abaixo do nível.
4. Fonte próxima aos blocos leiloados pela **ANP (P5)**, efeito direto do vento 3,5%, posição do óleo na coluna de água de $1m$ abaixo do nível.

M2-Simulações com atualização das correntes a cada duas horas do POM

1. Fonte próxima a desembocadura, efeito direto do vento 3,5%, posição do óleo na coluna de água de $1m$ abaixo do nível.
2. Fonte próxima aos blocos, efeito direto do vento 3,5%, posição do óleo na coluna de água de $1m$ abaixo do nível.

3 Análise do vento.

3.1 Comparação das análises do modelo atmosférico global com os dados da bóia(PNBÓIA).

Na Figura 15 estão graficados as séries temporais dos sensores **1** e **2** da bóia contra as análises do **MGCA**, nas duas componentes do vento **u** e **v**. A Figura 16 mostra os diagramas de dispersão e a reta de ajuste entre as análises do **MGCA** e as observações. Todas as variáveis tiveram distribuição normal. A Tabela 4 mostra os coeficientes de correlação linear(r), o coeficiente de determinação(r^2), os coeficientes angulares da reta padrão(b_1), os interceptos da reta padrão(b_0) e os erros padrões das estimativas(Se) entre as análises e as observações.

Os coeficientes de correlação, da Tabela 4, mostram que as observações e as análises do **MGCA** estão altamente correlacionados, estando todos acima dos valores críticos dos coeficientes de correlação de Pearson a um nível de significância 0,01. Os coeficientes de determinação mostram que as análises explicam mais de 90% da variação total das observações.

Também é possível verificar que o modelo está melhor ajustado ao sensor **2** da bóia. Sendo que os erros médios do sensor **2** são $1,86ms^{-1}$ e $1,97ms^{-1}$ para as componentes **u** e **v** respectivamente e para o sensor **1** são $2,07ms^{-1}$ e $2,37ms^{-1}$. O sensor **2** da bóia é melhor ajustado as análises porque está posicionado mais alto($4,95m$) que o sensor **1**($3,95m$). O vento das análises do **MGCA** é posicionado na altura de $10m$ acima do solo.

A qualidade do vento usado no modelo de óleo é importante uma vez que é um fator, muitas vezes, predominante nas simulação da trajetória do óleo (*Sebastião e Soares, 1995*).

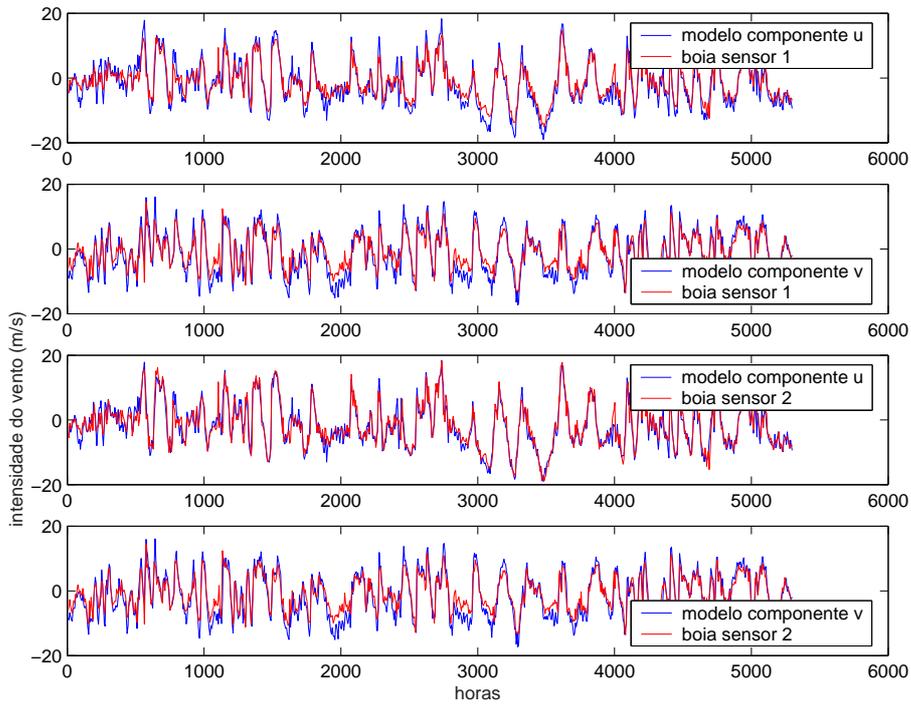


Figura 15: Séries temporais dos dados de vento(ms^{-1}) da bóia contra os dados de vento(ms^{-1}) das análises do modelo atmosférico global.

Tabela 4: Parâmetros estatísticos entre as análises do modelo atmosférico global e as observações.

Os parâmetros foram calculados conforme *Triola* (2003).

	r	r ²	b1	b0	Se
u1	0,943	0,889	0,758	0,088	2,07
u2	0,942	0,887	0,935	0,194	1,86
v1	0,935	0,875	0,702	0,225	2,374
v2	0,935	0,873	0,904	0,287	1,975

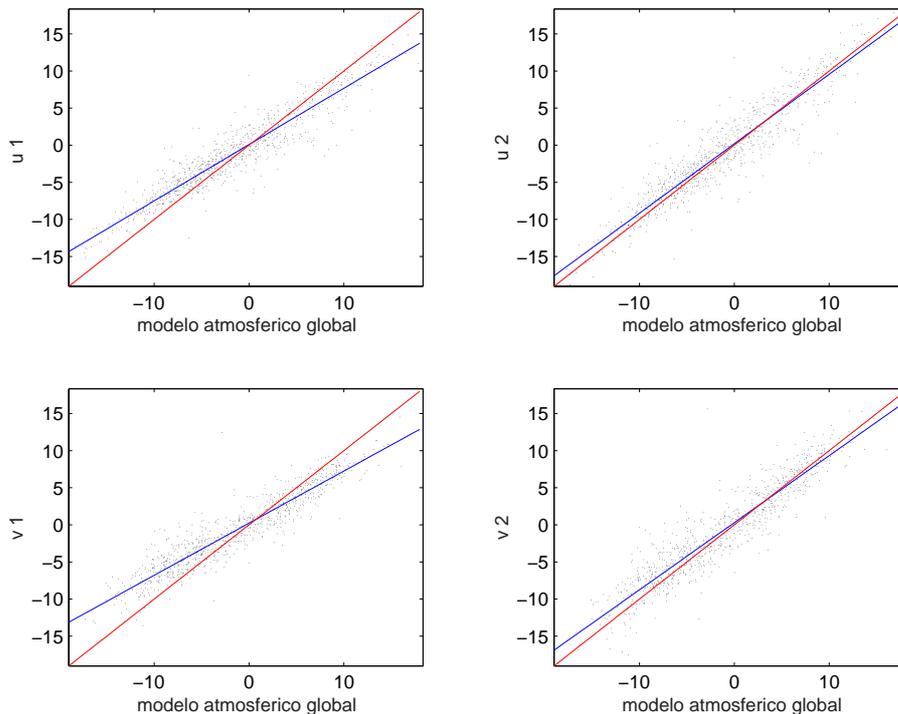


Figura 16: Diagrama de dispersão de vento(ms^{-1}) das análises do **MGCA** contra a bóia nos sensores 1 e 2 nas componentes u e v. Em azul a reta de regressão linear entre as observações e o modelo.

3.2 Vento usado para forçar o POM .

A Figura 17 mostra as séries temporais do vento usadas para forçar o **POM**, para cada ponto de análise, as localizações de cada ponto foram previamente estabelecidas na metodologia na Figura 10. As Figuras 18 e 19 mostram as séries das componentes

zonal(\mathbf{u}) e meridional(\mathbf{v}) nos mesmos pontos.

O vento alternou para a direção **S**, em todos os pontos simultaneamente, 14 vezes durante o período do estudo, sugerindo a passagem de pelo menos 14 sistemas frontais em três meses. Nessa análise foi considerado a variação do vento em todos os elementos para eliminar efeitos localizados em apenas um elemento de grade.

A frequência dos ventos do quadrante **S-SW** é menor que no quadrante **NE-E**. Apesar de pouco frequentes os vento do quadrante **S-SW** normalmente são intensos.

A Figura 20 mostra uma predominância do vento do quadrante **E-NE** no período do estudo e também que as maiores intensidades do vento estão orientadas paralelas a linha da costa. Na Figura 21 está o histograma de frequência das direções do vento no **P2**. A primeira direção predominante é **E** seguida de **NE**. *Tomazelli* (1992) encontrou predominância de **NE**, analisando dados da estação do Rio Grande no período de 1970 a 1982. *Krusche et al.* (2002) também encontraram predominância de **NE**, tanto para os meses de verão quanto para todo o ano inteiro. A Tabela 5 mostra as médias dos ventos no período modelado e a Tabela 6 as médias das normais climatológicas para a cidade de Rio Grande provenientes de *Krusche et al.* (2002).

Braga e Krushe (2000), analisando o padrão de ventos em Rio Grande no período de 1992 até 1995, encontraram para o verão a direção predominante de **NE** seguido de **E**. Segundo as autoras, a predominância de **NE** ocorre em todas as estações com exceção do Outono quando há predominância de **N** seguida de **NE**.

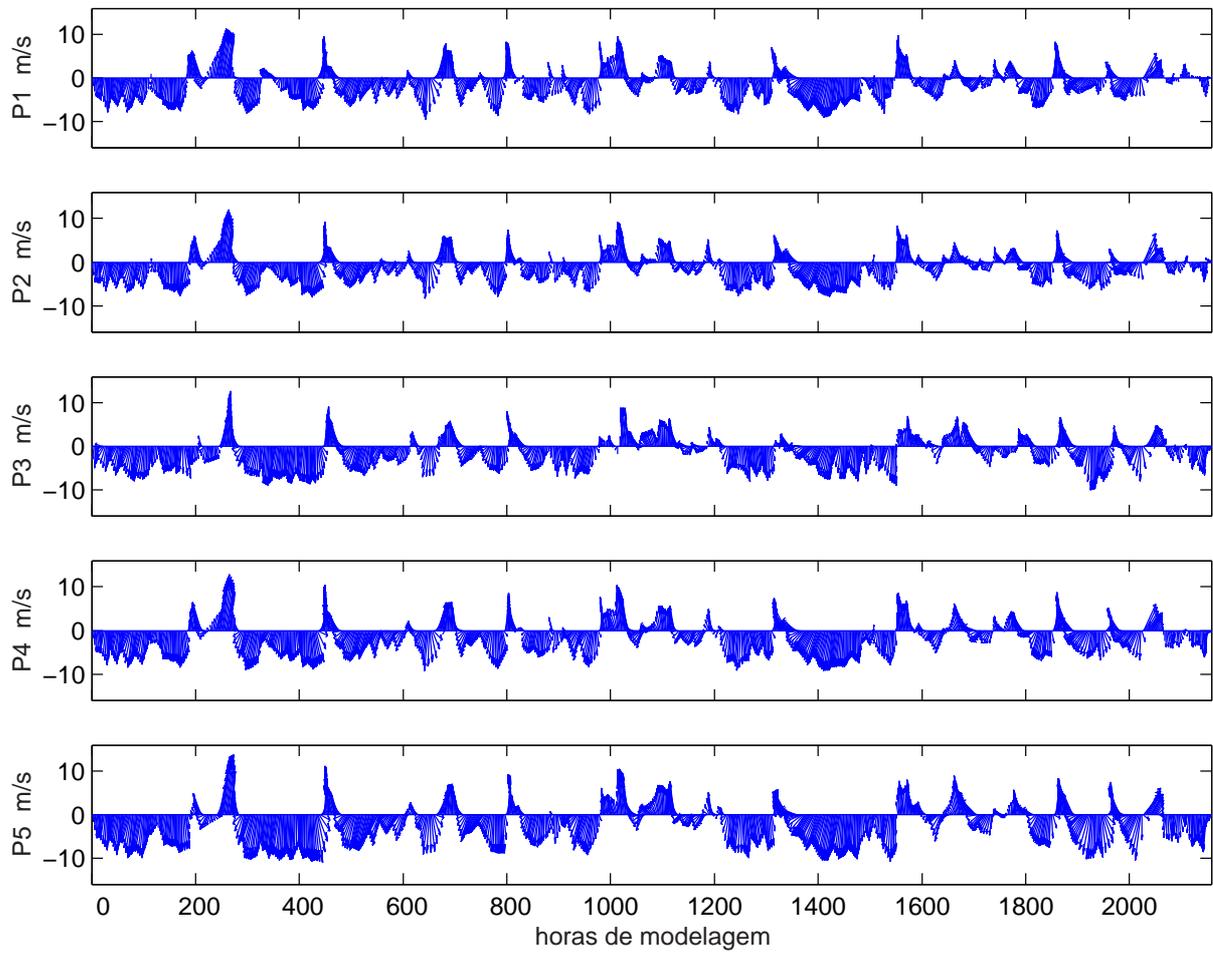


Figura 17: Séries de vento(ms^{-1}) nos pontos de análise no período de modelagem.

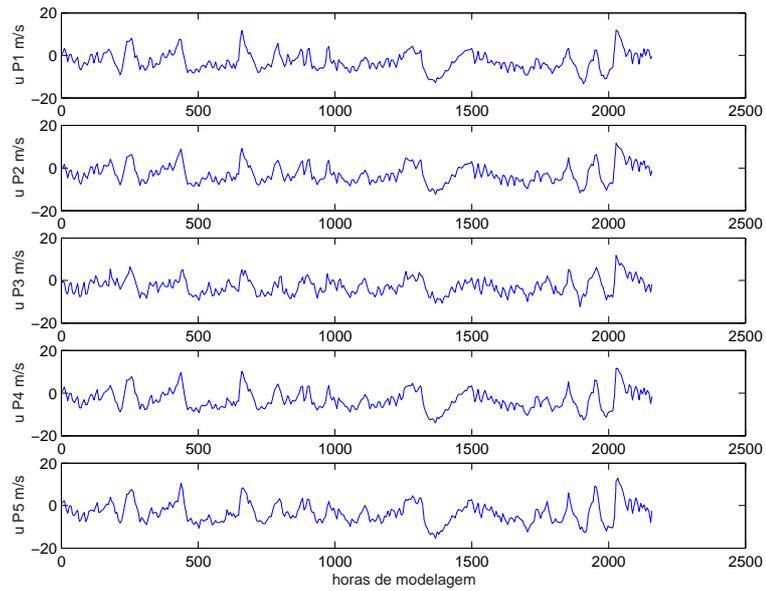


Figura 18: Séries temporais da componente u do vento(ms^{-1}) nos pontos de análise determinados na metodologia.

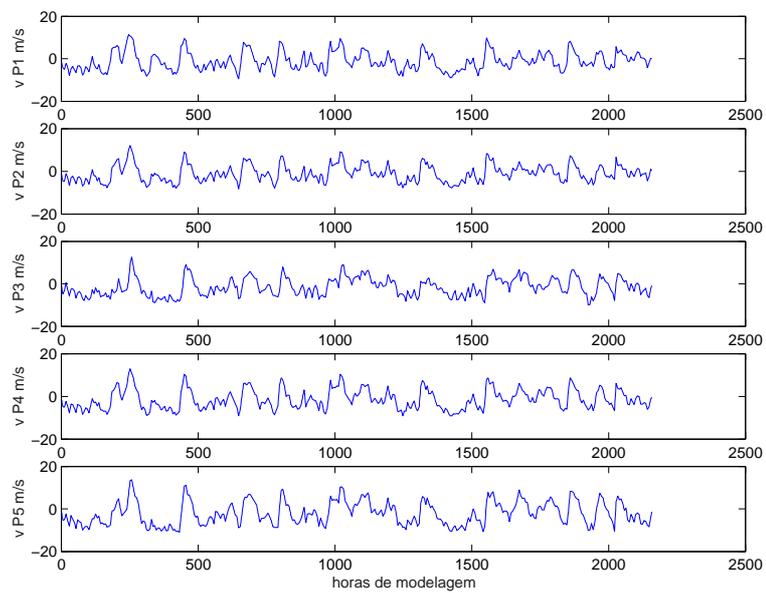


Figura 19: Séries temporais da componente v do vento(ms^{-1}) nos pontos de análise determinados na metodologia.

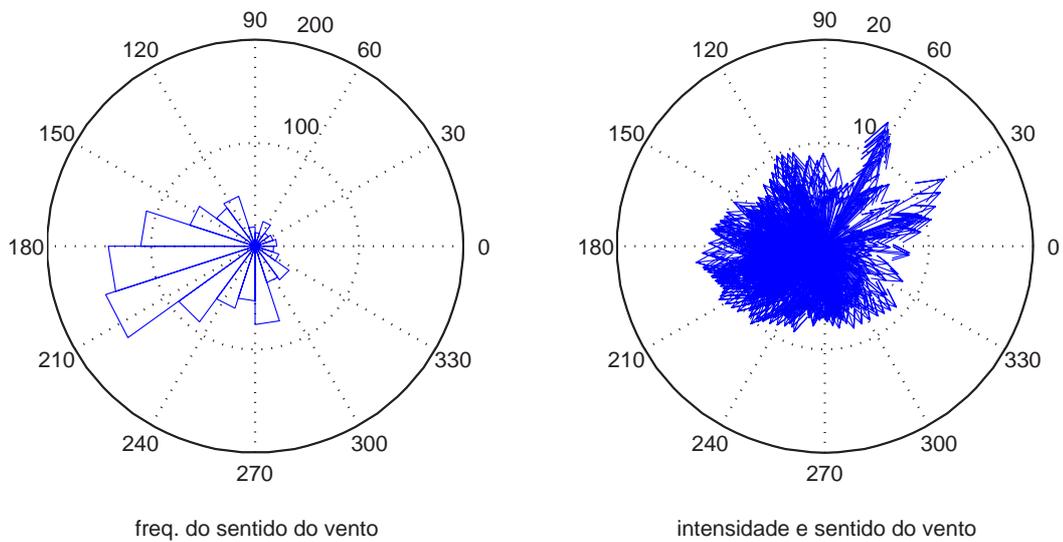


Figura 20: Direção, frequência e intensidade dos ventos do período de modelagem localizados no **P2**.

O zero é referenciado para o Leste, crescendo no sentido anti-horário.

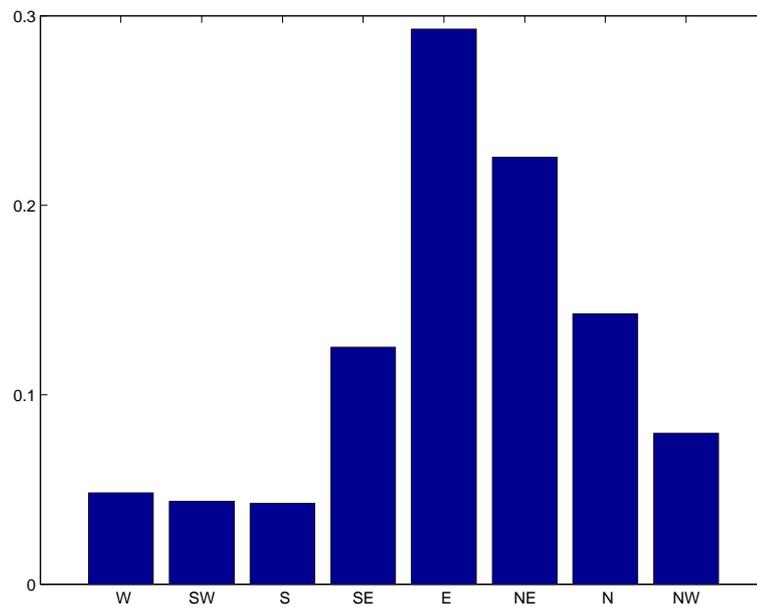


Figura 21: Histograma da porcentagem de frequência da direção dos ventos localizados no **P2**.

Tabela 5: Estatísticas do vento usado para forçar o modelo, fonte localizada no ponto de análise 2, o qual foi definido na metodologia (P2).

O zero é referenciado no Leste crescendo no sentido anti-horário.

Variável	Período de modelagem.
Intensidade média do vento(m/s)	2.96
Direção média do vento($^{\circ}$)	201, 13(E)
Componente zonal(m/s)	-2.76
Componente meridional(m/s)	-1.06
Média da intensidade do vento(m/s)	6.00
1 $^{\circ}$ Dir. predominante	E
2 $^{\circ}$ Dir. predominante	NE

Tabela 6: Normais climatológicas provisórias da Estação Meteorológica #83995, de Rio grande no período de 1991 até 2001. O zero é referenciado no Norte crescendo no sentido anti-horário. Fonte: *Krusche et al.* (2002)

Variável	jan	fev	mar
Intensidade média do vento(m/s)	1, 85	1,57	1,00
Direção média do vento	82 $^{\circ}$ (E)	91 $^{\circ}$ (E)	87 $^{\circ}$ (E)
Componente zonal	-1,84	-1,57	-1,00
Componente meridional	-0,24	-0,04	-0,05
Média da intensidade do vento	3,87	3,68	3,24
1 $^{\circ}$ Dir. predominante	NE	NE	NE
2 $^{\circ}$ Dir. predominante	SE	SE	SE

Os parâmetros estatísticos das análises de vento do **MGCA** e da bóia diferem um pouco dos coletados nas estações meteorológicas, provavelmente porque as estações estão localizadas no continente sofrendo a influência da fisiografia.

Lages (2003) comparou medições da estação meteorológica da **FURG** contra os dados de três anos da bóia meteorológica do PNBÓIA e concluiu que apesar de existir diferença de intensidade entre os valores de vento em relação as médias, o vento na estação em terra é semelhante a estação da bóia. As médias de direção da velocidade do vento também foram semelhantes entre os pontos de medição.

Os dados apresentados nesse trabalho diferem dos dados apresentados por *Lages* (2003) e *Braga e Krusche* (2000), possivelmente porque o padrão de ventos muda ao

longo dos anos. O verão de 2001 pode ter sido anômalo se comparado a climatologia. Também é importante ressaltar que o verão de 2001 foi um período de La Nina moderado (www.cptec.inpe.br, www.cdc.noaa.gov) como mostra a Figura 22. Esse fato pode explicar as diferenças entre as análises do **MGCA** do ano de 2001 e as normais climatológicas.

Um ponto importante é que a Região Sul do Brasil, Argentina, Uruguai, Chile e Paraguai são as regiões extratropicais mais afetadas pelos eventos do El Nino e da La Nina (Fases quentes e frias da Oscilação Sul). A região Sul do Brasil mostra fortes e consistentes anomalias de precipitação associadas aos eventos (*Grimm et al.*, 1998).

As anomalias de precipitação no Sul do Brasil estão relacionadas a anomalias de circulação, estas mudam o padrão de vento da região (*Grimm et al.*, 2000). A variação da intensidade e direção do vento ao longo do anos deve ser melhor estudada. Se as variações forem significativas, os modelos probabilísticos de óleo, considerando apenas um verão, podem não ser estatisticamente significativos principalmente para a região Sul do país. Hoje em dia a modelagem probabilística de manchas de óleo para os licenciamentos ambientais, em diversas regiões do Brasil, é realizada considerando apenas a estação de um único ano.

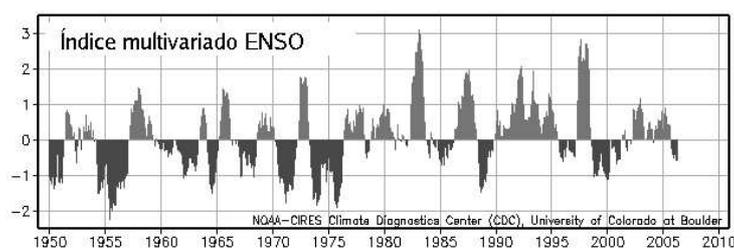


Figura 22: Desvio padrão do índice de oscilação Sul.
Fonte:NOAA-CIRES(Climate Diagnostics Center, Boulder Colorado)

3.3 A contribuição direta do vento na movimentação do óleo no ambiente marinho.

Além de gerar correntes, o vento atua diretamente na movimentação do óleo. Normalmente a movimentação do óleo é estimada somando as correntes a uma porcentagem do vento local. Para uma melhor análise do efeito direto do vento na trajetória do óleo e a sua importância em relação as correntes, a intensidade foi multiplicada por 0,035 (*Reed et al.*, 1999; *Proctor et al.*, 1994). Dessa forma estimamos a contribuição direta do vento na movimentação do óleo, permitindo a comparação direta com os valores de correntes.

Como já foi dito anteriormente, o óleo no ambiente marinho, em geral, é mais impactante para o ambiente quando chega na costa ou região costeira. Por esse motivo a contribuição direta do vento das análises do **MGCA** foi decomposta nas componentes ortogonal a linha da costa(**OC**) e paralela a linha da costa(**PC**).

Assim separamos a movimentação do óleo devido ao vento numa componente que pode afastar ou aproximar o óleo da costa e numa componente que apenas mudaria a posição do óleo ao largo da costa.

A costa da área de estudo é formada por praias arenosas. A zona costeira é mais vulnerável, ao óleo, que a plataforma continental. A divisão do vento nessas componentes simplifica a análise, deixando os resultados mais fáceis de serem aplicados na prática, como em mapas de sensibilidade, situações de emergência e análise de risco. Portanto a condição mais crítica seria um acidente no qual o óleo viesse em direção a costa e no caso desse estudo, quando as velocidades da componente **OC** são negativas.

As Figuras 23 e 24 mostram as séries temporais da contribuição do vento no deslocamento do óleo, nas componentes **OC** e **PC** respectivamente, para os pontos determinados na metodologia(Figura 10). De forma geral o caráter predominante do sentido **NE-SW** intensifica a magnitude da componente **PC** em relação a componente meridional e diminui

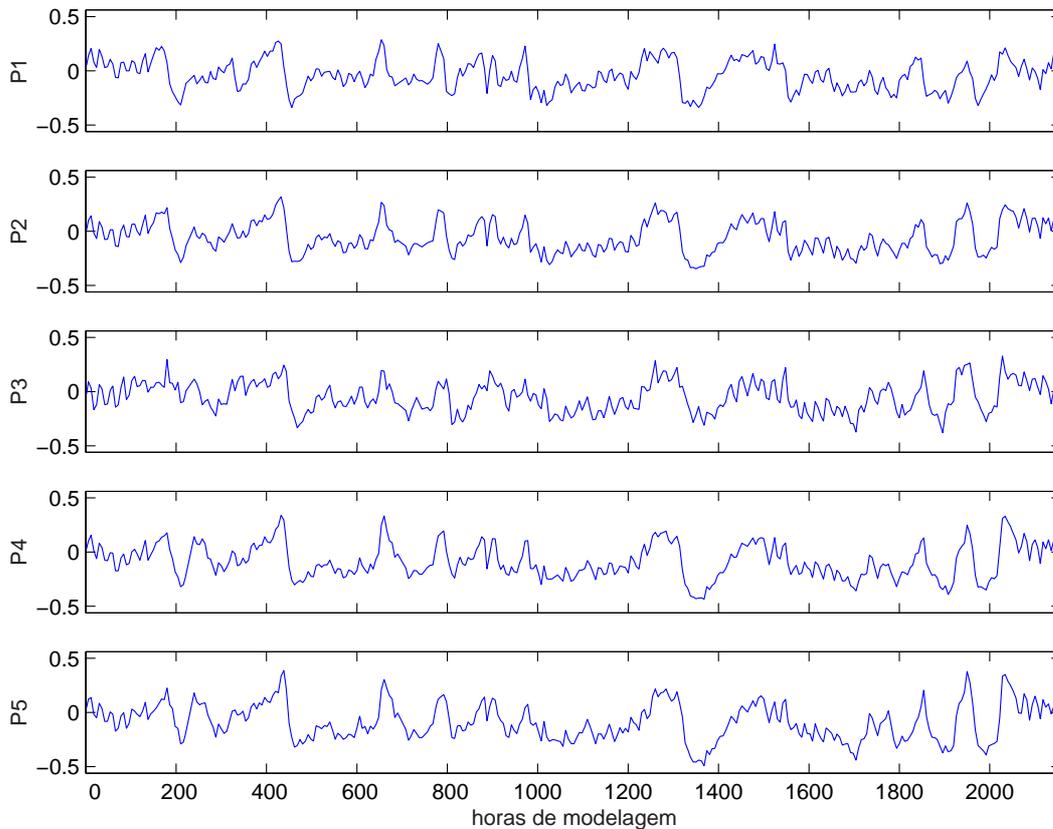


Figura 23: Séries temporais da contribuição(3,5% do valor) do vento(ms^{-1}) para trazer ou afastar o óleo(componente **OC**) da costa nos pontos determinados na metodologia.

da componente **OC** em relação a zonal. A Tabela 7 apresenta as estatísticas das componentes da contribuição do vento nos pontos de análise.

Sabe-se que na região a energia dos fenômenos meteorológicos de mesoescala (espacial) e escala sinótica(temporal) são importantes e provavelmente são predominantes em relação aos eventos meteorológicos de menor escala. Assim a intensidade da contribuição do vento é similar nos pontos de análise embora exista um pequeno intervalo temporal entre os pontos. O vento dos pontos localizados mais ao **S** e **W** sofrem primeiro as mudanças causadas pela passagem dos sistemas frontais devido ao deslocamento predominante dos mesmos.

Observando a Tabela 7 percebemos diferenças nas médias da contribuição para as

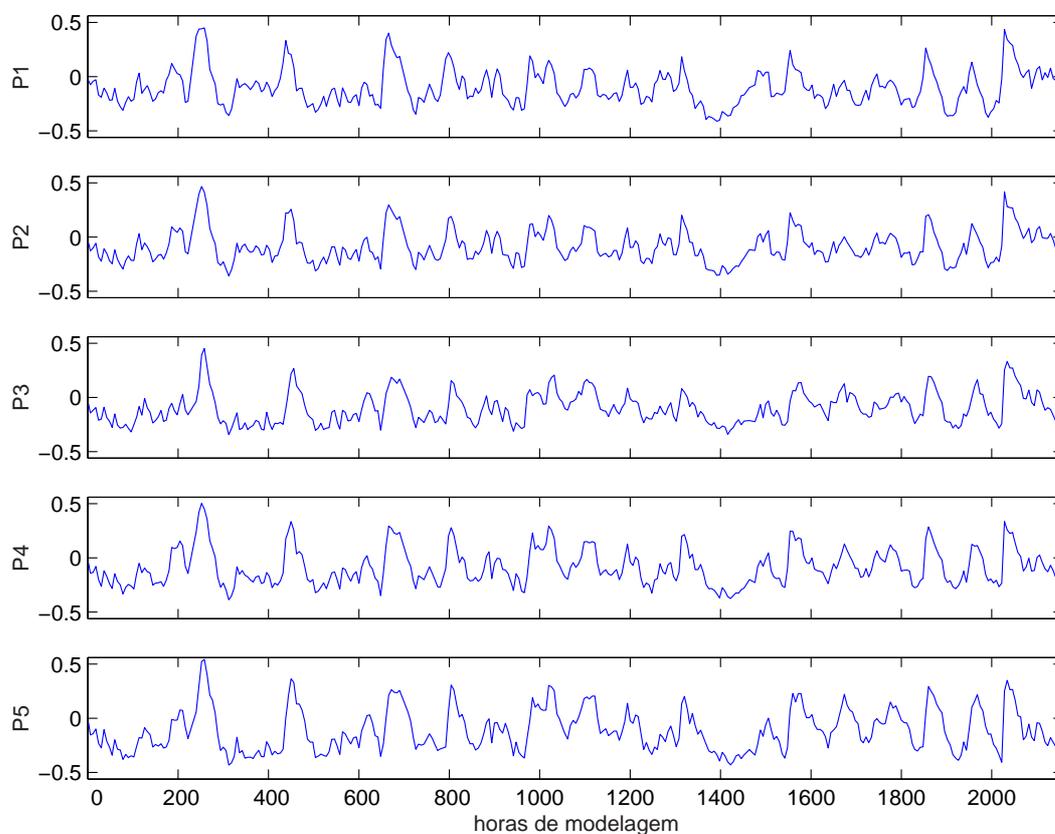


Figura 24: Séries temporais da contribuição(3,5% do valor) do vento na movimentação do óleo ao largo da costa (componente **PC**) nos pontos determinados na metodologia.

Tabela 7: Parâmetros estatísticos das componentes da contribuição do vento na movimentação do óleo nos pontos de análise determinados na metodologia.

O zero graus da direção do vento esta referenciado ao Norte, crescendo no sentido anti-horário.

Variável	P1	P2	P3	P4	P5
componente CO média(ms^{-1})	-0,040	-0,071	-0,065	-0,084	-0,087
componente CP média(ms^{-1})	-0,099	-0,074	-0,089	-0,085	-0,110
média do valo absoluto CO (ms^{-1})	0,116	0,130	0,120	0,148	0,156
média do valor absoluto CP (ms^{-1})	0,157	0,141	0,148	0,158	0,188
média da contribuição (ms^{-1})	0,106	0,103	0,110	0,119	0,140
direção média da contrib.($^{\circ}$)	201	201,13	208,68	205,25	211,55
média da int. da contrib.(ms^{-1})	0,215	0,210	0,208	0,236	0,270

componentes, que podem ser causadas pela mudança na orientação da linha da costa em relação ao ângulo com o vento predominante. Nos pontos costeiros, o transporte do óleo pelo vento que traria o óleo para a costa é menor no **P1** e maior no **P2** e intermediário no **P3**.

Esse é um fato importante e deve ser levado em conta na avaliação de quanto cada região costeira está suscetível a ser contaminada por óleo que será confirmada na apresentação dos resultados do modelo de óleo. *Calliari et al.* (2005) encontraram diferenças na altura de dunas frontais ao largo da costa do Rio Grande do Sul. Essa diferença de altura foi atribuída, principalmente, a mudanças na orientação da linha da costa em relação ao vento predominante. O autor concluiu que a mudança na orientação reflete na eficiência regional do transporte eólico que é formador dessas feições. Esse fato reforça a idéia de que a probabilidade do óleo chegar na praia muda em cada região da costa e deve ser influenciada pela orientação da mesma em relação ao vento predominante.

Em média os valores da componente **OC** são menores que a **PC**, evidenciando uma maior movimentação do óleo devido ao vento ao largo da costa por causa da orientação geral(**NE-SW**) da mesma em relação ao vento. As estatísticas mostram que ambas componentes de contribuição têm velocidades médias de aproximadamente $0,1ms^{-1}$. Entretanto sobre condições extremas a contribuição do vento pode ser maior que $0,5ms^{-1}$.

Se considerarmos apenas os parâmetros estatísticos do efeito direto do vento, em todos os pontos o movimento líquido ao largo da costa seria em direção ao sudoeste levando sempre o óleo para a região costeira mais ao **S**. Embora os ventos de **SW** tenham maior intensidade, os ventos de **NE** são mais freqüentes, direcionando o transporte líquido para **SW**.

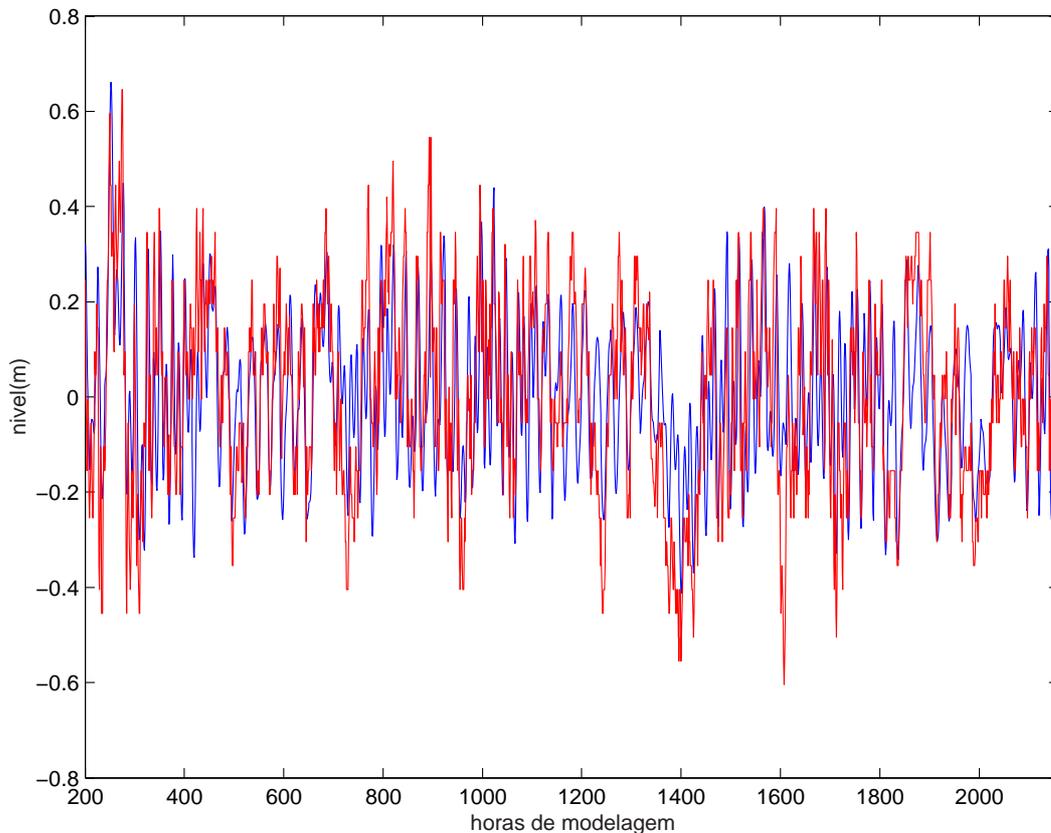


Figura 25: Séries temporais de elevação(m) das observações, modelo e ambos subtraídos da média.

As séries do modelo foram tiradas de um ponto próximo a costa.

4 Resultados e discussão.

4.1 Modelo hidrodinâmico.

4.1.1 Comparação do modelo hidrodinâmico com os dados da régua a partir da elevação da superfície e modelos teóricos.

Os resultados do modelo foram comparados com a régua graduada localizada na estação de praticagem da Barra do Rio Grande. A Figura 25 mostra as séries temporais da elevação da superfície das observações e do modelo. As primeiras 200 horas de aquecimento do modelo foram descartadas na calibração.

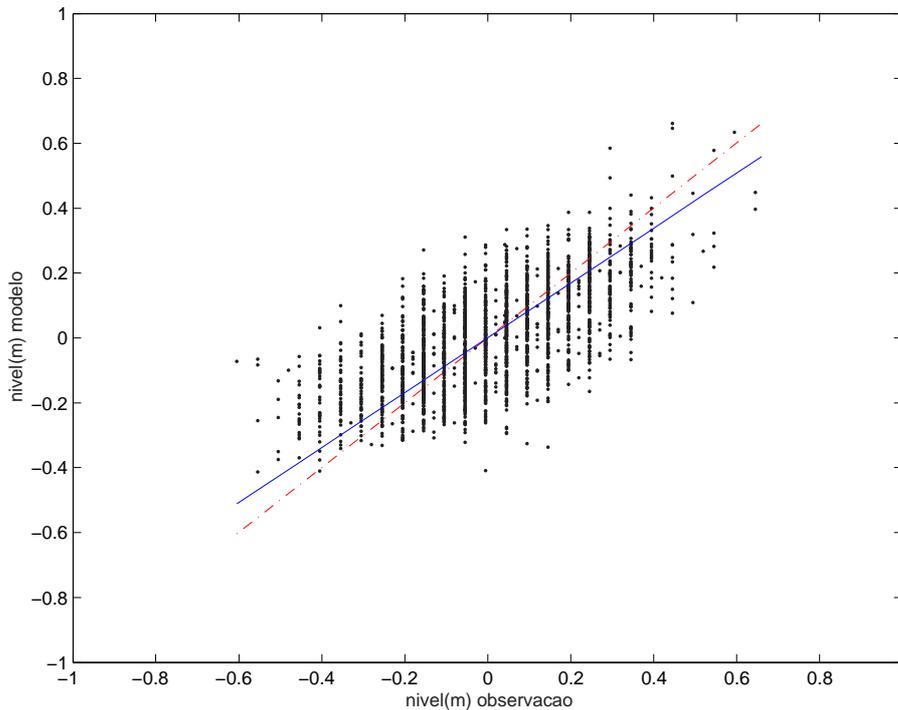


Figura 26: Diagrama de dispersão da altura do nível ($m s^{-1}$) entre as observações e o POM.

A reta de ajuste está em azul e em vermelho o ajuste ideal.

Verifica-se que o modelo tem comportamento similar aos dados observados. O coeficiente de correlação (r) entre as observações e o modelo é de 0,673 e está acima do valor crítico de correlação de Pearson com nível de significância de 1%. O erro padrão (Se) é de 0,14m. O coeficiente de determinação (r^2) mostra que o modelo explica 45,5% da variância observada. A Figura 26 mostra o diagrama de dispersão das observações contra o modelo e a reta de ajuste que têm coeficiente angular 0,845 (b_1) e intercepto (b_0) aproximadamente nulo.

A grade numérica não cobre o local das observações com a régua, que foram realizadas no canal do estuário. Portanto nas observações existem variações no nível que estão associados a própria laguna e não ao oceano adjacente. As variações do nível e a circulação no local de observação são influenciadas pela variação de nível do oceano adjacente (efeito

não-local do vento), por oscilações da laguna (seiches) devido ao efeito local do vento e por aporte de água dos rios (*Möller et al.*, 2001).

As ondas longas de plataforma e as marés que causam oscilações de baixa frequência na elevação do nível, ao entrar no estuário, normalmente, sofrem deformações e tem suas fases e amplitudes modificadas. As variações do nível inerentes da Laguna e a deformação das ondas longas podem estar contribuindo para o aumento do **Se** e diminuição do **r** entre o **POM** e as observações.

O **POM** não representa esses fenômenos que podem estar contribuindo na parte da variância que não é explicada pelo modelo. Conseqüentemente influenciando nos resultados da comparação.

Além do mais, a precisão numérica da régua é diferente da precisão numérica do modelo, e nas observações podem estar inclusos erros humanos uma vez que a leitura não é automatizada.

A hidrodinâmica do modelo representa bem as condições teóricas de *Csanady* (1982), reproduzindo o empilhamento (Figura 27) e o rebaixamento (Figura 28) do nível na costa assim como a propagação de ondas longas (no Hemisfério Sul deixando a costa a esquerda).

Pode ser observado que próximo à costa as velocidades das correntes respondem ao balanço geostrófico. O ajuste global resulta do gradiente de pressão associado ao empilhamento e gera correntes paralelas a costa por balanço geostrófico. No entanto, o ajuste geostrófico deve ocorrer apenas dentro de uma distância menor ou igual ao raio de deformação de Rossby externo. Portanto, além dessa distância espera-se que as correntes paralelas a costa sejam substituídas por correntes de Ekman. Quando o vento era de **SW** e **S** o nível da costa aumentava.

As correntes de superfície (Figura 29) apresentam-se alinhadas a costa nas proximidades dessa e tendem a apresentar um aumento na componente normal a costa a medida que se afastam dessa. Tais resultados estão de acordo com a teoria de "wind setup/setdown"

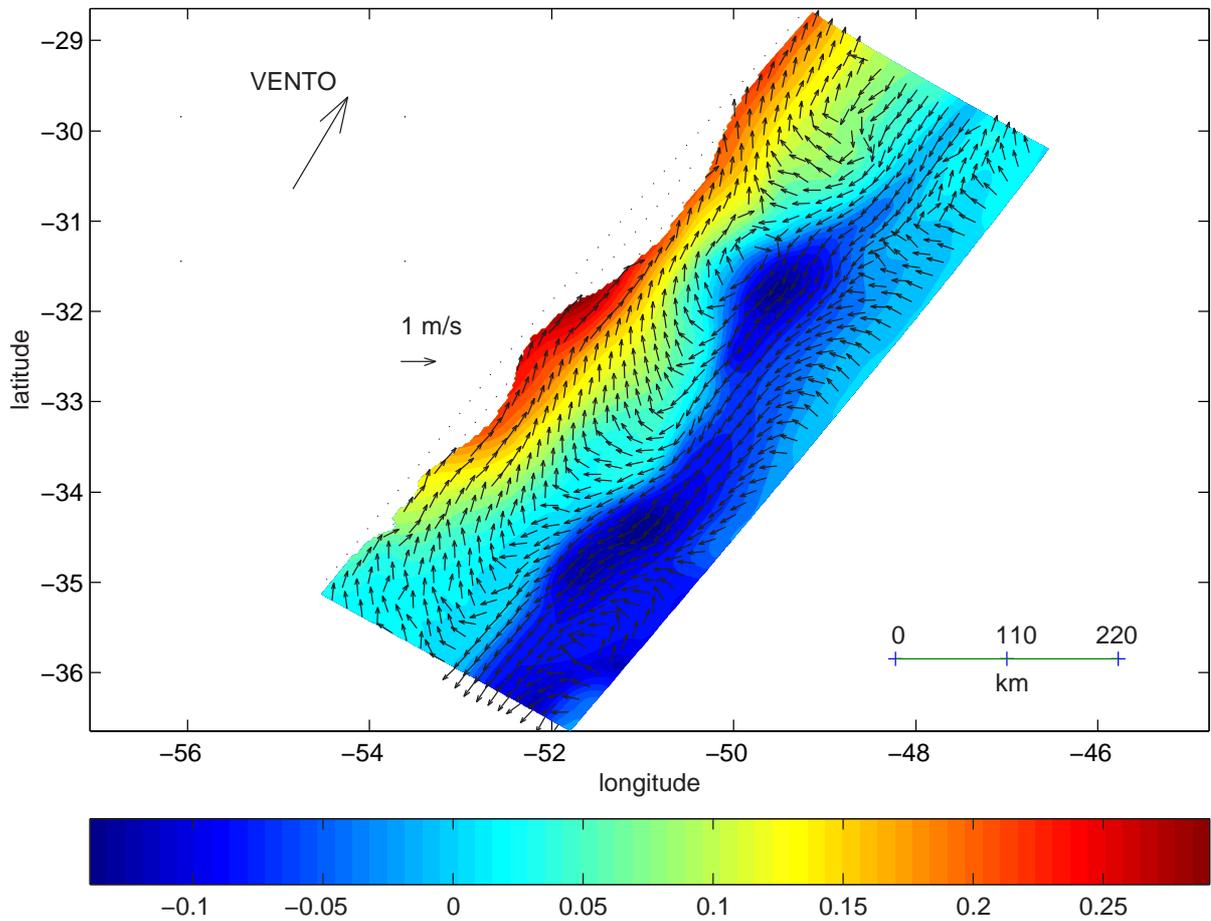


Figura 27: Média(244h-284h) da anomalia do nível(m) do mar e correntes(ms^{-1}) no primeiro nível sigma. As correntes são mostradas de $0,5ms^{-1}$ a $1,0ms^{-1}$. A passagem da frente fria associada ao vento Sul empilhou água na costa.

descrita por *Csanady* (1997), a qual descreve o ajuste local e o ajuste global. Segundo o autor, o ajuste local ocorre em função do transporte de Ekman na camada de superfície.

4.1.2 Limitações do modelo hidrodinâmico.

Nos primeiros experimentos pilotos realizados sem a corrente do Brasil, as condições de contornos abertos funcionaram bem e não foram observadas ondas geradas pelas condições de contorno. Nos campos de temperatura inicial foi usado um perfil exponencial. Nesses experimentos a energia potencial e a energia cinética estabilizaram. Os resultados dos

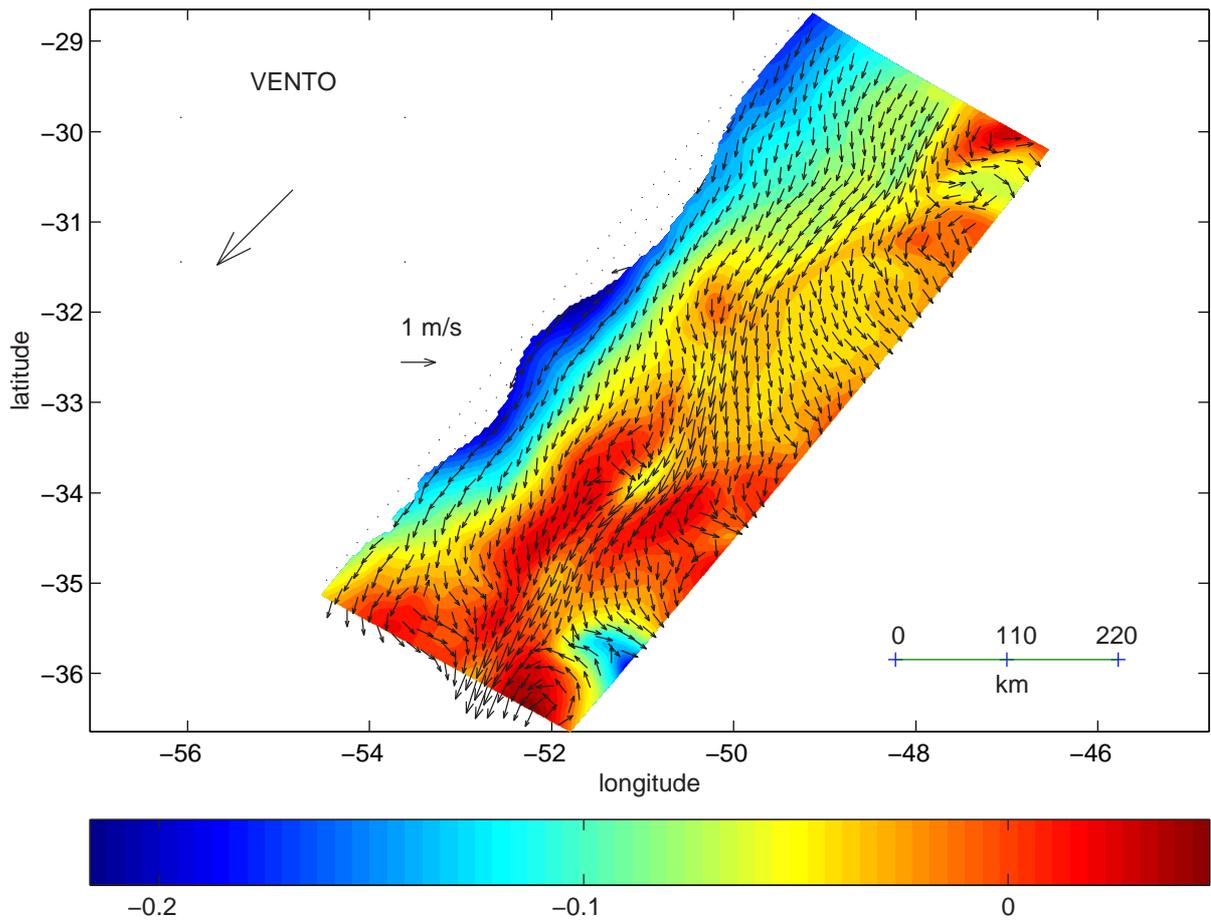


Figura 28: Média(1400h-1432h) da anomalia do nível(ms^{-1}) do mar e correntes(ms^{-1}) no primeiro nível sigma.

As correntes são mostradas de $0,5ms^{-1}$ a $1,0ms^{-1}$. A predominância do vento Nordeste rebaixou o nível de água na costa.

experimentos pilotos não serão mostrados neste trabalho.

Quando passamos a usar as saídas do **OCCAM** para os campos iniciais de temperatura e salinidade inicial, com o decorrer do experimento, apareceram ondas geradas pelo contorno na zona de relaxação. O uso desses campos é essencial para a representação da Corrente do Brasil. Apesar do nível e das velocidades se estabilizarem nos pontos de análise, não apresentando tendência de crescimento, as energias cinética e potencial do modelo cresceram. Porém as causas ainda não são bem conhecidas.

A saída da Corrente do Brasil pelo contorno Sul é difícil de ser representada por causa do meandramento da corrente que gera fortes gradientes de temperatura próximos aos contornos abertos. Isso torna a região difícil de ser simulada.

O uso dos campos médios do **OCCAM** não simula os eventos relacionados a variação de descarga continental da Laguna e do Rio da Prata. Apesar da vazão de ambos normalmente serem baixas no verão a importância da circulação por gradientes de densidade pode ser um fator importante dependendo da quantidade do aporte de água continental na plataforma (*Soares, 2003*). Sendo assim os resultados obtidos representam bem condições de baixa vazão desses corpos de água.

4.1.3 Séries de correntes nos pontos de estudo geradas pelo POM.

Como foi dito anteriormente na metodologia, para simplificar as análises, assim como foi realizado para o vento, as correntes foram decomposta nas componentes **OC** (ortogonal a linha da costa) e **PC**(paralela a linha da costa) com exceção do **P5** devido sua localização que é distante da costa.

A Figura 29 mostra as séries de velocidades das correntes interpoladas para $1m$ abaixo da superfície nos pontos pré-estabelecidos na metodologia. A Tabela 8 mostra os parâmetros estatísticos das correntes em $1m$ abaixo do nível do mar nos pontos de análise.

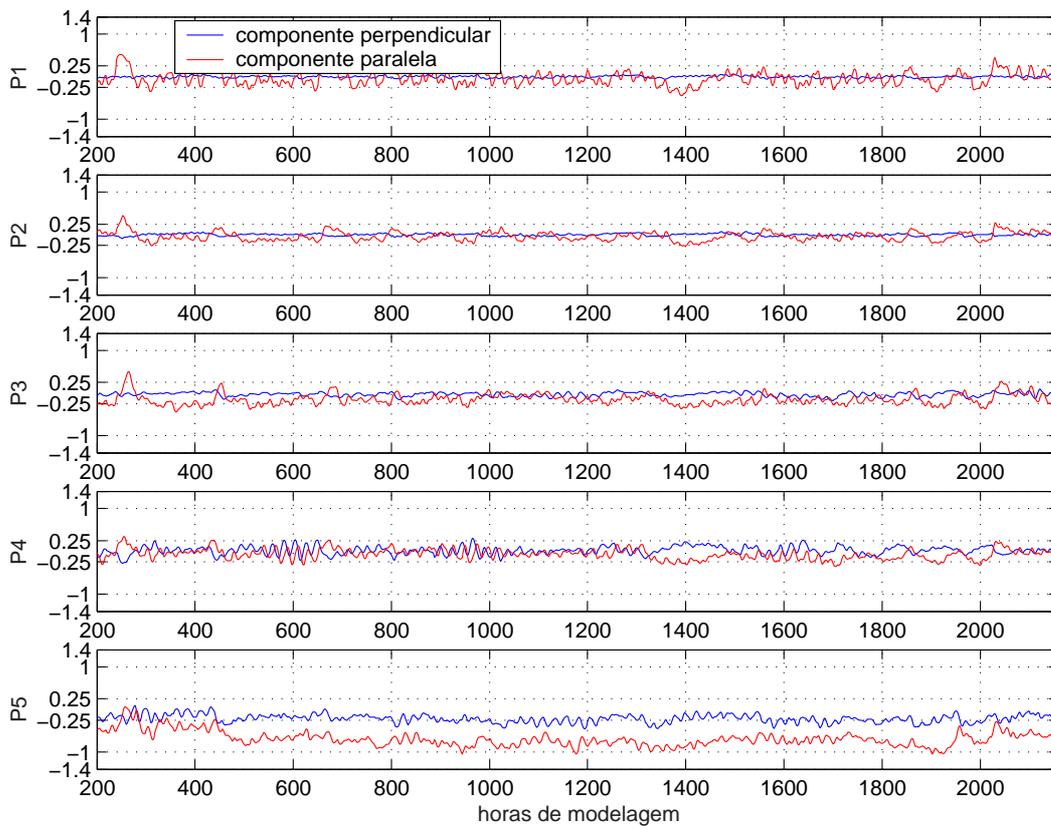


Figura 29: Séries de velocidades(ms^{-1}) de correntes nos pontos determinados na metodologia (ver Figura 10).

Tabela 8: Parâmetros estatísticos das correntes(ms^{-1}) em $1m$ abaixo do nível do mar nos pontos de análise.

Variáveis	P1	P2	P3	P4	P5
componente(ms^{-1}) OC média	-0,003	0,003	-0,028	0,024	-0,199(u)
componente(ms^{-1}) PC média	-0,043	-0,0395	-0,157	-0,066	-0,650(v)
média(ms^{-1}) da intensidade correntes	0,043	0,0396	0,160	0,070	0,680
direção média ($^{\circ}$)	50,95	49,2	59,8	65	72,9

As correntes paralelas a costa são mais intensas que as ortogonais nos pontos **P1**, **P2** e **P3**. A componente **OC** aumenta a medida que nos afastamos da costa, fato que pode ser observado comparando as velocidades nos pontos **2** e **4**. Já as velocidades paralelas tem mesma escala de intensidade em todos os pontos. No **P5** é onde temos as maiores velocidades na componente “**v**” devido a Corrente do Brasil.

Dessa forma, espera-se que nas proximidades da costa o transporte lagrangeano, devido as correntes, seja paralelo a costa e afastando desta ocorra a esquerda da direção do vento. No **P5** que está localizado na corrente do Brasil o transporte deve acompanhar a mesma, se dirigindo para **S**. Entretanto, o deslocamento de diversos tipos de óleo são fortemente influenciados pelo vento, que muda pouco na escala espacial se comparado as correntes. A intensidade das correntes muda bastante a medida que elas se afastam da costa.

Podemos então estimar a importância de cada fator na região de estudo, comparando os valores da corrente e da contribuição direta do vento na movimentação do óleo. Comparando as séries temporais (Figuras 29 , 23, 24) e os parâmetro estatísticos (Tabelas 5 e 8) entre a contribuição do vento e as correntes, percebemos que próximo a costa (**P1**, **P2** e **P3**) a movimentação superficial do óleo na componente ortogonal a costa (**OC**) deve ser dominada pelo vento. Enquanto na componente paralela a costa (**PC**), as intensidades de ventos e de correntes têm valores mais próximos. Apenas comparando as séries temporais, não é possível identificar uma forçante dominante no transporte de óleo no **P4**. Na região da corrente do Brasil (**P5**) a intensidade das correntes é maior sendo elas mais importantes

que o efeito direto do vento.

Óleos pesados têm densidade mais parecida com a da água, ficando mais suscetíveis a estarem localizados em sub-superfície. Com o aumento da distância da posição do óleo em relação a superfície a força do vento perde a importância no transporte do óleo. Portanto nesses casos as correntes tornam-se mais importantes que o vento mesmo o óleo estando localizado próximo a costa. Em casos extremos, quando o vento é muito forte, a turbulência na camada superficial do oceano e as ondas de gravidade livres de curto período distribuem o óleo verticalmente aumentando a importância das correntes e dissolvendo frações que compõem o petróleo na água.

No caso do acidente do Navio Braer uma tempestade gerou ventos fortes e a movimentação do óleo foi quase em direção contrária do vento, sendo a maré o processo dominante (Thorpe, 1995). O acidente foi simulado com sucesso por Davies et al. (1995) com um modelo **3D** uma vez que os modelos **2D** usados na época do acidente não calcularam a trajetória do óleo com sucesso.

A Figura 30 mostra as séries temporais das correntes nas componentes **OC** e **PC** em 1m, 5m e 10m abaixo da superfície no **P2**. Enquanto na componente **OC** elas têm a mesma escala de intensidade, na componente **PC** ocorre uma diminuição de intensidade com o aumento da distância da superfície.

Como o **POM** usa coordenadas sigma a representação vertical dos primeiros níveis da superfície em águas profundas não tem boa resolução. Devido a isso pode existir um erro associado ao cálculo das correntes superficiais nessas regiões.

4.1.4 Campo médio da contribuição do vento e correntes no deslocamento do óleo

A Figura 31 mostra o campo médio da contribuição do vento no período de modelagem. A direção é predominante de **NE** na maioria da grade virando para **N** na Região Sul da

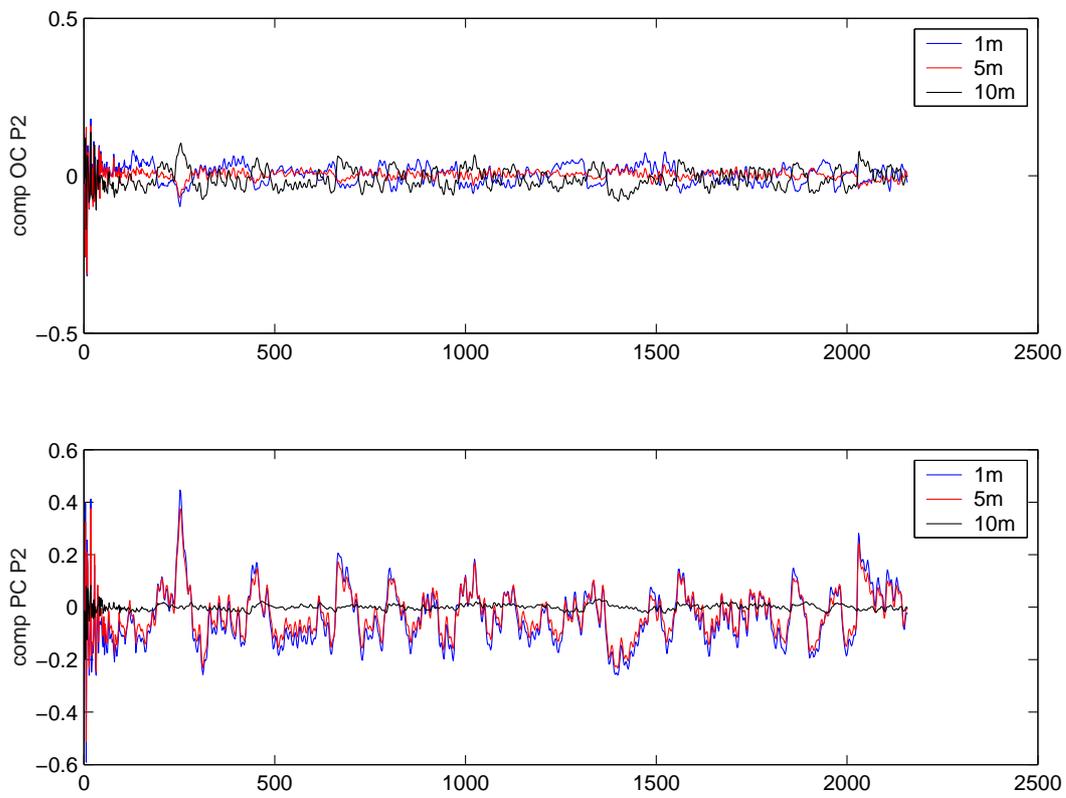


Figura 30: Séries de correntes(ms^{-1}) em 1, 5 e 10m, abaixo do nível do mar, no **P2**.

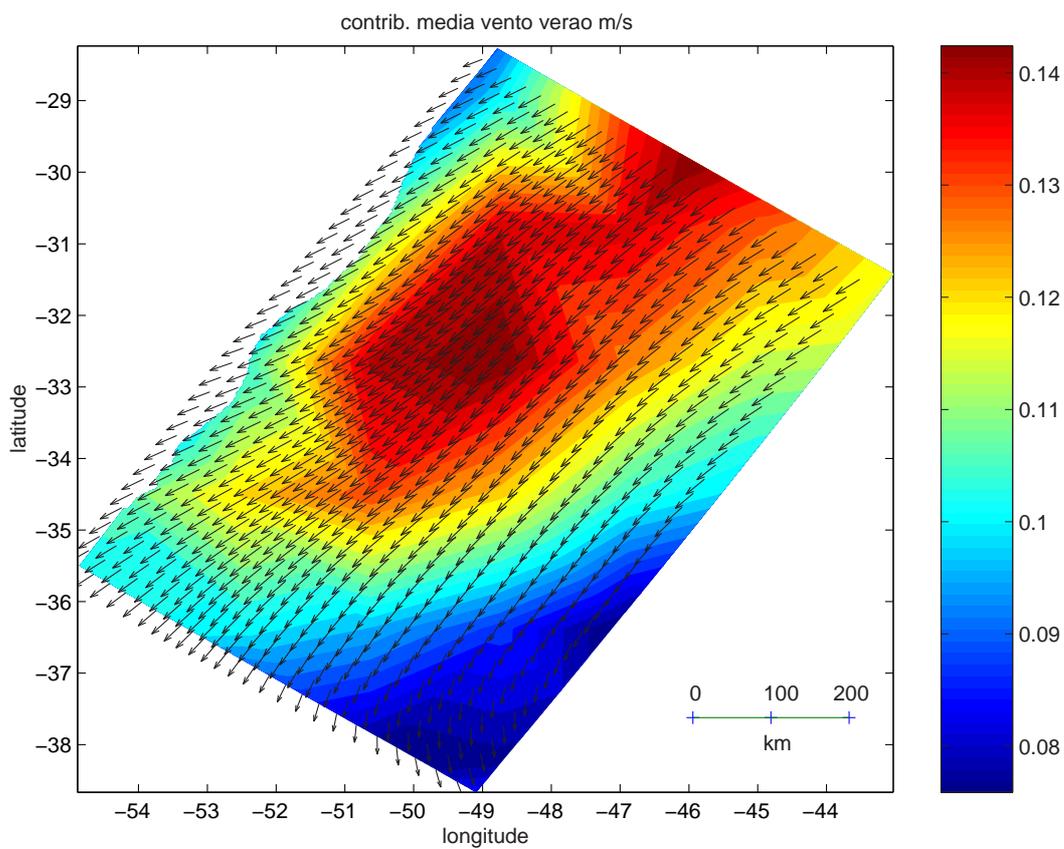


Figura 31: Campo da média da contribuição(3.5 % do valor) do vento(ms^{-1}) no período de modelagem.

grade e **NW** no canto direito inferior. Portanto o transporte médio de óleo devido ao vento é em direção a costa para o **S**. Embora a contribuição não tenha grandes mudanças ao longo da costa, a orientação da linha costa sofre alterações. Então a capacidade média de trazer ou afastar o óleo da costa muda na área de estudo conforme a orientação da linha da costa.

A Figura 32 mostra o campo médio das correntes em 1m abaixo no nível de superfície calculadas pelo **POM**. Na região do talude as correntes são mais intensas devido a corrente do Brasil. Na plataforma as correntes em geral são sudoeste. A Figura 33 apresenta em detalhe as correntes médias na plataforma.

Comparando os dois campos percebemos uma mudança espacial na intensidade das correntes que não é tão acentuada na contribuição do vento.

Visualizando os campos médios das forçantes do modelo de óleo é possível se ter uma boa idéia do destino e da trajetória do óleo, resultados que serão mostrados posteriormente. Entretanto o uso de campos médios (ventos e correntes) para forçar modelos de óleo probabilísticos têm desvantagem de não conter as transições temporais das forçantes e a probabilidade delas ocorrerem (*Elliott, 2004*).

Observando apenas os campos médios não fica claro, mas adiante será mostrado que o óleo tem chances de atingir áreas localizadas ao Norte da fonte e caso o derrame ocorresse em áreas de influência da corrente do Brasil o óleo pode acabar sendo transportado para a plataforma continental. Além disso incluindo a variação temporal do vento ocorrem mudanças no tempo médio de chegada do óleo na costa.

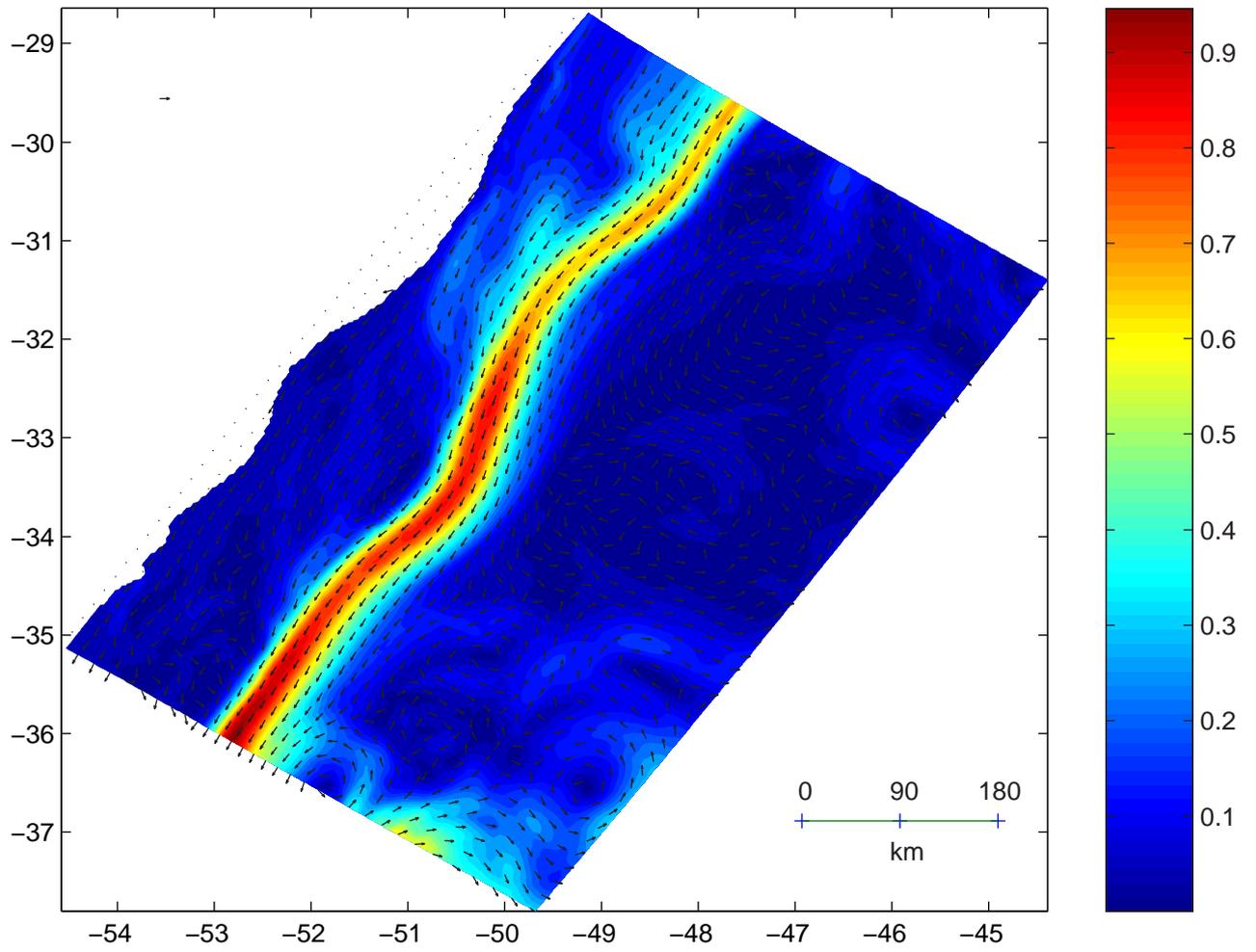


Figura 32: Campo da média das correntes(ms^{-1}) em 1m abaixo do nível .

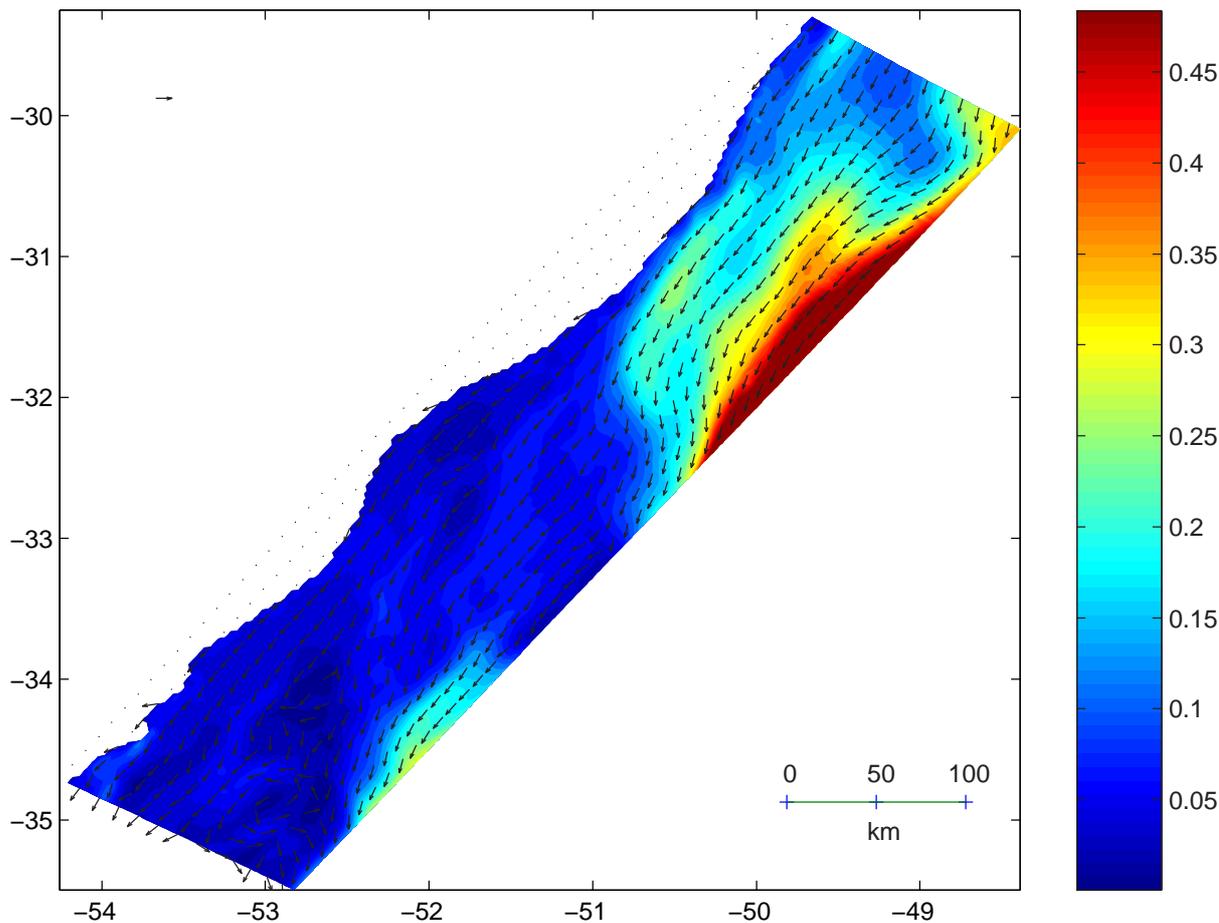


Figura 33: Campo médio das correntes(ms^{-1}) na plataforma em $1m$ abaixo da superfície.

4.2 Análise dos resultados do modelo de óleo.

4.2.1 Movimentação do óleo com a fonte localizada próxima a desembocadura da Laguna.

Com a predominância dos ventos de **NE**, o óleo foi transportado para a costa ao Sul da fonte (Figura 34). Devido a curva da linha de costa, o óleo seguiu direto para a terra na região localizada a sudoeste da fonte. Também foram observadas pequenas alterações na direção do vento, que formaram manchas de óleo com formato sinusoidal. Assim as manchas de óleo quando estiveram influenciadas pelo ventos predominantes, atingiam

regiões adjacentes a mostrada na Figura 34 um pouco mais ao Norte e ao Sul, mas nunca ao Norte da fonte. Como a simulação é de um derrame contínuo é possível observar nas figuras que parte do óleo já atingiu a costa em instantes anteriores aos que foram mostrados. Uma vez que o óleo atinge a terra ele para de se movimentar.

Esse pode ser considerado um cenário típico que foi comum e predominante durante todo o experimento. Nesse cenário os ventos foram de **NE-E**. As Figuras 45, 47, 46 e 48 mostram os campos de correntes e da contribuição dos ventos da situação descrita.

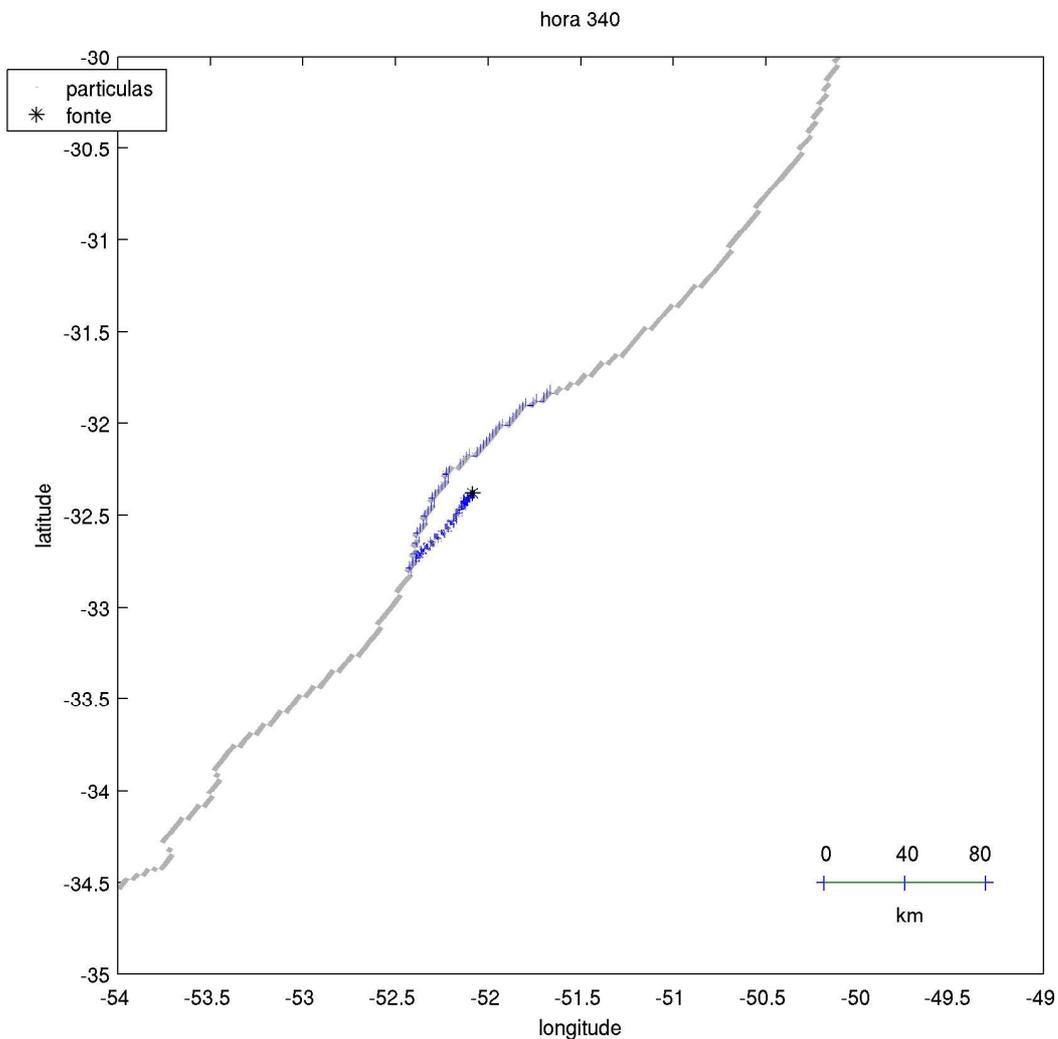


Figura 34: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no **P2** na passagem de um sistema frontal as 340h horas de modelagem.

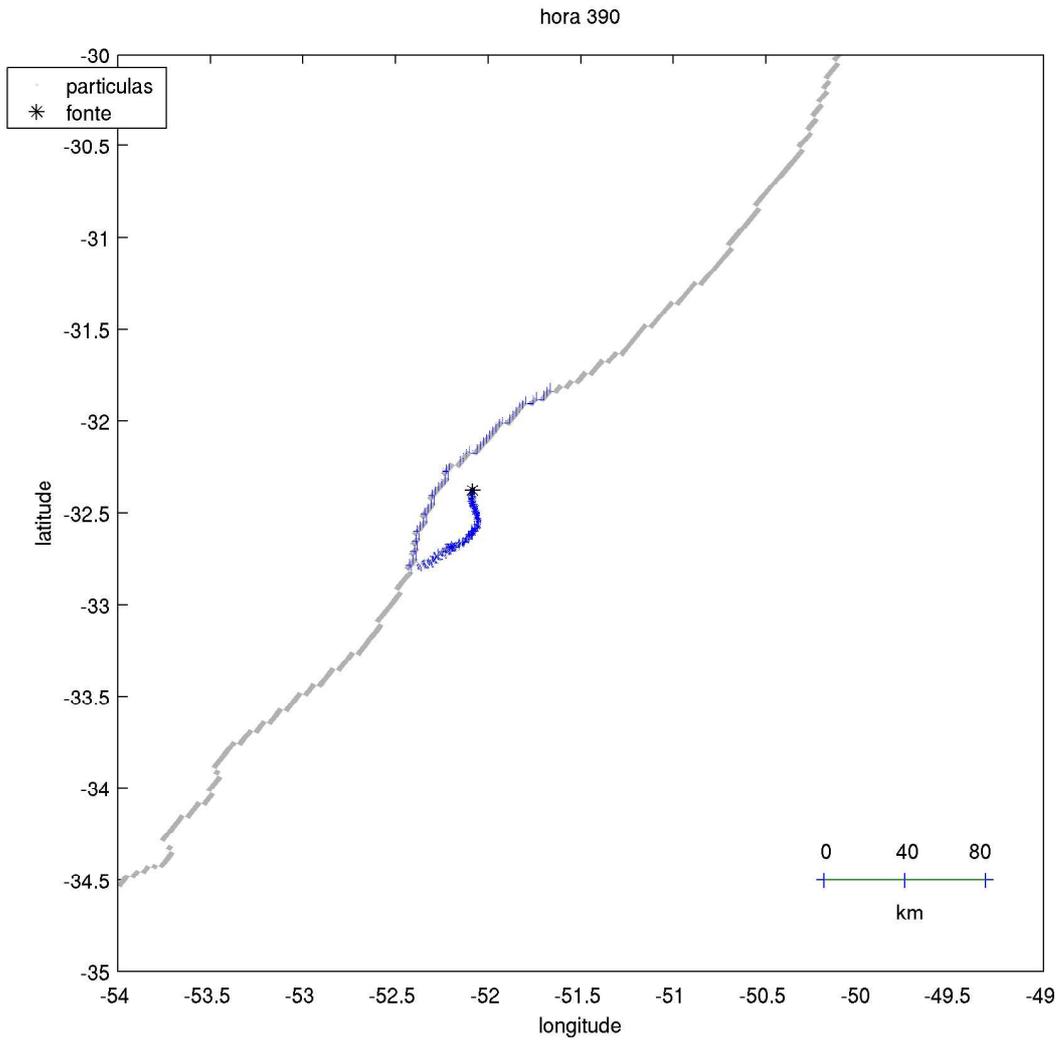


Figura 35: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no **P2** no começo da passagem de um sistema frontal as 390h horas de modelagem.

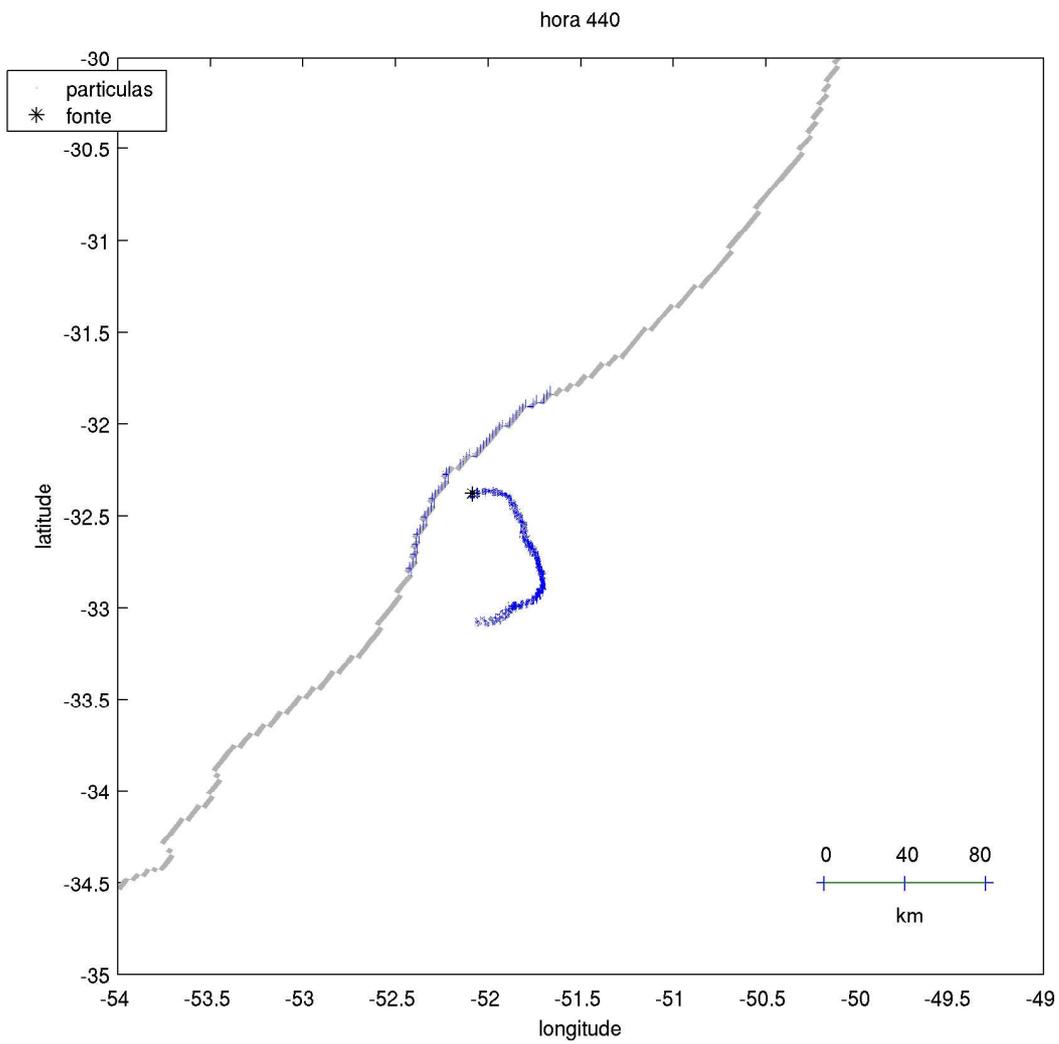


Figura 36: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no **P2** na passagem de um sistema frontal as 440h horas de modelagem.

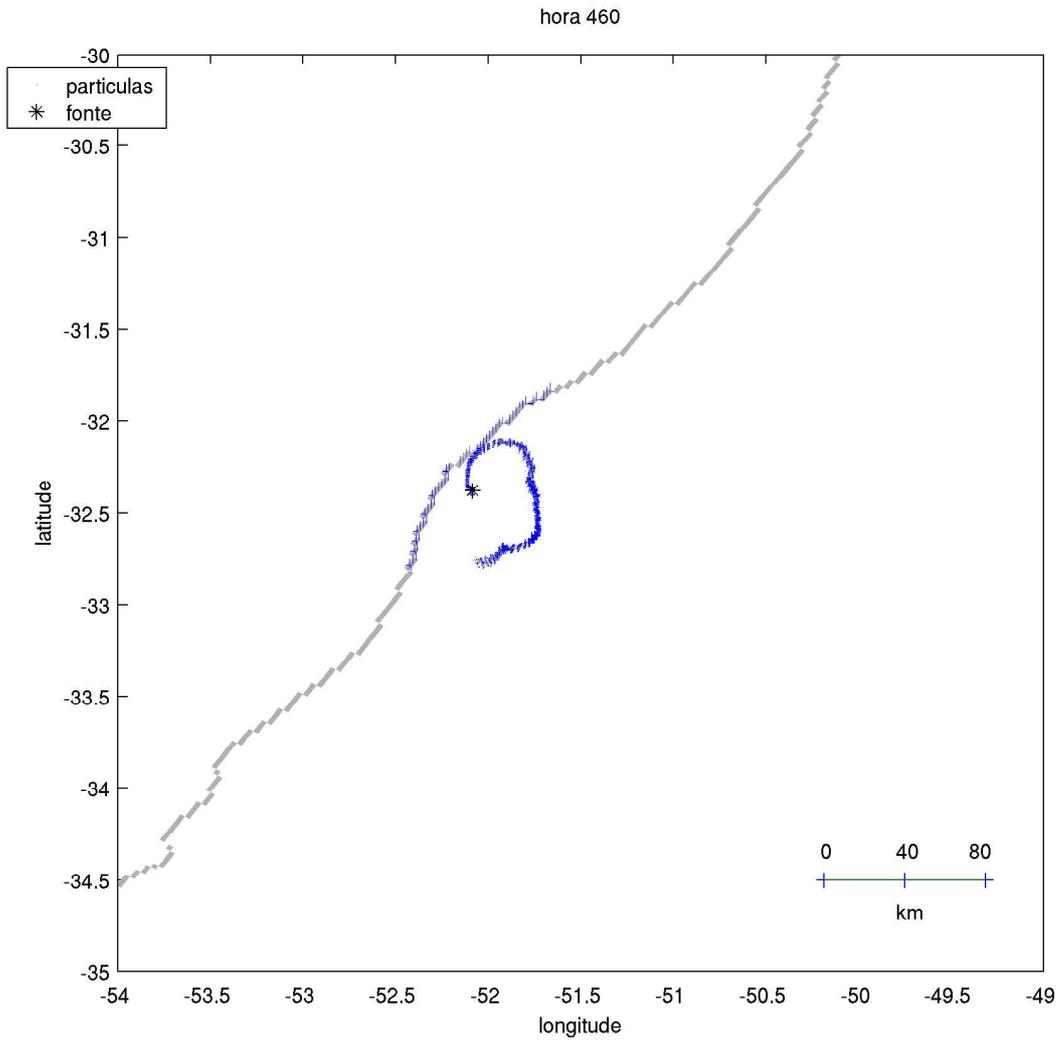


Figura 37: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no **P2** na passagem de um sistema frontal as 460h horas de modelagem.

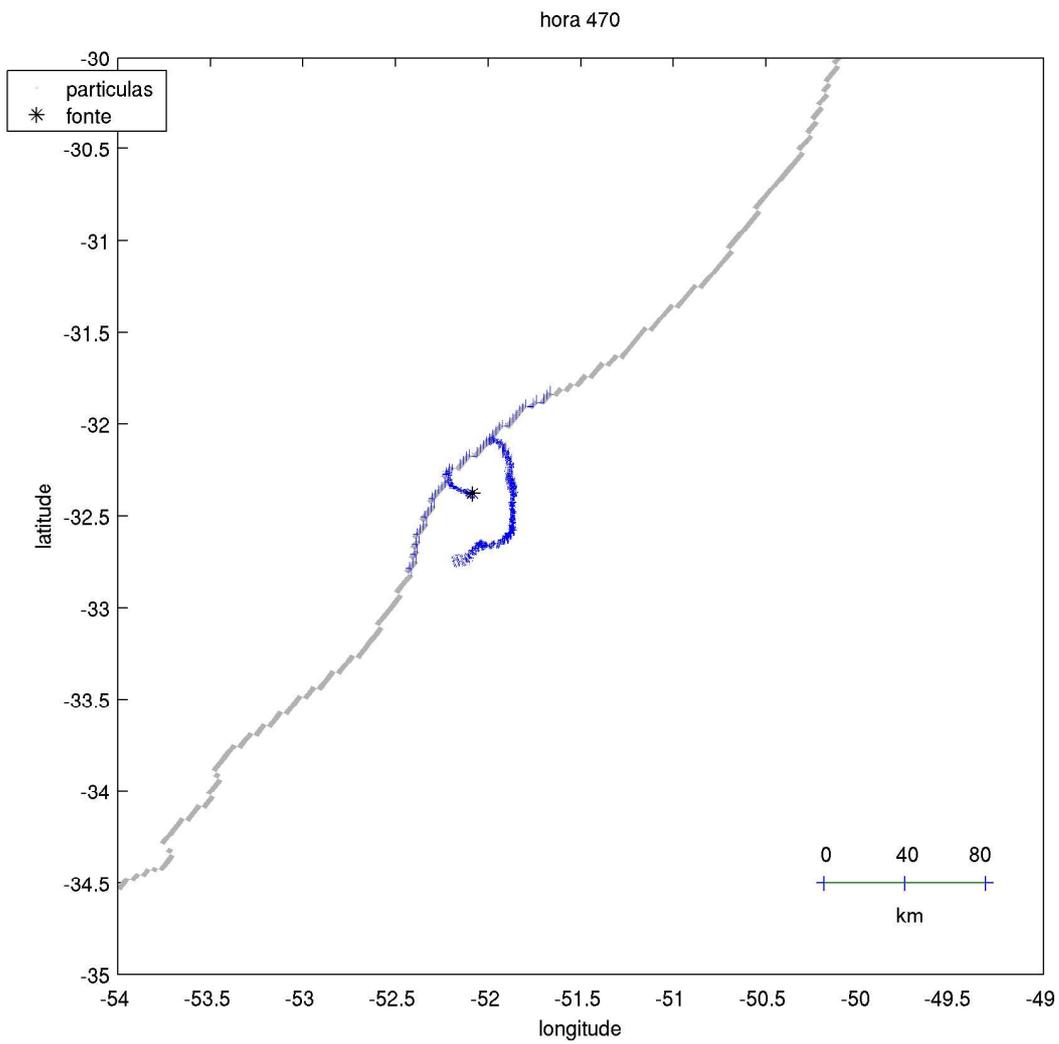


Figura 38: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no **P2** na passagem de um sistema frontal as 470h horas de modelagem.

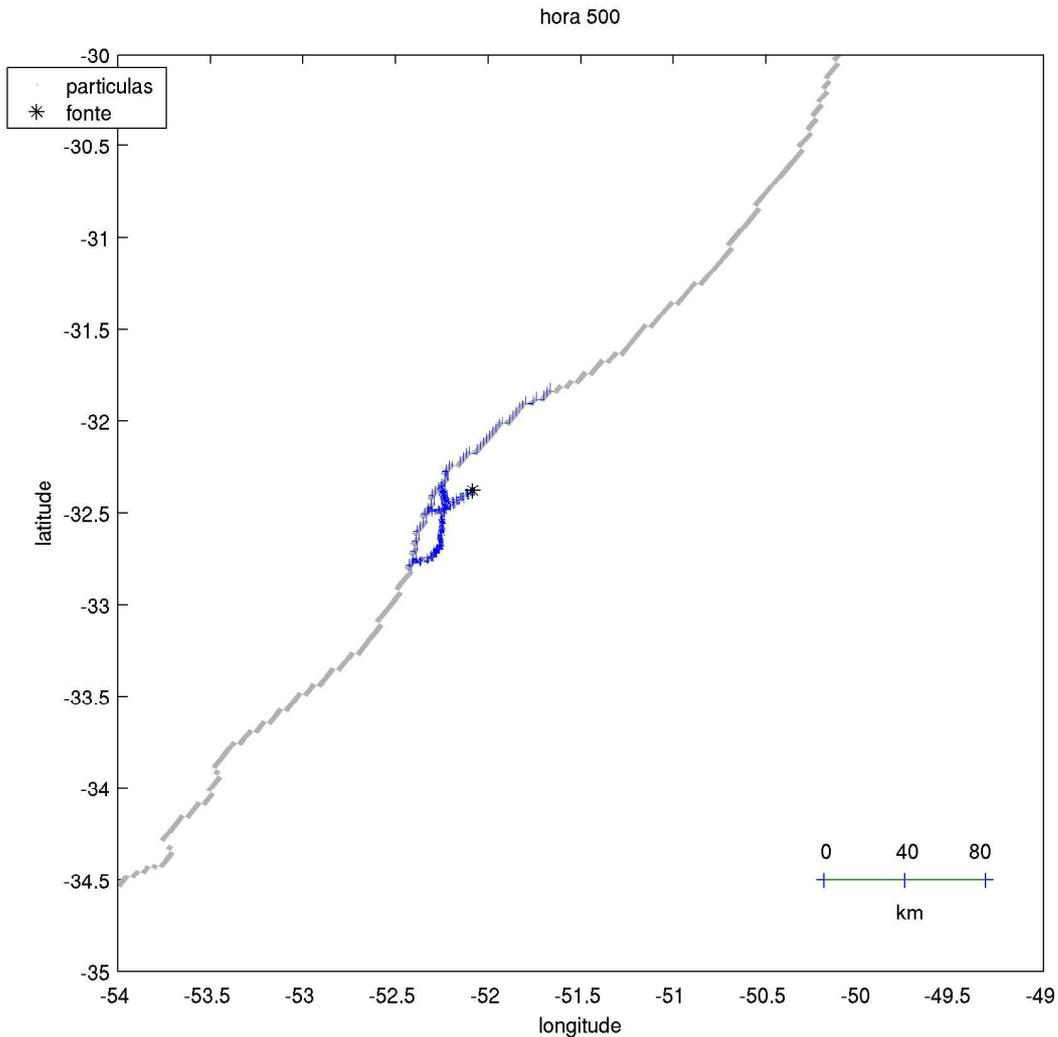


Figura 39: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no **P2** na passagem de um sistema frontal as 490h horas de modelagem.

Com a rotação do vento (início da passagem de frentes), que nessa situação soprava do continente (**NW** e **W**), a mancha de óleo começa a se curvar (Figura 35) e foi afastada da costa. Entretanto o vento não foi intenso e permaneceu nessa direção por pouco tempo. As Figuras 49 e 50 mostram os campos de correntes e a contribuição do vento no começo da passagem do sistema frontal. É possível observar uma zona de convergência nos fluxos dos ventos e das correntes. A escala espacial da zona de convergência de fluxo dos ventos é maior que das correntes.

Durante a passagem do sistema frontal os ventos passam a ser de **SW-S** e as correntes para **NE**, que são mostrados nas Figuras 52 e 51. A Figura 36 mostra o óleo que foi derramado primeiro distante da costa, e o óleo que foi derramado posteriormente próximo a fonte já posicionado ao norte da mesma. A Figura 37 mostra o óleo se dirigindo para a costa ao Norte da fonte e novamente devido a curva da linha da costa uma parte da mancha foi transportada para a terra.

Na Figura 38 o vento, que anteriormente era de **SW**, agora sopra de **SE-E**. Todo óleo que havia se afastado da costa começou a se aproximar da mesma e grande parte acaba atingindo a terra. Os ventos são de **SW-S** e as correntes para **NE** que são mostrados nas Figuras 54 e 53. A Figura 39 mostra a situação em que o vento fica de **E**, e que também empurraria o óleo em direção a costa na mesma longitude da fonte, essa situação caracteriza o final da passagem da frente e o cenário típico (predominante) volta a se estabelecer (Figura 34).

Na passagem dos sistemas frontais o tempo de ação dos vento que afastavam o óleo da costa (**NW**), e suas intensidades foram menores se comparados ao ventos que aproximavam o óleo da costa(**SW**). Apesar de no começo da passagem dos sistemas frontais o óleo ser afastado da costa quando o vento virara para **SW**, ele foi mais eficiente no transporte levando todo o óleo para a costa. A passagem dos sistemas frontais aumenta o tempo de chegada do óleo na terra e conseqüentemente o processo de dispersão horizontal do óleo, entretanto como considerarmos o óleo um composto conservativo, as frentes contribuem para aproximar o óleo da costa.

O aumento do tempo de chegada do óleo na costa aumenta o tempo em que este está sujeito ao intemperismo. Um dos processos de intemperismo importante no contexto é a evaporação. Nesse processo os compostos mais voláteis (e mais tóxicos) evaporam, o que tornaria o óleo menos prejudicial ao ecossistema caso esse fenômeno ocorra longe da costa.

Caso a turbulência aumente muito na superfície a dissolução da parte solúvel do óleo também aumenta e conseqüentemente a porção mais tóxica ao invés de evaporar, se dissolve na água. Essa pode ser considerado uma das situações mais prejudiciais aos organismos marinhos.

Outros processos de intemperismo como a fotooxidação, biodegradação e a sedimentação atuam diminuindo a massa total do óleo derramado.

Conforme a descrição da literatura os resultados aqui apresentados representam bem a advecção do óleo e o formato das manchas que é alongado nos primeiros dias do derrame. O formato alongado das manchas acontece normalmente em derrames superficiais contínuos, em locais onde ocorre a passagem de sistemas frontais. Derrames que geram manchas com formato alongado são reportados por *Proctor et al.* 1994 e *Korotenko et al.* 2000. Como exemplo, o experimento realizado por *Murray* (1982) simulando um derrame contínuo superficial, na costa da Flórida, com o transporte dominado pelo vento na passagem de um sistema frontal. O formato da mancha simulada(Figura 40) e sua trajetória é similar aos resultados obtidos nas simulações desse trabalho.

O formato das manchas desse trabalho também foram similar aos primeiros dias da mancha(Figura 41) gerada pelo acidente do navio mercante Argo ocorrido na costa da Califórnia descrito por *Murray* (1982) e *NOAA* (2001). Principalmente nos primeiros dias do acidente onde a mancha foi descrita como em forma de gancho. A contribuição do vento nesse acidente foi de 4%. Após alguns dias a forte maré da região fez com que a mancha ficasse mais dispersa.

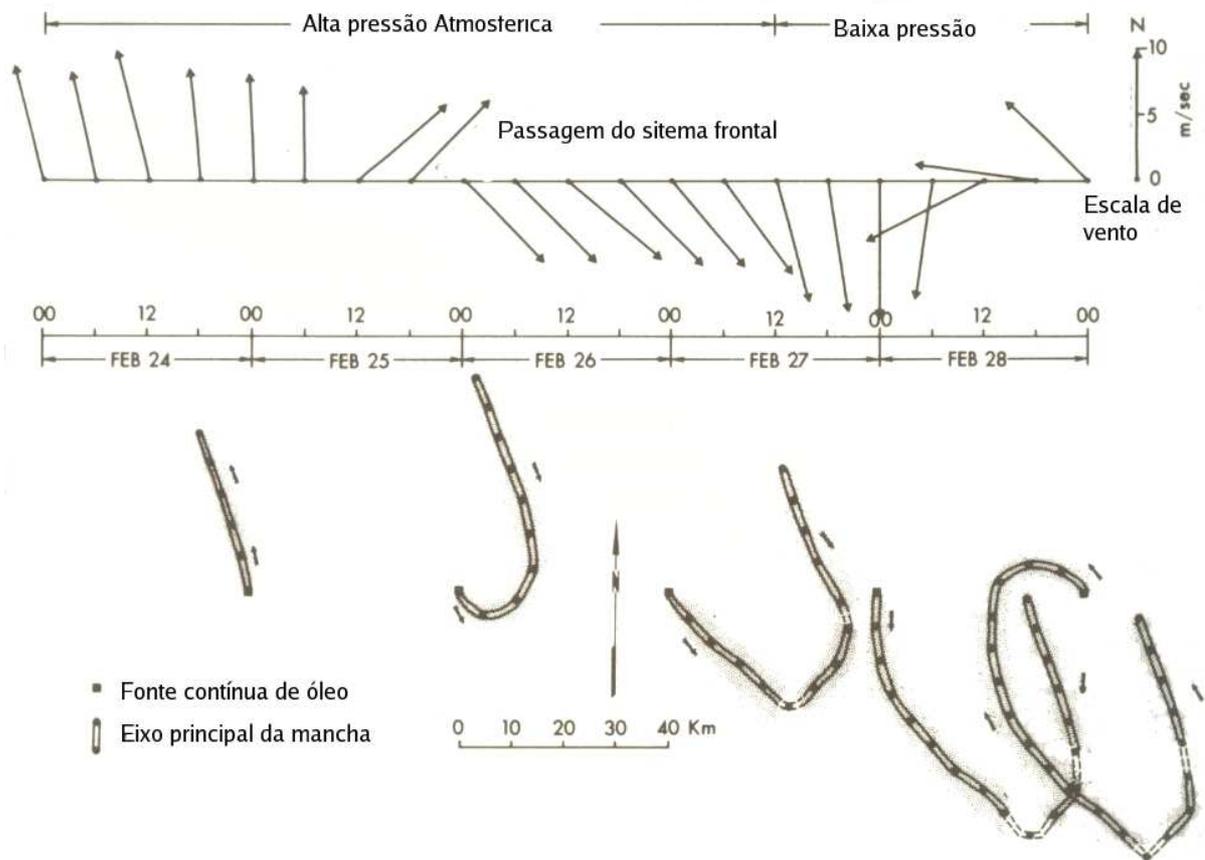


Figura 40: Evolução temporal de um derrame simulado na passagem de um sistema frontal na costa da Flórida.
 Fonte: Murray, 1982.

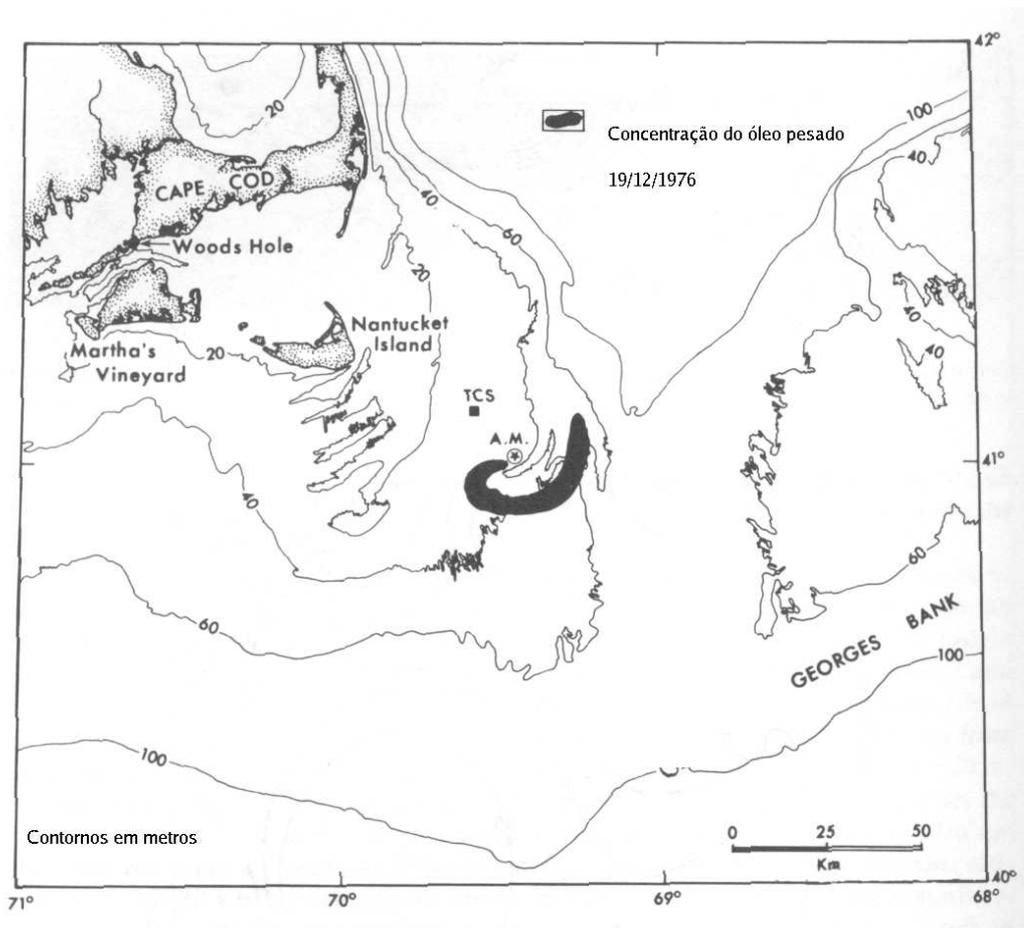


Figura 41: Mancha causada pelo naufrágio do navio mercante Argo no dia 19/12/1979. Fonte: Murray (1982).

A Figura 42 mostra a posição final das partículas (óleo) no experimento de 2 meses . É possível observar que todo o óleo atingiu a costa nesse caso. A passagem dos sistemas frontais que mudaram a direção do vento fez com que uma boa parte do óleo chegasse na costa ao Norte do ponto fonte.

Para situações emergenciais a probabilidade das trajetórias do óleo é um dado importante para as equipes que trabalham na contenção do óleo em caso de acidentes. A Figura 43 mostra a probabilidade da trajetória do óleo num derrame com 10 dias de duração.

Os resultados probabilísticos da posição final do óleo são melhores visualizados usando

a porcentagem do campo de massa como mostrado na Figura 44. A técnica usada para o cálculo do campo de massa (*Zhang et al., 1997*) através das partículas envolve uma distribuição gaussiana parametrizada por um coeficiente que considera a dispersão final das partículas. Para resultados mais precisos esses valores teriam que ser calibrados com experimentação. Com o aumento do coeficiente aumenta a área de influência da mancha.

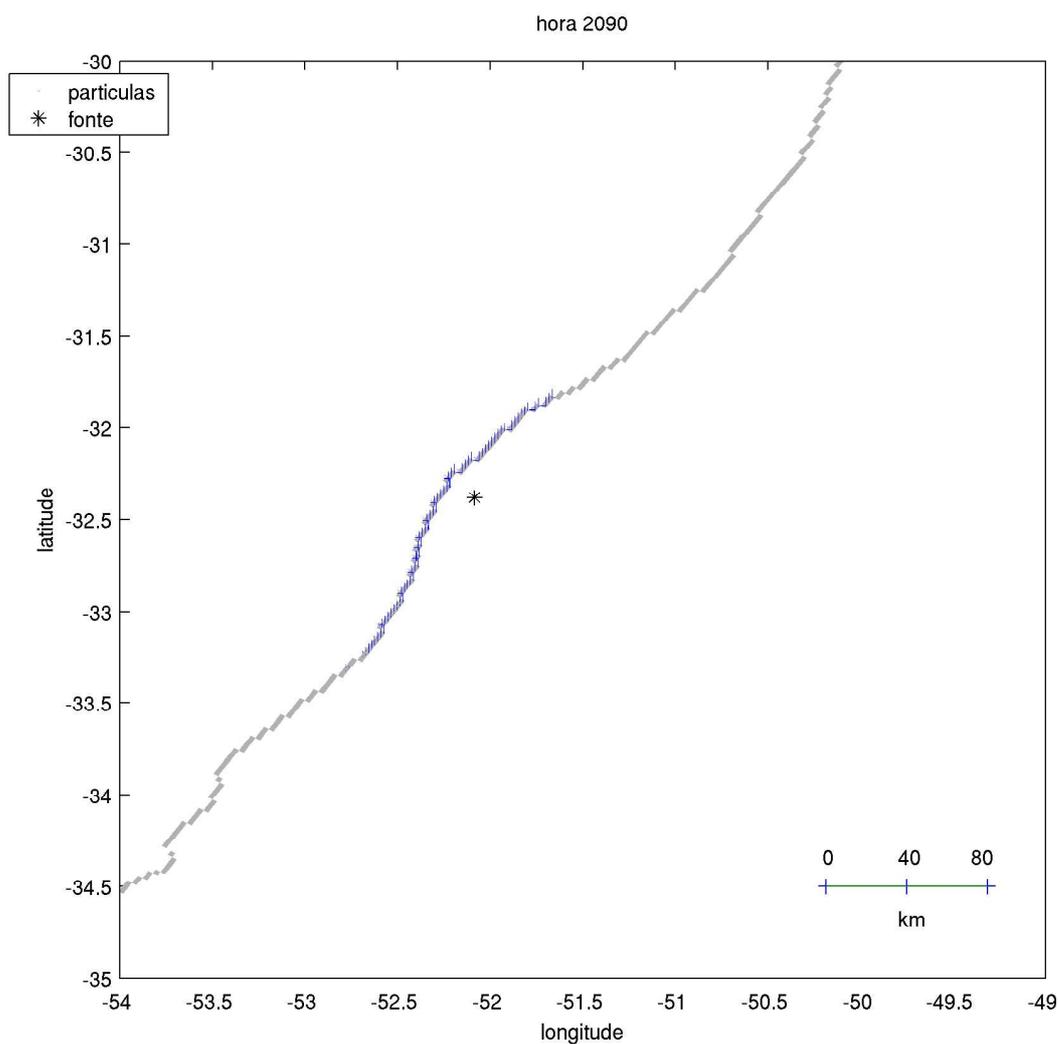


Figura 42: Posição final das manchas de óleo do modelo probabilístico com a fonte localizada próxima a desembocadura da laguna.

Em certos locais apesar de haver partículas a concentração do local é baixa aparecendo como zero no campo de massa. Esse pode ser um dos efeitos de se usar o coeficiente de

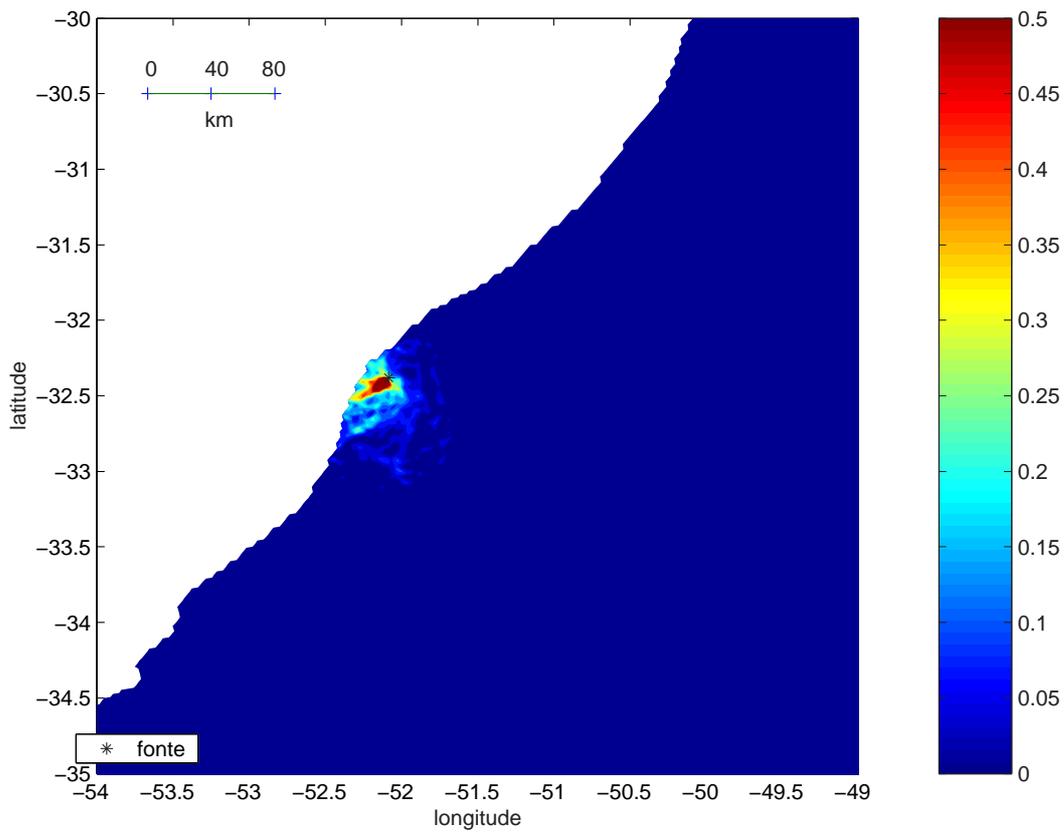


Figura 43: A Figura mostra a probabilidade da trajetória do óleo num derrame com 10 dias de duração, na simulação em que a fonte era localizada no **P2**.

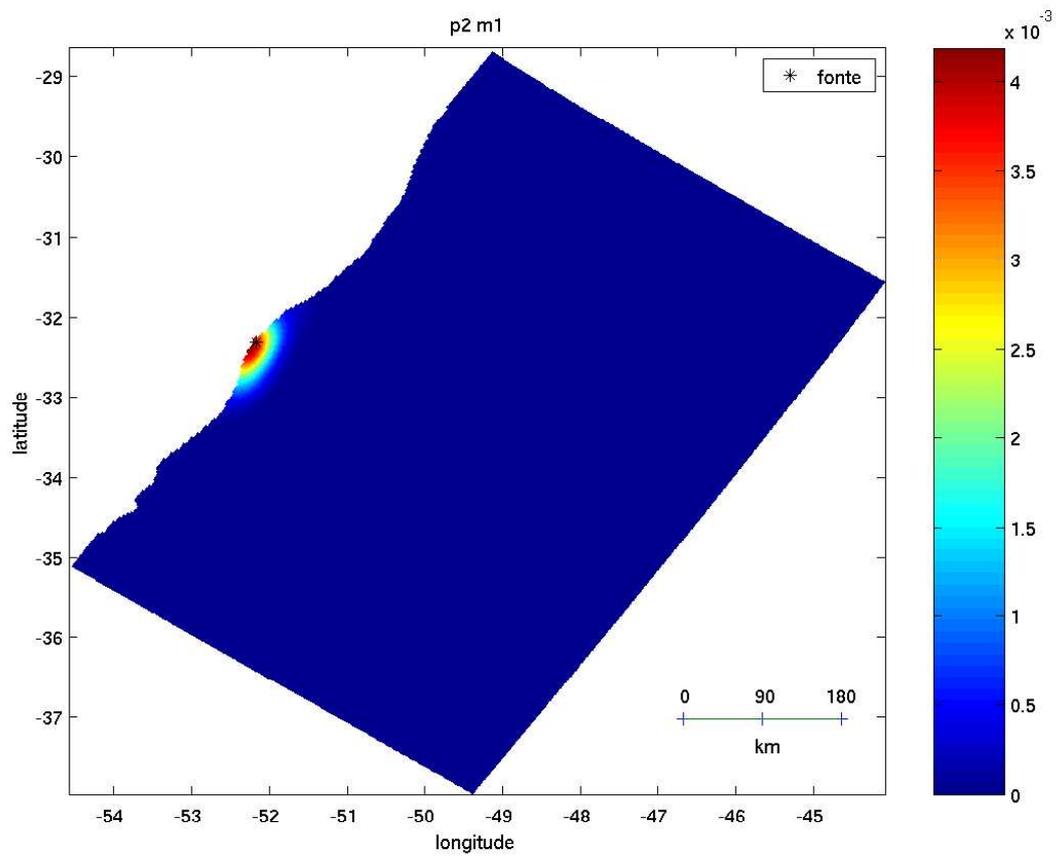


Figura 44: Porcentagem do campo de massa (óleo) final do modelo probabilístico com a fonte localizada próxima a desembocadura da Laguna.

difusão turbulenta $100m^2s^{-1}$ no cálculo das janelas gaussianas. As janelas são distâncias que controlam a suavização das isolinhas do campo de massa *Zhang* (1994). Uma calibração seria necessária para resultados mais precisos.

É possível observar (Figura 44) uma concentração maior ao Sul do ponto de lançamento e uma diminuição da mesma a medida que se aumenta a distância desse ponto, formando assim distribuições concêntricas. Os resultados mostram que um derrame neste local da costa(**P2**) nas condições predominantes ou na passagem de um sistema frontal após a virada do vento seria desastroso.

As simulações mostram que o óleo ficaria muito concentrado na região que parece ter baixa dinâmica quando comparada a outras regiões costeiras ao Norte(**P3**) da área de estudo, esse fato pode ser observado pelo campo de velocidades médias na Figura 32.

No final do experimento probabilístico todo o óleo acabaria nas praias arenosas da região. É provável que se considerássemos a dispersão, parte do óleo seria espalhado por fenômenos de menor escala que não são considerados no modelo de óleo. Esse processo iria contribuir para não deixar o óleo tão concentrado.

Para considerar os processos de dispersão de maneira correta, deveria ser incluído no modelo uma série de parâmetros adicionais e algoritmos que permitissem mudanças nas propriedades físico-químicas do óleo. Como por exemplo, a temperatura e a viscosidade do óleo como mostrado em *Lages* (2003).

Segundo *Murray* (1982), os fenômenos de menor escala responsáveis pela dispersão do óleo que não são representados nesse modelo seriam na atmosfera as rajadas de vento, tornados e turbulência e no oceano as ondas de gravidade livres, turbulência, Circulação de Langmuir e processos costeiros como a deriva litorânea e correntes de retorno.

Essa simulação representa bem óleos que ficam em superfície(baixa densidade), como os óleos leves(alto índice API) que normalmente são transportados por navios da Argentina, passando pela nossa plataforma e entrando no canal em direção a Refinaria Ipiranga

localizada no Estuário.

O modelo probabilístico tem melhor validade para casos em que não há tempestades e com baixa descarga do Prata e da Laguna dos Patos. Nas condições de ondas de tempestade o processo de dispersão vertical se tornaria importante, o coeficiente que determina o efeito direto do vento iria diminuir.

Na região normalmente essas tempestades estão associadas ao vento **S-SW** e o transporte para o **N** pode estar sendo superestimado. Com a dispersão vertical do óleo, o vento perde a importância sendo que o coeficiente deve ser menor que 0,035. Esse efeito é pouco discutido nos trabalhos realizados, e não foram encontrados algoritmos que representam a atenuação do efeito do vento com o aumento da profundidade.

Outro processo que ganha importância com o aumento de turbulência na interface água ar é a emulsificação. Esse processo pode aumentar a densidade do petróleo ao ponto de ficar similar a da água. Tal processo também aumentaria a importância das correntes em relação ao vento porque aumenta a dispersão vertical.

O aporte de água continental mais doce na plataforma pode ter grande importância na circulação termohalina da plataforma e gerar correntes na superfície residuais para o Norte (*Soares, 2003*), principalmente nos períodos de maior descarga que não é o caso do verão.

Outra influência do aporte continental é a formação de uma frente que pode vir a funcionar como uma barreira impedindo o óleo de atingir a região da costa que é influenciada pela pluma de água doce. Esse efeito foi observado no Delta do Mississipi num acidente ocorrido na Plataforma MP41C da companhia Chevron em 10 de março de 1970 quando o estuário estava num período de alta descarga (*Murray, 1982*).

As plumas podem ser importantes na circulação regional. No caso específico do acidente do navio cargueiro Prestige na Espanha, desprezar a circulação gerada por rios na plataforma-continental foi um dos fatores que causaram erros nas simulações que tentaram

prever com precisão a trajetória do óleo nesse ambiente *M. R. Villarreal et al. (2006)*.

A pluma da Lagoa dos Patos provavelmente funcionaria como uma barreira para o óleo caso a fonte não estivesse sobre a mesma. Dessa forma a região costeira que estivesse sobre a influência da pluma ficaria protegida do óleo que provavelmente se concentraria nas regiões costeiras adjacentes. Não foi encontrado na bibliografia trabalhos sobre modelos de óleo aplicados que conseguissem reproduzir com sucesso derrames em regiões costeiras que tivessem forte influência de descarga continental na plataforma na hora do derrame.

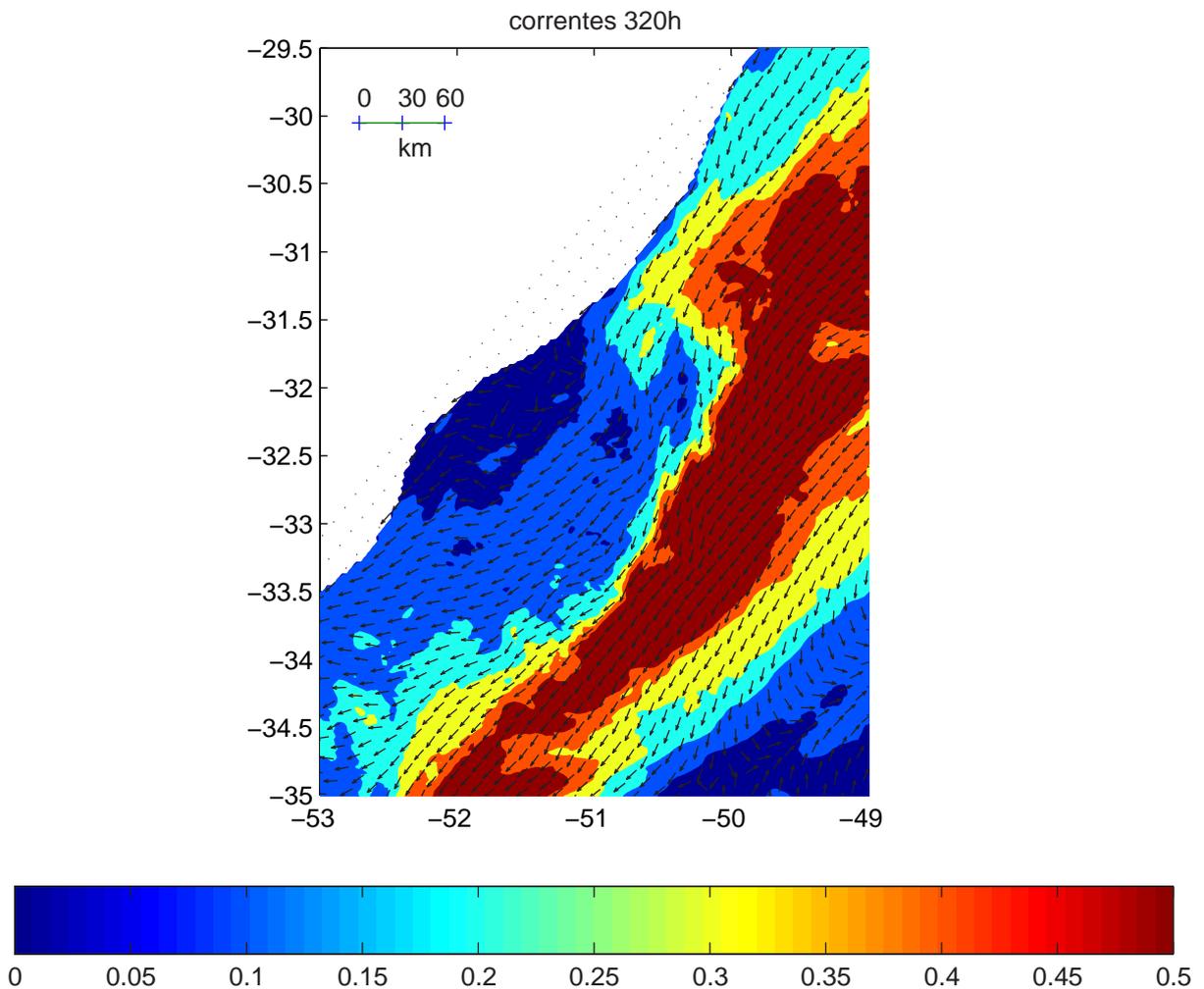


Figura 45: Correntes ($m s^{-1}$) do modelo hidrodinâmico, 1m abaixo da superfície em 320h de modelagem.

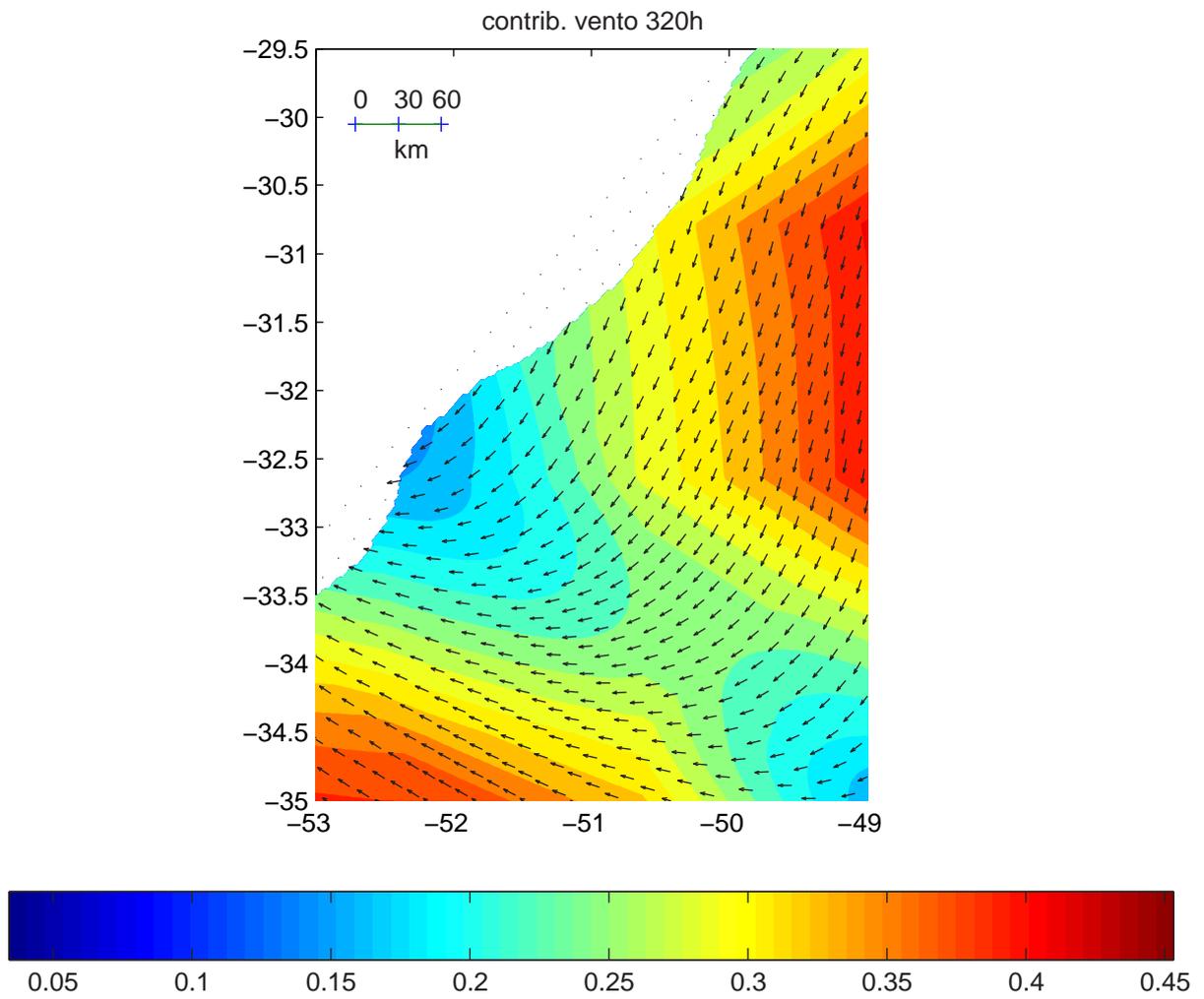


Figura 46: Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 320h de modelagem.

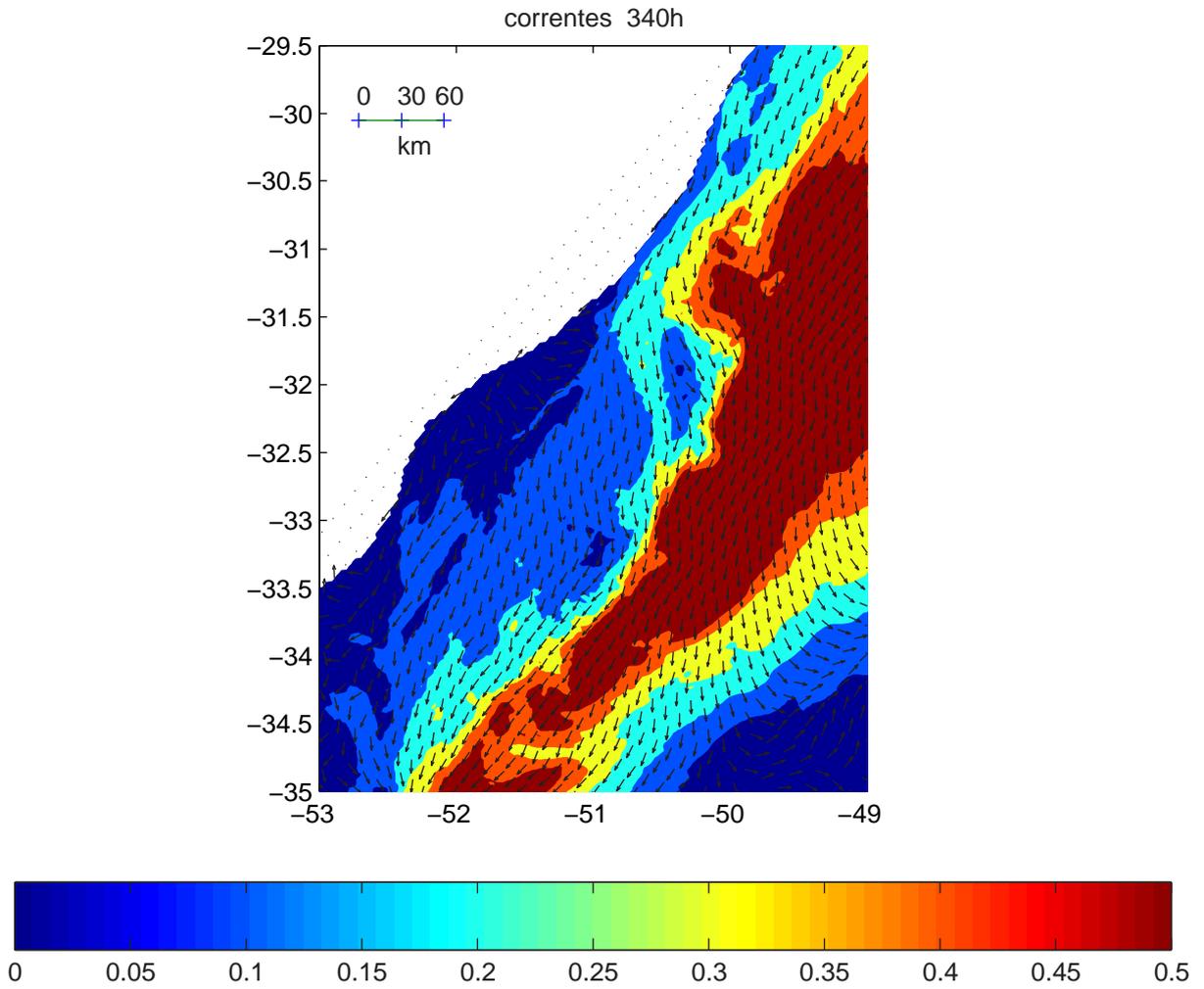


Figura 47: Correntes(ms^{-1}) do modelo hidrodinâmico $1m$ abaixo da superfície em $340h$ de modelagem.

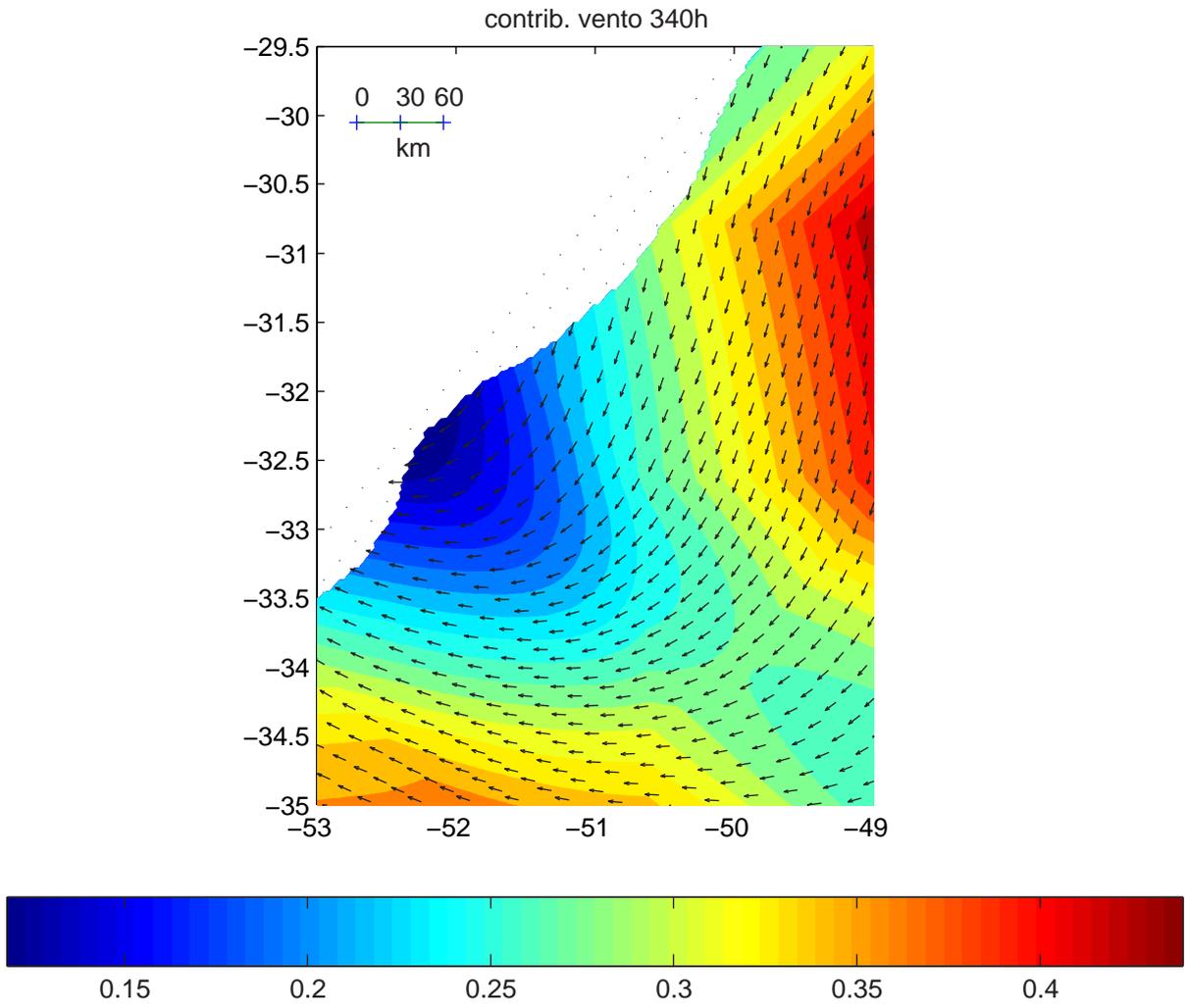


Figura 48: Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 340h de modelagem.

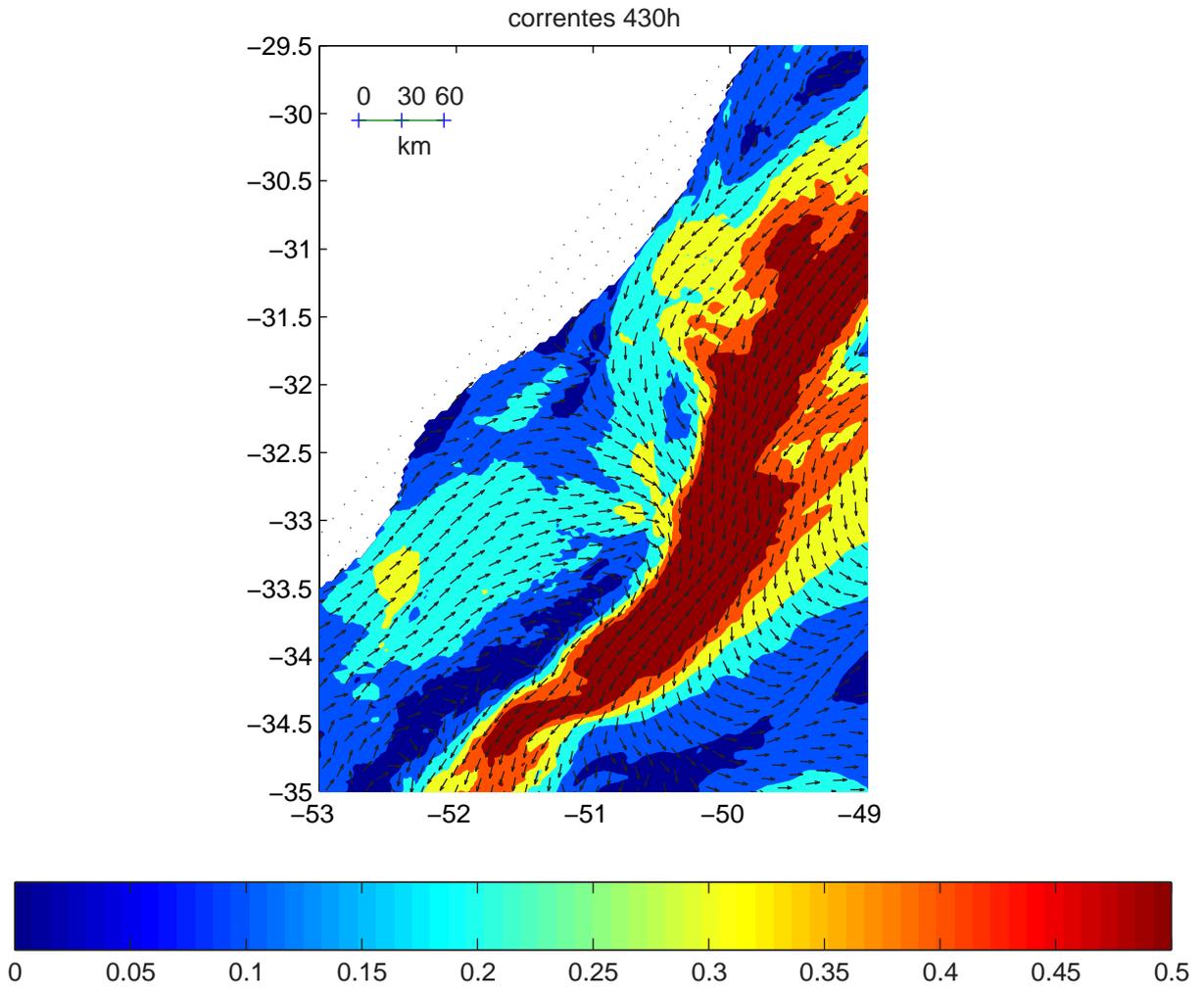


Figura 49: Correntes(ms^{-1}) do modelo hidrodinâmico, 1m abaixo da superfície em 430h de modelagem.

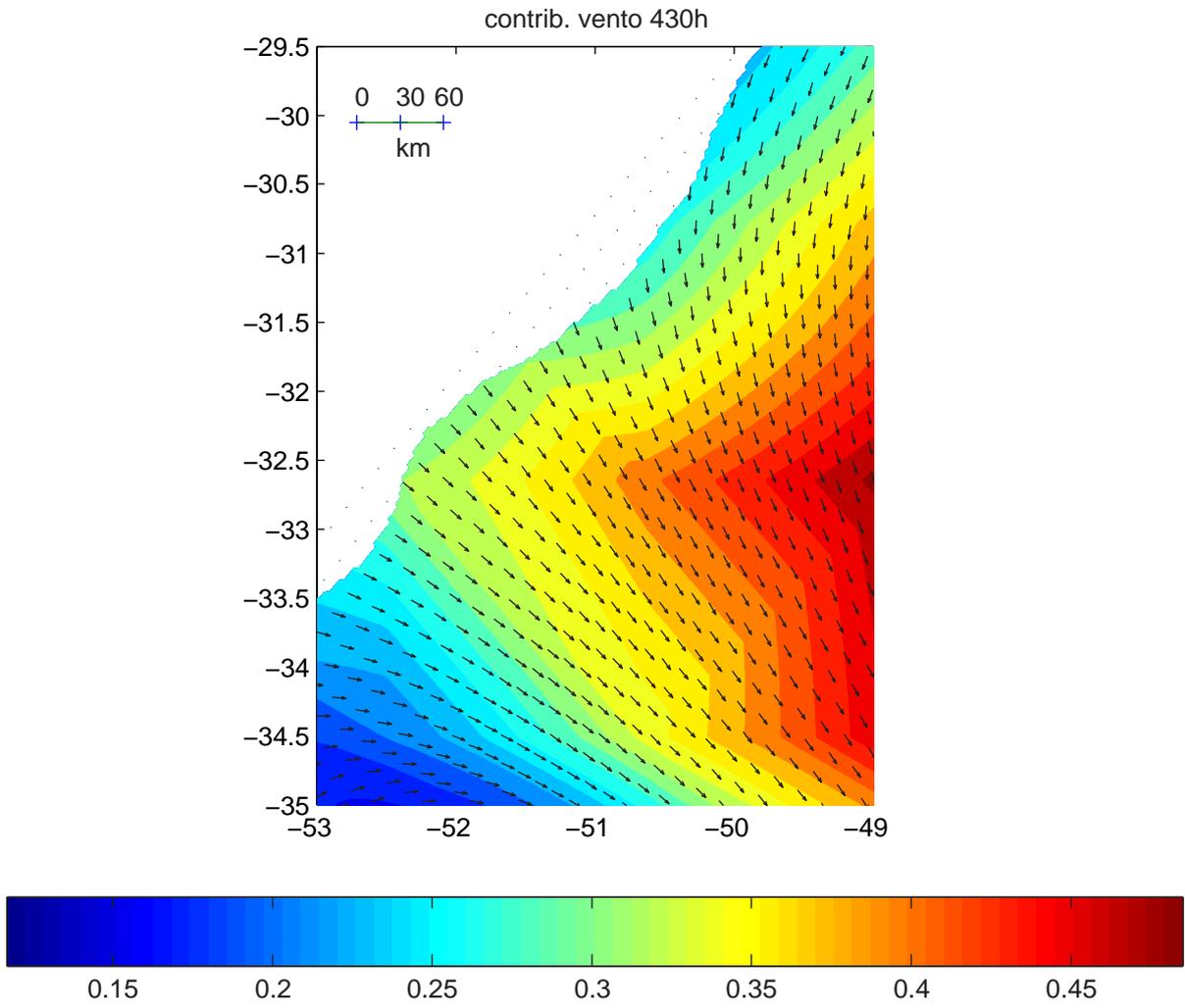


Figura 50: Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 430h de modelagem.

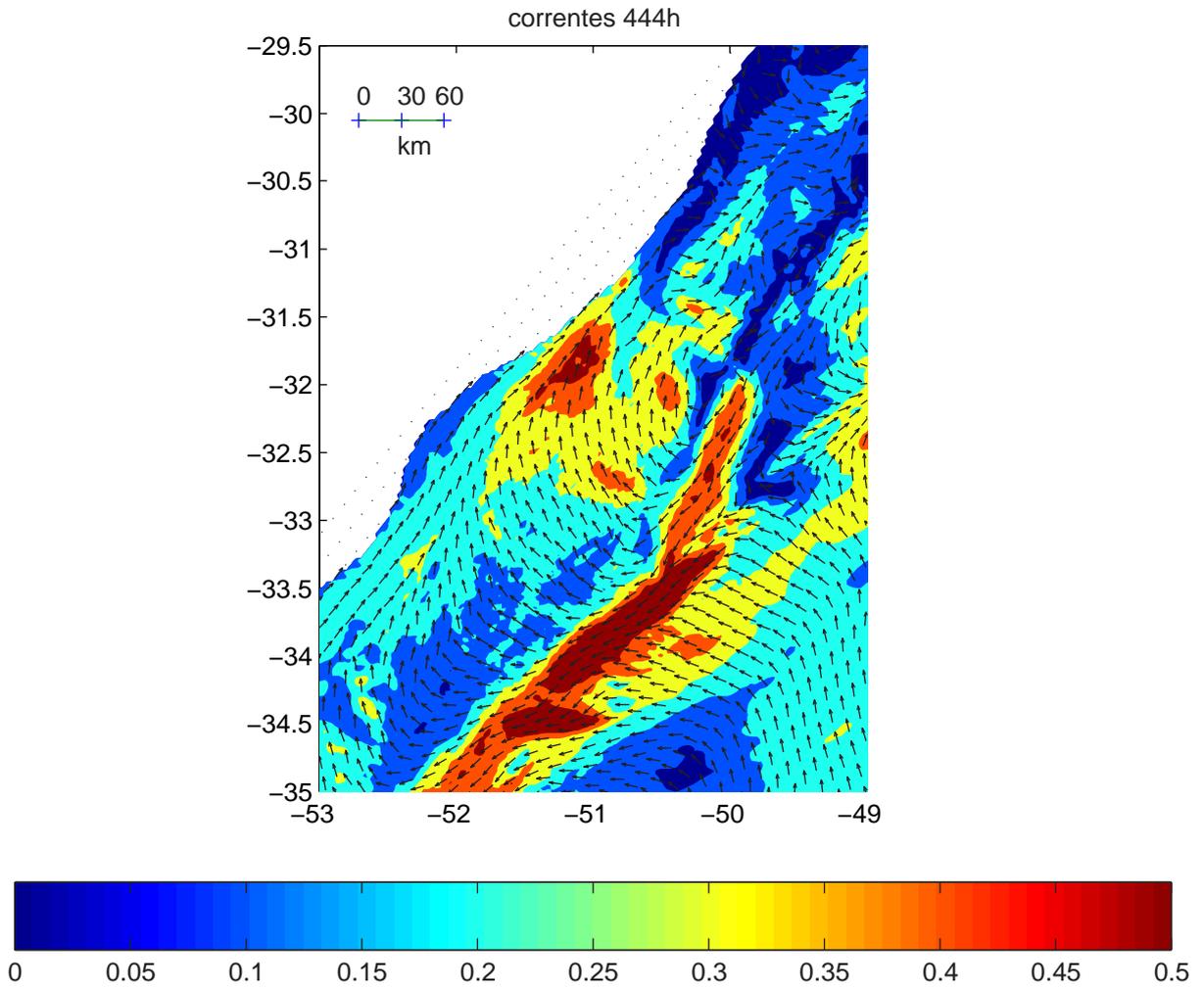


Figura 51: Correntes(ms^{-1})do modelo hidrodinâmico, $1m$ abaixo da superfície em $444h$ de modelagem.

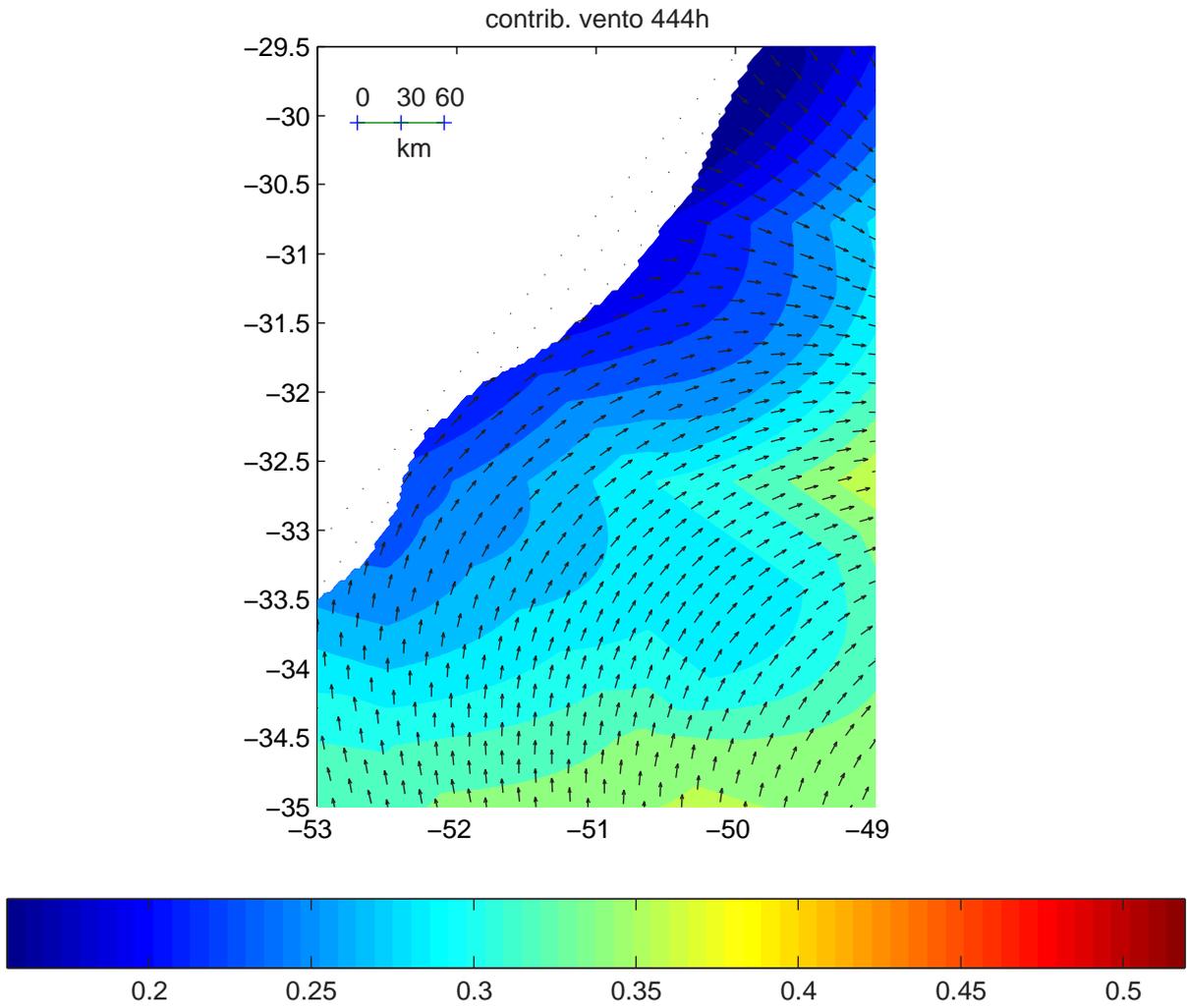


Figura 52: Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 444h de modelagem.

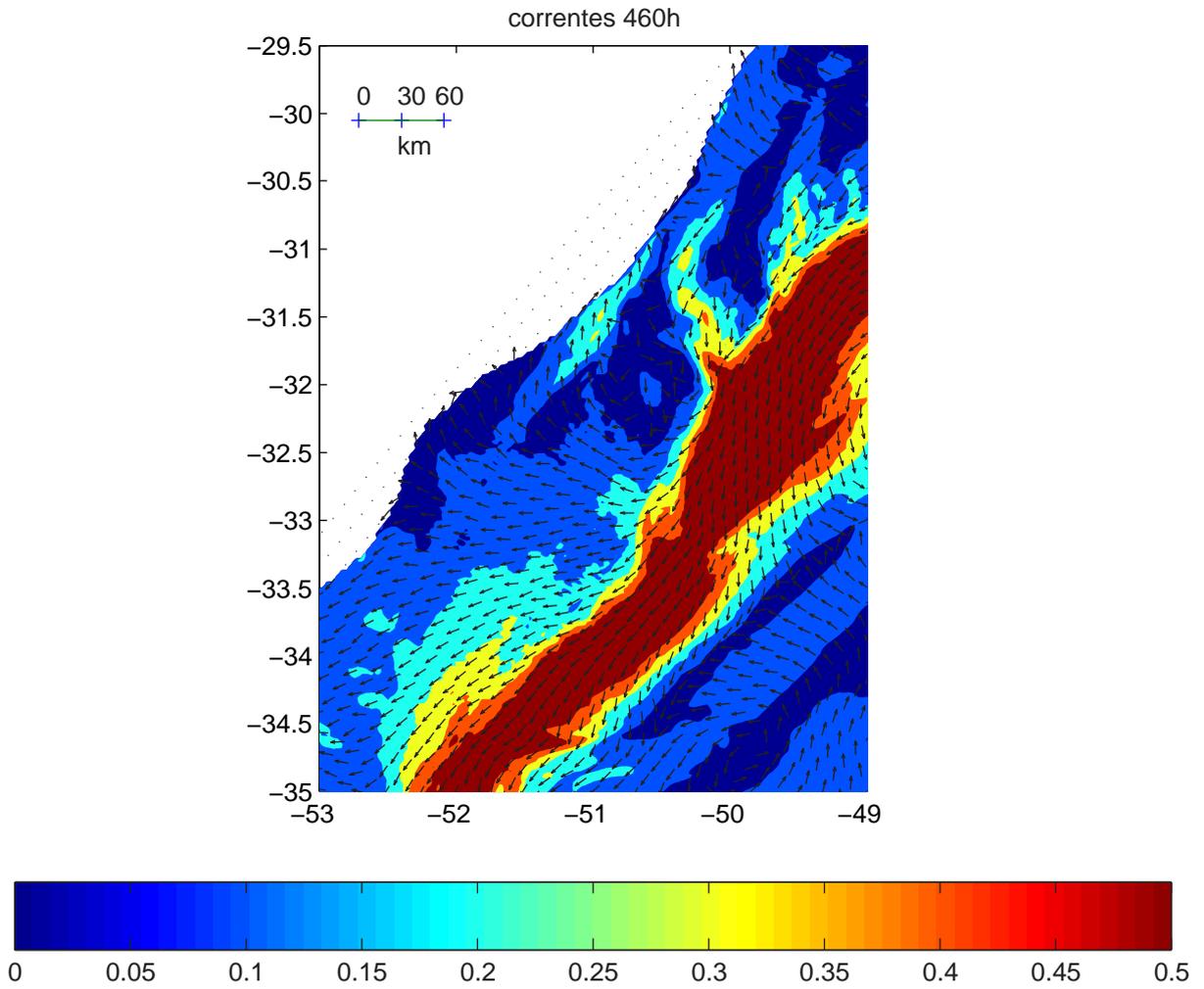


Figura 53: Correntes(ms^{-1})do modelo hidrodinâmico, 1m abaixo da superfície em 460h de modelagem.

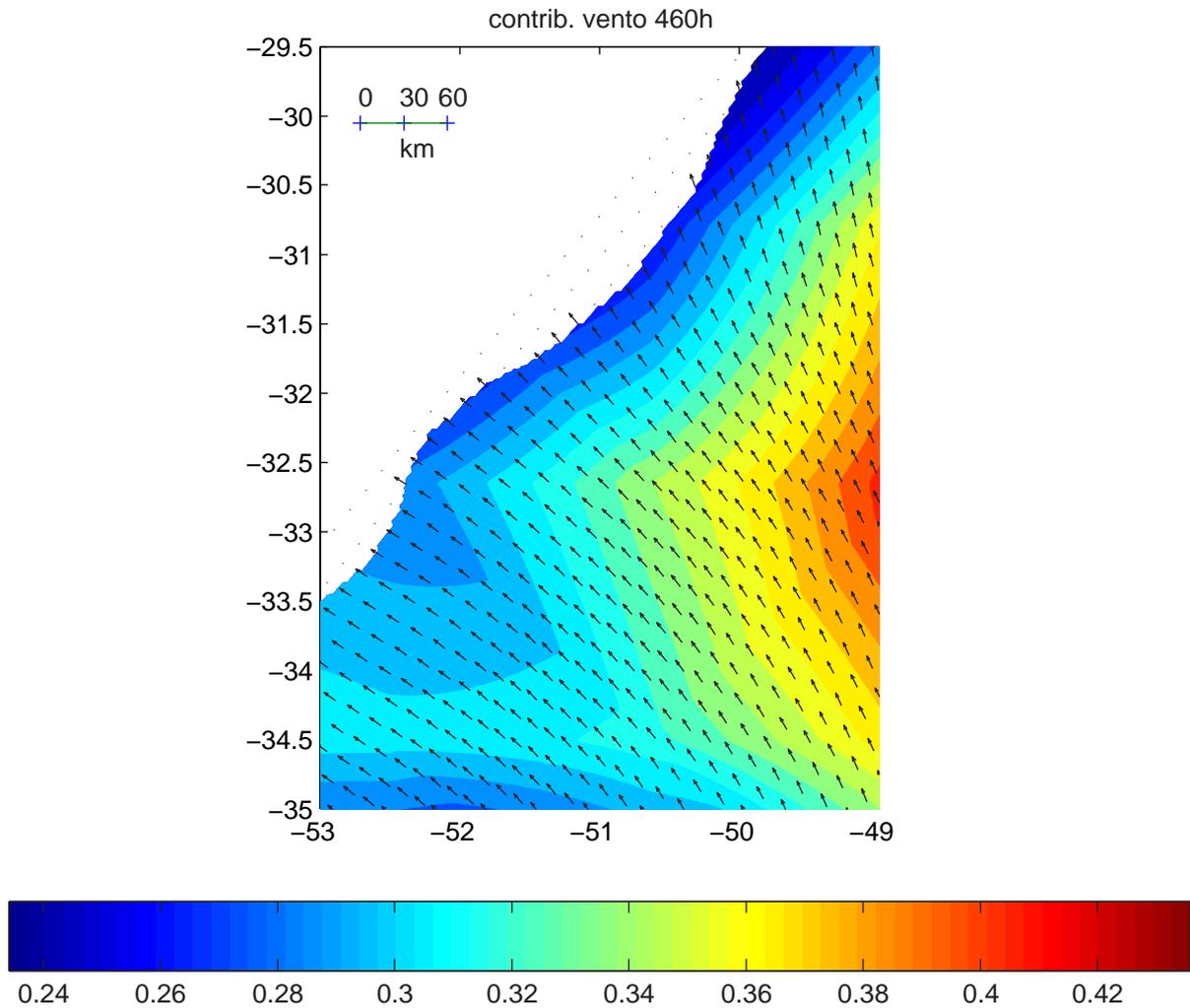


Figura 54: Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 460h de modelagem.

4.2.2 Movimentação do óleo com a fonte localizada nas monobóias(P3) .

Esse experimento mostra que o efeito direto do vento é a forçante dominante no transporte de óleo em superfície na plataforma. Nessa região as correntes da componente **PC** ganham importância porque são mais intensas se comparadas a as velocidades dessa componente localizadas no **P2**.

As situações que foram mais comuns quando a fonte de óleo estava localizada nas monobóias são mostradas nas Figuras 55 e 56. Apesar de uma parte do óleo atingir a

costa nas proximidades da fonte, as pequenas mudanças de direção do vento em alguns momentos levou grande parte do óleo para o **SW** (Figura 56). As correntes médias também levam o óleo para o **SW**. Nas Figuras 45, 47, 46 e 48 são mostradas as correntes e a contribuição do vento nas situações mais comuns que foram descritas acima.

Se comparamos a simulação com a fonte de óleo localizada no **P3**, em relação a localizada no **P2**, nas situações mais comuns a primeira teve menor quantidade de óleo chegando na região da praia próxima a fonte de óleo isso devido as correntes e a orientação da costa em relação ao vento predominante.

Os mesmos efeitos causados pela passagem de sistemas frontais que foram encontrados quando a fonte de óleo era localizada no **P2** também foram encontrados quando a fonte de óleo estava localizada no **P3**. Embora no **P3** a passagem das frentes foi mais importante para transportar o óleo para a costa, porque em situações comuns menor quantidade de óleo chegava em terra se comparado ao **P2**.

A passagem dos sistemas frontais afastava da costa a mancha de óleo alongada (Figura 57) levando o óleo para o Norte (Figura 58). Em seguida, a atuação dos ventos predominantes de Leste e Nordeste traziam novamente o óleo para a costa (Figura 59). As contribuições dos ventos na passagem do sistema frontal são mostradas nas Figuras 50, 52, e 54. As correntes são mostradas nas Figuras 49, 51 e 53.

A Figura 61 mostra a posição final do óleo no modelo probabilístico. Com a fonte localizada nas monobóias o óleo teve um alcance mais ao Sul de quando a fonte era localizada próxima a desembocadura da laguna. A passagem de sistemas frontais ao afastar o óleo da costa permitiu que o mesmo atingisse a costa mais ao Sul, quando comparada o óleo que sofria a ação apenas do vento predominante.

Nessa simulação o posicionamento do óleo foi mais disperso em comparação ao caso em que a fonte era localizada próxima a desembocadura da Laguna, e chegou em regiões mais ao Sul apesar da fonte ser localizada mais ao Norte. Em caso de um acidente, se

comparado ao **P2**, o **P3** seria menos suscetível ao acúmulo de óleo porém um acidente no local implicaria num aumento da área atingida pelo óleo. A Figura 63 mostra a probabilidade da trajetória do óleo na simulação de um vazamento de 10 dias.

A Figura 62 mostra a porcentagem do campo de massa do óleo sendo possível perceber a maior dispersão e a formação de três pontos costeiros de acúmulo de óleo e não apenas um como ocorreu quando a fonte de óleo era localizada no **P2**.

Assim como no experimento anterior a região próxima a Rio Grande, onde a linha da costa é perpendicular ao vento predominante, teve concentração de óleo significante.

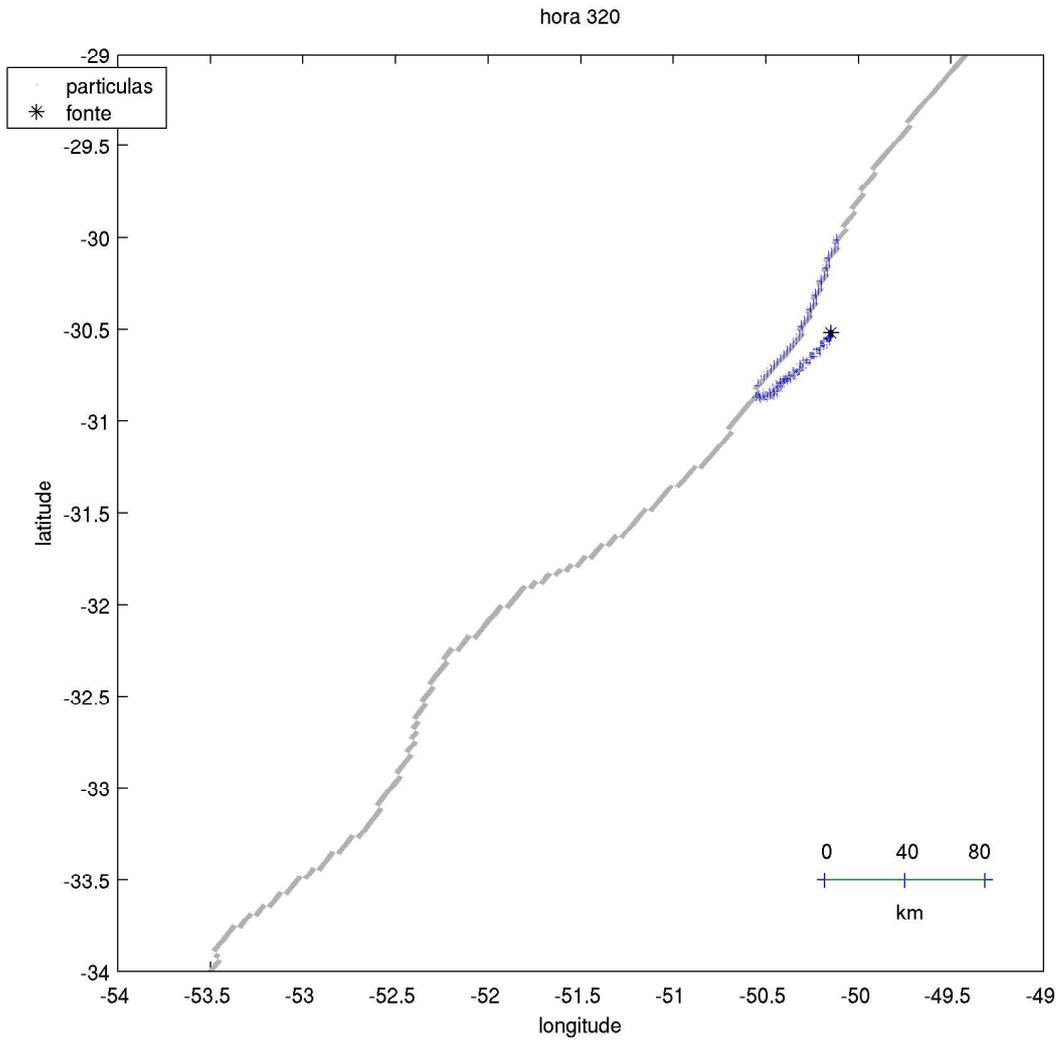


Figura 55: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no **P2** na passagem de um sistema frontal em 320h de modelagem.

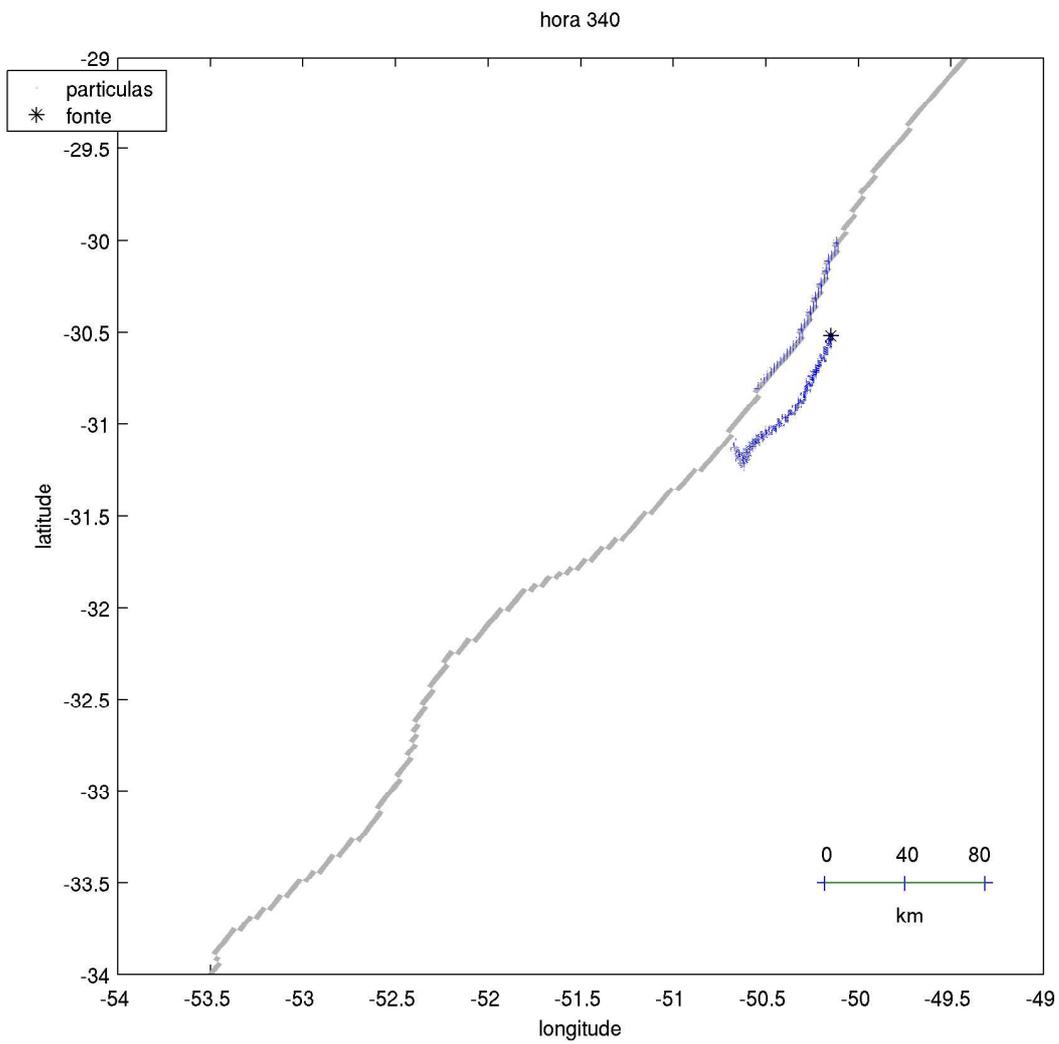


Figura 56: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada nas monobóias de Tramandaí na passagem de um sistema frontal 340h de modelagem.

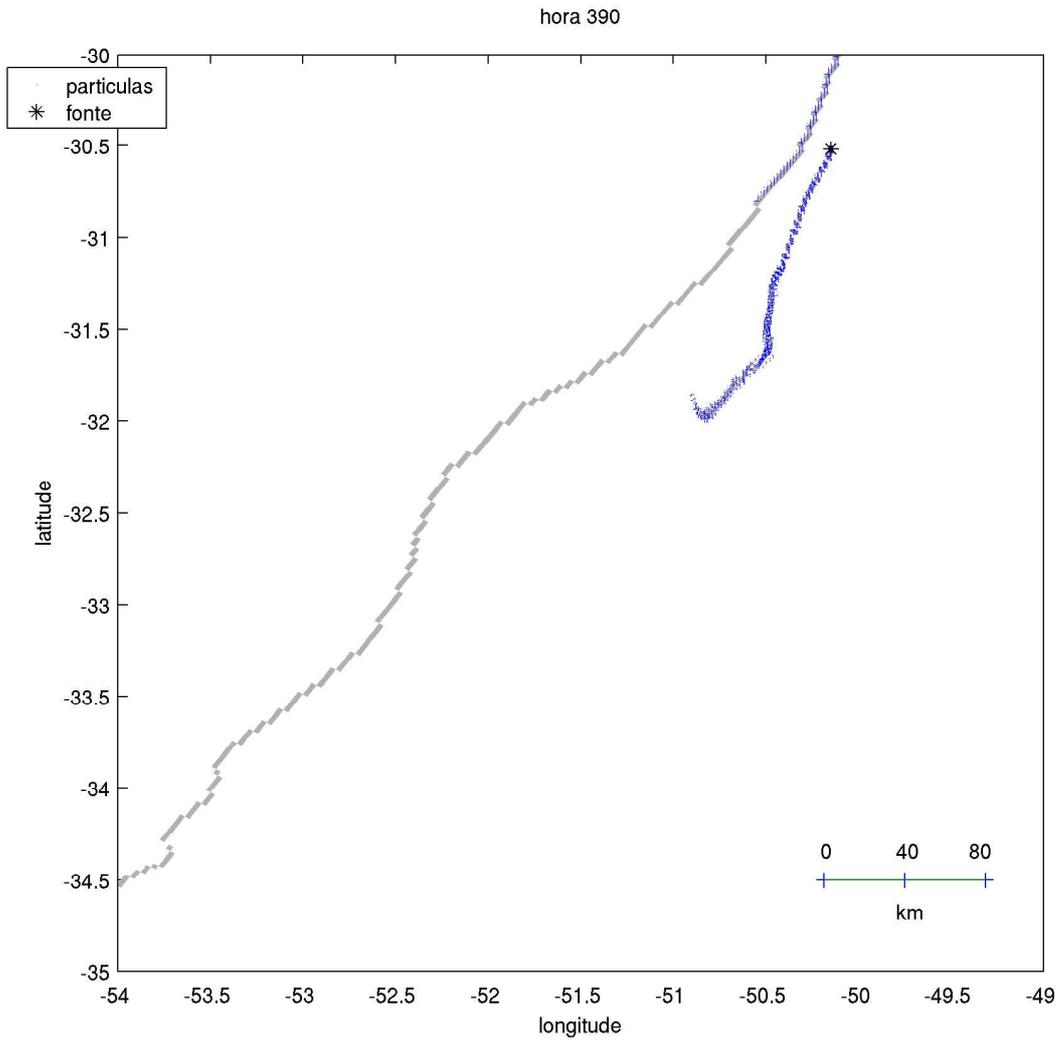


Figura 57: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada nas monobóias de Tramandaí na passagem de um sistema frontal as 390h de modelagem.

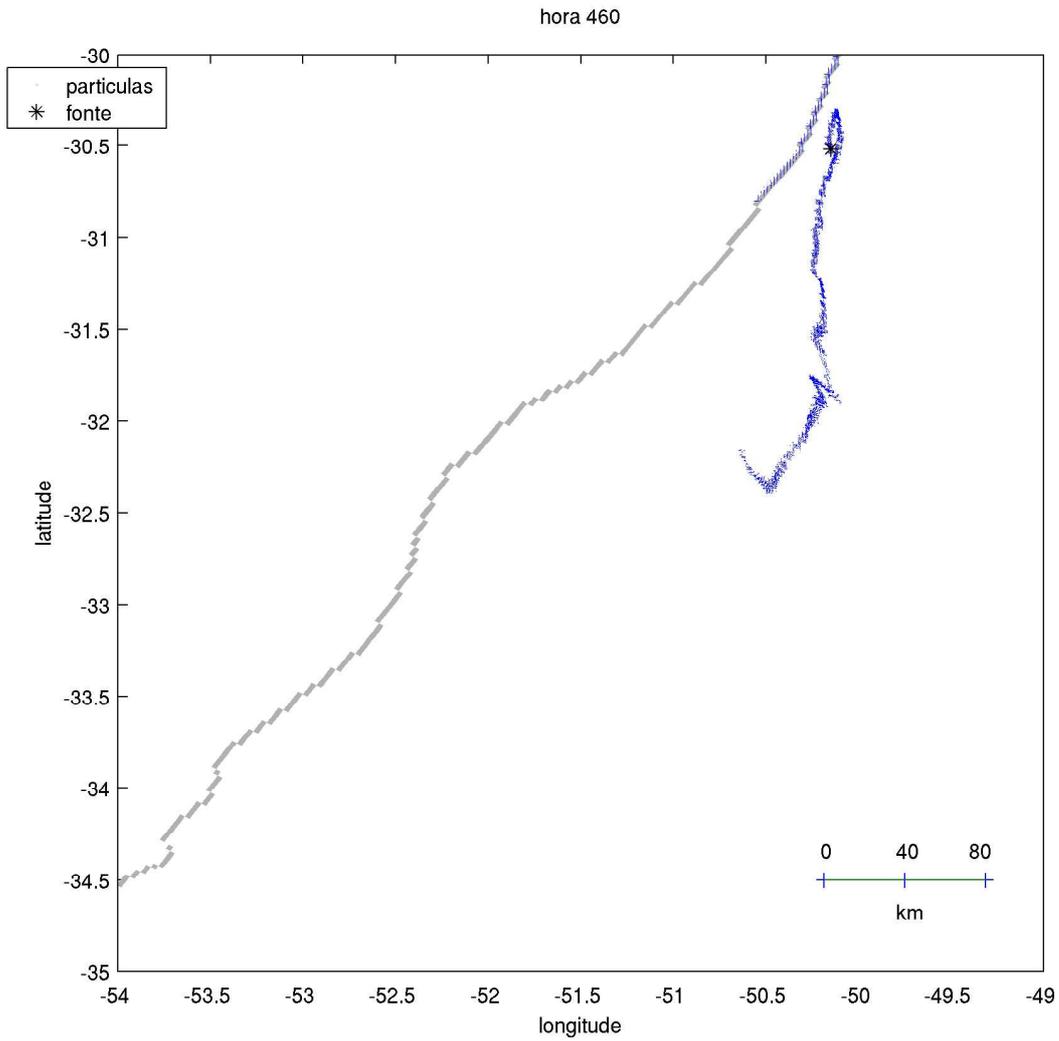


Figura 58: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada nas monobóias de Tramandaí na passagem de um sistema frontal em 460h de modelagem.

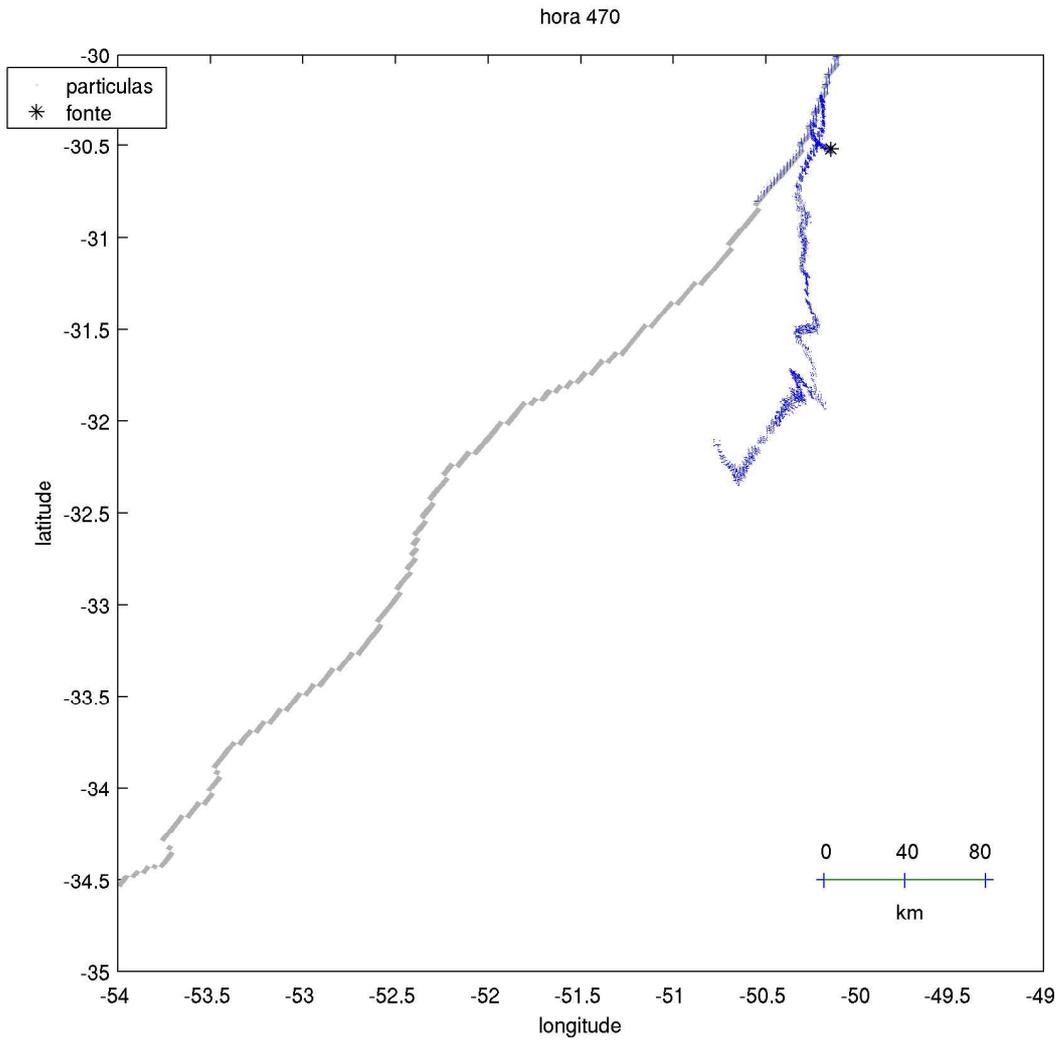


Figura 59: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no **P2** na passagem de um sistema frontal em 470h de modelagem.

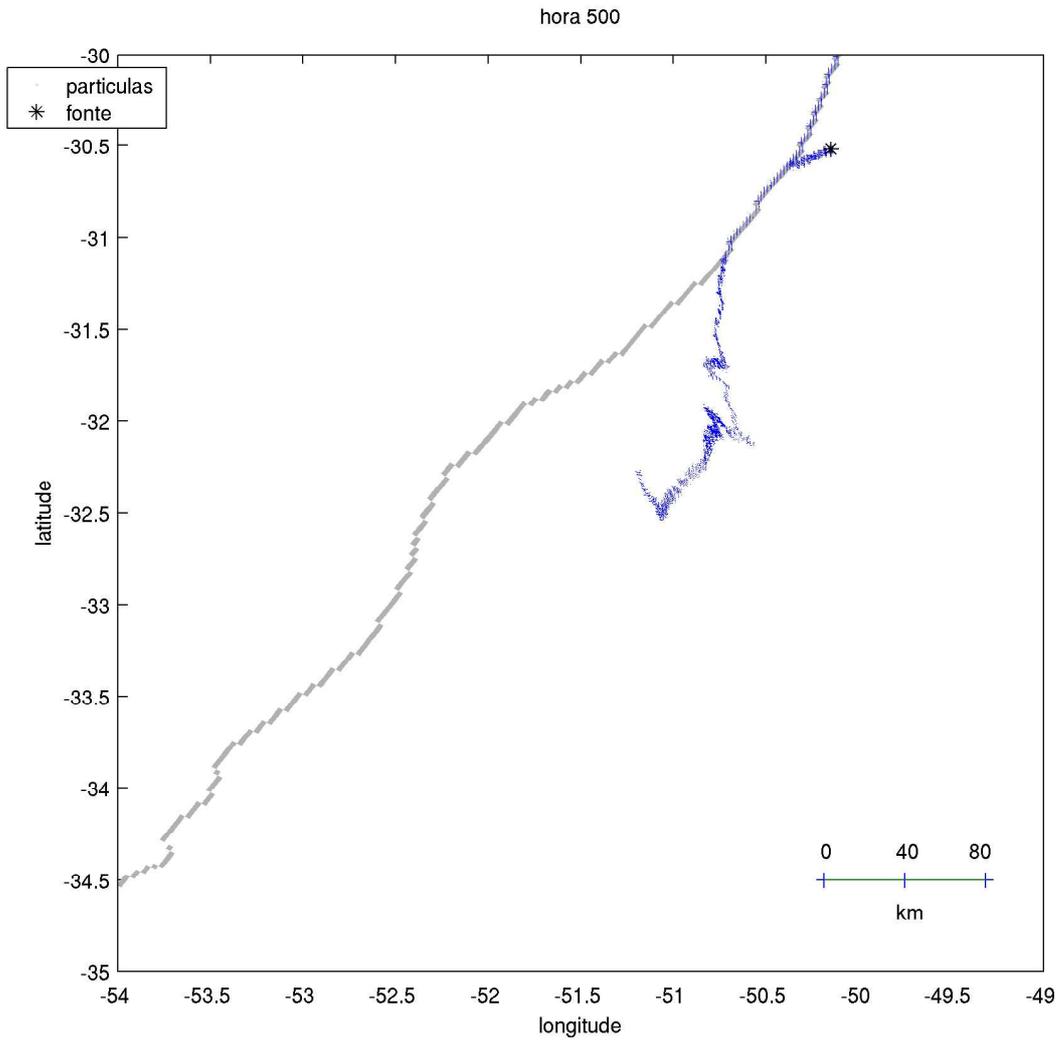


Figura 60: Posição da mancha de óleo com a fonte localizada no **P2** na passagem de um sistema frontal em 530h de modelagem.

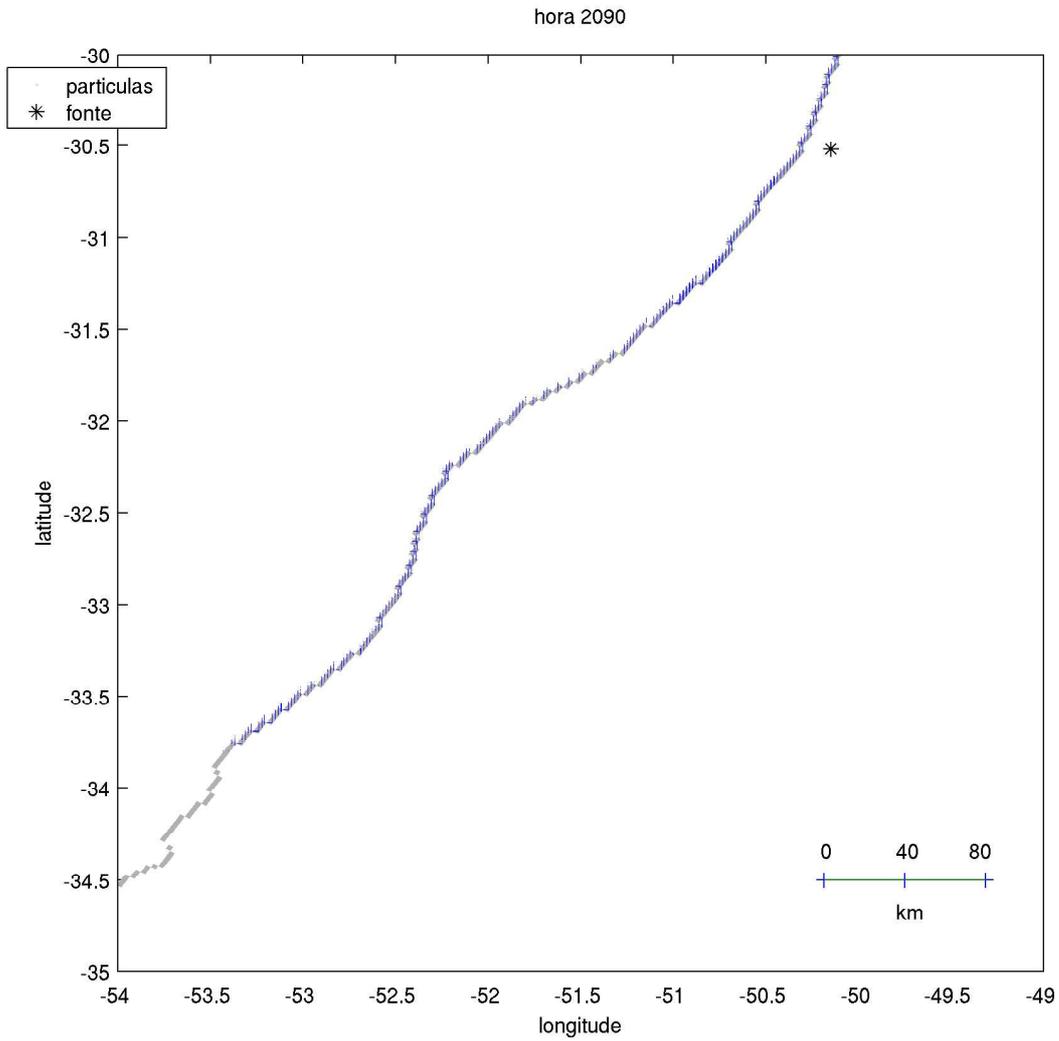


Figura 61: Posição final das manchas de óleo do modelo probabilístico com a fonte localizada no **P3**.

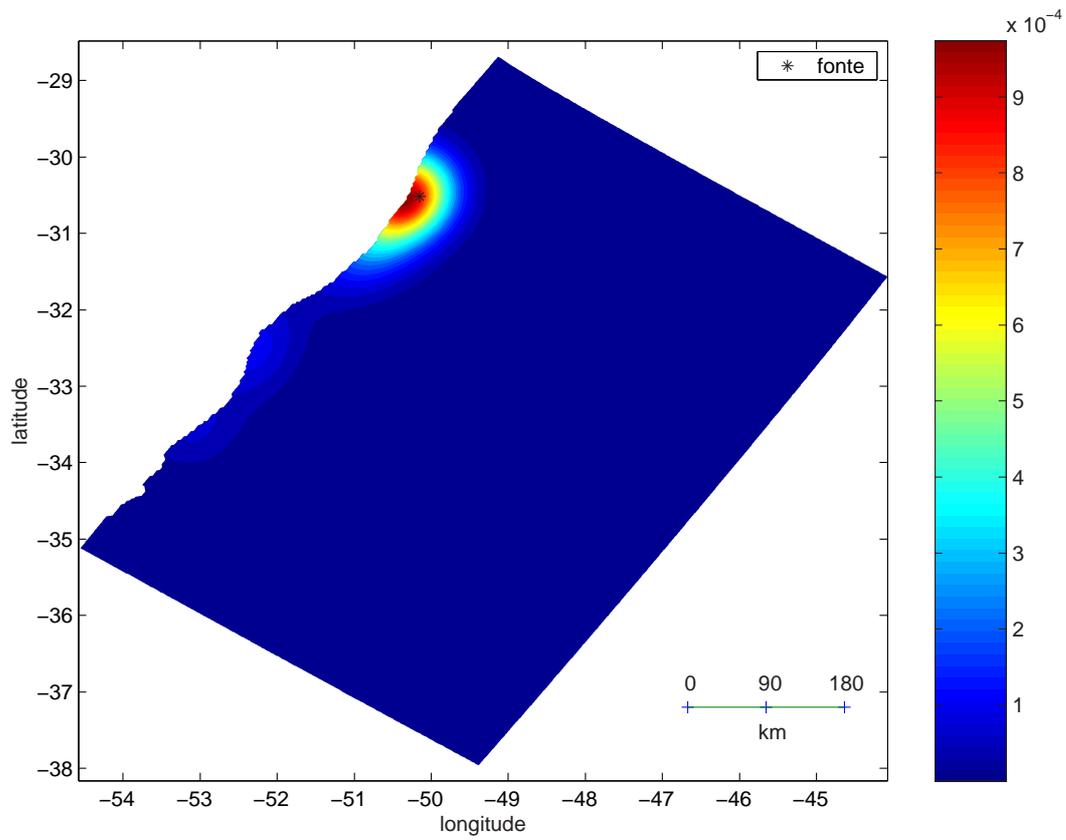


Figura 62: Porcentagem do campo de massa(óleo) do modelo probabilístico com a fonte localizada no **P3**.

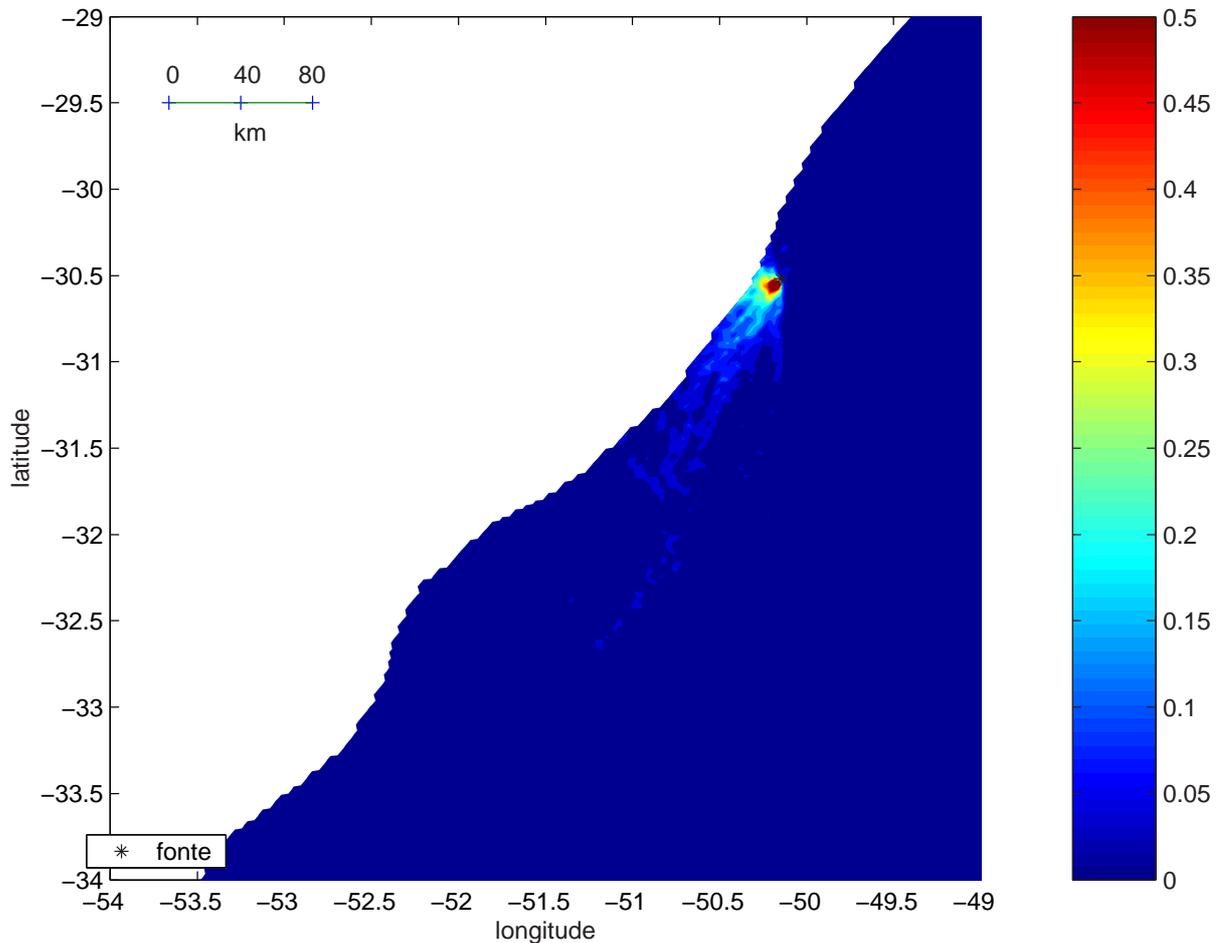


Figura 63: Probabilidade da trajetória do óleo num derrame de 10 dias com a fonte localizada no **P3**.

4.2.3 Movimentação do óleo com a fonte localizada próxima a desembocadura da Laguna sem a componente direta do vento com correntes em 3m abaixo do nível .

Nessa simulação o efeito direto do vento no transporte de óleo foi retirado para representar um óleo mais denso que seria transportado em sub-superfície. As correntes usadas nessa simulação estão em 3m abaixo da superfície. Os resultados mostram o efeito que a dispersão vertical teria na simulação da seção 4.1.1.

A Figura 64 mostra o óleo em 490 horas de modelagem. As correntes ao contrário

do vento afastam as partículas da costa. Esse fenômeno provavelmente é causado pela circulação de plataforma e pelo efeito de Ekman na camada limite que muda a direção das correntes à esquerda do vento no Hemisfério Sul. Além de afastar o óleo da costa as correntes levam o óleo para o Sul (Figura 65), entretanto o deslocamento do óleo é muito menor quando comparado aos dois experimentos anteriores. Essa simulação representa uma situação após ventos intensos (como na passagem de sistemas frontais associados a ciclones extratropicais) que dispersaram o óleo verticalmente na coluna d'água. Nessas situações a turbulência na superfície e as ondas de curto período aumentam. A mancha de óleo é separada formando gotas de óleo (“oil droplets”).

A maioria das gotas de óleo que se dispersam e afundam no processo de dispersão vertical depois acabam retornando a superfície e se reagrupam formando a mancha novamente. Embora uma fração menor fique permanentemente incorporada à coluna de água tornado o processo essencialmente vertical (*Korotenko et al.*, 2000).

De acordo com medidas de campo em um experimento de campo controlado na Noruega(DOODS), um óleo com 2% de dispersante foi detectado a 20m abaixo do nível da água(*Sortstorm*, 1986; *Genders*, 1988 apud *Korotenko et al.*, 2000).

A Figura 66 mostra a posição final do óleo no experimento de dois meses. Nos experimentos anteriores (fonte localizada no **P2** e **P3**) uma pequena parte do óleo seguia para o Norte e acabava parando na costa, diferente desse experimento em que todo o óleo foi transportado para o Sul. A Figura 67 mostra a probabilidade da trajetória do óleo num derrame de 10 dias com a fonte de óleo localizada no **P2** sem o efeito direto do vento.

Apesar da costa não ser atingida pelo óleo, quando consideramos a dispersão do campo de massa é possível ver que parte do óleo chegaria na costa ao Sul da fonte (Figura 68) por causa da dispersão causada pela aplicação do método de pesos gaussianos.

O formato das manchas nessa simulação é mais parecido com os acidentes onde o vento não é a forçante predominante como mostrado por *Davies et al.* (1995) no acidente do

Braer ocorrido nas Ilhas Shetlands. As manchas da simulação não ficaram tão dispersas se comparadas a mancha do Braer que ocorreu num lugar onde as marés são altas e têm grande importância na circulação e também porque o modelo usado nesse trabalho despreza a dispersão turbulenta.

As manchas foram menos alongadas se comparadas as simulações que consideravam o efeito do vento. Na plataforma continental o óleo em sub-superfície tem movimentação muito mais restrita que o óleo em superfície por diminuir o efeito direto do vento que é a forçante predominante no caso específico da plataforma, além disto as velocidades na camada limite superior diminuem exponencialmente com a profundidade.

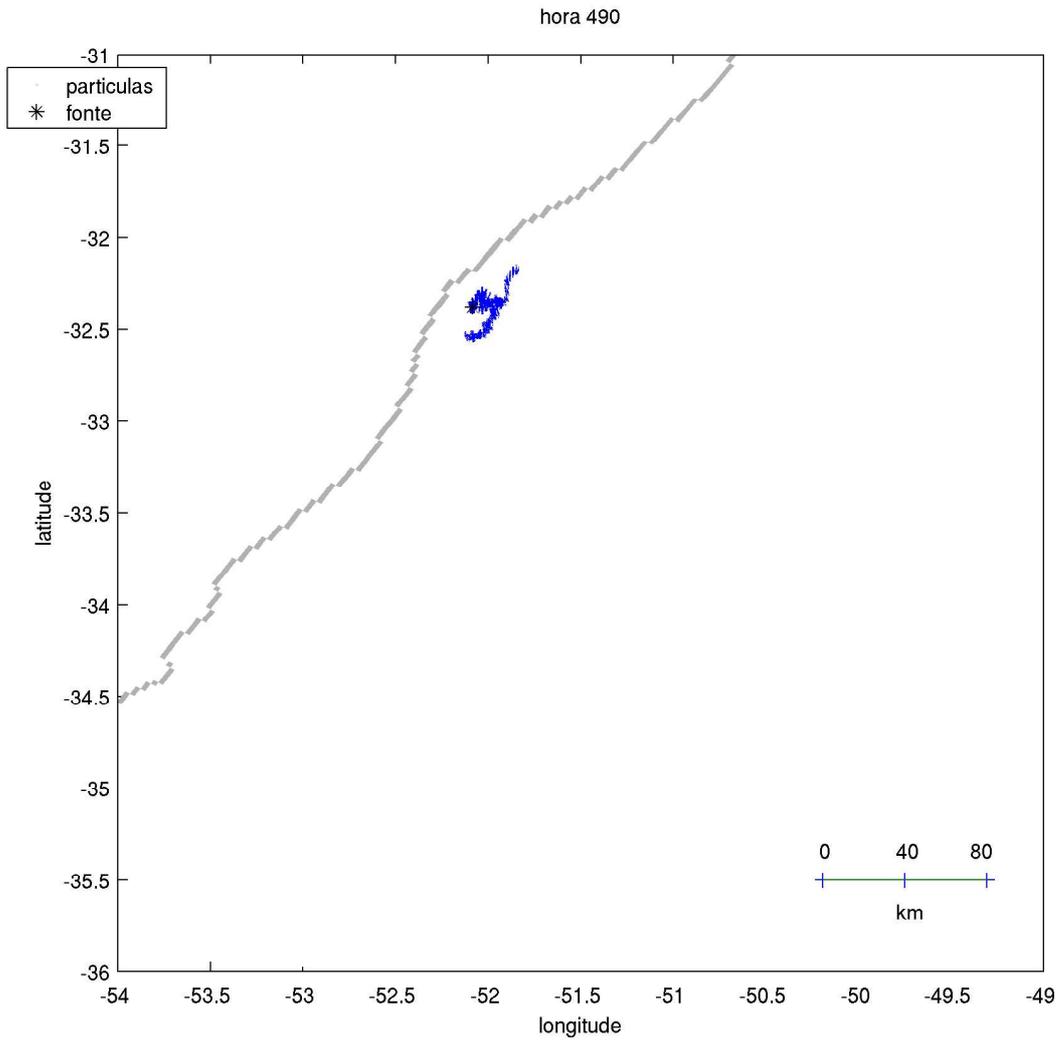


Figura 64: Posição da mancha de óleo em 490 h, a fonte está localizada próxima a desembocadura. Nesse experimento não existe efeito do vento e a profundidade do óleo é de 5m.

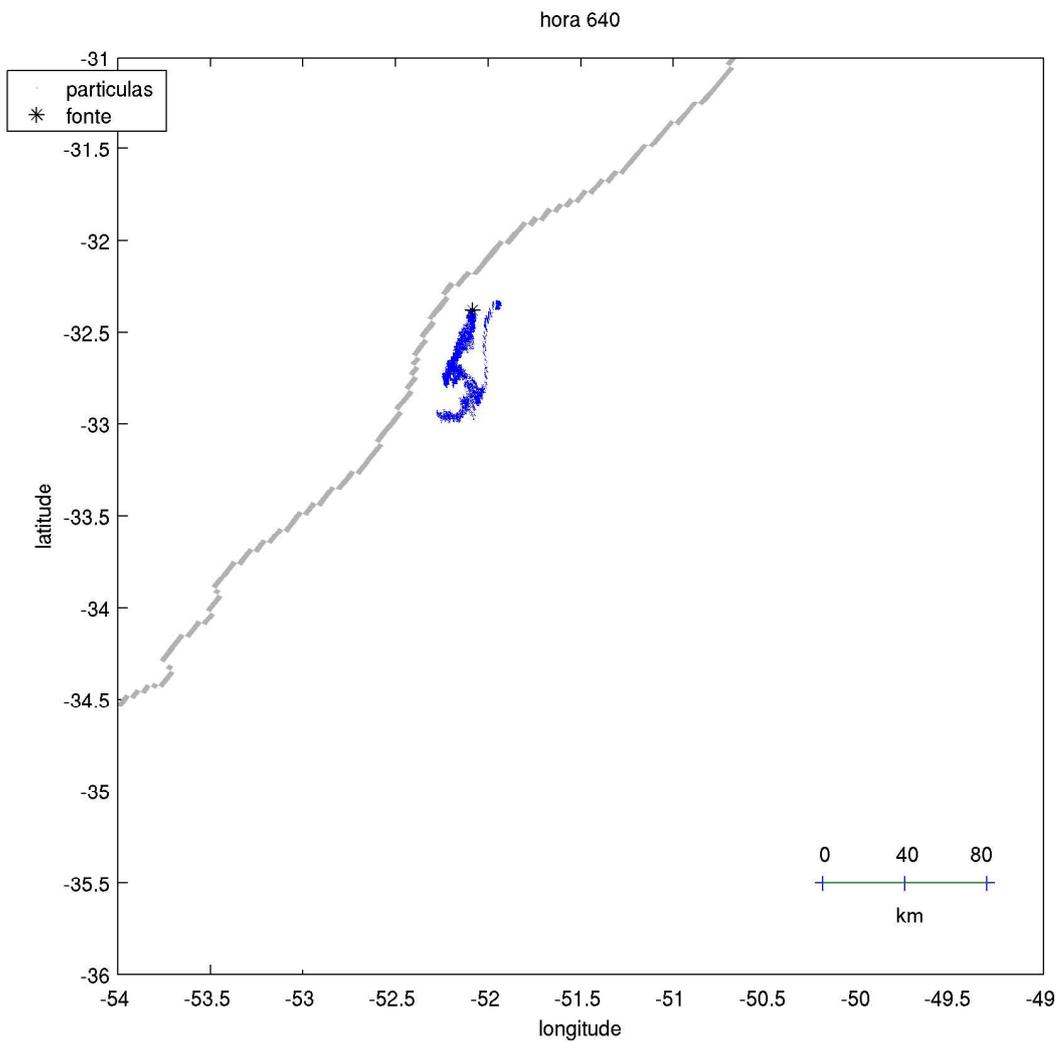


Figura 65: Posição da mancha de óleo em 640 h, a fonte está localizada próxima a desembocadura. Nesse experimento não existe efeito do vento e a profundidade do óleo é de 5m.

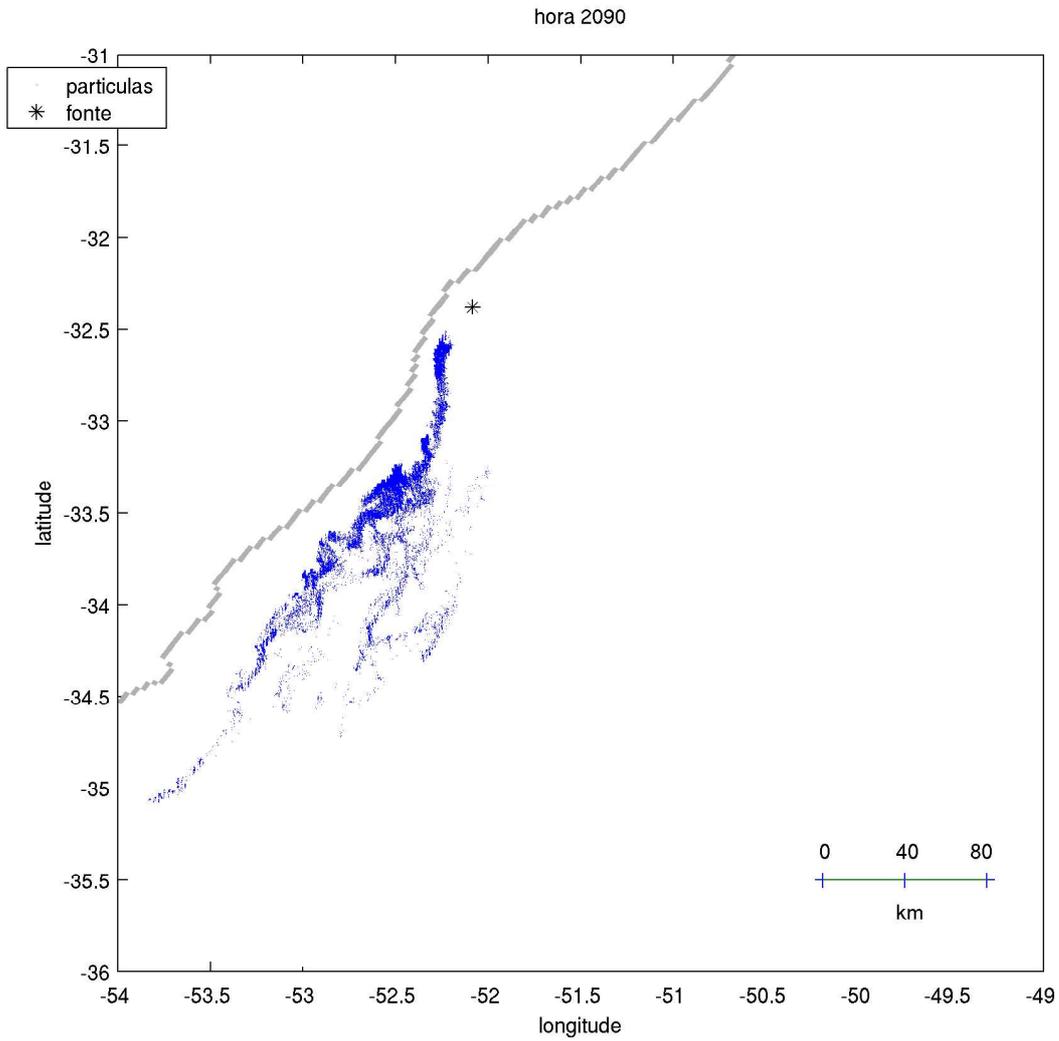


Figura 66: Posição final da mancha de óleo, a fonte está localizada próxima a desembocadura. Nesse experimento não existe efeito do vento e a profundidade do óleo é de 5m.

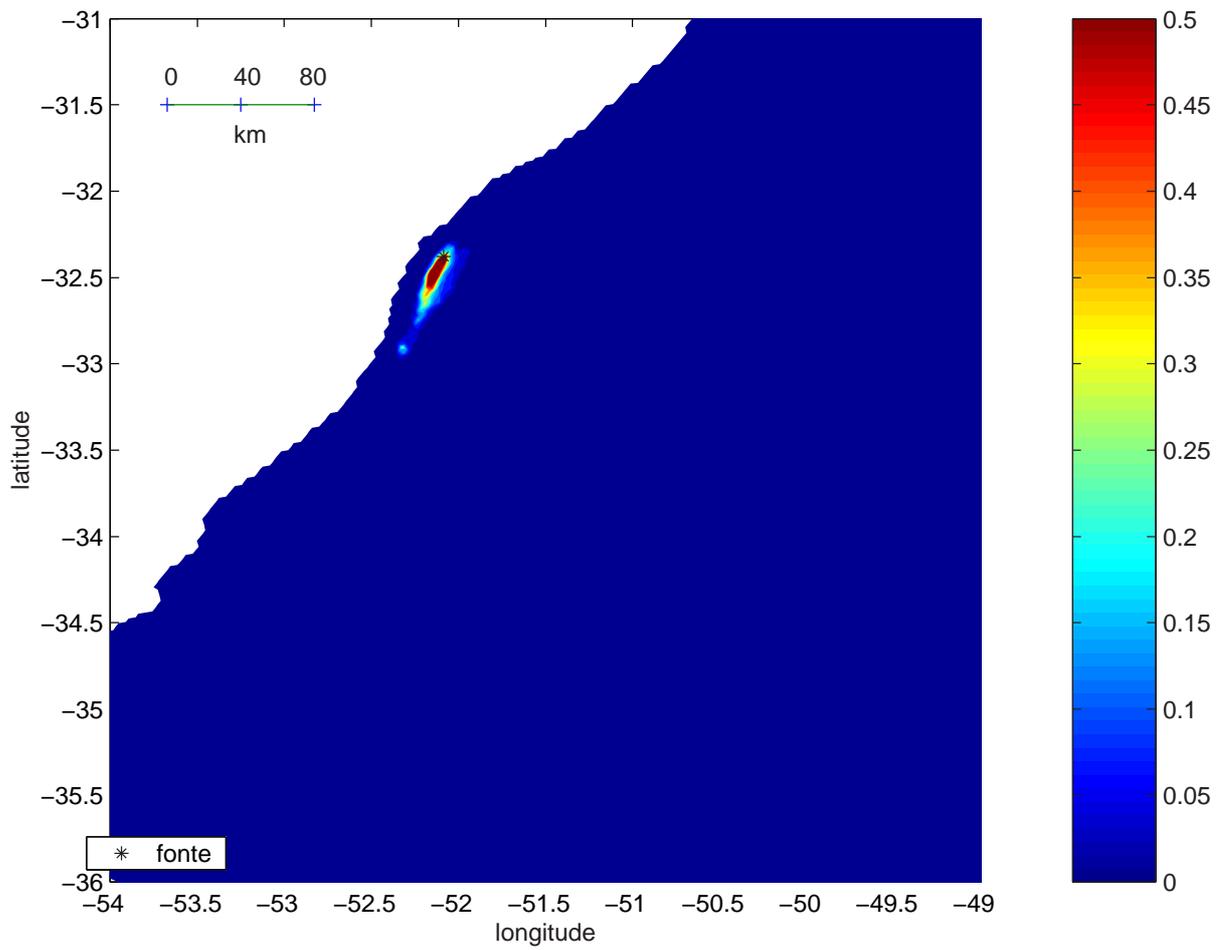


Figura 67: Probabilidade da trajetória do óleo num derrame de 10 dias com a fonte localizada no **P2** sem o efeito direto do vento com o óleo posicionado 3m abaixo do nível do mar.

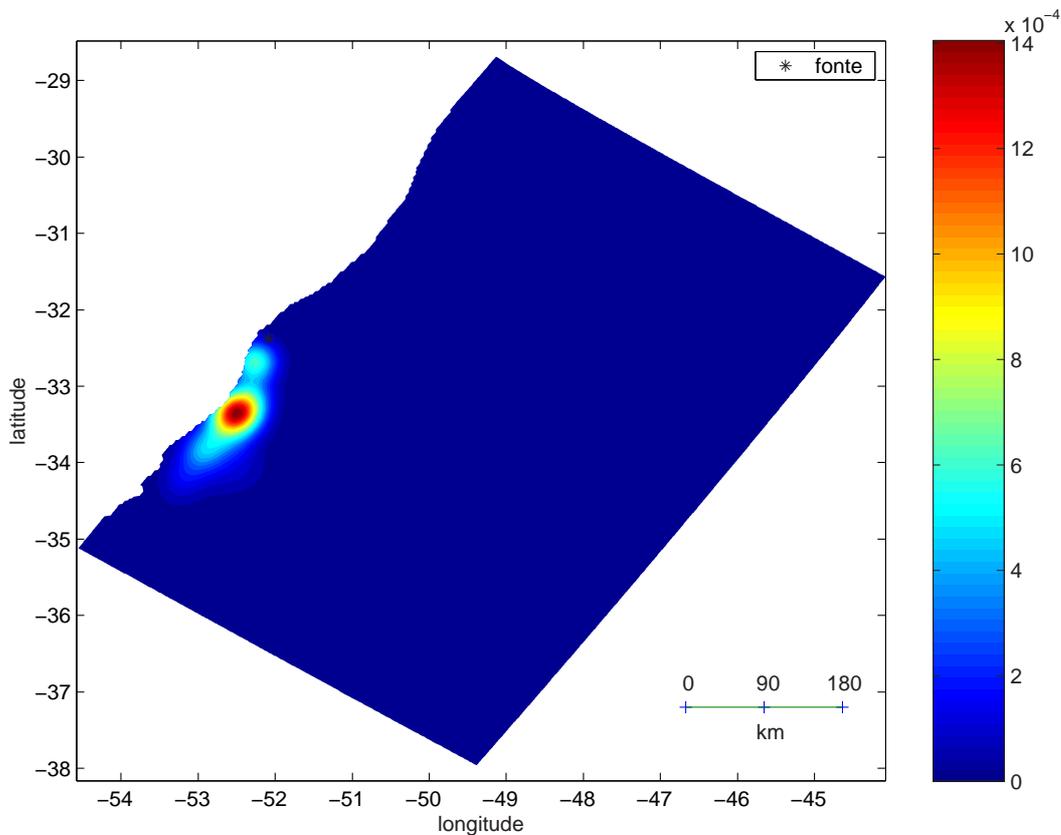


Figura 68: Porcentagem do campo de massa(óleo) do modelo probabilístico com a fonte localizada no **P2** .

A simulação foi realizada sem o efeito direto do vento

4.2.4 Movimentação do óleo com a fonte localizada próxima aos blocos licitados pela ANP.

A Figura 69 mostra a situação mais comum, onde o óleo seguiu junto com a Corrente do Brasil em direção ao contorno Sul da grade numérica. Nesse experimento a velocidade de transporte do óleo foi bem maior quando comparado aos casos anteriores.

Em certos instantes da simulação a passagem de frentes mais intensas tiraram o óleo da Corrente do Brasil transportando-o para a plataforma continental (Figura 70). As Figuras 71 e 72 mostram os campos de corrente e a contribuição do vento durante um dos eventos que tirou o óleo da corrente do Brasil levando-o para a plataforma continental.

Uma vez na plataforma a movimentação do óleo passa a ter como forçante principal a ação direta do vento. Uma boa parte do óleo chegou na costa outra parte seguiu para a Plataforma Continental Uruguaia (Figura 73) . A Figura 75 mostra a probabilidade da trajetória do óleo num derrame de 10 dias.

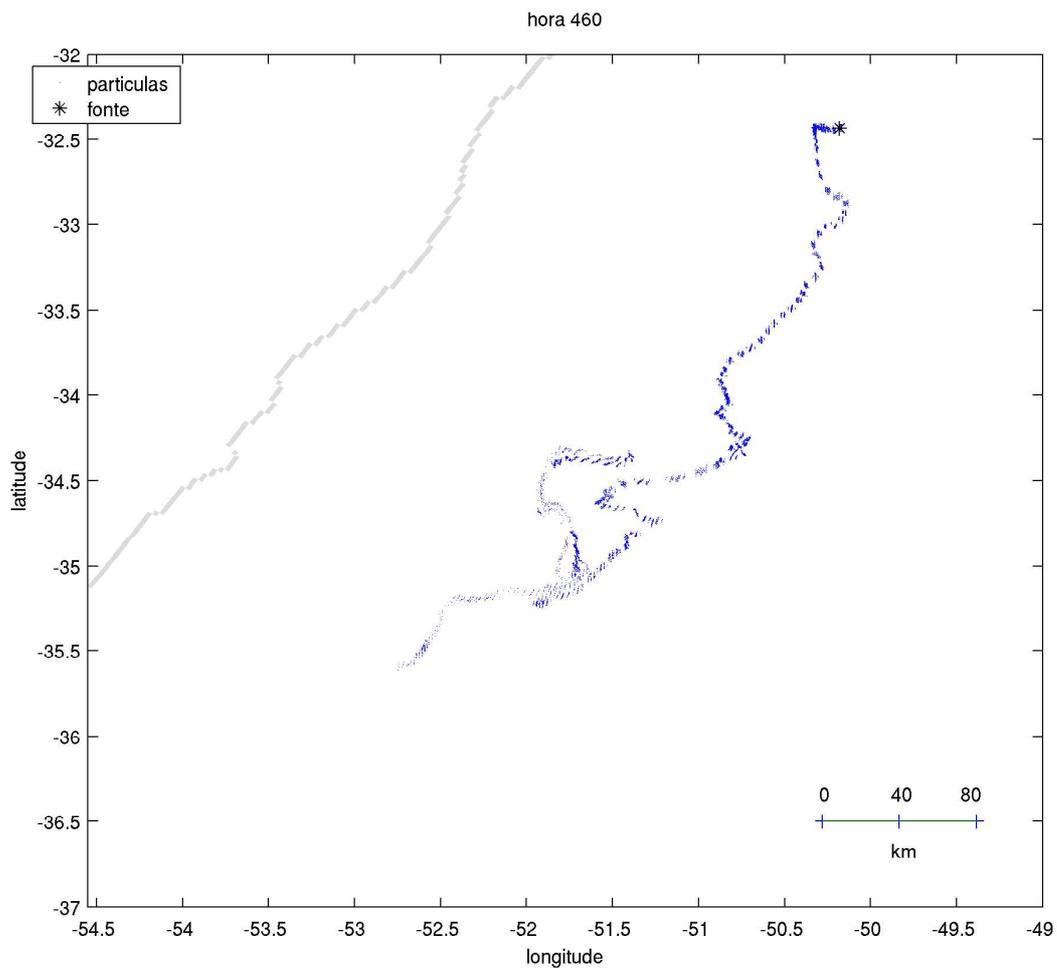


Figura 69: Posição da mancha de óleo em 480 horas. Fonte localizada próxima aos blocos da Petrobras.

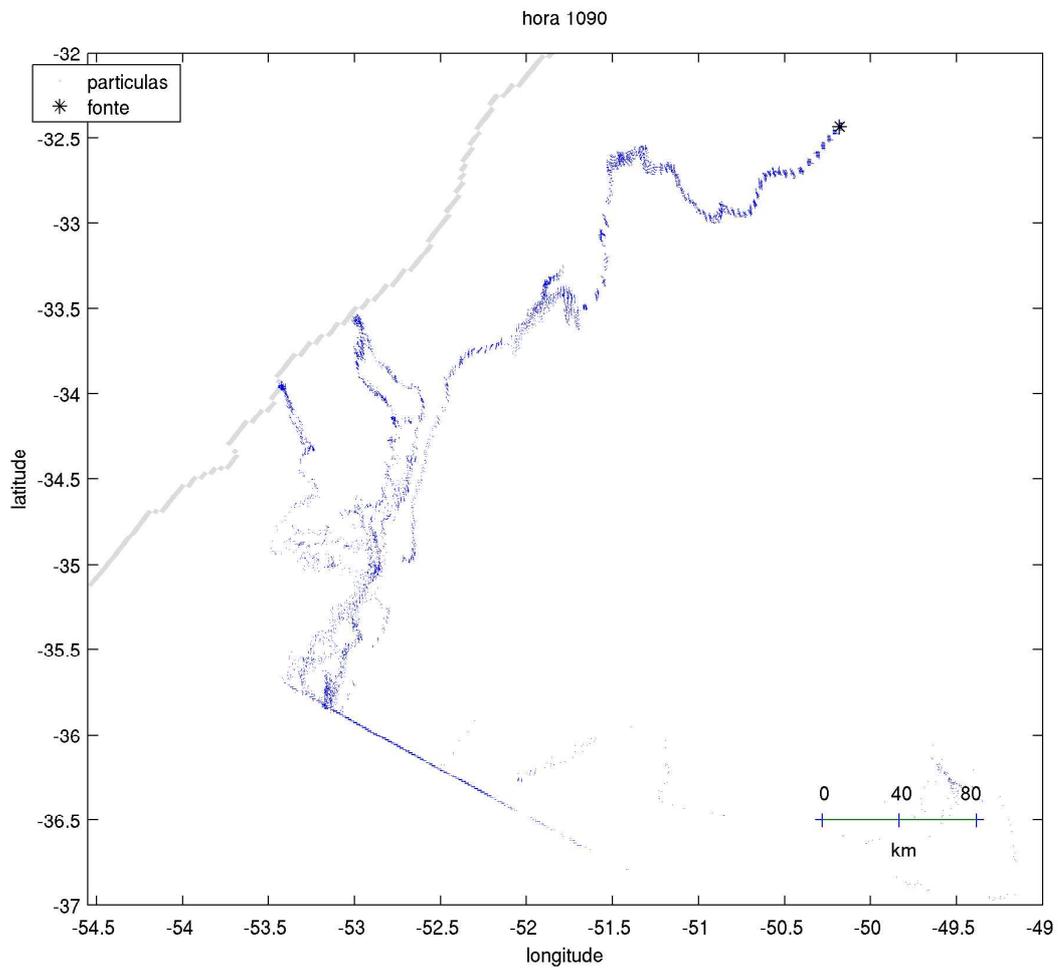


Figura 70: Posição da mancha de óleo em 1050 horas. Fonte de óleo localizada próxima aos blocos da Petrobras.

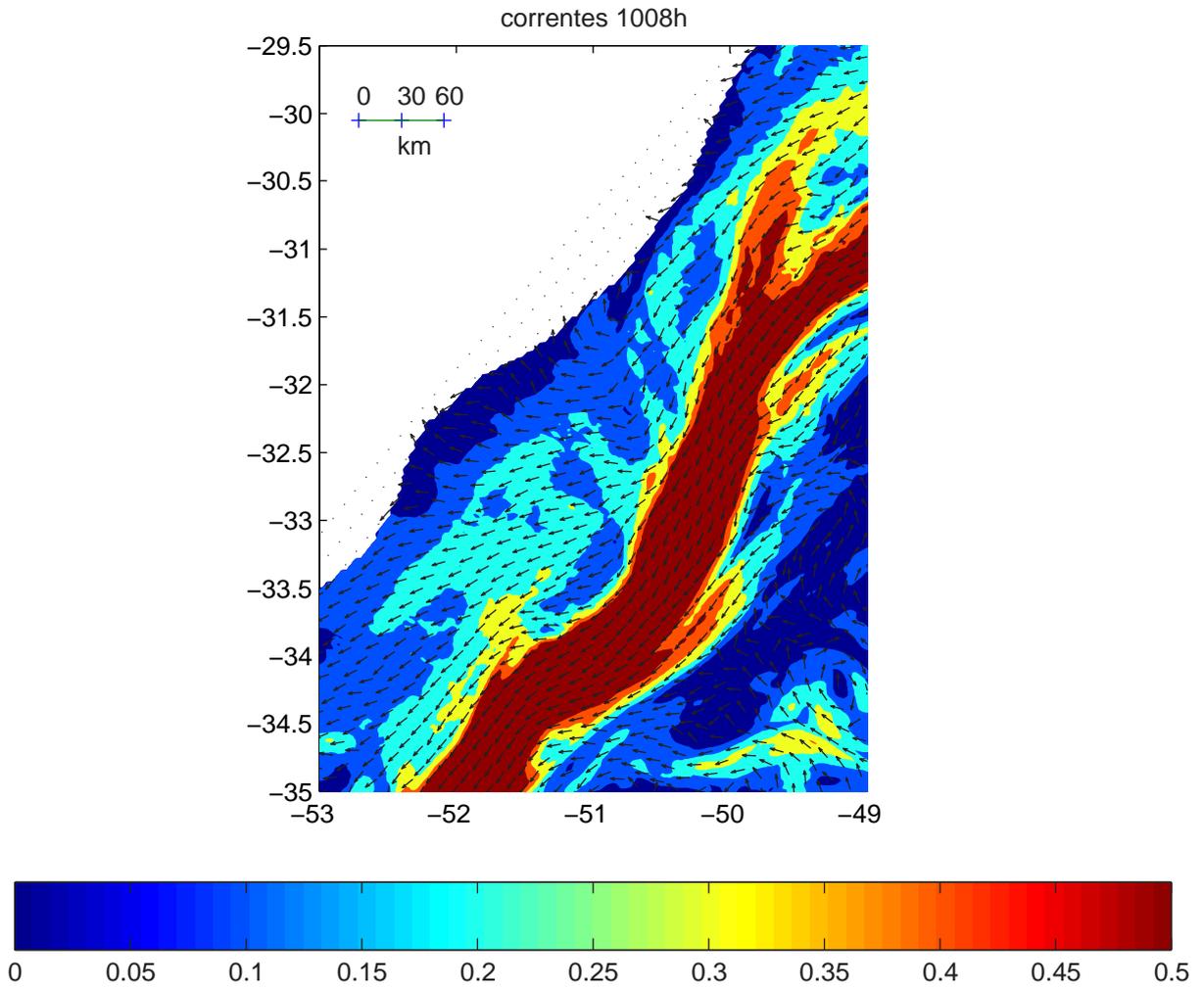


Figura 71: Correntes(ms^{-1})do modelo hidrodinâmico, $1m$ abaixo da superfície em $1008h$ de modelagem.

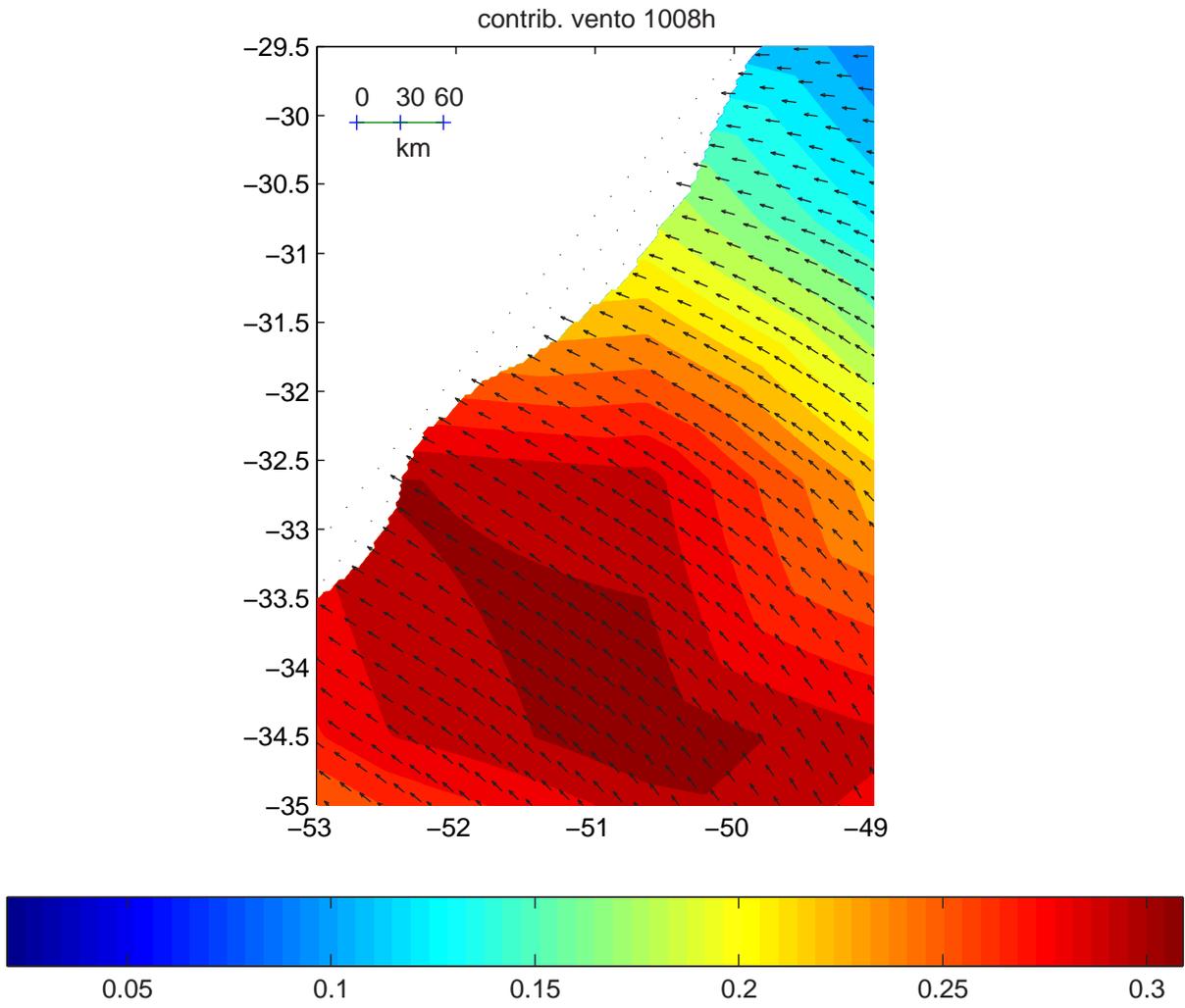


Figura 72: Contribuição direta do vento(ms^{-1}) em 1008h de modelagem.

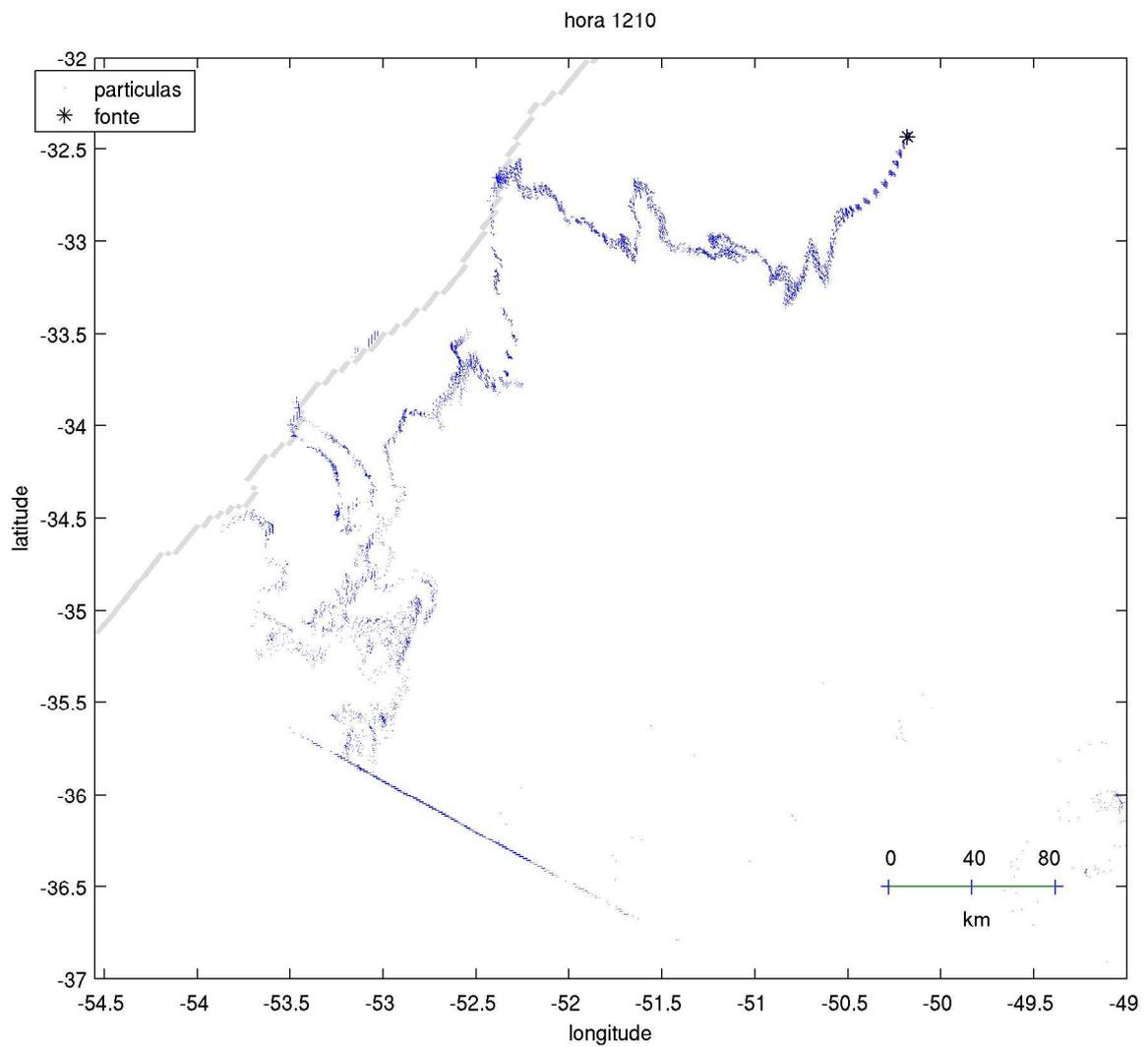


Figura 73: Posição das partículas em 1210 horas. Fonte localizada próxima aos blocos da PETROBRAS.

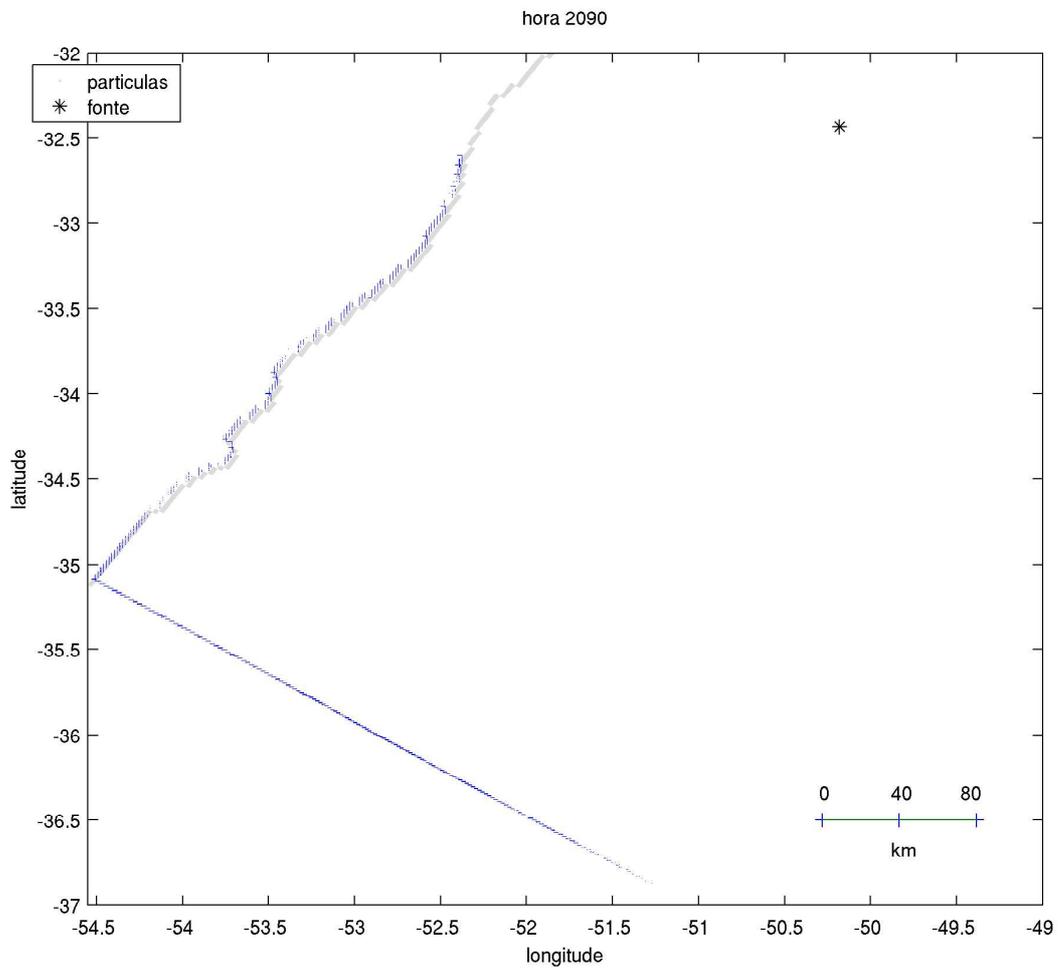


Figura 74: Posição final das manchas de óleo do modelo probabilístico. Fonte localizada próxima aos blocos da PETROBRAS.

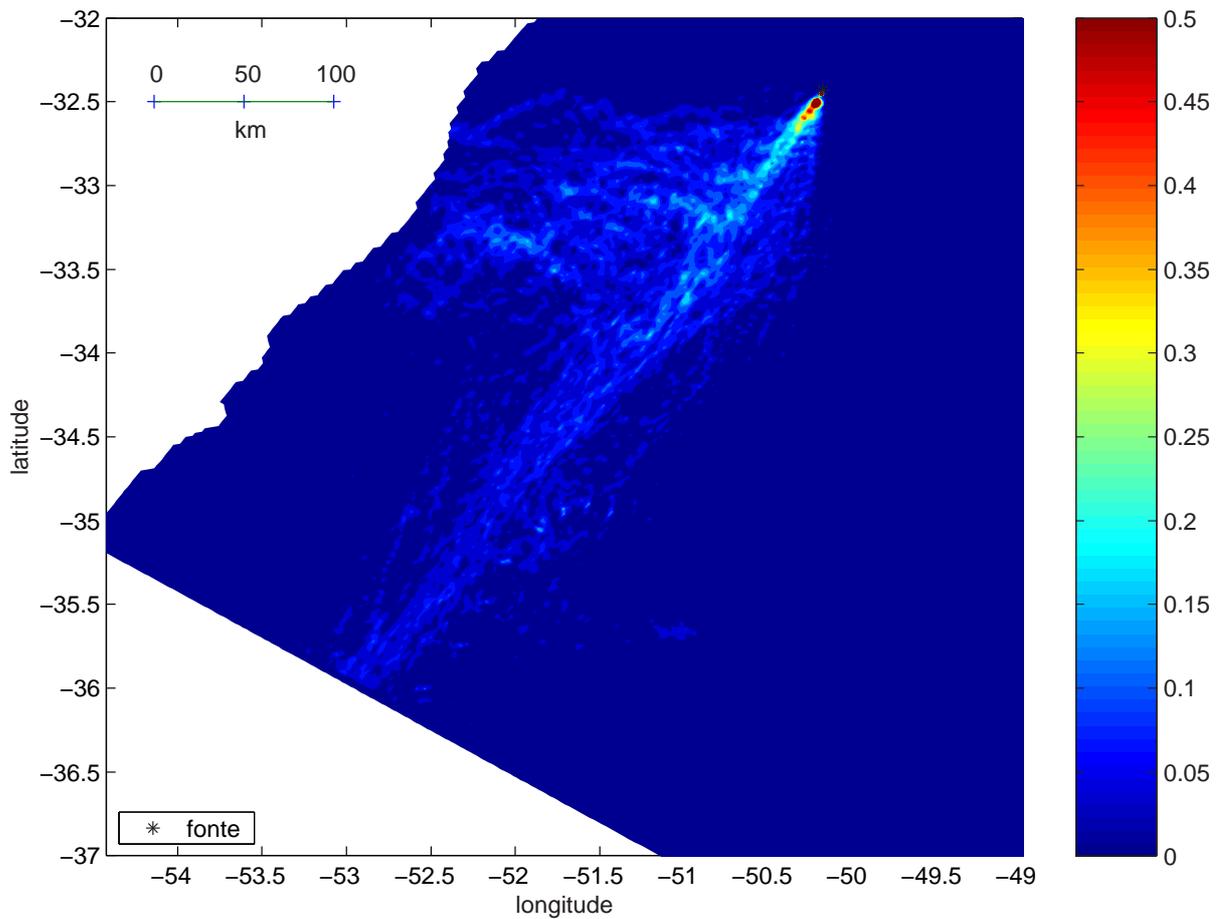


Figura 75: Probabilidade da trajetória do óleo num derrame de 10 dias com a fonte localizada no **P5**.

A Figura 74 mostra o resultado final do modelo probabilístico no caso em que a fonte de óleo estava localizada nos Blocos da PETROBRAS próximos ao **P5**. Parte do óleo chegou na costa, outra parte ficou na plataforma entretanto a maioria atingiu o limite Sul da grade. A probabilidade da trajetória do óleo é mostrada na Figura 75.

As manchas seguiriam com a Corrente do Brasil até chegarem ao contorno Sul da grade. Isso fica mais claro na Figura 76 onde é apresentado a porcentagem final do campo massa do óleo. Uma porcentagem do óleo que foi em direção a costa e atingiu a mesma está localizada na Região próxima a Barra do Chui a outra ficou na Plataforma Continental Uruguaia. Esse é um fato que deve ser considerado uma vez que o óleo pode alcançar

águas internacionais. Uma parte considerável do óleo atingiu a costa na região do Navio Altair até o Chui .

Diferente dos experimentos anteriores onde as fontes estavam localizadas na plataforma, a corrente passa a ser mais importante que o vento na trajetória do óleo. Fato esperado por causa dos parâmetros estatísticos (Tabelas 3 e 7) das correntes e da contribuição direta do vento.

Como o modelo trata o óleo como uma substância conservativa o alcance pode estar sendo superestimado uma vez que não é levado em conta os processos de intemperismo e dispersão. Nesse experimento o óleo demorou mais que os outros para atingir a costa estando sujeito a mais tempo de intemperismo. Esse processos com o tempo poderiam diminuir as concentrações de óleo através de biodegradação, sedimentação e dispersão.

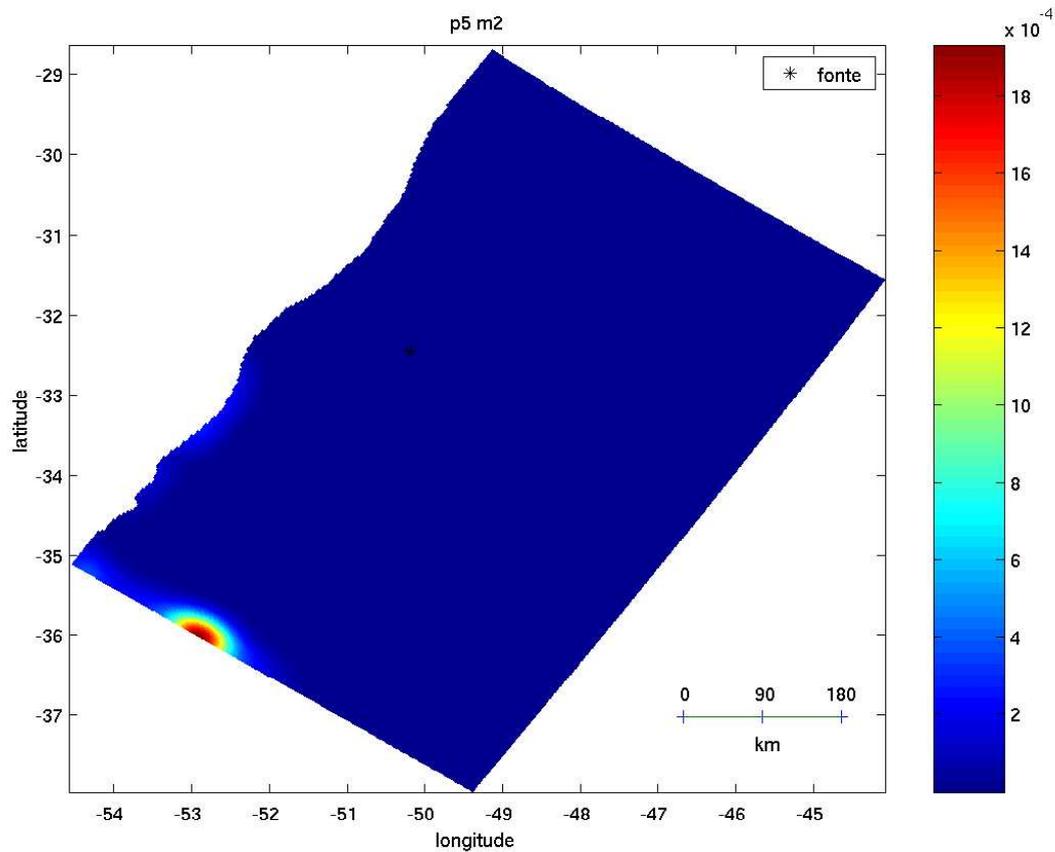


Figura 76: Porcentagem do campo de massa(óleo) do modelo probabilístico. A fonte estava localizada próxima ao **P5**.

4.3 O aumento do tempo de atualização da posição das partículas.

Os resultados dos experimentos anteriores foram realizados com o módulo de partículas sendo uma sub-rotina do **POM**. Nesse caso a posição de cada partícula foi calculada a cada passo do modo interno do **POM**. Apesar de mais acurácia, isso requer um gasto elevado de tempo computacional uma vez que o módulo hidrodinâmico é o mais demorado.

Percebeu-se que seria conveniente analisar o módulo de óleo implementado a partir de bases hidrodinâmicas prontas. Em caso de um acidente o modelo de óleo forçado com a hidrodinâmica têm resultados quase imediatos. Segundo *Proctor e Turner (1995)*, em casos de acidente os modelos primeiramente usados são de resposta rápida e posteriormente

modelos com boa resolução são implementados.

Os acidentes com óleo podem ter como variáveis importantes o local, as condições meteorológicas e o tipo de óleo. Seria impossível ter um banco de dados de simulações de todas as situações. Entretanto seria necessário verificar a diferença dos resultados para que a utilização da técnica não comprometesse o resultado final.

As Figuras 77 e 78 mostram as posições do óleo após 490 horas de modelagem (hidrodinâmica) para o **M1** e **M2** nos pontos **P2** e **P5** respectivamente, sugerindo que em um experimento determinístico há uma diferença considerável nas posição das partículas. No experimento com a fonte localizada no **P5** os resultados do **M1** e **M2** tiveram maiores diferenças de quando a fonte era localizada no **P2**. Isso se deve não só ao fato das correntes terem menor intensidade na costa, mas também a medida que o tempo aumenta, a diferença de posição das partículas é maior. Como as partículas que chegam em elementos de terra param de se movimentar seu tempo de transporte é menor.

Como já foi mostrado o vento é uma variável de grande importância na modelagem da região. É provável que nas proximidades da costa uma melhor resolução temporal nos dados de vento melhora a precisão dos modelos determinísticos.

Um outra solução, seria implementar um método numérico de maior ordem, utilizando mais passos de tempo. *Martínez e Tovar* (1999) viram que um modelo de óleo baseado em partículas lagrangeanas simulado com o método de Runge-Kutta 4 era mais próximo a solução analítica que o método de Euler. O método era substancialmente melhor que o de Euler em locais onde havia gradientes fortes de velocidade e esta tinha grande mudanças de direção em curtas distâncias.

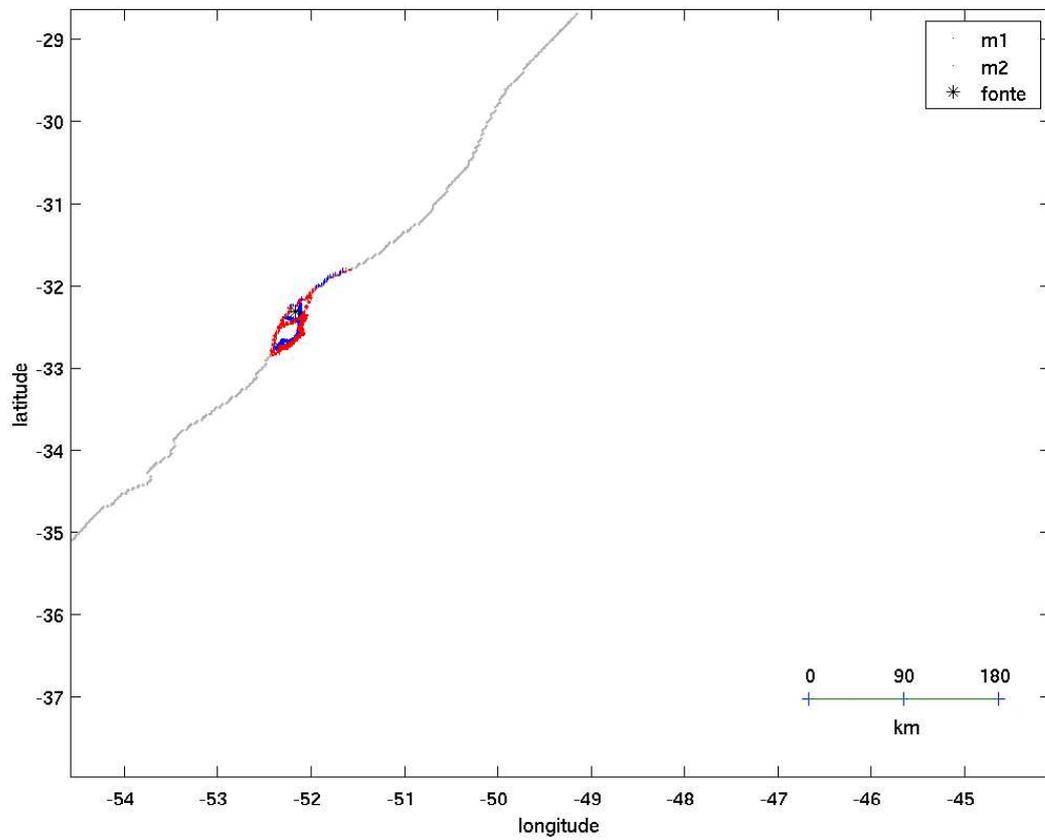


Figura 77: Comparação das posições das manchas de óleo para M1(azul) e M2(vermelho) na hora 490, a fonte está próxima a desembocadura da Laguna.

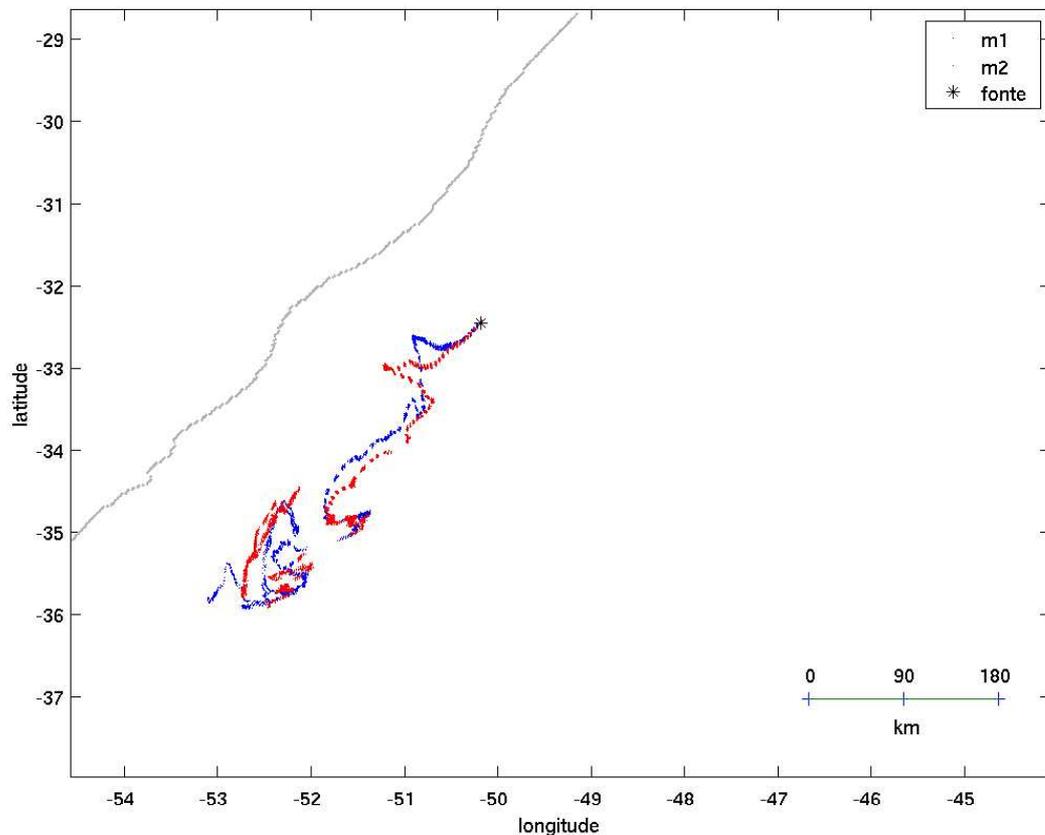


Figura 78: Comparação das posições das manchas de óleo para M1(azul) e M2(vermelho) na hora 490h.

4.4 Considerações finais

Independente do local da fonte do óleo as simulações mostraram que em baixa descarga da Lagoa dos Patos e do Rio da Prata, no verão o óleo tem maior probabilidade de ir para o Sul. Caso o derrame acontecesse próximo à costa o destino final do poluente é a terra.

Pereira (2005) mostrou que ocorre uma alta vulnerabilidade (Figura 79) nas praias do litoral Norte do Rio Grande do Sul devido a urbanização. Conforme os resultados obtidos nesse trabalho essas praias teriam menos chances de serem atingidas por óleo desde de que o derrame não aconteça próximo ao local.

Caso o derrame ocorresse na região próxima ao **P3**, o óleo só atingiria regiões mais

ao Norte caso houvesse a passagem de uma frente. As áreas mais afetadas estariam na mesma Longitude e ao sul da fonte. As praia ao Sul da desembocadura da Laguna mesmo distante mostraram chances de contaminação.

Os derrames ocorridos próximos ao **P2** teriam efeito mais localizado com maiores chances de atingir as áreas ao Sul da fonte. Nesse caso as praias do litoral Norte não seriam atingidas.

Analisando os resultados da posição final das partículas e dos campos de massa de todas as simulações, percebemos que a região entre o Navio Altair e o Farol do Albardão (Figura 8) sempre foi atingida com óleo. Os resultados mostram que estas regiões parecem ser uma zona favorável ao acúmulo de óleo. No mapa de vulnerabilidade apresentado essa região teria vulnerabilidade de moderada a baixa devido a distancia de zonas urbanizadas. Entretanto, essa análise da vulnerabilidade só considera as variáveis geomorfológicas e a urbanização que representariam o ambiente praial. A bibliografia mostra que a ante-praia e a plataforma interna da região é uma importante área de reprodução para espécies de peixe com valor comercial. Se levados em conta, a fauna marinha da região pode aumentar a vulnerabilidade do local devido ao fato da região ser importante para o ciclo reprodutivo de espécies de peixes comerciais.

Apesar das simulações de verão mostrarem um transporte líquido na plataforma para o **S** esse quadro pode ser mudado em outras estações. *Souza e Robinson* (2003) através de bóias lagrangeanas posicionadas em 15m abaixo da superfície observaram uma corrente costeira em direção ao Norte de abril a julho. Os resultados obtidos por *Zavialov et al.* (1998), através de um modelo inverso forçado com temperatura e salinidade, foram semelhantes.

Soares (2003) mostrou que a forçante dominante nas correntes de plataforma era o vento. Porém sob condições de alta descarga, as correntes induzidas por gradientes de densidade passavam a ser muito importantes. Na primavera os ventos de **NE** inibiam o

transporte da pluma para o Norte. Corroborando a simulação de verão para o deslocamento líquido das partículas.

Um situação similar é esperada para o verão pois o vento **NE** é dominante como acontece na primavera.

Entretanto no outono e inverno a frequência do Ventos de **NE** diminuem. Os ventos do quadrante **S** e **SW** aumentam e os ventos normalmente são mais intensos nessa direções. Esse fatores junto a a circulação termohalina gerada pela alta descarga de água doce na plataforma podem acabar levando o óleo para o Norte.

Talvez por isso *Wetzel* (1995), não encontrou ocorrência de piche na praia do Cassino durante o Outono e meados do inverno.

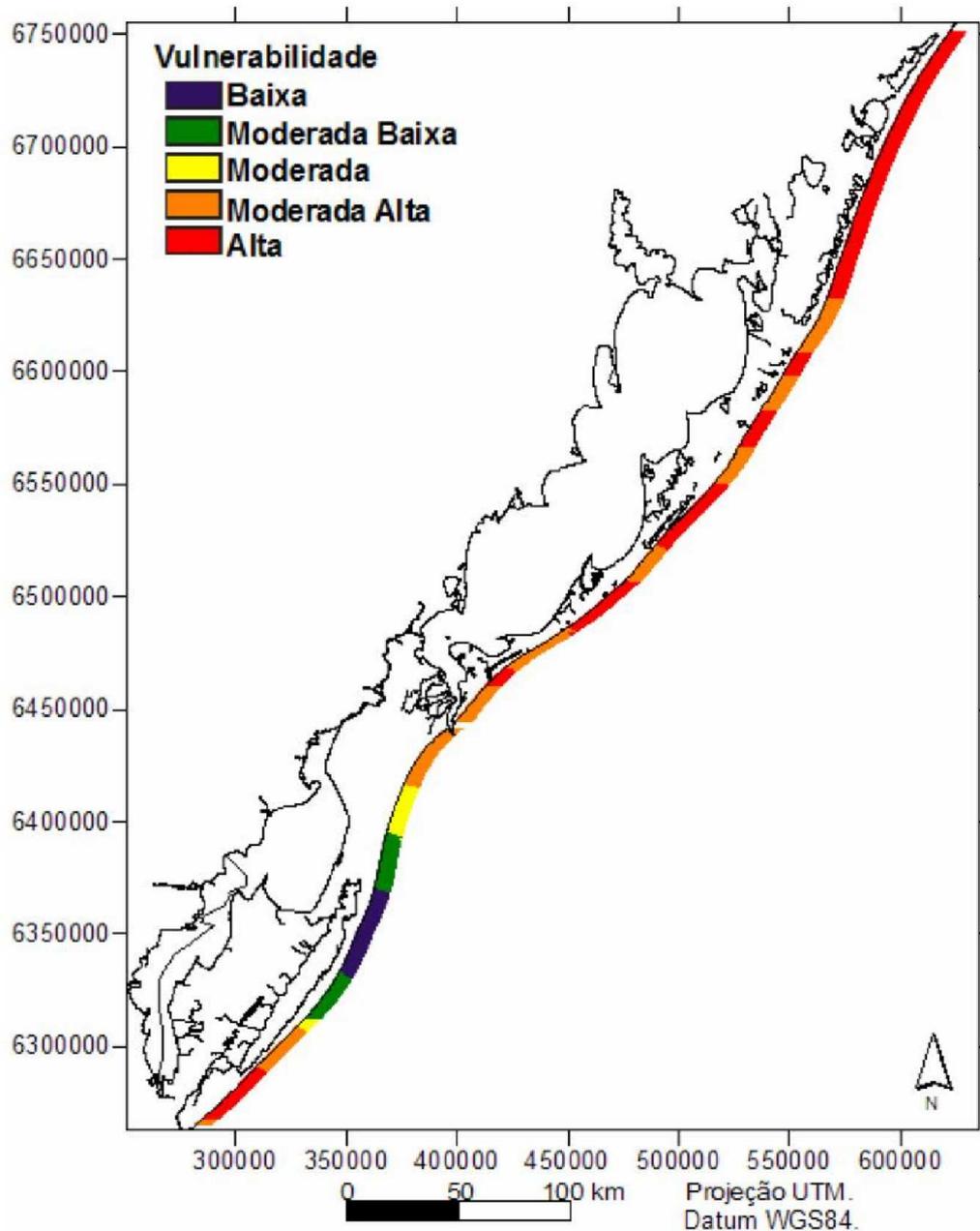


Figura 79: Vulnerabilidade da costa(RG) resultante da integração das variáveis geomorfológica e urbanização.

Cenário com maior peso para as dunas.

Fonte: *Pereira* (2005)

Sugestões para trabalhos futuros :

- Incluir a descarga de água doce nas simulações.
- Realizar simulações das outras estações do ano.
- Considerar os outros processos de intemperismo que o óleo sofre no ambiente marinho.
- Fazer uma Calibração do modelo de óleo

5 Conclusões.

Na plataforma continental o vento é o fator mais importante no transporte de um óleo que fique na superfície. Principalmente se analisarmos a forçante responsável por trazer o óleo para a costa. No verão de 2001 um derrame, próximo a costa, com um óleo de baixa densidade seria desastroso uma vez que a grande maioria do óleo tem grande chance de ser levado para a costa.

O transporte do óleo seria menos perigoso quanto mais o óleo ficasse abaixo da coluna de água, uma vez que uma parte considerável do óleo se afastou da costa quando retiramos o efeito do vento.

Sob baixa descarga no verão de 2001, o óleo tem um deslocamento para o **S** ao largo da costa, podendo atingir algumas áreas ao **N** na passagem de sistemas frontais.

Segundo os resultados, a orientação da linha de costa em relação ao vento predominante é um fator importante na probabilidade da região ser contaminada com óleo num eventual derrame.

A passagem de um sistema frontal após um derrame costeiro aumenta o tempo de chegada do óleo na costa. Apesar disso o transporte resultante de um sistema frontal aproxima o óleo da costa.

Segundo os resultados obtidos, as praias do litoral Norte Gaúcho só seriam impactadas caso o derrame fosse próximo a mesma.

Os resultados mostram uma dinâmica mais baixa na Região do Cassino que parece dispersar menos o óleo em relação a região de Tramandaí.

Um acidente no verão, próximo aos Blocos leiloados pela **ANP**, teria chances, apesar de remotas, de impactar a costa. A maioria do óleo seguiria para a confluência das correntes de larga escala. Eventualmente, a passagem de frentes poderia tirar o óleo da Corrente do Brasil levando para a Plataforma. Uma vez na Plataforma, caso não fosse

totalmente intemperizado, o óleo chegaria a costa.

Sob efeito direto do vento as manchas tem maiores velocidades e são alongadas. Sem o efeito do vento a mancha ficou arredondada. Portanto o modelo de óleo consegue reproduzir o formato das manchas de óleo no início de derrames em situações e locais onde o vento é a força predominante.

Referências

- Baars, B., 2002: The wreckage of the oil tanker 'erica'-human health risk assessment of beach cleaning sunbathing and swimming. *Toxicology Letters*, **128**, 55–68.
- Berbery, E. e C. Vera, 1996: Characteristics of the Southern Hemisphere Winter Storm Track with Filtered and Unfiltered Data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **53**(3), 468–481.
- Blumber, A. e L. Khanta, 1985: Open boundary conditions for circulation models. *J. Hydraul. Eng.*, **11**, 237–255.
- Blumberg, A. e G. Mellor, 1987: A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In N. Heaps, editor, Three-dimensional coastal ocean models, volume 4, capítulo 1, págs. 1–16. American Geophysical Union Ed.
- Blumer, M., 1969: Oil pollution in the ocean. In D. P. Hoult, editor, Oil in the sea.
- BP, 2005: Putting energy in the spotlight bp statistical review of world energy 2005. Relatório técnico, British Petroleum.
- Braga, M. F. S. e N. Krushe, 2000: Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no Período de 1992 a 1995. *Atlântica*, **22**, 13–26.
- Bryan, K., 1969: A Numerical Method for the Study of the Circulation of the World Ocean. *J. Comput. Phys.*, **4**, 347–376.
- Burns, K. A., S. Garrity, D. Jorissen, J. MacPherson, M. Stoelting, J. Tierney, e L. Y. Simmons, 1994: The galeta oil spill ii.unexpected persistence of oil trapped in mangrove sediments morlaix twenty years after the amoco cadiz oil spill. *Estuarine, Coastal and Shelf Research*, **38**, 349–364.

- Calliari, L. R., P. S. Pereira, A. O. Oliveira, e S. A. Oliveira, 2005: Variabilidade das dunas frontais no litoral norte e médio do rio grande do sul. *Gravel*, (3), 15–30.
- Castro, B. e T. Lee, 1995: Wind-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. *J. Geophys. Research*, **100**(C8), 16.045–16.056.
- Chapman, D. C., 1985: Numerical Treatment of Cross-Shelf Open Boundaries in a Barotropic Coastal Ocean Model. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1060–1075.
- Ciotti, A., C. Odebrecht, G. Fillman, e O. Möller, 1995: Freshwater outflow and subtropical convergence influence on the phytoplankton biomass on the Southern Brazilian Continental Shelf. *Continental Shelf Research*, **15**(14), 1737–1756.
- Clark, R. B., editor, 2001: Marine Pollution. Oxford University Press.
- Cox, M., 1984: A primitive equation, 3-dimensional model of the ocean. *Tech. Report GFDL Ocean Group - Geophys. Fluid Dyn. Lab., Princeton Univ., Princeton*, **71**(41), 1131–1134.
- Csanady, G., 1997: On the theories that underlie our understanding of continental shelf circulation. *Journal of Oceanography*, **53**, 207–229.
- Csanady, G. T., 1982: Circulation in the coastal ocean. D. Reidi, Norwell.
- Davies, J. M., A. D. McIntosh, R. Stagg, G. Topping, e J. Rees, 1995: O destino do óleo no Braer nos meios ambientais marinhos e terrestres, capítulo 3. FEMAR.
- Elliott, A. J., 2004: A probabilistic description of the wind over liverpool bay with application to oil spill simulations. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **61**, 569–581.
- Emilsson, I., 1959: Alguns aspectos físicos e químicos das águas marinhas brasileiras. *Cienc. Cult. - article in portuguese with English abstract.*, **11**, 44–54.

- Fay, J. A., 1969: The spread of oil slicks on a calm sea. In D. P. Hoult, editor, Oil in the sea.
- Fernandes, R., 2001: Modelação de hidrocarbonetos. Trabalho de conclusão de curso. Instituto Superior Técnico Portugal.
- Gan, J., L. Mysak, e D. Straub, 1998: Simulation of the South Atlantic Ocean circulation and its seasonal variability. *J. Geophys. Research*, **103**(C5), 10.241–10.251.
- Genders, S., 1988: In situ detection and tracking of oil in the water column. *Oil and Chemical Pollution*, **4**(2), 113–126.
- GESAMP, 1993: Impact of oil and related chemicals and wastes on the marine environment,imo. Relatório técnico, Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection.
- Gianuca, N. M., 1998: Recursos Naturais das Praias Arenosas do Brasil. *Inf Unnesco Ciênc. Mar.*, **47**, 89–94.
- Goodlad, J., 1986: Effects of the braer oil spillof the shetland seafood industry. *The science of the total environment*, **186**, 127–123.
- Gordon, A., 1981: South Atlantic thermohaline ventilation. *Deep Sea Research*, **28A**(11), 1238–1264.
- Grimm, A. M., V. R. Barros, e M. E. Doyle, 2000: Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*, **13**, 35–58.
- Grimm, A. M., S. E. T. Ferraz, e J. Gomes, 1998: Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*, **11**, 2863–2880.

- Haimovici, M., S. D. Pereira, e P. C. Vieira, 1989: La pesca demersal en el sur do brasil en el periodo 1975-1985. *Frente Maritimo*, **5(A)**, 151–163.
- Harris, C., 1995: O acidente do Braer: Ilhas Shetland, janeiro de 1993, capítulo 2. FEMAR.
- Holme, N. A., 1969: Effects of torrey canyon pollution on marine life. In D. P. Hoult, editor, Oil in the sea.
- Hunter, J. R., P. D. Craig, e H. E. Phillips, 1993: On the use of random walk models with spatially variable diffusivity. *Journal of Computational Physics*, **106**(366-376).
- IBAMA, 2002: Modelagem de derramamento de oleo no mar. Relatório técnico, IBAMA.
- Irvine, G. V., D. H. Mann, e J. W. Short, 2006: Persistence of ten year old Exxon Valdez oil on gulf of Alaska beaches. *MPB*, **no prelo**.
- James, I. D., 2002: Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal water. a review. *Environmental Modelling /& Software*, **17**, 363–385.
- Knap, A. H., K. A. Burns, R. D. nad M. Ehrhardt, e K. H. Palmork, 1986: Dissolved/dispersed hydrocarbons, tarballs and the surface microlayer: Experiences from an IOC/UNEP workshop in Bermuda, December, 1984. *Marine Pollution Bulletin*, **17(7)**, 313–319.
- Korotenko, K. A., R. M. Mamedov, e C. N. K. Mooers, 2000: Prediction of the dispersal of oil transport in the Caspian sea resulting from a continuous release. *Spill Science & Technology Bulletin*, **6(5/6)**, 323–339.
- Korotenko, K. A., R. M. Memedov, A. E. Kontar, e L. A. Korotenko, 2004: Particle tracking method in the approach for prediction of oil slick transport in the sea: modelling oil pollution resulting from river input. *J. Marine Systems*, **48**, 159–170.

- Krusche, N., J. M. B. Saraiva, e M. S. Reboita, 2002: Normais Climatológicas Provisórias de 1991 a 2000 para Rio Grande. Editora da Furg.
- Lages, R. S., 2003: Padrão de Ventos no extremo Sul Análise de 2000 a 2003 e aplicação a dispersão de poluentes. FURG Rio Grande,RS.
- Lehr, W. J., H. M. Cekirge, R. J. Fraga, e M. S. Belen, 1984: Empirical studies of the spreading of oil spills. *Oil and petrochemical pollution*, **2**(1), 7–11.
- LeProvost, C., M. Genco, F. Lyard, P. Vincent, e P. Canceil, 1994: Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model. *J. Geophys. Research*, **99**(C12), 24.777–24.797.
- Lima, I., C. Garcia, e O. Möller., 1996: Ocean surface processes on the Southern Brazil shelf: characterization and seasonal variability. *Continental Shelf Research*, **16**(10), 1307–1317.
- Linden, O., A. Jernelov, e J. Egerup, 2004: The environmental impacts of the gulf war 1991. Relatório Técnico 4-19, International Institute for Applied Systems.
- M. R. Villarreal, C. G. P., G. D. Rio, A. Lavin, P. Otero, S. Piedracoba, e J. Cabanas, 2006: Oceanographic conditions in north and northwest iberia and their influence on the prestige oil spill. *Marine Pollution Bulletin*, **no prelo**.
- MARPOL, 1998: Marpol 25 years. Relatório técnico, Internatinal Maritime Organization.
- Martínez, R. G. e H. F. Tovar, 1999: Computer modeling of oil spill trajectories with a high accuracy method. *Spill Science & Technology Bulletin*, **5**(5/6), 323–330.
- Martinsen, E. e H. Engerdahl, 1987: Implementation and Testing of a Lateral Boundary Scheme as an Open Boundary Condition in a Barotropic Ocean Model. *Coastal Eng.*, **11**, 603–627.

- Matano, R. e Philander, 1993: Heat and mass balances of the SAO calculated from numerical model. *J. Geophys. Research*, **98**(C1), 977–984.
- Mellor, G., 1998: A three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. *Users guide for the Princeton Ocean Model*, págs. 1–41.
- Mellor, G. e A. Blumberg, 1985: Modeling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1380–1383.
- Mellor, G., S. Hakkinen, T. Ezer, e R. Patchen, 1999: A Generalization of a Sigma Coordinate Ocean Model and an Intercomparison of Model Vertical Grids. In N. Pinardi, editor, *Ocean Forecasting: Theory and Practice*, págs. 1–16. Springer-Verlag Publ.
- Mellor, G. e T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **20**(4), 851–875.
- Miraglia, R. A., 2002: The cultural and behavioral impact of the Exxon Valdez oil spill on native peoples of Prince William Sound, Alaska. *Spill Science & Technology Bulletin*, **7**(1-2), 75–97.
- Möller, O., P. Castaing, J. Salomon, e P. Lazure, 2001: The influence of Local e Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, **24**(2), 297–311.
- Murray, S. P., 1972: Turbulent diffusion of oil in the ocean. *Limnology Oceanography*, **17**, 615.
- Murray, S. P., 1982: Pollutant transfer and transport in the sea, volume II, capítulo 5. CRC.
- NOAA, 2001: Oil spill case histories. Relatório técnico, National Oceanic and Atmospheric Administration.

- Nobre, C. A., I. F. A. Cavalcanti, M. A. Gan, e M. T. Kayano, 1986: Boletim de Monitoramento e Análise climática. *Climanálise*.
- NRC, 1985: Oil in the Sea. Inputs, Fates, and Effects. National academy press, Washington, DC.
- NRC, 2002: Oil in the Sea: Inputs, Fates, and Effects, 2002. National Research Council. National Academy Press, Washington, DC.
- Orlanski, I., 1976: A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *J. Comput. Phys.*, **21**, 251–269.
- Pereira, C., 1989: Seasonal variability in the coastal circulation on the Brazilian Continental Shelf (29°S-35°S). *Continental Shelf Research*, **9**(3), 285–299.
- Pereira, P. S., 2005: Variabilidade da orla oceânica do Rio Grande do Sul e suas implicações na elaboração de planos de contingência aspectos morfodinâmicos, Sedimentológicos e geomorfológicos. Tese de Mestrado, FURG.
- Piola, A. R., O. O. Möller, e E. D. Palma, 2005: O impacto do rio da prata no oceano atlântico. *Ciência hoje*, **36**(226), 30–37.
- Proctor, R., R. A. Flather, e A. J. Elliot, 1994: Modelling tides and surface drift in the arabian gulf - application to gulf oil spill. *Continental Shelf Research*, **14**(5), 533–545.
- Proctor, R. e W. R. Turner, 1995: Modelando o Destino do óleo do Braer: validade das previsões, capítulo 4. FEMAR.
- Reed, M., O. Johansen, P. J. Brandvick, P. Daling, A. Lewis, R. Fiocco, D. Mackay, e R. Prentki, 1999: Oil Spill Modeling towards the Close of the 20th Century: of the State of Art. *Spill Science & Technology Bulletin*, **5**(1), 3–16.

- Ruoppolo, V., A. C. Adornes, A. C. Nascimento, e R. S. Fiho, 2004: Reabilitação de pingüins afetados por petróleo. *Clínica veterinária*, **9**(51).
- Sebastião, P. e C. G. Soares, 1995: Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. *Spill Science & Technology Bulletin*, **2**(2/3), 121–131.
- Seeliger, U., C. Odebrecht, e J. P. Castello, 1998: Os Ecossistemas Costeiro e Marinho do Extremo Sul do Brasil. Editora Ecoscientia.
- Silva, V. A., 2003: O PLANEJAMENTO DE EMERGÊNCIA EM REFINARIAS BRASILEIRAS. Tese de Mestrado, Universidade Federal Fluminense.
- Smagorinsky, J., 1963: General circulation experiments with the primitive equations, I, The basic experiment. *Monthly Weather Review*, **91**, 99–164.
- Soares, I. e O. Möller, 2001: Low-frequency currents and water mass spatial distribution on the Southern Brazilian Shelf. *Continental Shelf Research*, **21**(16-17), 1785–1814.
- Soares, I. D., 2003: The Southern Brazilian Shelf Buoyancy-Driven Currents. Tese de Doutorado, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science - University of Miami, Miami, USA.
- Sommerfeld, A., 1949: Partial Differential Equations, Lect. Theoretical Physics, volume 6. Academic Press.
- Sortstorm, E. S., 1986: The 1985 scale experimental oil spill at haltenbanken, norway. *Oil and Cemical Pollution*, **3**, 455–469.
- Souza, R. B. e I. S. Robinson, 2003: Lagrangian and satellite observations of the brazilian coastal current. *Continental Shelf Research*, págs. 01–21.

- Stech, J. e J. Lorenzetti, 1992: The response of the South Brazilian Bight to the passage of wintertime cold fronts. *J. Geophys. Research*, **97**(C6), 9507–9520.
- Stewart, R. B., 2004: Introduction to Physical Oceanography. Texas University.
- Thorpe, S. A., 1995: Vertical dispersion of oil droplets in strong winds; the braer oil spill. *Marine Pollution Bulletin*, **30**(11), 756–758.
- Tomazelli, L. J., 1992: O regime de ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, **20**(1), 27–32.
- Triola, M., 2003: Elementary Statistics. Addison Wesley.
- Wanga, Z., M. Fingas, E. Owensb, L. Sigouina, e C. Brown, 2001: Long-term fate and persistence of the spilled metula oil in a marine salt marsh environment. degradation of petroleum biomarkers. *Journal of Chromatography*, **926**, 275–290.
- Wetzel, L. B., 1995: Contaminação por resíduos sólidos e piche: Uma perspectiva da praia do Cassino, Município de Rio grande, RS. Monografia gradação, FURG Rio Grande,RS.
- Yelland, M. J., B. I. Moat, P. K. Taylor, R. W. Pascal, J. Hutchings, e V. C. Cornell., 1998: Wind stress measurements from the open ocean corrected for airflow distortion by the ship. *J. Phys. Oceanogr.*, **28**(7), 1511–1526.
- Yelland, M. J. e P. Taylor, 1996: Wind stress measurements from the open ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **26**(4).
- Zavialov, P., R. Ghisolfi, e C. Garcia, 1998: An inverse model for seasonal circulation on the Southern Brazilian Shelf: near surface velocity from the heat budget. *J. Phys. Oceanogr.*, **28**, 545–562.

Zhang, D. F., A. K. Easton, e J. M. Steiner, 1997: Simulation of coastal oil spills using th random walk particle method with gaussian kernel weighting. *Spill Science & Technology Bulletin*, 4(2), 71–88.

Zhang, S., 1994: On the Coastal Circulation Driven by River Outflow. Tese de Mestrado, Nova Southeastern University - Oceanography Center.