



Relatório Técnico [rev.02]

## Modelagem de Transporte de Óleo

Bloco BM-P-2

---

Preparado para: Ecology and Environment do Brasil

Preparado por: Henery Ferreira Garção

Felipe Lobo Mendes

Francisco dos Santos

Bruna Cerrone

Leonardo Marques da Cruz

20 de abril de 2012

### **Prooceano**

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.0040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax + 55 21 2532.5666

[www.prooceano.com.br](http://www.prooceano.com.br)

## Controle de revisão

---

### Revisão nº 01

Data: 16 / 03 / 2012

Descrição: Revisão seguindo os comentários da Petrobras

Responsável: Bruna Cerrone

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 02

Data: 18 / 04 / 2012

Descrição: Revisão seguindo os comentários da Petrobras

Responsável: Bruna Cerrone

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 03

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 04

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 05

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

## Sumário

---

<b>1. Introdução .....</b>	<b>16</b>
<b>2. Metodologia.....</b>	<b>19</b>
2.1. Modelo Hidrodinâmico .....	19
2.2. Modelo de Transporte.....	38
2.3. Estratégias de Modelagem .....	50
2.4. Descrição das Grades .....	52
2.5. Forçantes .....	55
2.6. Variabilidade Ambiental .....	61
<b>3. Resultados .....</b>	<b>63</b>
3.1. Resultados Probabilísticos.....	66
3.2. Resultados Determinísticos .....	111
<b>4. Conclusão .....</b>	<b>155</b>
<b>5. Bibliografia .....</b>	<b>156</b>

## Índice das imagens

Figura 1: Localização dos pontos de vazamento, em relação à Bacia de Pelotas (área em destaque).....	16
Figura 2: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <a href="http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html">http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html</a> .....	19
Figura 3: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25°W, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <a href="http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html">http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html</a> .....	20
Figura 4: Trajetórias dos derivadores i12 e i13, lançados no Projeto MoncoCorcovado ( <a href="http://mondocorcovado.prooceano.com.br">mondocorcovado.prooceano.com.br</a> ).....	21
Figura 5: Espectro da velocidade de corrente. ....	22
Figura 6: Local de medição das correntes.....	23
Figura 7: Série temporal da componente zonal e meridional das correntes.....	24
Figura 8: Espectro de Energia das Componentes Zonal e Meridional de Corrente. ....	25
Figura 9: Exemplo da grade hidrodinâmica do HYCOM utilizada para forçar o modelo de óleo.29	
Figura 10: Campo médio das simulações do HYCOM para o período de verão. ....	30
Figura 11: Campo médio das simulações do HYCOM para o período de inverno. ....	31
Figura 12: Trajetórias dos derivadores do Projeto MONDO e simuladas com a utilização dos resultados do HYCOM para o mesmo período. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008. ....	33
Figura 13: Mapa de probabilidade de presença dos derivadores lançados no Projeto MONDO. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008. ....	34
Figura 14: Mapa de probabilidade de presença dos derivadores virtuais, simulados com os resultados do HYCOM. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008. 35	
Figura 15: Mapas de Probabilidade de presença de derivadores. MONDO (contornos) e HYCOM (sombreado). ....	36

Figura 16: Limite norte da isoterma de 20° C a partir de dados do produto OSTIA, do HYCOM e dos resultados de Souza e Robinson (2004). Fonte: Santos <i>et al.</i> (2011). .....	37
Figura 17: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001). .....	38
Figura 18: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001). .....	46
Figura 19: A grade de habitats utilizada na simulação. ....	53
Figura 20: A grade de batimetria utilizada na simulação. ....	54
Figura 21: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo do ponto de vazamento no bloco BM-P-2. ....	57
Figura 22: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho na região do Bloco BM-P-2. ....	58
Figura 23: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro na região do Bloco BM-P-2. ....	59
Figura 24: Séries temporais das componentes “u” e “v”, do vento, para a região do Bloco BM-P-2, Bacia de Pelotas, com o número de zeros ascendentes presentes nas séries. ....	62
Figura 25: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilístico. ....	64
Figura 26: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos. ....	65
Figura 27: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani. ....	67
Figura 28: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani. ....	68
Figura 29: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani. ....	69
Figura 30: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani. ....	70
Figura 31: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 6 horas. Poço Guarani. ....	71
Figura 32: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani. ....	72

Figura 33: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.....	73
Figura 34: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 6 horas. Poço Guarani.....	74
Figura 35: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.....	75
Figura 36: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> , no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.....	76
Figura 37: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 12 horas no período de verão. Poço Guarani.....	77
Figura 38: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 36 horas no período de verão. Poço Guarani.....	78
Figura 39: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 60 horas no período de verão. Poço Guarani.....	79
Figura 40: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias no período de verão. Poço Guarani.....	80
Figura 41: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de 30 dias no período de verão. Poço Guarani.....	82
Figura 42: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 12 horas no período de inverno. Poço Guarani.....	83
Figura 43: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 36 horas no período de inverno. Poço Guarani.....	84
Figura 44: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 60 horas no período de inverno. Poço Guarani.....	85
Figura 45: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias no período de inverno. Poço Guarani.....	86
Figura 46: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias, no período de inverno. Poço Guarani.....	87
Figura 47: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.....	89

Figura 48: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano. ....	90
Figura 49: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.....	91
Figura 50: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.....	92
Figura 51: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 6 horas. Poço Pampeano. ....	93
Figura 52: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano. ....	94
Figura 53: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano. ....	95
Figura 54: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 6 horas. Poço Pampeano. ....	96
Figura 55: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano. ....	97
Figura 56: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> , no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano. ....	98
Figura 57: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 12 horas no período de verão. Poço Pampeano. ....	99
Figura 58: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 36 horas no período de verão. Poço Pampeano. ....	100
Figura 59: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 60 horas no período de verão. Poço Pampeano. ....	101
Figura 60: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias no período de verão. Poço Pampeano.....	102
Figura 61: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de 30 dias no período de verão. Poço Pampeano. ....	104
Figura 62: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 12 horas no período de inverno. Poço Pampeano. ....	105

Figura 63: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 36 horas no período de inverno. Poço Pampeano. ....	106
Figura 64: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 60 horas no período de inverno. Poço Pampeano. ....	107
Figura 65: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias no período de inverno. Poço Pampeano.....	108
Figura 66: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias, no período de inverno. ....	110
Figura 67: Vento utilizado nas simulações de condições meteo-oceanográficas.....	112
Figura 68: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	113
Figura 69: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	114
Figura 70: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	115
Figura 71: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	116
Figura 72: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	117
Figura 73: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	118
Figura 74: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	119

Figura 75: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	120
Figura 76: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	121
Figura 77: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	122
Figura 78: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de verão. Volume de blowout (10.200 m <sup>3</sup> ). Poço Guarani. ....	123
Figura 79: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	124
Figura 80: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	125
Figura 81: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	126
Figura 82: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	127
Figura 83: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	128
Figura 84: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	129

Figura 85: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	130
Figura 86: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	131
Figura 87: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Guarani.....	132
Figura 88: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de inverno. Volume de blowout (10.200 m <sup>3</sup> ). Poço Guarani. ....	133
Figura 89: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano. ....	134
Figura 90: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano. ....	135
Figura 91: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano. ....	136
Figura 92: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	137
Figura 93: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	138
Figura 94: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	139

Figura 95: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	140
Figura 96: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	141
Figura 97: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	142
Figura 98: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	143
Figura 99: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de verão. Volume de blowout (10.200 m <sup>3</sup> ). Poço Pampeano.....	144
Figura 100: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano. ....	145
Figura 101: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano. ....	146
Figura 102: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano. ....	147
Figura 103: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	148
Figura 104: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	149

---

Figura 105: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	150
Figura 106: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	151
Figura 107: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	152
Figura 108: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m <sup>3</sup> . Poço Pampeano.....	153
Figura 109: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de inverno. Volume de blowout (10.200 m <sup>3</sup> ). Poço Pampeano.....	154

## Índice das tabelas

---

Tabela 1: Resumo dos cenários de vazamento simulados no estudo.....	18
Tabela 2: Características do óleo informado pela contratante. ....	50
Tabela 3: Características do óleo escolhido no banco de dado do OSCAR. ....	51

## Equipe técnica

---

**Nome: Henery Ferreira Garção**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 3790998

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Felipe Lobo Mendes Soares**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 3811578

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Francisco dos Santos**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 459094

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Bruna Cerrone**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 768292

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

---

**Nome: Leonardo Marques da Cruz**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 252527

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

## 1. Introdução

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica do transporte de óleo no mar para cenários acidentais de vazamento a partir de duas localidades, poços Guarani e Pampeano, localizadas no bloco BM-P-2, Baía de Pelotas. A localização dos poços Guarani e Pampeano, cujas coordenadas geográficas são 32°52'16,92"S e 49°54'59,05"W e 32°38'27,47"S e 50°6'33,84"W, respectivamente, são apresentadas na Figura 1.

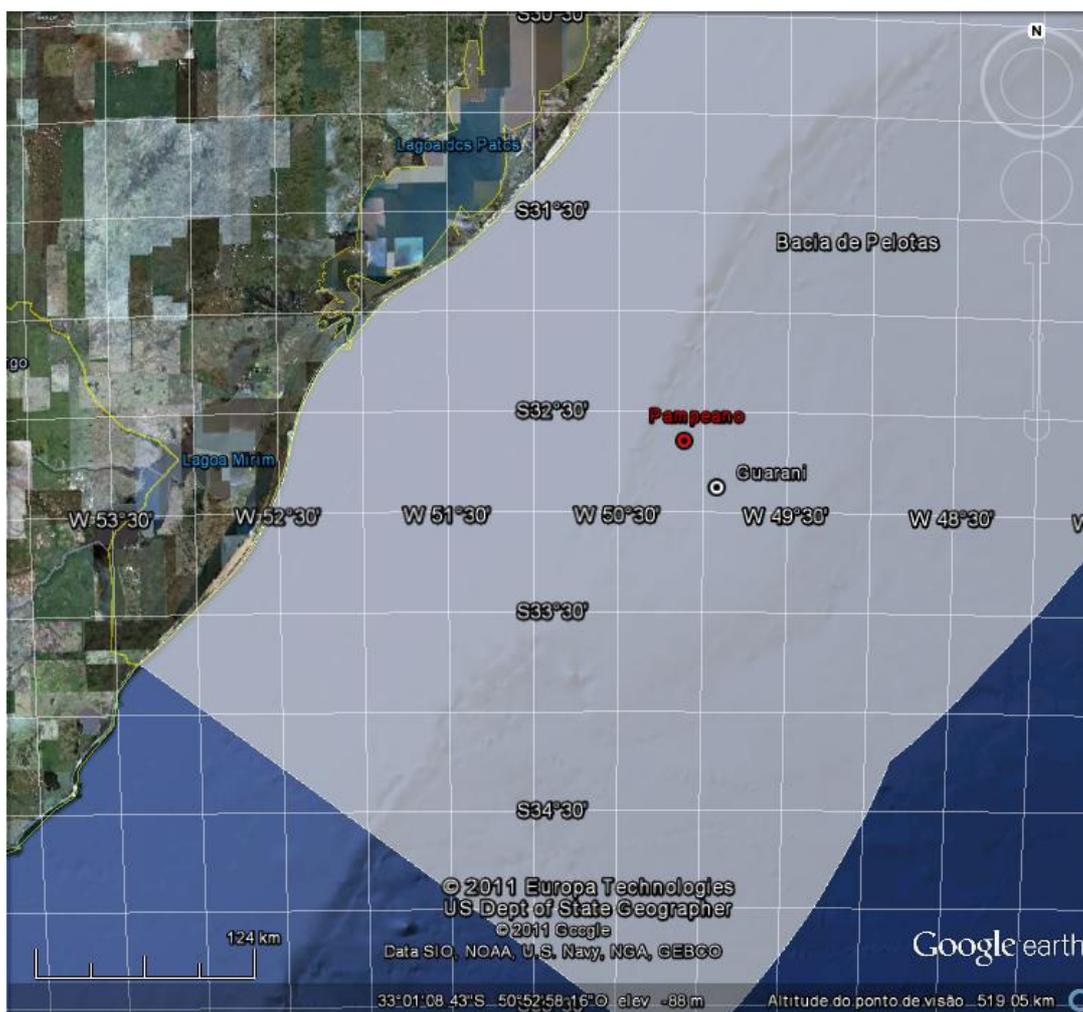


Figura 1: Localização dos pontos de vazamento, em relação à Baía de Pelotas (área em destaque).

O estudo foi dividido em duas etapas. A primeira consiste na análise das características meteorológicas e simulações hidrodinâmicas da região, mais especificamente os parâmetros capazes de afetar o comportamento do óleo derramado (item Modelo Hidrodinâmico).

Na segunda etapa foi realizada a simulação da dispersão do óleo, para as condições meteo-oceanográficas características, estimando o comportamento do óleo a ser derramado em cada um deles.

Foram considerados três volumes de vazamento, definidos de acordo com a resolução CONAMA nº 398/2008<sup>1</sup>, são eles:

- Pequeno porte - 8 m<sup>3</sup>;
- Médio Porte - 200 m<sup>3</sup>;
- Pior caso (maior volume) – 10.200 m<sup>3</sup>.

Os fluidos esperados são óleo e gás de origem marinha, semelhante às rochas geradoras da Bacia de Santos. Nos 9 poços perfurados em águas rasas na Bacia de Pelotas, não foram encontradas acumulações de hidrocarbonetos. Nos estudos exploratórios foi realizada modelagem de sistema petrolífero na área BM-P-2 e foram considerados os mesmos geradores marinhos de Santos.

Para a estimativa do volume de *blowout*, foi feita uma correlação com o poço SPS-56. Durante a fase de perfuração do poço SPS-56, o intervalo 2101 a 2111 metros foi testado, observando-se vazão de óleo de 340 m<sup>3</sup>/dia, resultando em 10.200 m<sup>3</sup> de óleo em trinta dias de vazamento.

No estudo de dispersão de óleo, dois tipos de simulações serão conduzidos no estudo: probabilísticas e determinísticas. Na Tabela 1 é apresentado o resumo dos cenários simulados.

As simulações determinísticas foram conduzidas para a condição meteo-oceanográfica mais frequente, representada pelas condições de ventos e correntes de maior ocorrência na região.

---

<sup>1</sup> De dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional

Tabela 1: Resumo dos cenários de vazamento simulados no estudo.

Modelo	Volume Total (m <sup>3</sup> )	Estação	Vazamento	Tempo
<b>Probabilístico</b>				
Pequeno Porte	8	verão	instantâneo	30 dias
Pequeno Porte	8	inverno	instantâneo	30 dias
Médio Porte	200	verão	instantâneo	30 dias
Médio Porte	200	inverno	instantâneo	30 dias
Pior Caso	10.200	verão	contínuo (30 dias)	60 dias
Pior Caso	10.200	inverno	contínuo (30 dias)	60 dias
<b>Determinístico</b>				
Meteo-oceanográfica	10.200	verão	contínuo (30 dias)	60 dias
Meteo-oceanográfica	10.200	inverno	contínuo (30 dias)	60 dias

Para contextualizar a questão, os modelos numéricos e os dados físicos usados serão aqui descritos.

## 2. Metodologia

### 2.1. Modelo Hidrodinâmico

O HYCOM é um modelo de circulação oceânica global, que utiliza discretização horizontal em diferenças finitas (GABIOUX, 2008). Esse modelo tem como principal característica a utilização de um sistema de coordenadas verticais híbridas, isto é, utiliza o sistema de coordenadas isopicnais para as áreas de oceano aberto e estratificado, coordenadas z (cartesianas) para a camada de mistura e regiões pouco estratificadas, e coordenadas sigma para regiões com menores profundidades e topografia de fundo variável (zonas costeiras).

Utilizando esses três sistemas de coordenadas, o modelo pode conservar as características das massas d'água por longos períodos de tempo em regiões oceânicas (coordenada isopicnal), obter alta resolução na camada de mistura ou em regiões com pouca estratificação (coordenada z), e resolver melhor a topografia de fundo em áreas costeiras ou sobre a plataforma continental (coordenada sigma). Desta forma, o HYCOM é basicamente um modelo em camadas isopicnais, que pode realizar uma transição suave para os sistemas de coordenadas z e sigma próximo aos contornos superiores e inferiores, ou quando a resolução vertical é inadequada (GABIOUX, 2008). Assim, o HYCOM combina as vantagens dos diferentes sistemas de coordenadas, simulando de forma otimizada as características da circulação oceânica e costeira, sendo atribuída ao usuário a determinação das zonas de transição entre os sistemas de coordenadas (CHASSIGNET *et al.*, 2003). A Figura 2 e a Figura 3 ilustram a estrutura híbrida do modelo.

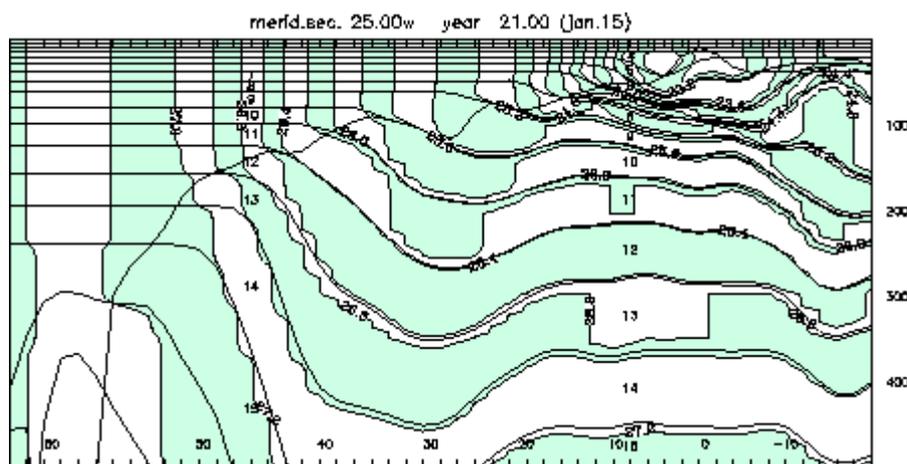


Figura 2: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html>

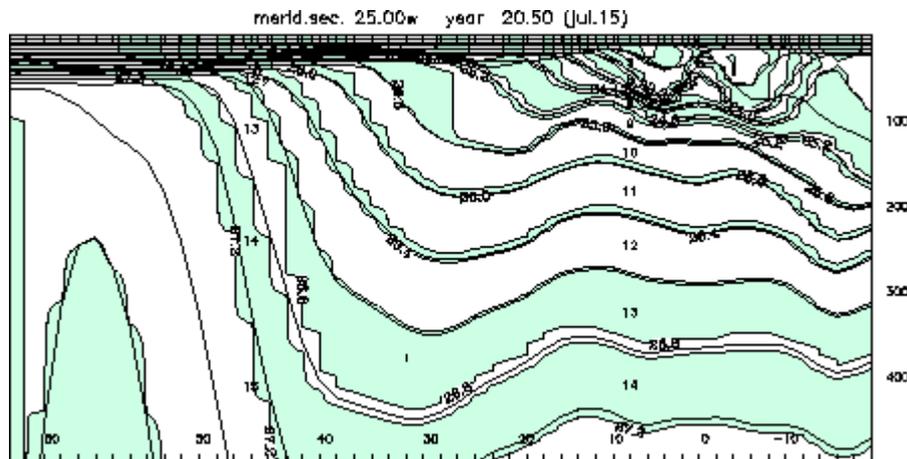


Figura 3: Seção meridional do HYCOM na longitude de 25°W, na porção leste do Atlântico Norte. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. Fonte: <http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html>

A utilização de modelos globais oceânicos, como o HYCOM, com o objetivo de simular o transporte de óleo na Bacia Oceânica Sudeste/Sul do Brasil era até pouco tempo uma opção inviável, em virtude da baixa resolução espacial e temporal desse tipo de modelo. O aumento da capacidade computacional fez com que essa limitação fosse sendo minimizada, e atualmente existem diversos modelos globais com alta resolução, que desta forma são capazes de resolver as feições de mesoescala, responsáveis pela maior parte da energia da circulação oceânica. Além disso, os modelos globais não necessitam da imposição de condições de contorno em fronteiras abertas, uma das maiores fontes de problemas em se tratando de modelagem numérica geofísica. Somado a isso, os modelos globais contam, em geral, com sistemas robustos de assimilação de dados, o que possibilita que as simulações sejam realizadas por longos períodos, sem que haja grande divergência em relação à realidade. Diante disso, optou-se por utilizar os dados do HYCOM nesta simulação.

Embora seja verificada a ausência da maré astronômica nas condições de contorno do HYCOM, as correntes de maré na região de estudo (costa sudeste/sul do Brasil) apresentam energia desprezível em relação às demais forçantes, mesmo em locais abertos muito próximos à costa, como as praias. Esse fato é demonstrado através da análise das velocidades obtidas dos derivadores 12 e 13 do Projeto MondoCorcovado (<http://mondocorcovado.prooceano.com.br>), que durante cerca de dois meses e meio derivaram a menos de 10 km da costa, conforme a Figura 4. Ao realizar o espectro de energia das velocidades (utilizando apenas a parte das trajetórias onde os derivadores já se encontram sobre a plataforma - Figura 5), nota-se que a energia da banda de frequência da maré (entre 12

e 24 horas) apresenta valores insignificantes em relação à baixa frequência. O espectro foi calculado através da transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*), sem a utilização de filtros ou alisamentos. O pico correspondente à maré semi-diurna, por exemplo, contém apenas 3,5% da energia contida no pico de cerca de 6 dias, associado às forçantes atmosféricas. As correntes de maré serão apenas significativas no interior de baías como a Baía de Guanabara, Ilha Grande e Paranaguá, por exemplo.

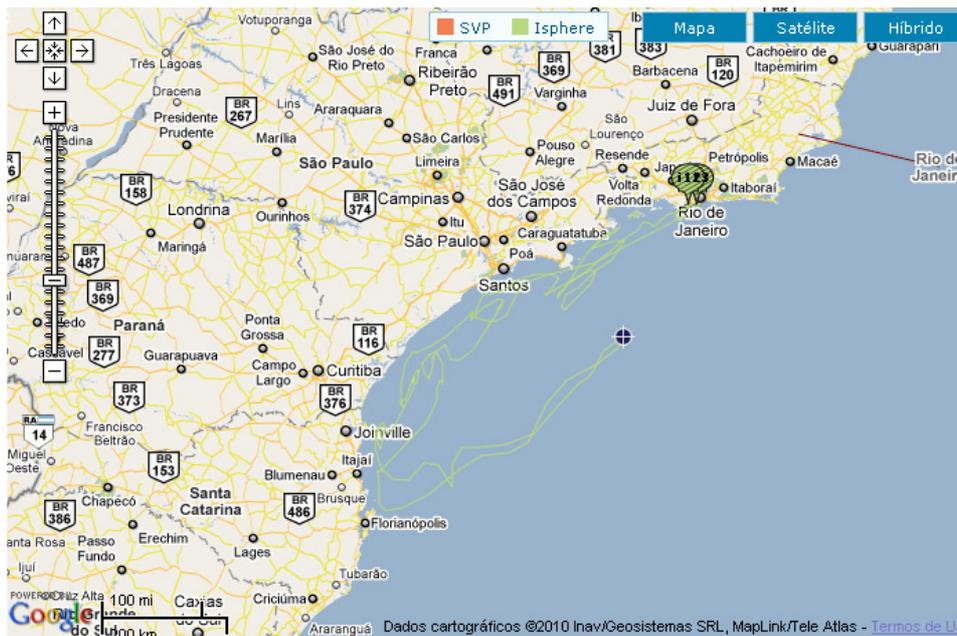


Figura 4: Trajetórias dos derivadores i12 e i13, lançados no Projeto MoncoCorcovado (mondocorcovado.proceano.com.br).

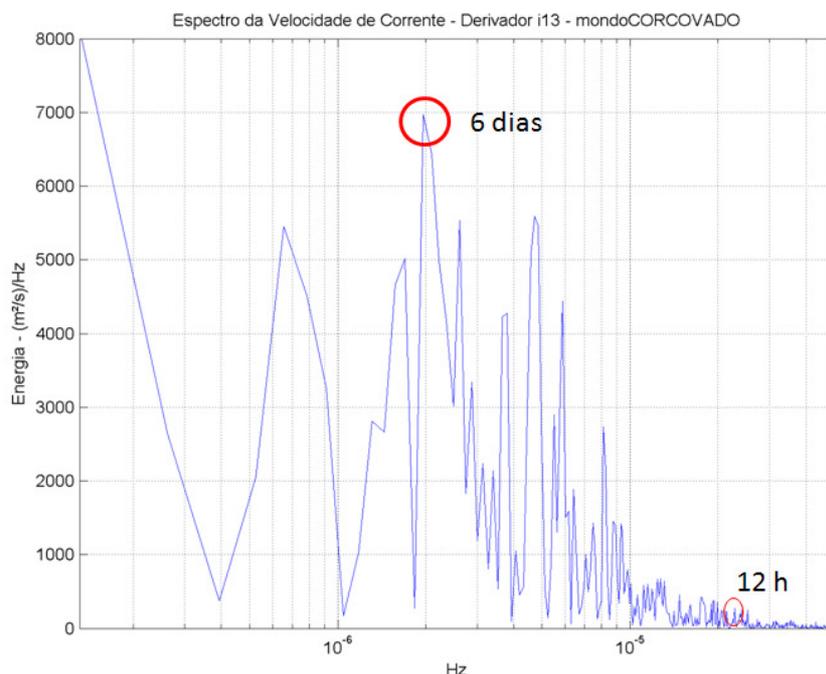


Figura 5: Espectro da velocidade de corrente.

Para avaliar os efeitos da maré, também foram utilizados dados de correntes obtidos de uma campanha de medição realizada pela empresa PROOCEANO entre 8 de setembro e 25 de novembro de 2005. As medições foram realizadas em um fundeio posicionado em  $23^{\circ} 15' 03,54''$  S e  $44^{\circ} 12' 10,14''$  W (Figura 6), em região com lâmina d'água de aproximadamente 50 m. Esta campanha teve como objetivo caracterizar o comportamento hidrodinâmico da região.

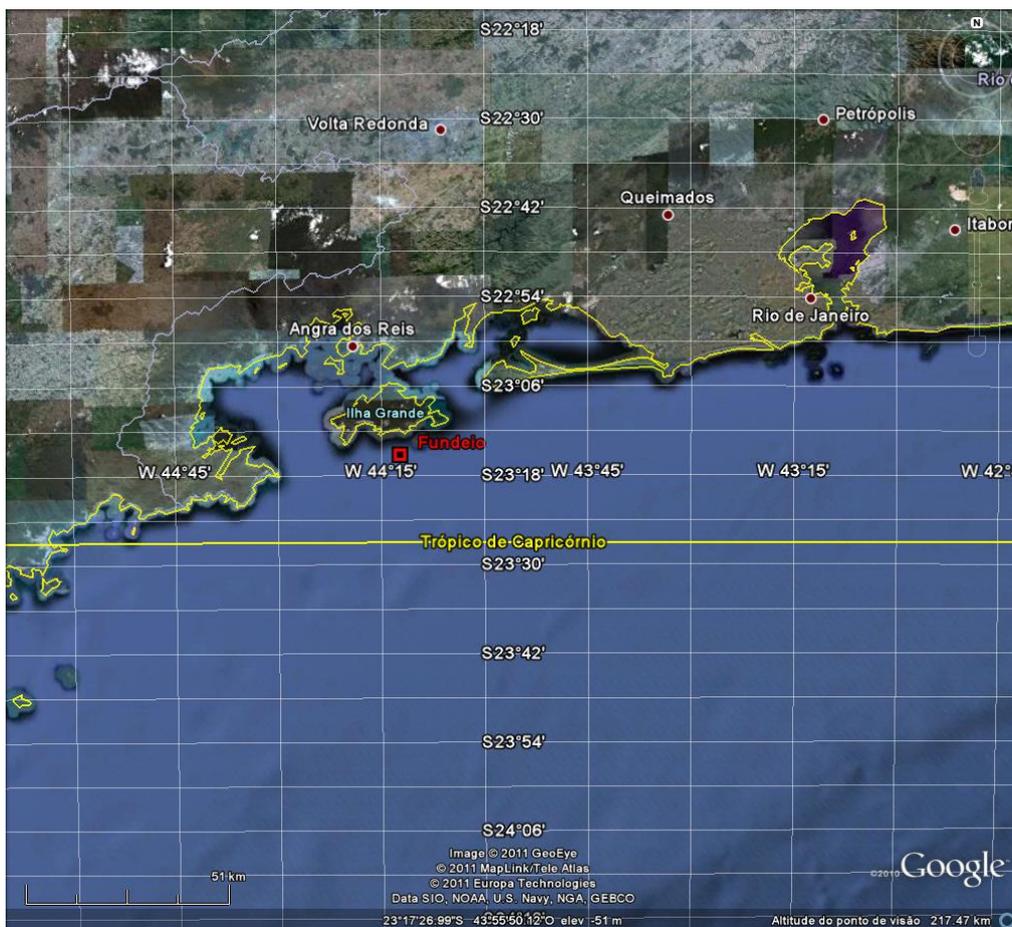


Figura 6: Local de medição das correntes.

Os dados de correntes foram obtidos nessa campanha, em duas profundidades (10 m e 40 m), com o uso de correntômetro da marca *Sensordata*, modelo SD-6000. Este equipamento registra os valores de velocidade e direção de correntes e temperatura da água, em intervalos regulares de amostragem, podendo realizar medições em até 500 m de profundidade.

O equipamento permite a medição de velocidades de corrente de até 8 m/s, com resolução de 0,005 m/s, e valores de temperatura variando entre -2º C a 32º C, com autonomia para até 6000 registros. O correntômetro foi posicionado a 10 m abaixo da superfície, realizando medições a cada 30 min. As séries temporais obtidas para as componentes zonais e meridionais das correntes podem ser observadas na Figura 7.

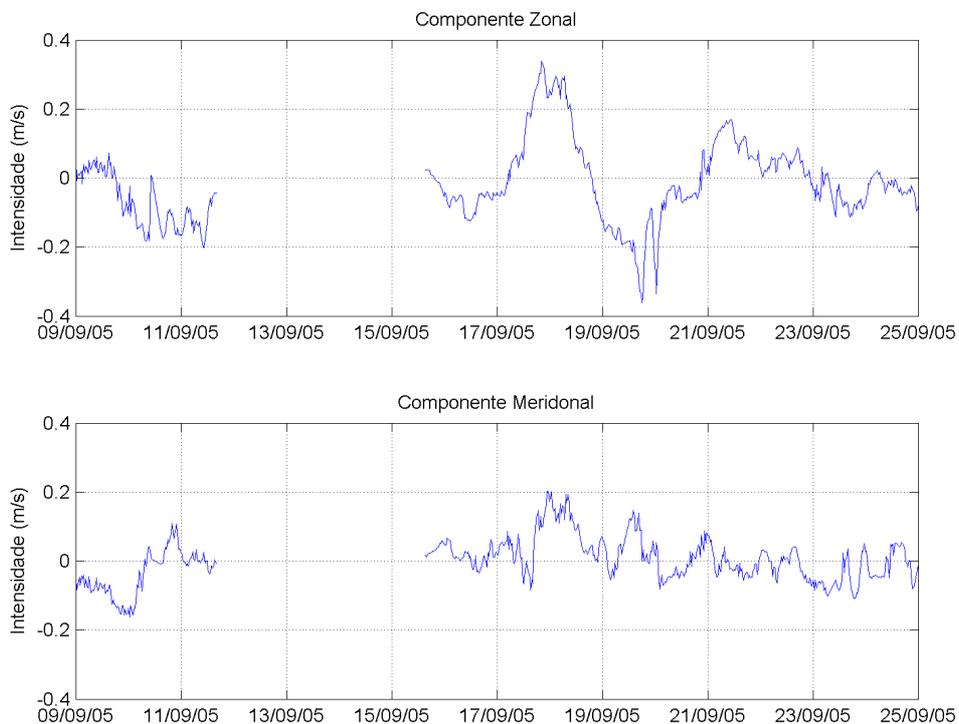


Figura 7: Série temporal da componente zonal e meridional das correntes.

Para verificar a influência da maré foi feito um espectro de energia das componentes da corrente medida no fundeio mais superficial. Neste, pretende-se observar quais são as frequências (ou períodos) responsáveis pela maior parte da energia das correntes. Embora seja recomendada a utilização de uma série temporal mais longa para avaliar as oscilações no ciclo de maré, o período que constitui a série avaliada corresponde à transição do ápice da maré de sizígia (lua nova em 17/09) até o meio da quadratura (quarto - minguante 25/09) abrangendo assim, os dois cenários possíveis de maré. Na Figura 8, observa-se que a maior parcela da energia da componente meridional da corrente ( $v$ ) está associada à frequência de 0,008 ciclos por hora (ou 125 horas de período). Esse é o período correspondente ao período de oscilação presente na circulação atmosférica da região, como as passagens de sistemas frontais, ou seja, o período em que os ventos variam entre E/NE e S/SW.

Já para a componente zonal ( $u$ ), a maior parte da energia encontra-se na banda de frequência correspondente aos períodos entre 20 e 30 horas e comparando-se com a energia total presente na componente  $v$ , possui uma ordem de grandeza inferior. Nessa faixa de períodos estão presentes três fenômenos principais; a oscilação inercial, o efeito de brisa e a

componente diurna da maré. Como a maré na região é a semi-diurna e não há energia significativa no período de 12 horas (~0,08 ciclos por hora) em nenhuma das duas componentes (u e v), demonstra-se que a maré não exerce papel de significativa importância nas correntes.

Pode-se inferir então que a componente v da corrente nessa região possui a maior parte da energia das correntes que é mais influenciada pelas passagens de frentes frias, enquanto os a componente u possui menor energia e sofre maior influência dos fenômenos com períodos próximos ao diurno, provavelmente associada à oscilação inercial e à brisa marinha. Portanto, baseado nesses dados e nos anteriormente apresentados (de derivadores) conclui-se que a influência da maré pode ser considerada desprezível em relação aos demais forçantes na geração das correntes no local.

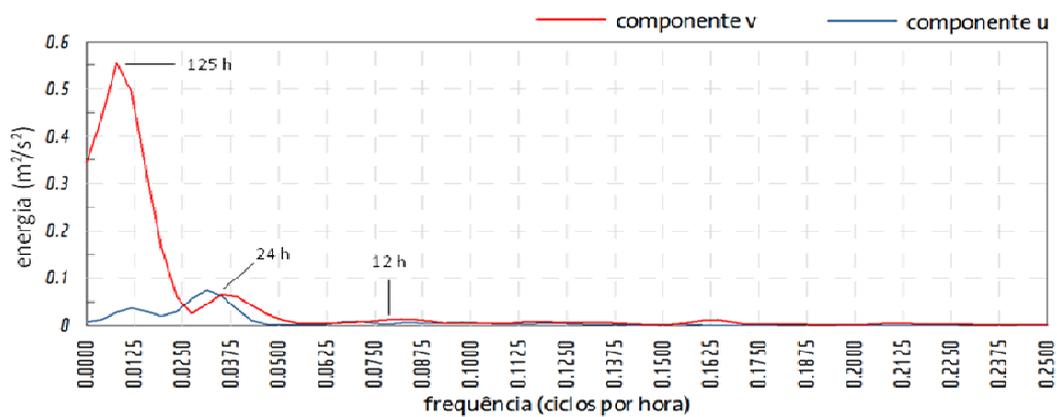


Figura 8: Espectro de Energia das Componentes Zonal e Meridional de Corrente.

### 2.1.1 Equações Governantes

O HYCOM é um modelo de equações primitivas contendo 5 equações prognósticas – duas para as componentes horizontais de velocidade, uma equação de continuidade de massa ou tendência de espessura da camada, e duas equações para o par de variáveis termodinâmicas, como temperatura e salinidade ou densidade e salinidade. As equações do modelo podem ser descritas em coordenadas (x,y,s), onde s é a coordenada vertical não especificada, na forma de (BLECK, 2002):

$$\frac{\Delta v}{\Delta t_s} + \nabla_s \frac{v^2}{2} + (\zeta + f)k \times v + \left( \dot{s} \frac{\partial \rho}{\partial s} \right) \frac{\partial v}{\partial \rho} + \nabla_s M - \rho \nabla_s \alpha \quad (1)$$

$$= -g \frac{\partial \tau}{\partial \rho} + \left( \frac{\partial \rho}{\partial s} \right)^{-1} \nabla_s \left( v \frac{\partial \rho}{\partial s} \nabla_s v \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left( \frac{\partial \rho}{\partial s} \right) + \nabla_s \left( v \frac{\partial \rho}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left( \dot{s} \frac{\partial \rho}{\partial s} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left( \frac{\partial \rho}{\partial s} \theta \right) + \nabla_s \left( v \frac{\partial \rho}{\partial s} \theta \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left( \dot{s} \frac{\partial \rho}{\partial s} \theta \right) = \nabla_s \left( v \frac{\partial \rho}{\partial s} \nabla_s \theta \right) + H_\theta \quad (4)$$

Onde  $v=(U, V)$  é o vetor velocidade horizontal,  $\rho$  é a pressão,  $\theta$  representa as variáveis termodinâmicas,  $\alpha$  é o volume específico potencial,  $\zeta$  é a vorticidade relativa,  $M$  é o potencial de Montgomery,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $k$  é o vetor vertical unitário,  $V$  é o coeficiente variável de viscosidade/difusividade,  $\tau$  é o vetor de estresse de cisalhamento induzido pelo vento ou pelo fundo e  $H_\theta$  representa o somatório dos termos fonte diabáticos, incluindo a mistura diapical, que atua em  $\theta$ . Os subscritos indicam quais variáveis permanecem constantes durante a diferenciação parcial (BLECK, 2002).

Após integração vertical sobre uma camada coordenada, limitada pelas duas superfícies  $S_{sup}$  e  $S_{inf}$  (superfície, fundo do mar e todos os limites de camadas são superfícies  $S$ ), a equação de continuidade (II-2) se torna equação prognóstica para o peso da camada por unidade de área,  $\Delta \rho = \rho_{inf} - \rho_{sup}$  (BLECK, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \Delta \rho + \nabla_s \cdot (v \Delta \rho) + \left( \dot{s} \frac{\partial \rho}{\partial s} \right)_{inf} - \left( \dot{s} \frac{\partial \rho}{\partial s} \right)_{sup} = 0 \quad (5)$$

O termo  $\left( \dot{s} \frac{\partial \rho}{\partial s} \right)$  representa o fluxo vertical de massa por uma superfície  $S$ .

A multiplicação de (1) por  $(\partial p / \partial s)$  e integração no intervalo  $(S_{sup}, S_{inf})$ , seguida pela divisão por  $(\Delta p / \Delta s)$ , modifica o termo de estresse de cisalhamento nesta equação para (BLECK, 2002):

$$\frac{g}{\Delta p} (\tau_{sup} - \tau_{inf}) \quad (6)$$

Enquanto o termo de mistura lateral de momentum é integrado para:

$$(\Delta p)^{-1} \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s v) \quad (7)$$

Estresses induzidos pelo vento e pelo fundo são admitidos como linearmente variáveis sobre determinado intervalo de profundidade, geralmente da ordem 10 m (BLECK, 2002).

A equação (II-4) expressa em camadas integradas é da forma de:

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \theta \Delta p + \nabla_s \cdot (v \theta \Delta p) + \left( s \frac{\partial \rho}{\partial s} \theta \right)_{inf} - \left( s \frac{\partial \rho}{\partial s} \theta \right)_{sup} = \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s \theta) + H_\theta \quad (8)$$

O sistema de equações prognósticas é complementado por equações diagnósticas, que incluem:

A equação hidrostática:  $\partial M / \partial \alpha = p$ ;

Uma equação de estado relacionando salinidade, temperatura e pressão à  $\alpha^{-1}$ , e

Uma equação descrevendo o fluxo vertical de massa sobre uma superfície  $S$ :  $\partial p / \partial s$

Esta última equação controla o espaçamento e o movimento das interfaces de camadas, sendo a essência da modelagem com coordenadas híbridas (BLECK, 2002).

## 2.1.2 Características da Simulação

Foi utilizada uma simulação para o oceano global, com o HYCOM 2.2 como modelo dinâmico. Os cálculos foram feitos para uma grade gerada na projeção de Mercator entre 78° S e 47° N (resolução de 1/12° no equador). Para regiões acima de 47° N é usada uma grade bipolar. A grade global tem dimensões horizontais de 4500 (longitude) x 3298 (latitude) pontos de grade, resultando num espaçamento médio de ~7 km. Apresenta 32 camadas verticais e a batimetria é derivada de uma base de dados qualificados NRL DBDB2. As forçantes superficiais são obtidas do NOGAPS (*Navy Operational Global Atmospheric Prediction System*) e incluem o cisalhamento do vento, velocidade do vento, fluxo de calor e precipitação.

Essa simulação utiliza o sistema para assimilação de dados NCODA (*Navy Coupled Ocean Data Assimilation*). Este sistema usa uma modelagem de previsão como partida em um esquema multi variável de interpolação ótima, que assimila observações de altimetria por satélites (pela trajetória obtida pelo NAVOCEANO *Altimeter Data Fusion Center*), temperatura da superfície do mar (*in-situ* e por satélites), assim como perfis de temperatura e salinidade obtidos por XBTs, flutuadores Argo e outras plataformas.

Esse *hindcast* foi conduzido para o período compreendido entre novembro de 2003 até os dias atuais, e seus resultados estão disponíveis via OPeNDAP no endereço: [http://hycom.coaps.fsu.edu/thredds/dodsC/glb\\_analysis.html](http://hycom.coaps.fsu.edu/thredds/dodsC/glb_analysis.html). Esses arquivos contêm a saída diagnóstica nos níveis de profundidade da base Levitus para várias variáveis, incluindo: correntes, temperatura e salinidade (HYCOM, 2008).

Para as simulações de dispersão de óleo apresentadas foram utilizados dados das componentes zonais (u) e meridionais (v) das velocidades das correntes. Os dados foram baixados na área compreendida entre as longitudes de 30° e 62°W, e as latitudes 16° e 50°S, com um total de 209.723 pontos, simulados para os anos entre 2005 e 2010 (6 anos). Os limites da grade hidrodinâmica utilizada são apresentados na Figura 9.

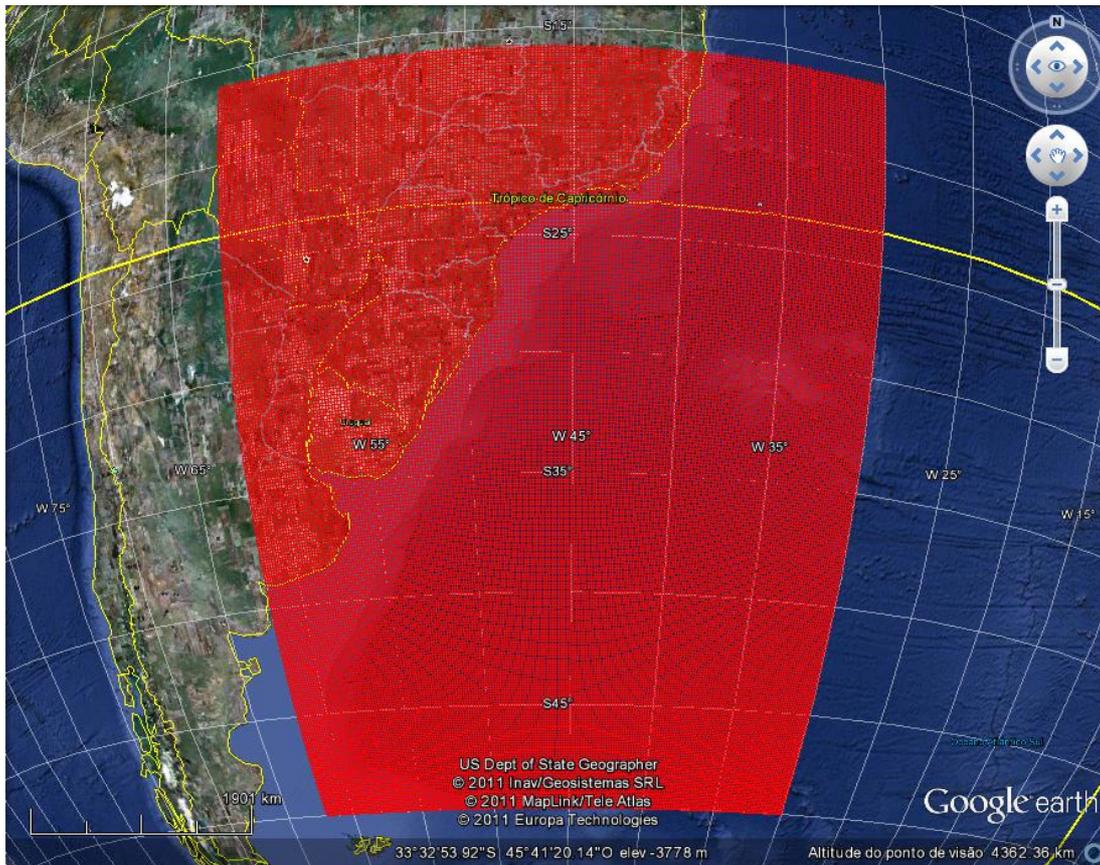


Figura 9: Exemplo da grade hidrodinâmica do HYCOM utilizada para forçar o modelo de óleo.

Os campos médios de circulação obtidos das simulações do HYCOM, para o período de verão e inverno, são apresentados na Figura 10 e na Figura 11.

Corrente Média - Verão (m/s)

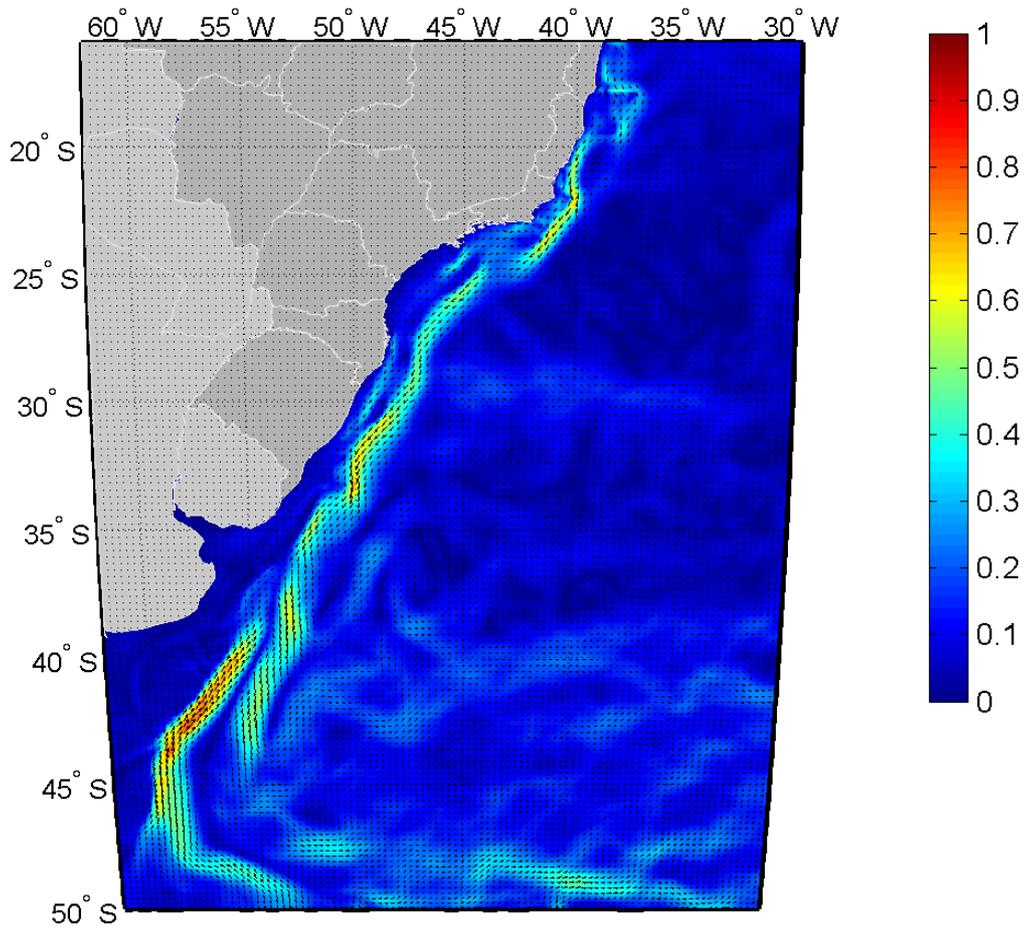


Figura 10: Campo médio das simulações do HYCOM para o período de verão.

Corrente Media - Inverno (m/s)

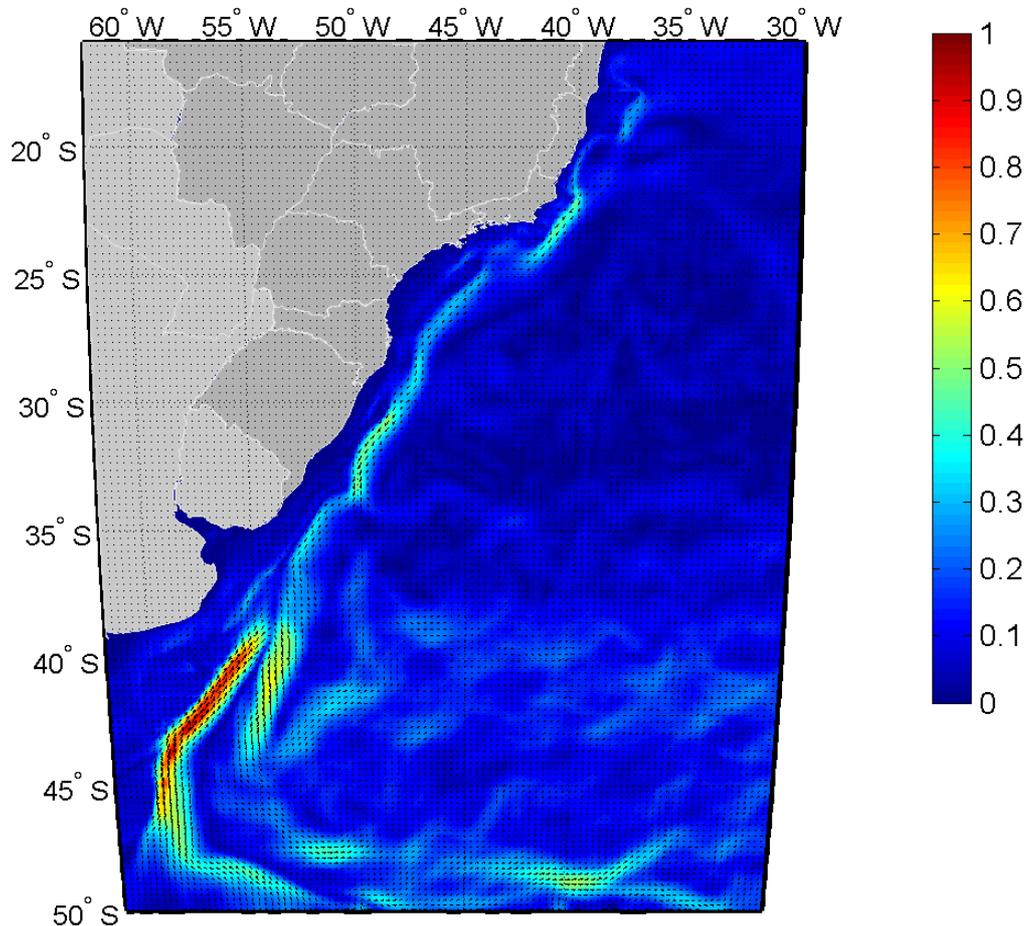


Figura 11: Campo médio das simulações do HYCOM para o período de inverno.

### 2.1.3 Avaliação do Modelo

Para que possamos saber se o comportamento do sistema de previsão é suficientemente compatível com o “sistema real” é necessário realizar uma comparação entre os resultados obtidos nos dois mundos; o “real” e o simulado.

A nomenclatura contemporânea para tal estudo é “avaliação”. Embora possa parecer um rótulo de pouca importância, os termos anteriormente utilizados para tal fim, sempre foram controversos. A primeira nomenclatura “validação” foi substituída por “comparação histórica”, a qual foi complementada com o termo “garantia de qualidade”. A dificuldade em se definir um

termo reside no fato de que as palavras “validação” e “garantia” trazem em si uma expectativa de positivo e negativo em relação aos resultados. O modelo poderia ser somente válido ou não válido, garantido ou não garantido. Nesse sentido, o termo “avaliação” torna-se mais adequado, uma vez que é neutro e pode abarcar uma gama maior de definições em termos de qualificação do modelo ou sistema (BECK, 2002).

Em essência, são duas as principais perguntas que devem ser respondidas quando se avalia um modelo ou sistema:

1. O modelo foi construído com materiais aprovados, i.e. as hipóteses constituintes são consagradas e adequadas?
2. O seu comportamento se aproxima bem do observado com respeito ao “mundo real”?

A primeira pergunta pode ser respondida com o grande número de artigos publicados em revistas internacionais utilizando o HYCOM para estudos de circulação oceânica (SHAJI *et al.*, 2005; KARA *et al.*, 2005; KELLY *et al.*, 2007; CHANG *et al.*, 2008).

Para responder a esta segunda questão a PROOCEANO simulou, utilizando os dados do HYCOM, os lançamentos dos derivadores do Projeto MONDO. Foram calculadas as trajetórias de 40 derivadores virtuais (partículas lagrangeanas), com datas e intervalos de lançamentos idênticos ao do MONDO. Ressalta-se entretanto, que comparações diretas entre modelos numéricos e observações lagrangeanas são difíceis de serem realizadas, já que a física dos modelos e os dados utilizados na modelagem (batimetria, forçantes externas e parametrizações sub-grade) não são idênticos à realidade. É fato que a comparação entre modelos numéricos e dados lagrangeanos deve ser realizada somente em termos estatísticos (CHU *et al.*, 2004). Desta forma, optamos por realizar uma comparação probabilística entre os dados do Mondo e os numéricos, simulados com uso do HYCOM. Além disso, também foram feitas comparações com dados de temperatura da superfície do mar (TSM) do Programa OSTIA (*Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis*). Na Figura 12 são apresentadas as trajetórias obtidas na simulação e as trajetórias medidas no MONDO.

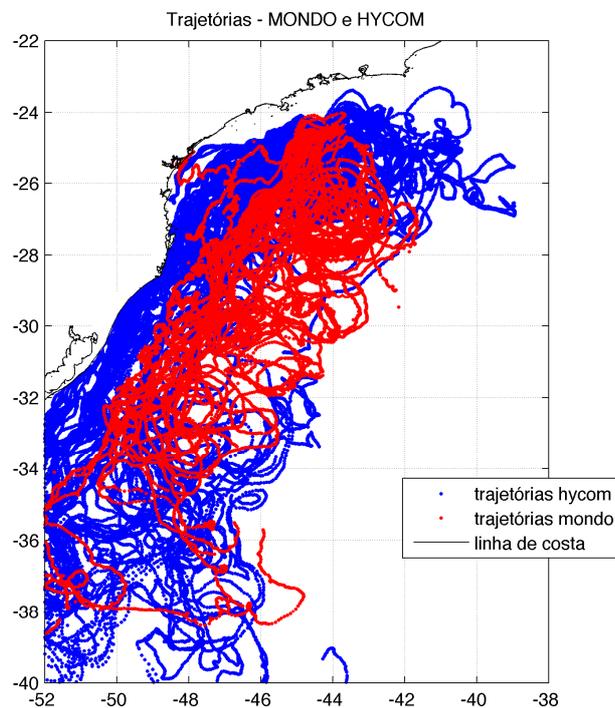


Figura 12: Trajetórias dos derivadores do Projeto MONDO e simuladas com a utilização dos resultados do HYCOM para o mesmo período. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008.

Observa-se que os conjuntos de trajetórias possuem padrão semelhante, em termos de área de presença, tanto em latitude, quanto em longitude, sendo que as trajetórias obtidas com os dados do HYCOM possuem maior tendência de atingir a costa. As feições oceânicas como a Corrente do Brasil e os vórtices de mesoescala estão representados nos dois conjuntos de forma similar, como pode ser notado na maior densidade de trajetórias sobre a quebra da plataforma e nos padrões circulares de várias trajetórias de ambos os conjuntos. Outra avaliação é realizada através da comparação das probabilidades de presença dos derivadores em cada região, apresentadas nas Figura 13 e Figura 14. Nota-se que o padrão preferencial da deriva é rumo sudoeste nos dois mapas, no entanto, o mapa elaborado com os resultados do HYCOM apresenta maiores probabilidades de presença em regiões mais próximas à costa.

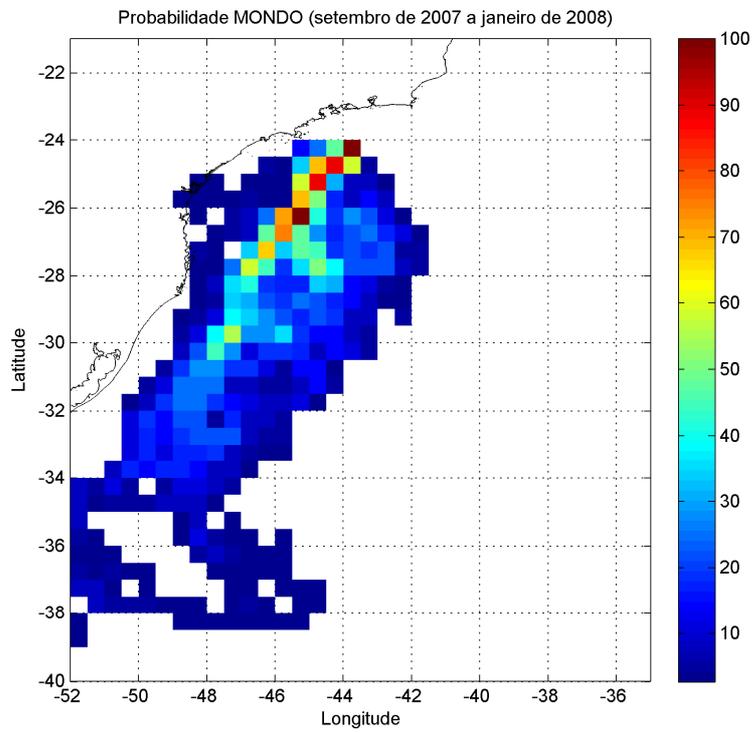


Figura 13: Mapa de probabilidade de presença dos derivadores lançados no Projeto MONDO.  
Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008.

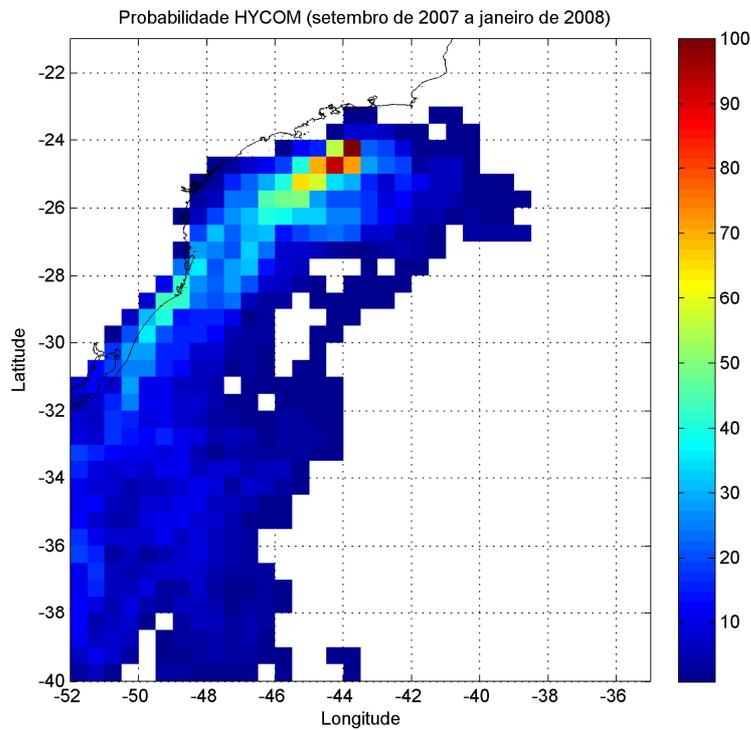


Figura 14: Mapa de probabilidade de presença dos derivadores virtuais, simulados com os resultados do HYCOM. Período entre 20 de setembro de 2007 e 23 de janeiro de 2008.

Na Figura 15 é apresentada a sobreposição dos dois mapas probabilísticos.

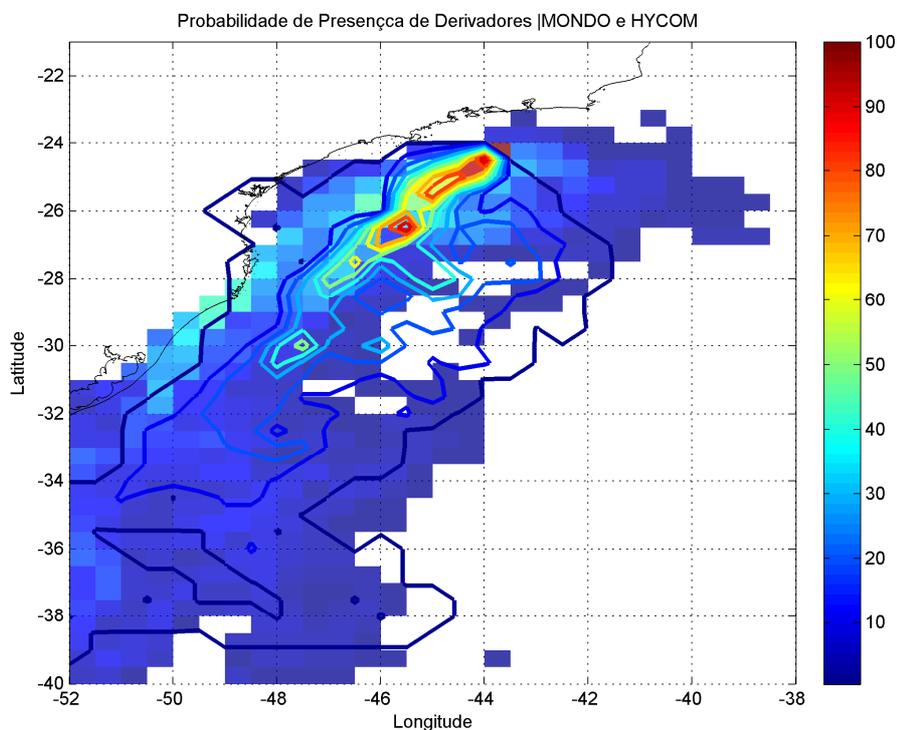


Figura 15: Mapas de Probabilidade de presença de derivadores. MONDO (contornos) e HYCOM (sombreado).

A última comparação realizada, desta vez tem como foco a circulação costeira da plataforma SE/S do Brasil. O objetivo desta comparação é avaliar quão bem o HYCOM reproduz a Corrente Costeira do Brasil, descrita pela primeira vez em Souza & Robinson (2004). Essa corrente exerce importante influência na circulação costeira na plataforma SE/S do Brasil, principalmente durante os meses de inverno e primavera. Trata-se de um fluxo confinado entre a Plataforma interna e a costa com sentido sul/norte, que atinge toda a costa Sul do Brasil, podendo chegar até a costa do Rio de Janeiro. A influência direta dessa corrente pode ser observada na Figura 16, que mostra a deriva de uma bóia do projeto MondoCorcovado, que ao chegar na região costeira rumo de Florianópolis até a costa do Rio de Janeiro, seguindo o fluxo da CCB. Souza & Robinson (2004) utilizaram como traçador do limite do fluxo da CCB, a isoterma de 20° C e determinaram sua posição na costa ao longo do tempo, através da análise de dados obtidos por derivadores.

Santos *et al.* (2011) determinou a posição da CCB (isoterma de 20°C) com dados de TSM do Programa *Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis - OSTIA* (<http://ghrsst->

[pp.metoffice.com/pages/latest\\_analysis/ostia.html](http://pp.metoffice.com/pages/latest_analysis/ostia.html)), dados de TSM do HYCOM, e os comparou com os resultados obtidos por Souza e Robinson (2004). O produto OSTIA abrange todo o globo, possui alta resolução (~6 km) e é oferecido diariamente, sendo resultado da combinação de diversos sensores infravermelhos e micro-ondas, além de dados *in situ* por meio de processo de Análise Objetiva. Este produto tem oferecido dados acurados de TSM, com um erro médio quadrático menor que 0,6°C, em alta resolução e disponibilizados em tempo quase real (Stark *et al.* 2007). A Figura 16 mostra os resultados obtidos por Santos *et al.* (2011).

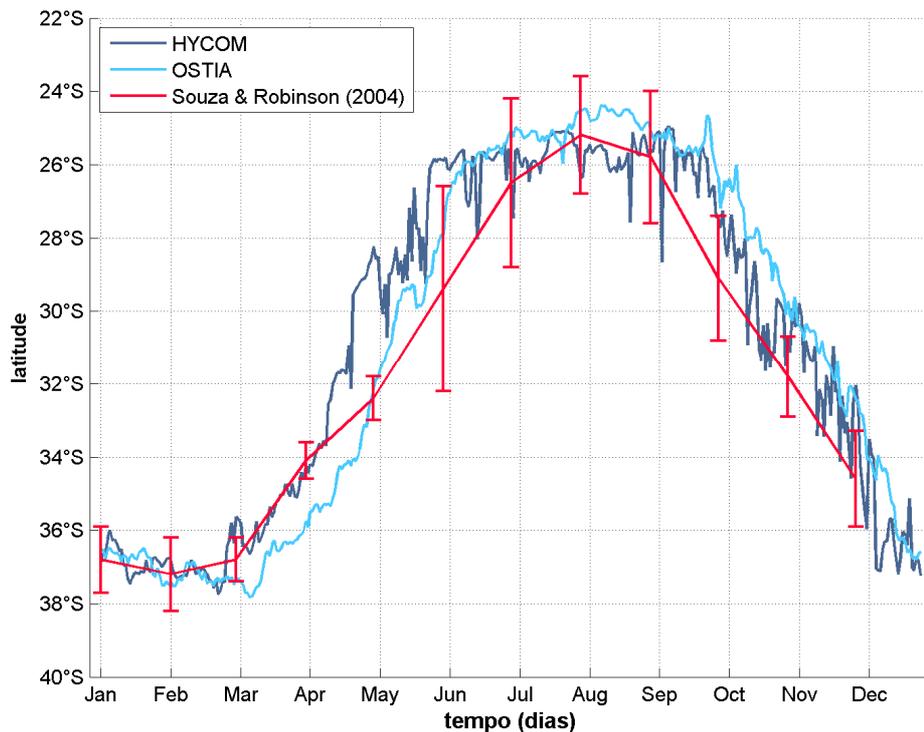


Figura 16: Limite norte da isoterma de 20°C a partir de dados do produto OSTIA, do HYCOM e dos resultados de Souza e Robinson (2004). Fonte: Santos *et al.* (2011).

Pode-se observar que o comportamento das curvas é bastante semelhante nas três bases de dados analisadas, indicando que o HYCOM é capaz de reproduzir esse fluxo de maneira satisfatória em seus resultados.

Em síntese, podemos concluir que a avaliação realizada mostra que os resultados do HYCOM reproduzem de forma satisfatória a dinâmica de maior escala (como a Corrente do Brasil), as feições de mesoescala (como vórtices e meandros) e também a circulação costeira e de plataforma.

## 2.2. Modelo de Transporte

As simulações numéricas apresentadas nesse estudo foram feitas com o OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response*), modelo desenvolvido pela SINTEF para o cálculo da dispersão de manchas de óleo. O OSCAR é capaz avaliar a evolução de óleo na superfície da água, ao longo de costas, na coluna d'água e no sedimento. Os principais componentes do sistema OSCAR são um modelo de intemperismo, um modelo de trajetória em três dimensões e um modelo de combate a vazamentos acidentais (REED, 2001; REED *et. al* 2004).

Na Figura 17 é apresentado um esquema ilustrativo das três principais etapas no processo da simulação: os dados de entrada (características do vazamento e condições ambientais), os processos realizados em diferentes intervalos de tempo (intemperismo atuante no óleo) e os resultados (balanço de massa do óleo, distribuição geográfica e propriedades).

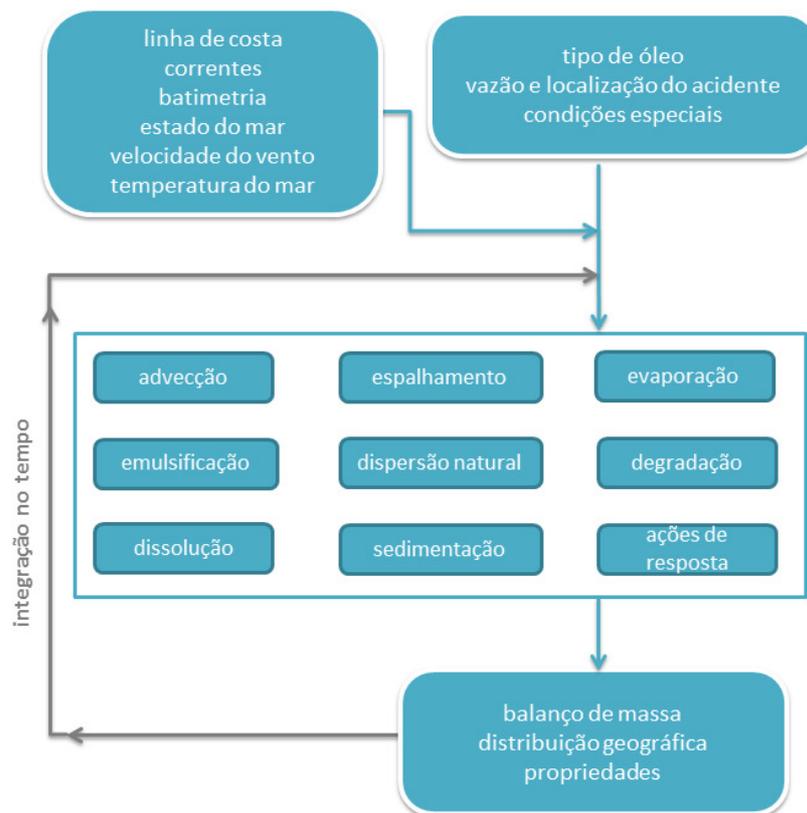


Figura 17: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).

Uma breve descrição dos processos físicos/químicos atuantes no óleo e de como eles são representados no modelo OSCAR, será apresentada a seguir, com base no relatório desenvolvido por Reed (2001).

## 2.2.1 Processos de Intemperismo

### 2.2.1.1 Advecção

A advecção é calculada a partir da soma de uma velocidade local média e de uma componente turbulenta de base aleatória. A velocidade local média é a soma das velocidades de correntes, ventos e a componente governada pela onda (Stokes) e a componente turbulenta ( $w'$ ) é expressa como:

$$w' = \sqrt{6K / \Delta t} \quad 2-9$$

onde  $K$  é o coeficiente de dispersão turbulenta, estimado para as direções horizontais e verticais, e  $t$  o tempo.

O coeficiente de dispersão horizontal pode ser calculado a partir de dados aproximados de estudos de dispersão de traçadores (OKUBO (1971, 1974) e BOWDEN (1983)):

$$K_x = 0,0027 t^{1,34} \quad 2-10$$

para  $K$  em  $\text{cm}^2/\text{s}$  e  $t$  em segundos.

O coeficiente de difusão turbulenta acima da picnoclina relacionado às condições de onda, segundo Ichiye (1967), é:

$$K_z = 0,0028 \frac{H^2}{T} \exp(-2Kz) \quad 2-11$$

sendo  $H$  a altura de onda,  $T$  o período de onda e  $K$  o número de onda. Abaixo da profundidade da picnoclina,  $K_z$  é assumido como uma constante igual a  $10^{-4} \text{ m/s}^2$  (KULLENBERG, 1984). Na ausência da picnoclina, a equação de Ichiye é aplicada da superfície ao fundo.

O deslocamento vertical das gotículas de óleo é calculado pela soma da velocidade turbulenta de base aleatória e uma velocidade vertical (subida ou descida). As velocidades verticais são calculadas usando a média harmônica de dois extremos, sendo o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds (JOHANSEN, 2000):

$$w_{ascendente} = 1/(w_1^{-1} + w_2^{-1})$$

onde,

$$w_1 = d^2 g' / 18\nu, \text{ (para número de Reynolds} < 1000), \text{ e}$$

$$w_2 = \sqrt{3d |g'|}, \text{ (para número de Reynolds} > 1000),$$

sendo  $g' = g(\rho_\alpha - \rho_0) / \rho_\alpha$  onde  $g$  é a aceleração gravitacional e  $\nu$  a viscosidade cinemática da água ( $\sim 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

O coeficiente de arrasto do vento na deriva superficial do óleo utilizada neste estudo foi 3% da intensidade do vento (REED *et al.*, 1994; WANG *et al.*, 2005; GUO *et al.*, 2009).

### 2.2.1.2 Espalhamento

O espalhamento do óleo na superfície do mar envolve diversas interações entre forças e processos, e alguns estudos (FAY, 1969, HOULT, 1972 e FANNELØP & WALDMAN, 1972) já mostraram que o espalhamento passivo do óleo ocorre devido às forças da gravidade, momento e viscosidade. Para a representação do espalhamento transversal de uma mancha de vazamento contínuo, é utilizada neste modelo uma equação unidimensional:

$$x_{LE} = C_0 \left( \frac{g\Delta\rho}{\rho_w^2} \right)^{1/4} \frac{m^{1/2}}{(\rho_w \mu_w)^{1/8}} t^{3/8} \quad 2-12$$

onde  $x_{LE}$  é a largura da mancha de óleo (m),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ),  $\Delta\rho$  é a diferença entre as densidades da água e do óleo ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_w$  é a densidade da água

(kg/m<sup>3</sup>),  $\mu_w$  é a viscosidade da água (cP),  $m$  é ½ da taxa de liberação de massa dividido pela corrente superficial (kg/m) e  $C_0$  é a constante de espalhamento.

Esta equação representa o regime de gravidade-viscosidade no processo de espalhamento e somente é utilizado para a parte espessa da mancha de óleo.

### 2.2.1.3 Evaporação

A taxa de evaporação é controlada pela pressão de vapor dos componentes individuais do óleo as suas frações molares em qualquer localização da mancha superficial, e calculada como. (MACKAY *et al.*, 1980; SEBASTIÃO & SOARES, 1995; REED *et al.*, 1999):

$$dm_i / dt = K_e P_i A M_i F_i / (RT) \quad 2-13$$

onde  $m_i$  é a massa associada ao  $i$ -ésimo componente do vazamento;  $t$  é o tempo (s);  $K_e$  é o coeficiente de transferência de massa evaporada (m/s);  $T$  é a temperatura (K);  $P_i$  é a pressão de vapor para o  $i$ -ésimo componente (atm);  $A$  é a área da mancha de óleo (m<sup>2</sup>);  $M_i$  é o peso molecular da  $i$ -ésimo componente (g/mol);  $F_i$  é a fração molar do  $i$ -ésimo componente remanescente na mancha; e  $R$  é a constante universal dos gases,  $8,206 \times 10^{-5}$  atm-m<sup>3</sup>/mol-K.

O coeficiente de transferência de massa,  $K_e$ , depende do vento e é calculado por (AMOROCHO & DEVRIES, 1980):

$$K_e = C_d U(t) \quad 2-14$$

sendo  $C_d$  o coeficiente de atrito entre a atmosfera e o ar, e  $U(t)$  a velocidade do vento (m/s). O coeficiente de arrasto  $C_d$  é calculado em função da velocidade do vento:

$$C_d = \left( \frac{U^*}{U(t)} \right)^2 \quad 2-15$$

em que

$$U^* = CU(t), \text{ quando } U(t) < u_1$$

$$U^* = Cu_1 + (Du_2 - Cu_1) \frac{U(t) - u_1}{u_2 - u_1}, \text{ quando } u_1 \leq U(t) \leq u_2$$

$$U^* = DU(t), \text{ quando } U(t) > u_2$$

sendo  $C$ ,  $D$ ,  $u_1$  e  $u_2$  valores constantes (0,0323; 0,0474, 7 e 20, respectivamente).

### 2.2.1.4 Dispersão natural

A dispersão de óleo na superfície do mar é obtida por (DELVIGNE & SWEENEY, 1988):

$$Q_{di} = C^* D^{0,57} S F d_i^{0,7} \Delta d \quad 2-16$$

onde  $Q_{di}$  é a taxa de dispersão por unidade de área das gotículas de óleo com diâmetros entre  $(d_i - \Delta d)$  e  $(d_i + \Delta d)$  (kg/m<sup>2</sup>s);  $C^*$  é um coeficiente de dispersão derivado empiricamente;  $D$  é a energia da onda dissipada por unidade de área (kg/s<sup>2</sup>);  $S$  é a fração da superfície do oceano coberta por óleo;  $F$  é a fração da superfície do mar coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo (1/s);  $d_i$  é o diâmetro médio das partículas na classe de tamanho  $i$  (m); e  $\Delta d$  é o intervalo do diâmetro das partículas (m).

O coeficiente empírico  $C^*$  é uma função da viscosidade do óleo:

$$C^* = 4450\nu^{-0,4} \quad 2-17$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do óleo (m<sup>2</sup>/s). A energia dissipada da quebra da onda  $D$ , é aproximadamente:

$$D = 0,0034 \rho_w g H_b^2 \quad 2-18$$

onde  $\rho_w$  é a densidade da água do mar ( $\text{kg/m}^3$ );  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ); e  $H_b$  é altura de quebra da onda (m). A fração  $F$  de superfície do oceano coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo é, aproximadamente:

$$F = 3 \cdot 10^{-6} U(t)^{3,5} \quad 2-19$$

onde  $U(t)$  é a velocidade do vento (m/s). O tamanho das partículas é dado por:

$$d_0 = \frac{C_0 \nu^{0,34}}{\sqrt{e}} \quad 2-20$$

sendo  $\nu$  é a viscosidade cinemática do óleo ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $e$  é a taxa de dissipação de energia (geralmente  $1000 \text{ J/m}^3\text{s}$ );  $C_0$  é, aproximadamente, 500 para o menor tamanho de partícula e 3400 para o maior tamanho de partícula. As gotículas são divididas em intervalos entre os tamanhos, mínimo e máximo, encontrados.

### 2.2.1.5 Emulsificação

A emulsificação  $W(t)$  é calculada a partir de uma regressão exponencial:

$$W(t + \Delta t) = W_m(t) - [W_m(t) - W(t)] 0,5^{\frac{\Delta t}{t_{1/2}}} \quad 2-21$$

onde  $W_m(t)$  é o teor máximo de água (%);  $\Delta t$  é o passo de tempo (s);  $t_{1/2}$  é o tempo de meia-vida dependente do vento para emulsificação (s).

O valor  $t_{1/2}$  e a função  $W_m(t)$  são derivados de dados de laboratório e, correlacionam a taxa de emulsificação e o teor máximo de água pela fração evaporada. A partir desses dados, a meia-vida de referência  $t_{ref}$  para um vento de 10 m/s de velocidade, é encontrada em:

$$t_{ref} = Ct_{lab} \quad 2-22$$

onde,  $t_{lab}$  é a média de valores de meia-vida encontrados em laboratório para amostras de óleo artificialmente intemperizados (s), e  $C$  é uma constante empírica. Esses dados são baseados no estudo de Cormack (1983):

$$t_{1/2} = \left[ \frac{1 + U_{ref}}{1 + U(t)} \right]^2 t_{ref} \quad 2-23$$

onde  $U_{ref}$ , é de 10 (m/s), e  $U(t)$  é a velocidade do vento (m/s).  $W_m$  como função da fração evaporada é obtida a partir de dados de laboratório, assumindo-se que a quantidade máxima de água é linearmente dependente da fração evaporada.

### 2.2.1.6 Dissolução

Como a evaporação, a dissolução, é dependente da fração molar de cada componente em uma mancha de óleo.

$$dm_i / dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad 2-24$$

onde  $K_d$  é o coeficiente de transferência de massa por difusão (m/s);  $A$  é a área superficial da mancha de óleo (m<sup>2</sup>);  $F_i$  é a fração molar do componente  $i$  remanescente na mancha;  $S_i$  é a solubilidade do componente  $i$  (g/m<sup>3</sup>, ppm); e  $C_i$  é a concentração ambiente do componente  $i$  (g/m<sup>3</sup>).

Para uma mancha de óleo, o coeficiente de transferência de massa  $K_d$  é calculado (THIBODEAUX, 1979):

$$K_d = Sh_i D_i / L \quad 2-25$$

Para manchas na superfície, é feita a correlação de superfície plana para o Número de Sherwood:

$$Sh_i = 0,578 Re^{0,5} Sc_i^{0,33} \quad 2-26$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds;  $Sc_i$  é o número de Schmidt;  $U_{rel}$  é a velocidade relativa entre o óleo e a água (m/s);  $L$  é a extensão da mancha (m);  $\nu_w$  é a viscosidade cinemática da água ( $\sim 8,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  a 25°C) e  $D_i$  a difusividade molecular do componente  $i$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Para as partículas de óleo, a correlação da transferência de massa para esferas é usada para o número de Sherwood:

$$Sh = 2 + 0,347 Re^{0,62} Sc_i^{0,31i} \quad 2-27$$

### 2.2.1.7 Degradação

O cálculo da degradação do óleo no modelo OSCAR é feita através da soma da transformação de cada componente do óleo por diferentes formas de degradação. A Figura 18 mostra o esquema de transformação dos componentes considerados no modelo OSCAR.

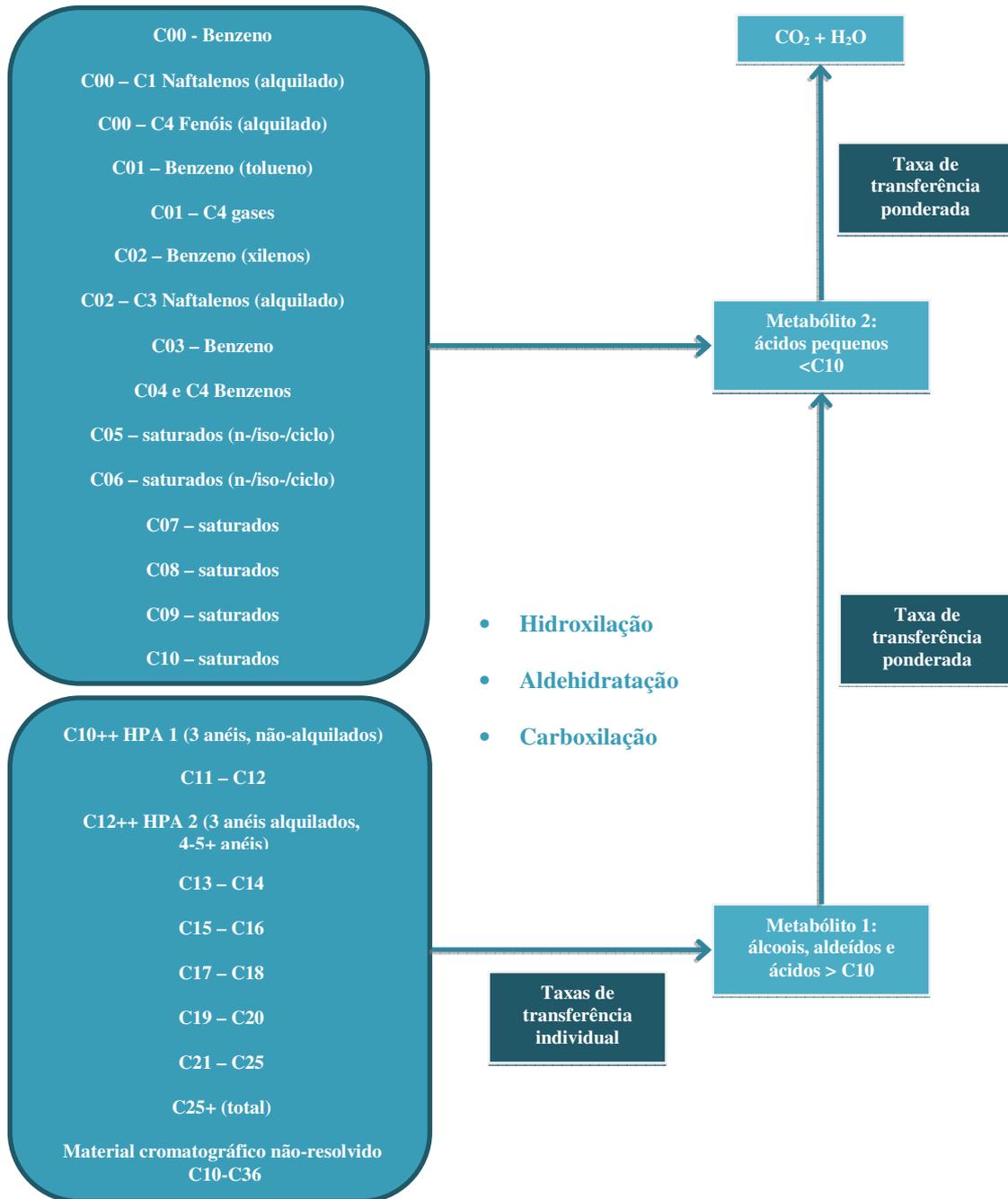


Figura 18: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001).

### 2.2.1.8 Sedimentação

No OSCAR a separação entre a fase dissolvida e particulada/adsorvida é calculada com base na teoria de equilíbrio linear. A fração de óleo particulada, ou adsorvida em material particulado, é passível de sedimentação no fundo, misturando-se aos sedimentos, e podendo ser dissolvida novamente para a coluna d'água (REED *et al.*, 1996).

### 2.2.2 Propriedades físicas do óleo

As propriedades do óleo utilizadas pelo modelo são o ponto de fluidez (*pour point*), ponto de fulgor (*flash point*), densidade e a viscosidade do óleo. Essas propriedades variam de acordo com curvas obtidas em laboratório e a fração de óleo evaporado. A seguir são apresentadas as equações para os cálculos das propriedades do óleo (JOHANSEN, 1991):

$$\text{Ponto de fluidez (}^\circ\text{C)} \quad P = e^{(a_p + b_p f)} - 273 \quad 2-28$$

$$\text{Ponto de fulgor (}^\circ\text{C)} \quad F = e^{(a_p + b_p f)} - 273 \quad 2-29$$

$$\text{Densidade (g/L)} \quad \rho_0 = a_p + b_p f \quad 2-30$$

$$\text{Viscosidade (cP)} \quad \mu_0 = e^{(a_\mu + b_\mu f)} \quad 2-31$$

sendo  $f$  a fração evaporada (%) e  $a$  e  $b$  fatores de regressão. A densidade da emulsão  $\rho(t)$  é calculada:

$$\rho(t) = \frac{W(t)\rho_w + [100 - W(t)]\rho_0(t)}{100} \quad 2-32$$

sendo  $W(t)$  a porcentagem de água (%),  $\rho_w$  a densidade da água do mar, e  $\rho_0(t)$  a densidade do óleo livre de água (g/L).

A equação de Mooney, de 1951, é usada para calcular a viscosidade de emulsão  $\mu(t)$ :

$$\mu(t) = \mu_0(t) e^{\frac{aW(t)}{100-bW(t)}} \quad 2-33$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes empíricas.

### 2.2.3 Concentração na coluna d'água

O modelo resolve a seguinte equação de transporte advectivo-difusivo:

$$\frac{\delta C_i}{\delta t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla} \cdot D_k \vec{\nabla} C_i + \sum_{j=1}^n r_j C_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n r_{ij} C_i \quad 2-34$$

onde  $C_i$  é a concentração do  $i$ -ésimo constituinte químico do vazamento;  $t$  é o tempo;  $\vec{V}$  é o vetor do transporte advectivo; e  $D_k$  é o coeficiente de difusão turbulenta para  $k = x, y$  e  $z$ .

O primeiro termo da equação é a taxa de variação temporal da concentração de um determinado constituinte em uma determinada localização espacial. Esta taxa de variação é calculada através da determinação dos outros termos da equação utilizando partículas lagrangeanas para representar o campo de concentração. Os termos  $r_j$  são taxas de vários processos, tais como a evaporação, emulsificação e espalhamento das manchas superficiais e volatilização dos compostos do óleo.

Os termos de degradação  $r_{ij}$  aparecem no modelo para determinar os subprodutos da degradação como transferência de massa de um componente à outro. Desta forma, as modificações nas propriedades toxicológicas são incorporadas no modelo.

### 2.2.4 Massa Máxima de Óleo na Costa

Para obter a massa máxima de óleo na costa, os elementos de grade são monitorados ao longo de toda a simulação. São armazenadas as informações de massa máxima de óleo que atingiram cada elemento de grade ao longo das  $n$  simulações. Ao final, têm-se um mapa dos

volumes máximos por unidade de área, ou espessuras máximas, que atingiram os elementos de grade que representam a costa.

Para contabilizar os volumes máximos por município, são utilizados os maiores valores de volumes máximos de óleo presentes nos elementos de grade mais próximos a cada município costeiro.

## 2.3. Estratégias de Modelagem

Para os dois pontos de vazamento, as simulações foram realizadas considerando eventos de *blowout* com vazamentos contínuos por 30 dias (720 horas) em 2 cenários sazonais, verão e inverno. Após os 30 dias de vazamento foram ainda simulados mais 30 dias para observação do comportamento da deriva do óleo, totalizando 60 dias (1440 horas) de simulação.

Além da simulação de *blowout*, na qual é considerado o volume de pior caso, 10.200 m<sup>3</sup> (340 m<sup>3</sup>/dia), foram ainda realizadas simulações para vazamentos instantâneos de pequeno e médio porte, 8 m<sup>3</sup> e 200 m<sup>3</sup>, respectivamente. Para todos os casos simulados a deriva do óleo foi acompanhada por 30 dias nos vazamentos instantâneos e 60 dias para *blowout*.

Com relação ao tipo de óleo utilizado na modelagem, é importante destacar que a região de concessão do BM-P-2 se trata de uma fronteira exploratória, na qual ainda não são conhecidas as características do óleo.

Segundo informações da PETROBRAS, os fluidos esperados na região são óleo e gás de origem marinha, semelhante às rochas geradoras da Bacia de Santos. Nos 9 poços perfurados em águas rasas na Bacia de Pelotas, não foram encontradas acumulações de hidrocarbonetos. Nos estudos exploratórios foi realizada modelagem de sistema petrolífero realizado na área BM-P-2 sendo os mesmos geradores marinhos de Santos. O resultado da modelagem indicou um cenário mais favorável de óleo leve a condensado de até 41°API, com viscosidade baixa e alta razão gás/óleo e também gás. Assim, foi usada a caracterização do óleo obtido nos Campos de Tiro e Sidon, localizados no sul da Bacia de Santos, sendo os mais próximos da Bacia de Pelotas. As características do óleo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características do óleo informado pela contratante.

Propriedade	Valor	Unidade
API	33,7	-
Densidade	0,8494 (20/4 °C)	g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade Dinâmica	8,79 (30 °C)	cP
Ponto de Fluidez Máximo	0	°C

Devido a ausência de uma caracterização mais completa do óleo em questão, tais como seus componentes, e suas respectivas frações, necessários para alimentar o modelo, foi escolhido um óleo de características próximas no banco de dados do OSCAR para utilização nas simulações (Tabela 3).

Tabela 3: Características do óleo escolhido no banco de dado do OSCAR.

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>GULLFAKS C</b>	API	33,8	°
	Densidade	0,856	g/cm <sup>3</sup>
	Viscosidade Dinâmica	17 (13°C)	cP
	Ponto de Fluidez	-39	°C
	Graxa	2,6	%
	Asfalteno	0,1	%

## 2.4. Descrição das Grades

Neste estudo utilizou-se uma grade regular com resolução espacial de 3,5 km nas direções zonal e meridional. Os limites da grade são: ao sul, 50° S, ao norte, 26°04' S, a oeste, 63° 13' O e a leste, 40°02' O. Com isso obteve-se uma matriz com 579 por 758, totalizando 438.882 elementos. A grade com os habitats e a batimetria são apresentadas nas Figura 19 e Figura 20, respectivamente.

A definição do tipo de costa e da batimetria estão contidos no banco de dados do modelo OSCAR. Os dados de batimetria são provenientes do estudo desenvolvido por Smith & Sandwell (1997). O tipo de costa definido para todo domínio foi de praia arenosa (Figura 19 – em amarelo).

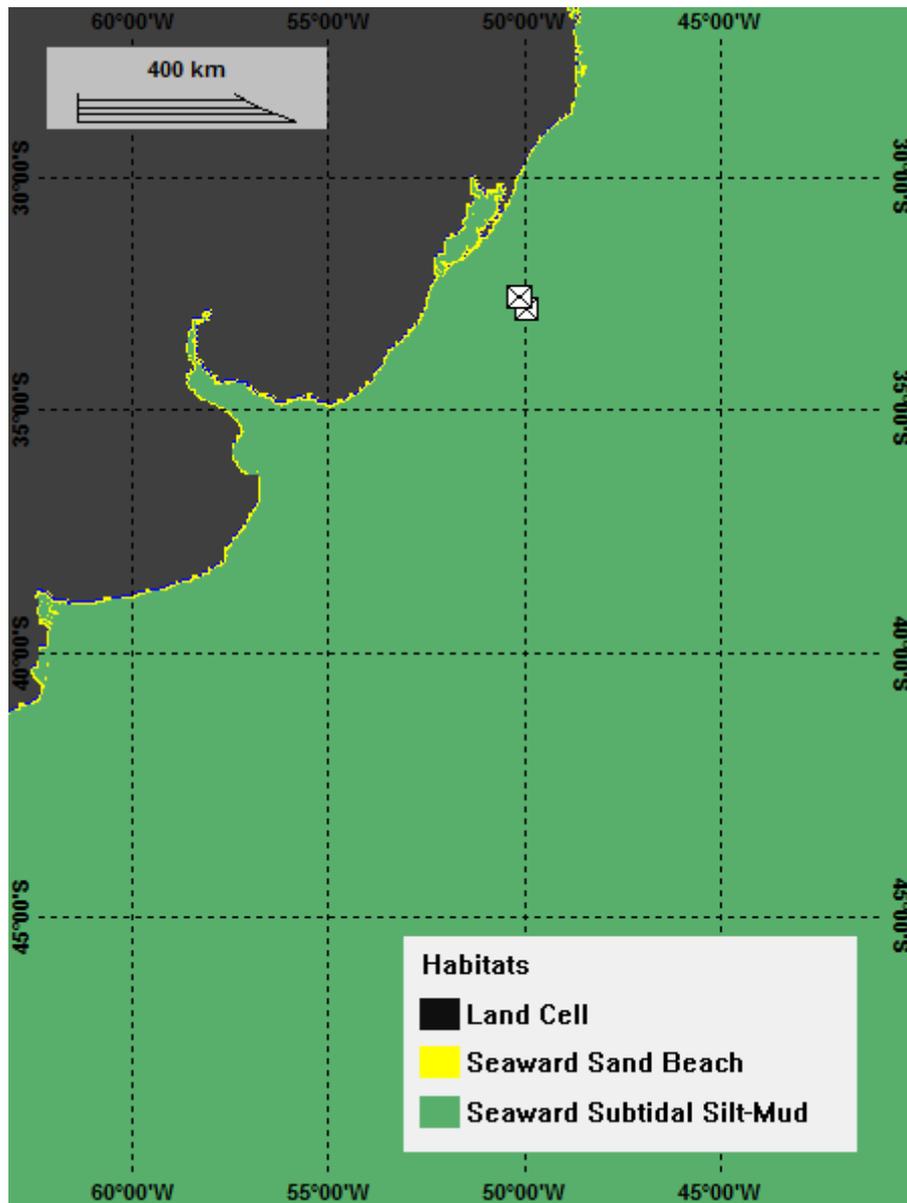


Figura 19: A grade de habitats utilizada na simulação.

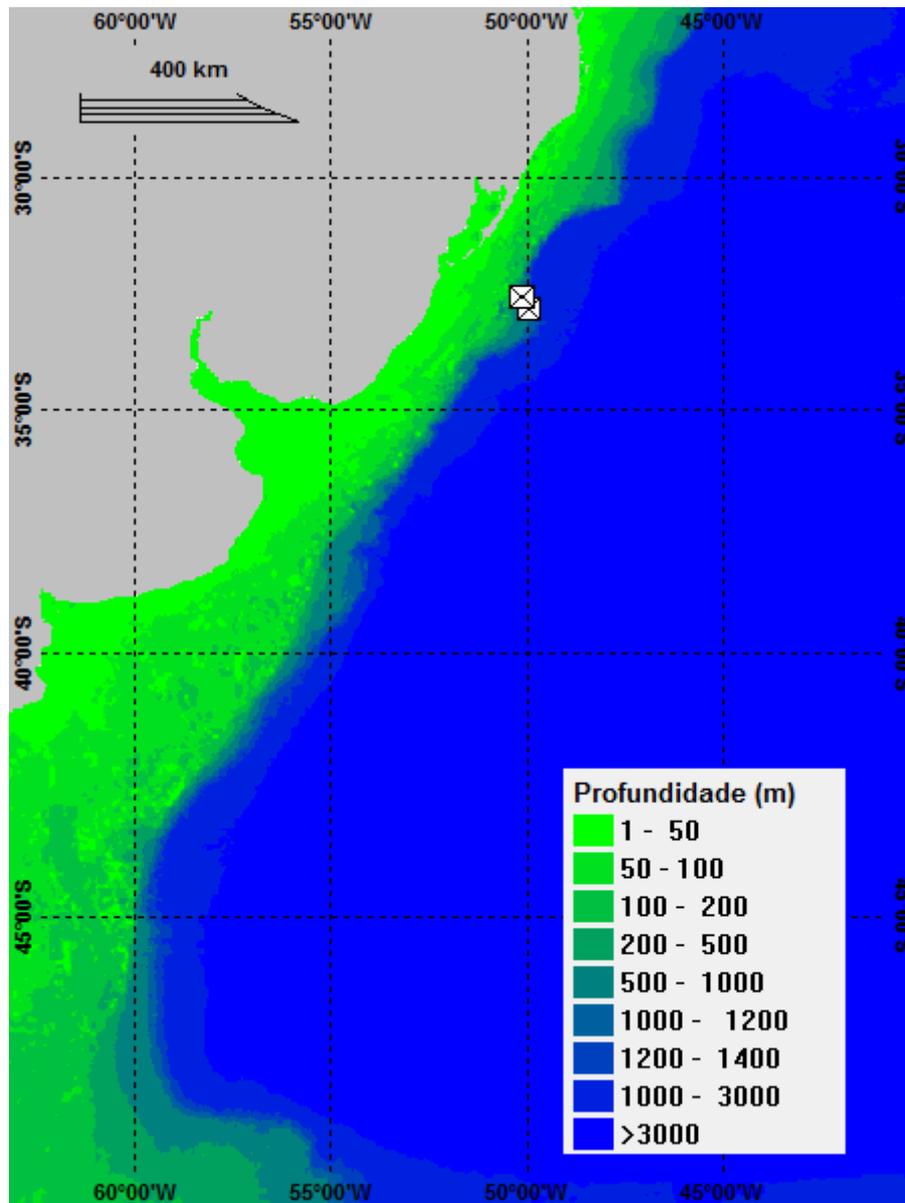


Figura 20: A grade de batimetria utilizada na simulação.

A seguir serão apresentadas as forçantes utilizadas durante a simulação probabilística.

## 2.5. Forçantes

Os dados de vento utilizados como forçante no modelo são provenientes das Reanálises do NCEP – *National Centers for Environmental Prediction* – (KALNAY *et al.*, 1996). A base de dados conhecida como “Reanálises do NCEP” foi originada a partir de uma cooperação entre o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) e o NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), com intuito de produzir inicialmente uma rede de 40 anos de dados meteorológicos globais com base nas análises dos campos atmosféricos (KALNAY *et al.*, 1996). Posteriormente, esse projeto foi ampliado para uma janela de tempo de 50 anos (KISTLER *et al.*, 2001), e atualmente, estão disponíveis mais de 60 anos (1948-atual) de dados.

A Reanálise do NCEP (R-1) usa o estado da arte em sistemas de assimilação de dados e um banco de dados mais completo possível, abrangendo informações meteorológicas primárias das mais diversas fontes associadas aos dados do modelo atmosférico global do NCEP (KISTLER *et al.*, 2001).

Estes dados são amplamente utilizados pela comunidade científica, sendo, portanto adequados para utilização em estudos dessa natureza. Os dados primários utilizados para gerar as reanálises são de diferentes origens:

- Dados globais de radiossondas.
- Dados da superfície do mar obtidos através do projeto COADS (*Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set*) no período de 1983 a 1996 (14 anos), originados de diversas fontes, dentre elas, observações de navios, bóias fixas, bóias móveis e estações oceânicas próximas à superfície.
- Dados aéreos, originados de observações por aeronaves em todo o globo, geralmente associados a projetos como GARP (*Global Atmospheric Research Program*) e GATE (*Global Atlantic Tropical Experiment*), por exemplo.
- Dados de Satélite, que começaram a ser obtidos em 1967, através de diversos programas. Atualmente, o NCEP/NCAR utiliza dados fornecidos pelo projeto TOVS (*Operational Vertical Sounder System*), com variáveis em três dimensões, cuja resolução espacial média é de 2,5 graus.
- Dados de vento em superfície, obtidos pelo sensor espacial *Microwave/Imager* (SSM/I) a partir de 1987, submetidos ao tratamento feito pela rede neural de Kransnopolsky *et al.* (1995) *apud* Kalnay *et al.* (1996).

- Dados de cobertura de nuvens obtidos por estimativas dos dados de Satélites Meteorológicos Geoestacionários (SMG). Esses dados estão disponíveis desde 1978.

Todos os dados utilizados nas reanálises passam por um rigoroso controle de qualidade e recebem um tratamento diferenciado de acordo com a forma de obtenção. Utilizando-se técnicas de interpolação espaço-temporal, que levam em consideração não somente a estatística como também a dinâmica dos fenômenos meteorológicos (análise objetiva).

As reanálises foram criadas por um sistema complexo de programas, bibliotecas, algoritmos e dados, que envolvem diversas etapas no processamento, tais como, decodificação, controle de qualidade, análises, previsão, pós-processamento e armazenamento. Consequentemente, o processo se tornou propenso a erros humanos. Neste contexto, surgiu a Reanálise 2 (R-2), que além de minimizar os erros humanos no processamento, incorporou atualizações no modelo de previsão e diagnóstico (KANAMITSU *et al.*, 2002). Outro fator determinante para o desenvolvimento da R-2 foi o aumento significativo da quantidade e da qualidade dos dados coletados a partir do final dos anos 70. Assim, ao contrário da R-1 que está disponível de 1948 até os dias de hoje, a R-2 encontra-se disponível a partir de 1/1/1979 (CAMPOS, 2009).

O projeto R-2 (NCEP - DOE AMIP-II *Reanalysis*) refere-se a uma série global atualizada, de 1979 até 2008, que corrige os erros de processamento da R-1, utilizando um modelo de previsão e um sistema de assimilação de dados mais robustos. Assim, é gerada uma reanálise mais consistente e recomendada para usuários que eram afetados por alguns erros presentes na R-1. Dentre estes erros, podemos citar as análises de transientes no Hemisfério Sul; o uso de temperaturas próximas à superfície e cobertura de neve sobre os continentes no Hemisfério Norte durante o inverno; análise da umidade dos solos; análises do balanço de neve; e sensibilidade das análises a mudanças no modelo de assimilação (KANAMITSU *et al.*, 2002).

Deve ser ressaltado que a R-2, embora tenha passado por melhorias significativas, consiste em uma atualização da R-1, e não uma nova geração da reanálise. Os produtos da R-2 estão disponíveis para o público através do Centro de Diagnósticos Climáticos do NCAR, e através da página: <http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>.

Para este estudo foram tratados 6 anos de dados (2005 a 2010) com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia). A resolução espacial na área em questão é de aproximadamente 1.8°, tendo sido utilizado o ponto de grade do NCEP mais próximo aos pontos de simulação de vazamento do bloco BM-P-2 (Figura 21). Essa análise subsidiou a definição de dois períodos com características distintas na direção do vento, fato que influencia diretamente o transporte do óleo.

A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos mensais (Figura 22 e Figura 23), elaboradas para o período analisado (2005 a 2010).

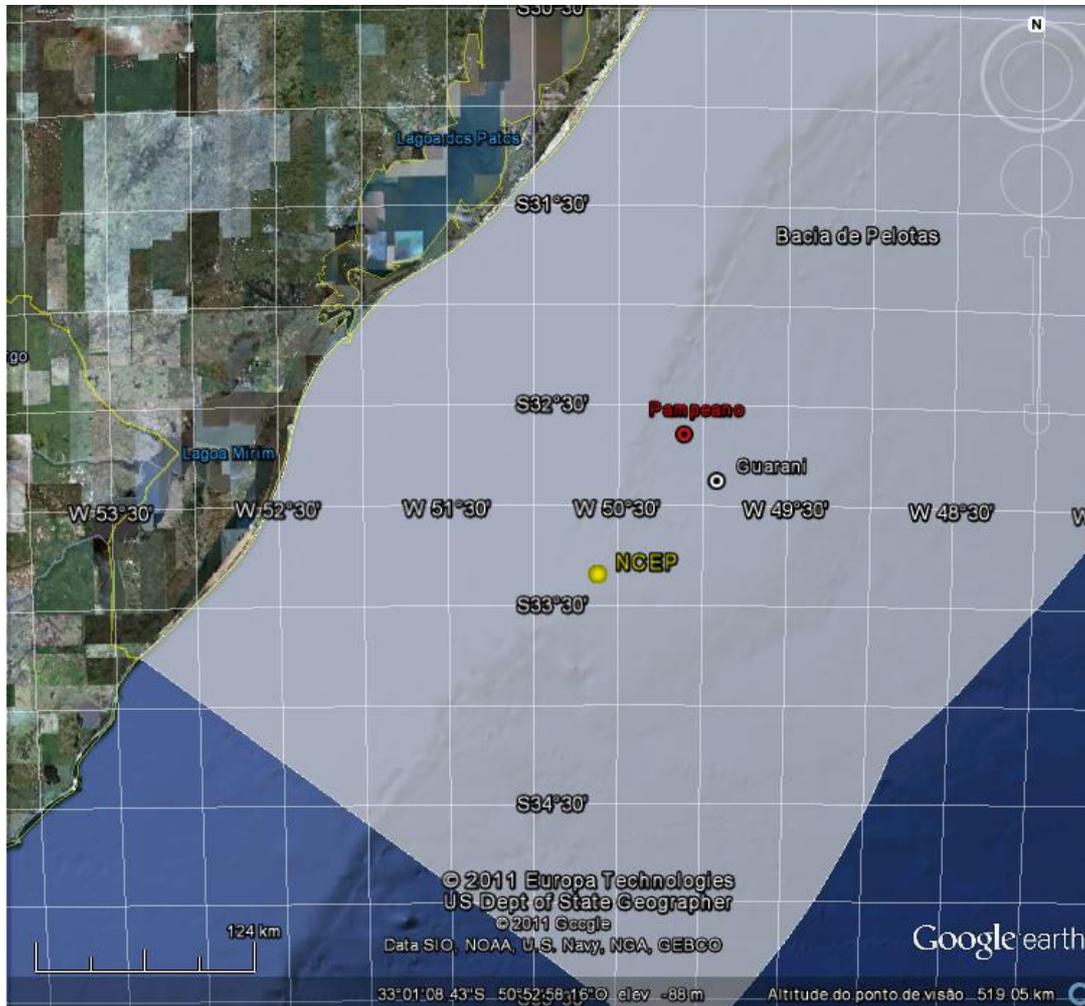


Figura 21: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo do ponto de vazamento no bloco BM-P-2.

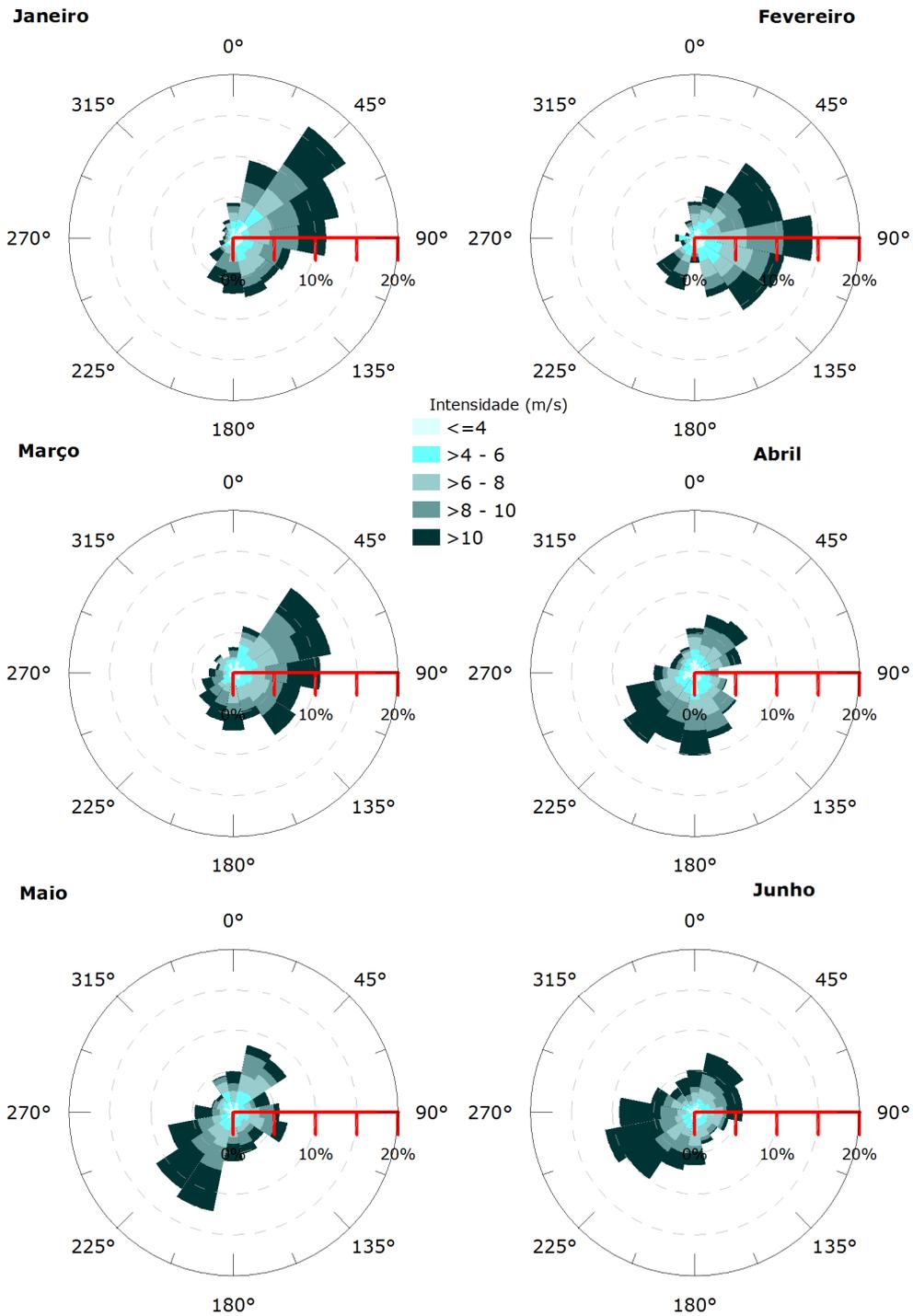


Figura 22: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho na região do Bloco BM-P-2.

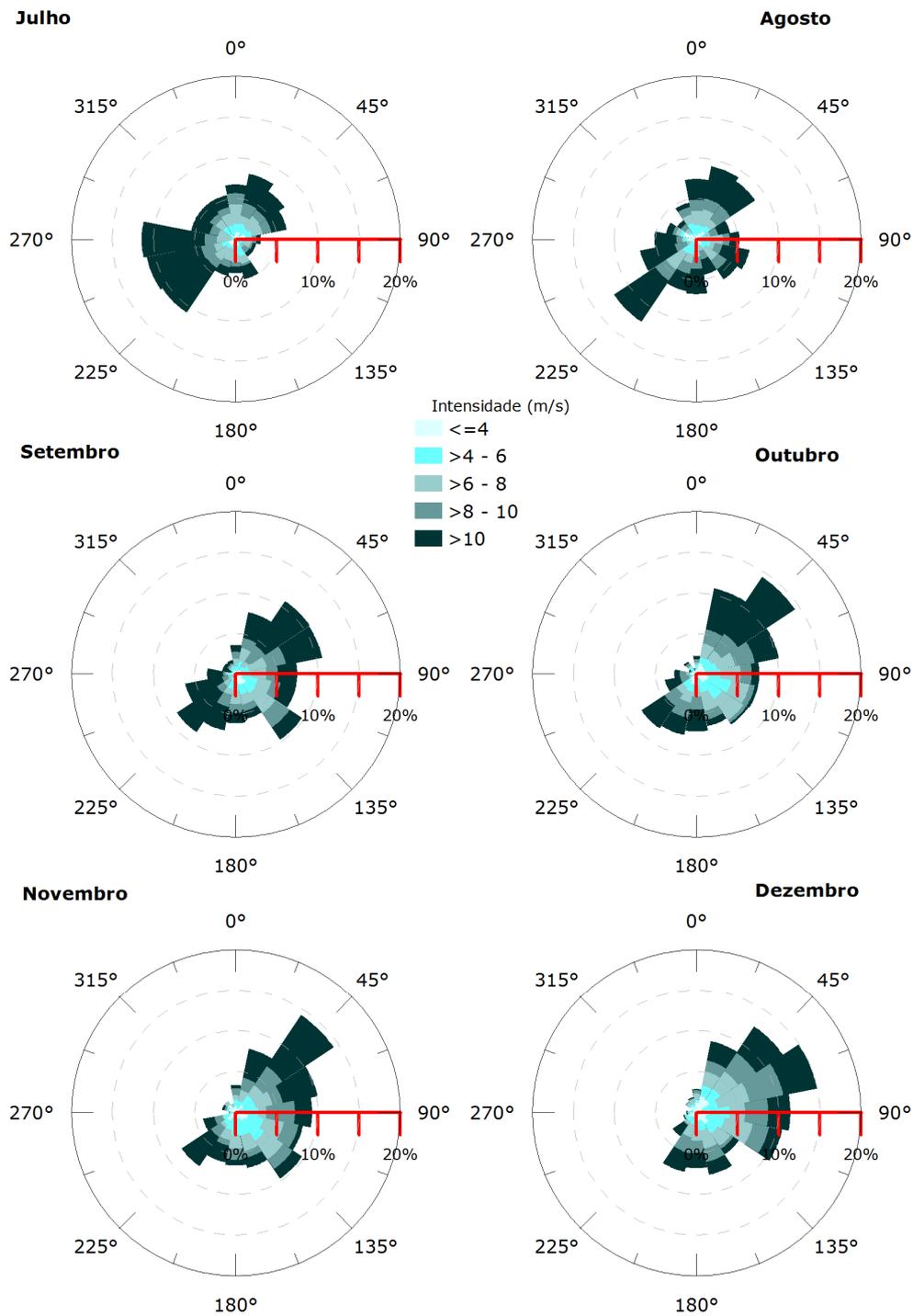


Figura 23: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro na região do Bloco BM-P-2.

A partir da observação da rosa dos ventos, que trazem informações sobre as frequências de ocorrência conjunta de direção e intensidade dos ventos na região, são identificadas duas condições sazonais a serem utilizadas no estudo.

A primeira, denominada período de verão, compreende os meses de outubro a março é caracterizado pela maior frequência e incidência de ventos do primeiro quadrante, com predominância de ventos de nordeste e leste-nordeste. No segundo período, entre os meses de abril e setembro, denominado período de inverno, existe a predominância de ventos de sul, do segundo e terceiro quadrante.

Pequenas diferenças entre as direções das rosas dos ventos aqui apresentadas, e as rosas dos ventos apresentadas no *item 11.5.1.1 - Meteorologia*, devem-se às diferenças nos períodos analisados. Enquanto na meteorologia foram utilizados 30 anos de dados (1981 - 2010), na modelagem de óleo, foram utilizados 6 anos de dados (2005 - 2010) para forçar o modelo. Entretanto, deve-se ressaltar que as diferenças verificadas foram pequenas, e que o padrão de ventos observado entre 2005 e 2010 apresentou-se coerente com o verificado ao longo dos 30 anos analisados na meteorologia.

Como forçante na modelagem de dispersão do óleo, utiliza-se todos os pontos do NCEP disponíveis na região da grade do modelo hidrodinâmico ao longo de todo o período analisado.

Nesse estudo foram utilizados como forçante hidrodinâmica uma série temporal de 6 anos de dados (2005 a 2010) dos resultados do modelo global disponibilizado pelo HYCOM *consortium*, descrito no item 2.1 (Modelo Hidrodinâmico).

## 2.6. Variabilidade Ambiental

Na implementação de um modelo probabilístico de vazamento de óleo é necessária a definição de um universo amostral que represente a variabilidade ambiental da região. No modelo OSCAR, o universo amostral é criado por  $n$  repetições com condições de vento e corrente correlacionadas (*i.e.* condição de vento e de corrente são para o mesmo dia), o que cria a necessidade de se definir o número de simulações que serão conduzidas na realização da modelagem. Este número deve ser suficiente para representar de forma adequada a variabilidade ambiental presente na região, obtendo um mapa de probabilidade estatisticamente coerente.

A metodologia proposta por Elliot (2004) sugere o número adequado de simulações baseado na análise do número de zeros-ascendentes (*zero-up-crossing*) do vento, que consiste na identificação do número de vezes em que as componentes zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ) do vento trocam de sinal. De forma prática, a alteração de sentido nas componentes está ligada a mudanças no padrão sinótico do vento, como por exemplo, no período de passagem de um sistema frontal pela região.

Dessa forma, com objetivo de avaliar a variabilidade das escalas temporais transientes presentes nos dados de ventos analisados e utilizados nesse relatório, foi realizada uma análise de zeros ascendentes (*zero-up-crossing*) do ponto do NCEP mais próximo aos pontos de vazamento no bloco BM-P-2 (Figura 21). Os resultados podem ser observados na Figura 24.

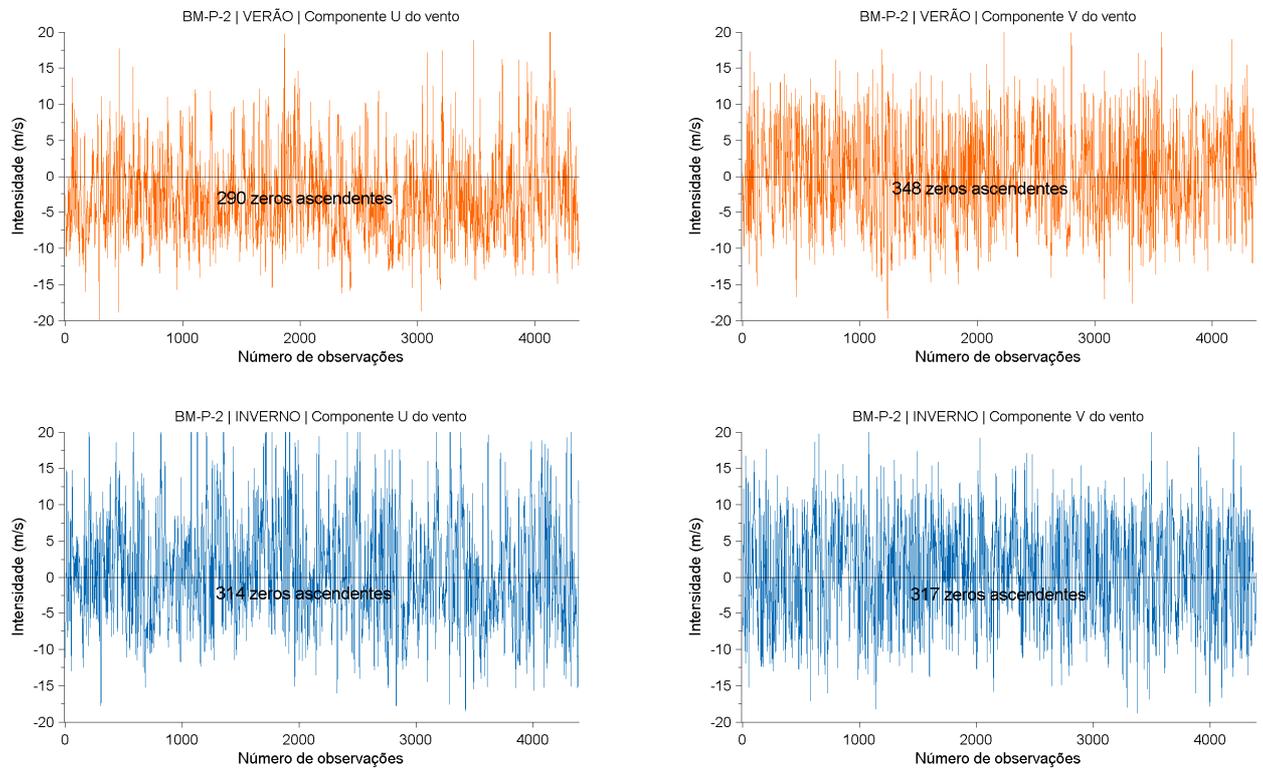


Figura 24: Séries temporais das componentes “u” e “v”, do vento, para a região do Bloco BM-P-2, Bacia de Pelotas, com o número de zeros ascendentes presentes nas séries.

Observa-se que a no período de verão, o número de zeros ascendentes foi de 290, para a componente zonal (u) e 348 para a meridional (v). No período de inverno, o número de zeros ascendentes para componente zonal (u) subiu para 314 e, da componente meridional (v) diminuiu para 317. Considerando que os dados correspondem a um período de 6 anos (aproximadamente 3 anos para cada condição ambiental: verão e inverno), e que o intervalo entre as medições é de 6 horas, podemos estimar uma escala mínima de variabilidade significativa de aproximadamente 3,15 dias no período de verão e de 3,45 dias no período de inverno.

Assim, tendo como base a metodologia proposta por Elliot (2004), para uma correta representação dessa variabilidade na modelagem probabilística de óleo, os números mínimos de simulações aconselháveis seriam de 348 e 317 para os períodos de verão e inverno, respectivamente. No estudo em questão foram utilizadas 360 simulações para cada condição sazonal.

### 3. Resultados

A seguir serão apresentados os resultados das simulações de deriva do óleo para vazamentos de 8, 200 e 10.200 m<sup>3</sup>, nos modos probabilístico e determinístico, a partir das locações dos poços Guarani e Pampeano.

Na abordagem probabilística são realizadas diversas simulações determinísticas, considerando todos os processos citados nos itens anteriores, em diferentes condições meteorológicas. Os resultados do modo probabilístico são de grande importância porque ilustram tanto a abrangência da área passível de ser afetada pelo vazamento quanto o tempo mínimo de chegada do poluente em cada local com probabilidade de ser atingido, além de identificar as regiões com maiores probabilidades de serem alcançadas nas diferentes condições simuladas.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas 360 diferentes simulações para cada período (verão e inverno) nos diferentes volumes de vazamento, totalizando 2.160 possíveis cenários ambientais de vazamento.

Serão apresentadas duas trajetórias que representam a deriva do óleo nas condições meteorológicas mais frequentes da região, nos períodos sazonais de verão e inverno.

O intemperismo do óleo será apresentado ao final de cada simulação determinística, através de gráficos que apresentam o balanço de massa do constituinte ao longo da simulação.

A Figura 25 e a Figura 26 resumem a forma como os resultados dos modos probabilísticos e determinísticos serão apresentados, respectivamente.

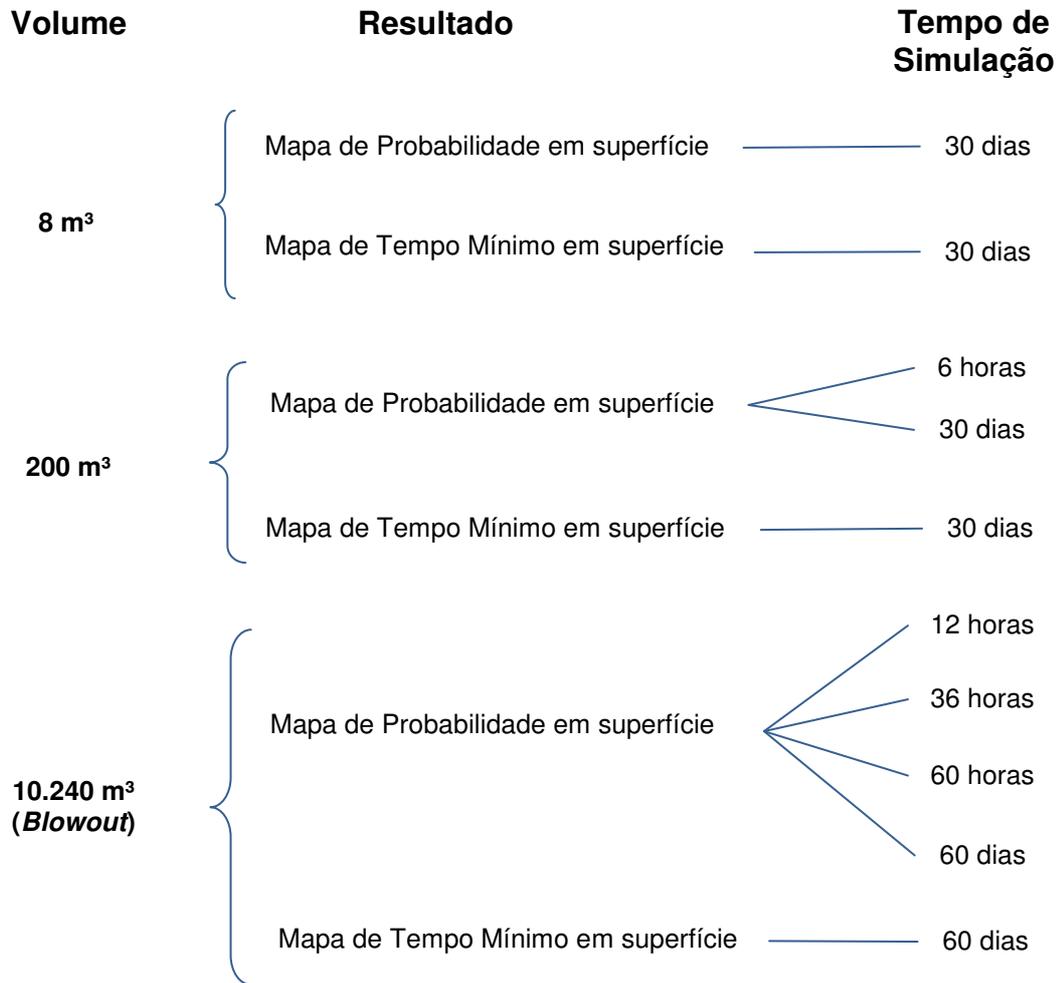


Figura 25: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilístico.

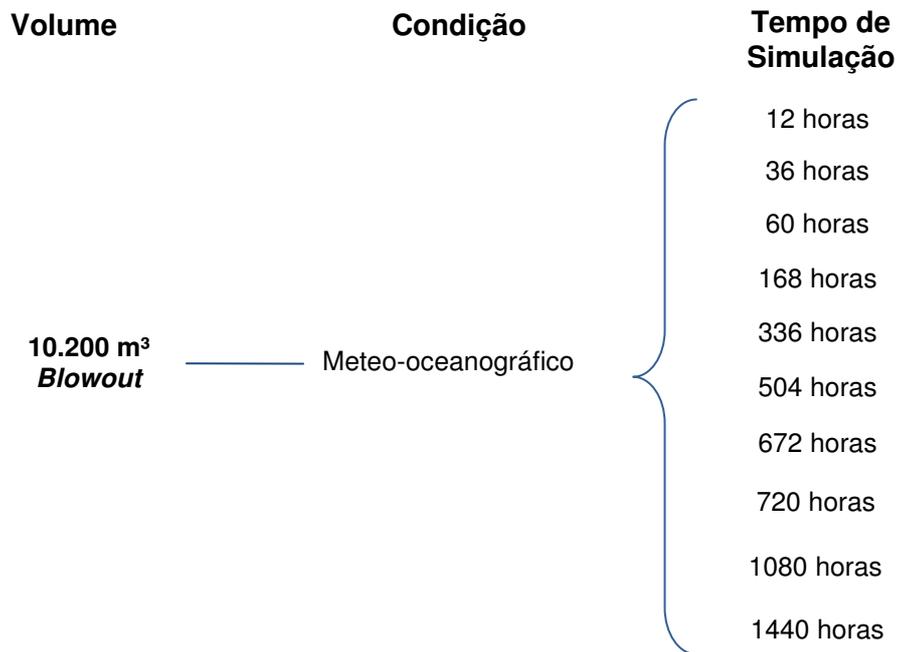


Figura 26: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos.

## 3.1. Resultados Probabilísticos

A seguir serão apresentados os mapas probabilísticos das simulações numéricas para vazamentos de 8, 200 e 10.200 m<sup>3</sup>, em condições de verão e inverno. São eles:

- Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície;
- Tempo mínimo de chegada de óleo na superfície;

### 3.1.1 Guarani

#### 3.1.1.1 Vazamento de 8 m<sup>3</sup>

##### 3.1.1.1.1 Verão

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para o vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão é apresentado na Figura 27 . O mapa de tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 28.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Simulação 30 dias | 360 simulações

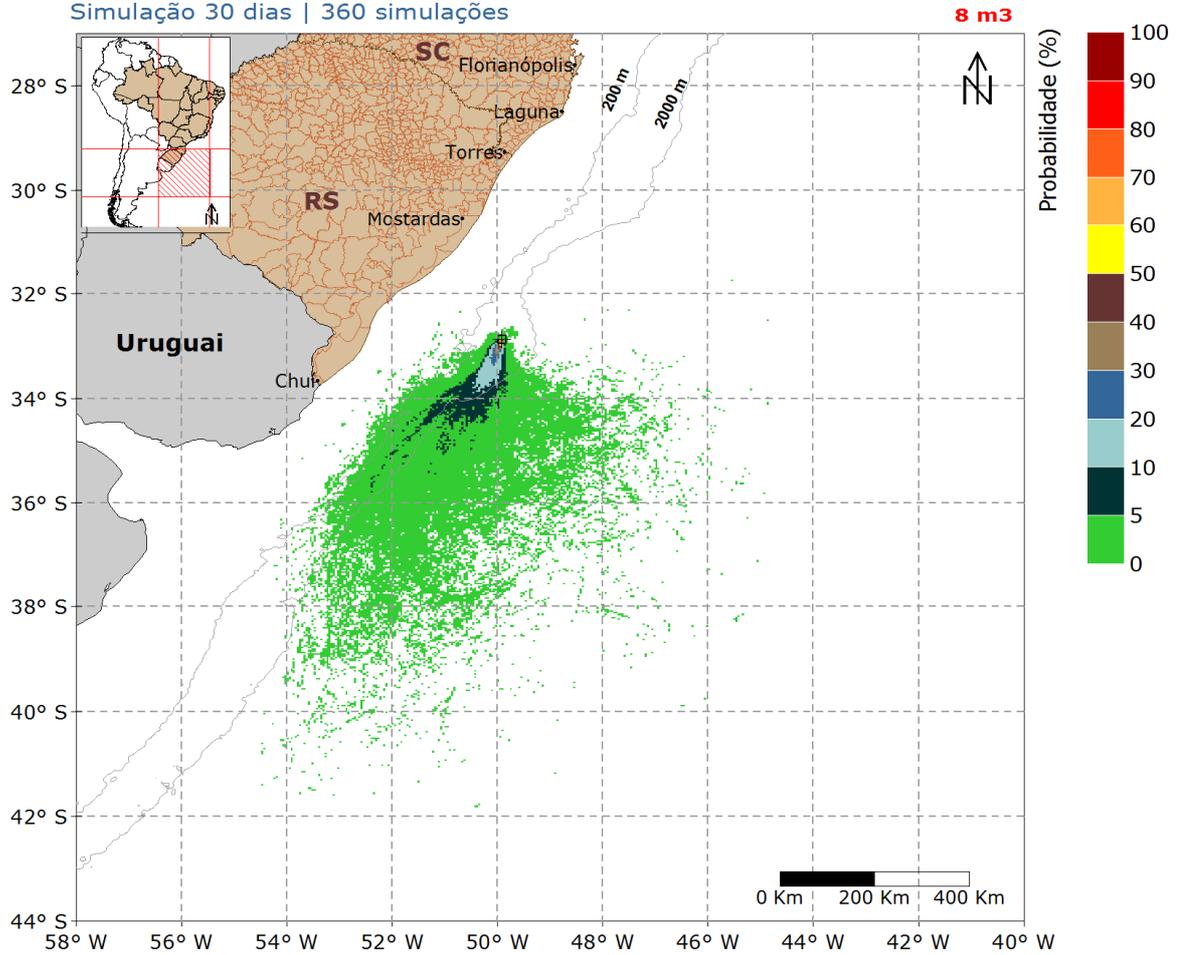


Figura 27: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.

A deriva do óleo foi preferencialmente para o sul e sudoeste do local de vazamento devido à influência da Corrente do Brasil e dos ventos do primeiro quadrante. Derivas de leste também podem ser observadas. As regiões com probabilidades superiores a 10% restringiram-se principalmente entre as isóbatas de 200 m e 2000 m, não ocorrendo probabilidade de toque na costa.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Simulação 30 dias | 360 simulações

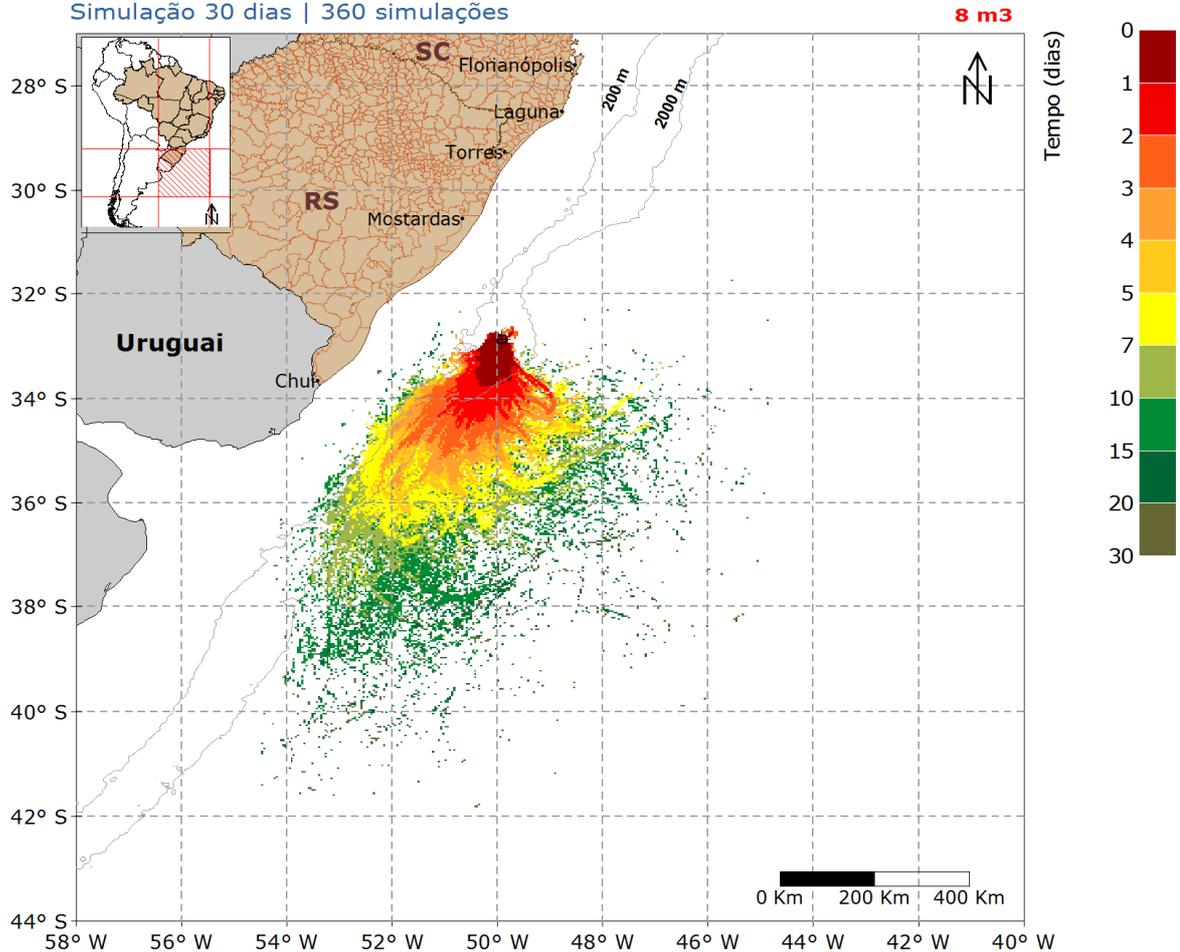


Figura 28: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.

Como observado na Figura 28, as regiões mais afastadas com probabilidade de presença de óleo em superfície podem ser alcançadas em até 30 dias após o vazamento.

### 3.1.1.1.2 Inverno

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para o vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno encontra-se na Figura 29. O mapa de tempo mínimo de chegada, em superfície encontra-se na Figura 30.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Simulação 30 dias | 360 simulações

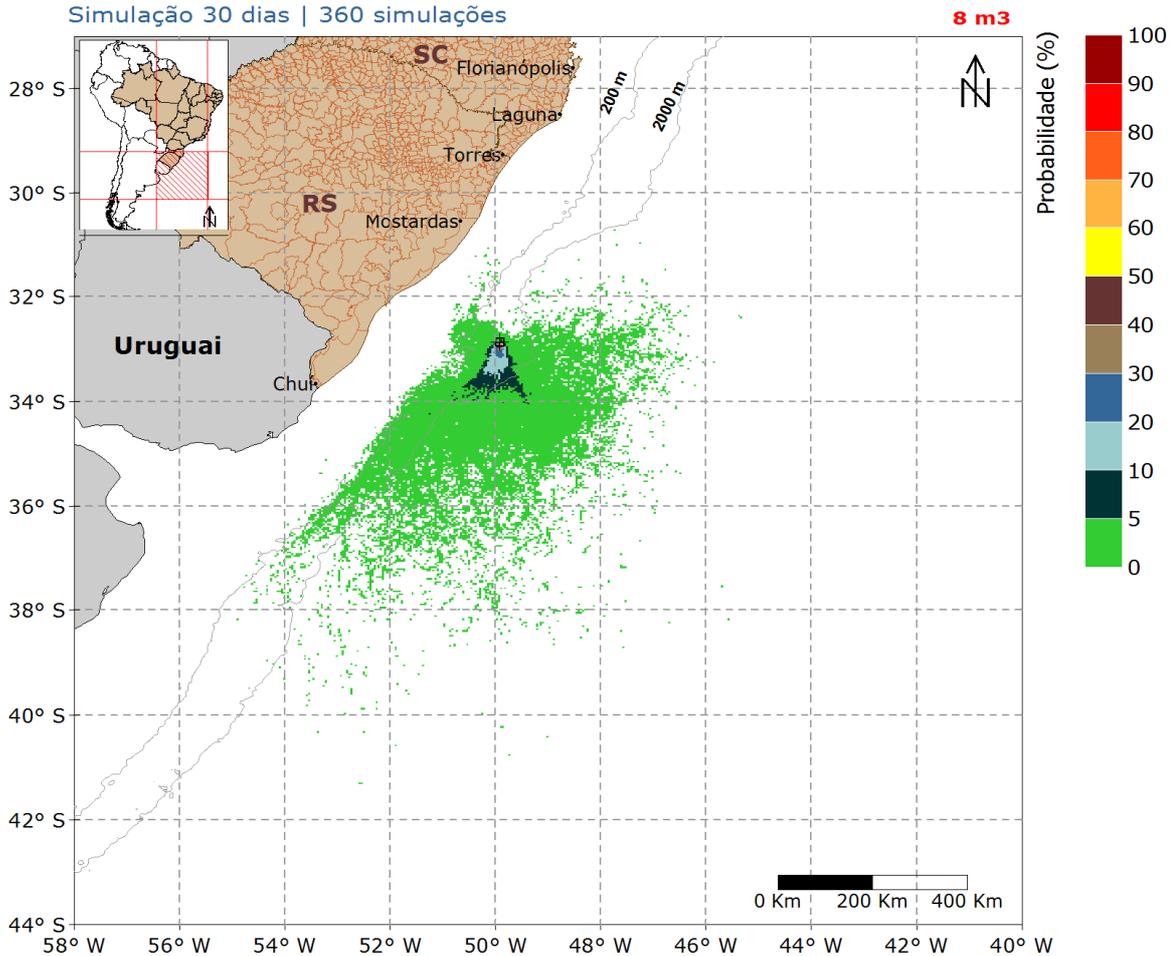


Figura 29: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.

A deriva do óleo neste cenário foi também preferencialmente para o sul/sudoeste do local de vazamento. Entretanto, é observado que há áreas mais ao norte com probabilidade de presença de óleo devido à presença de ventos de sul neste cenário. Como no verão, as probabilidades superiores a 10% ficaram restritas entre as isóbatas de 200 m e 2000 m.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Simulação 30 dias | 360 simulações

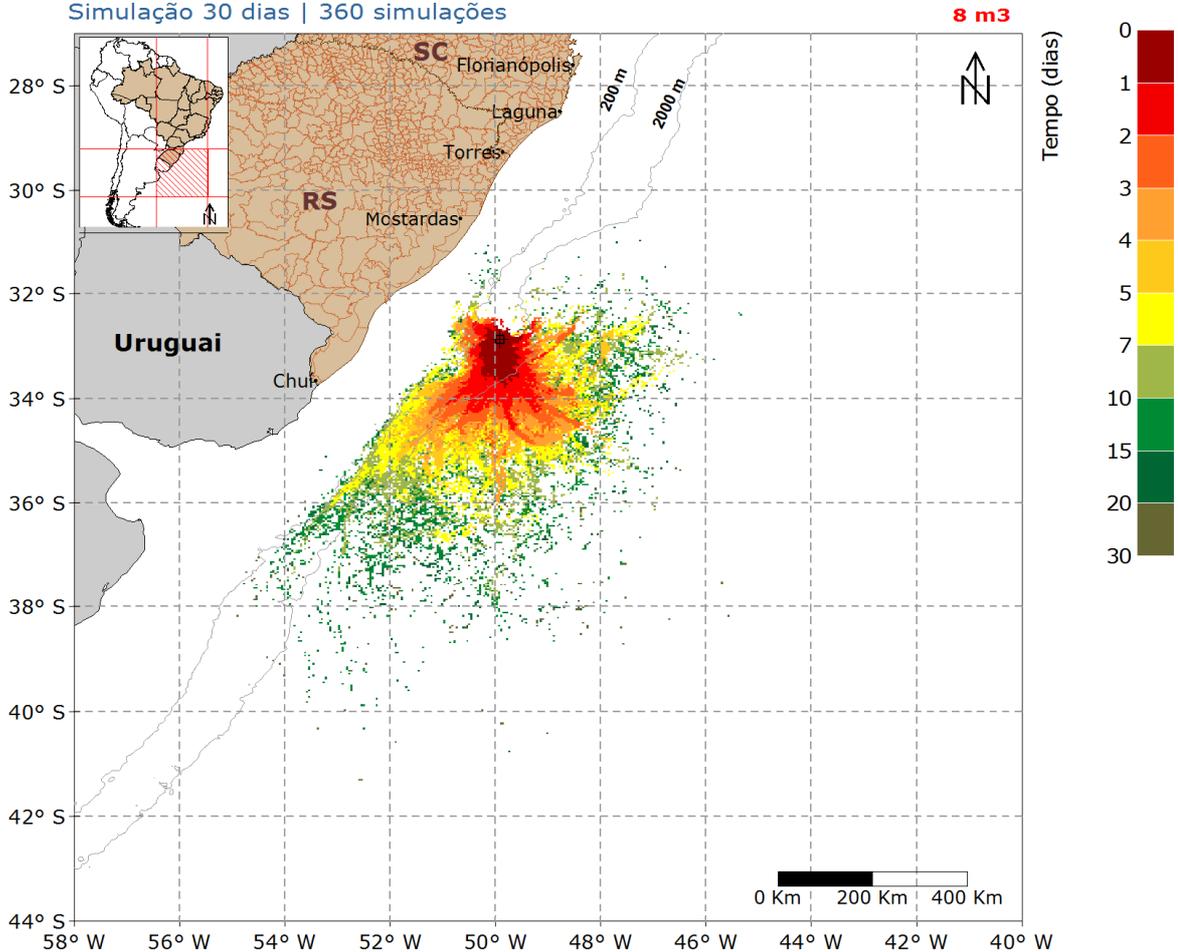


Figura 30: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.

Observa-se que em regiões mais afastadas com probabilidade de presença de óleo em superfície podem ser alcançadas em até 30 dias após o vazamento em superfície.

### 3.1.1.2 Vazamento de 200 m<sup>3</sup>

#### 3.1.1.2.1 Verão

A seguir, são apresentados os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície (6 horas e 720 horas após o início do vazamento) para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>) no período de verão (Figura 31 e Figura 32, respectivamente). O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 33.

### Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície  
BM-P-2 | Cenário de Verão  
6 horas após o início do vazamento

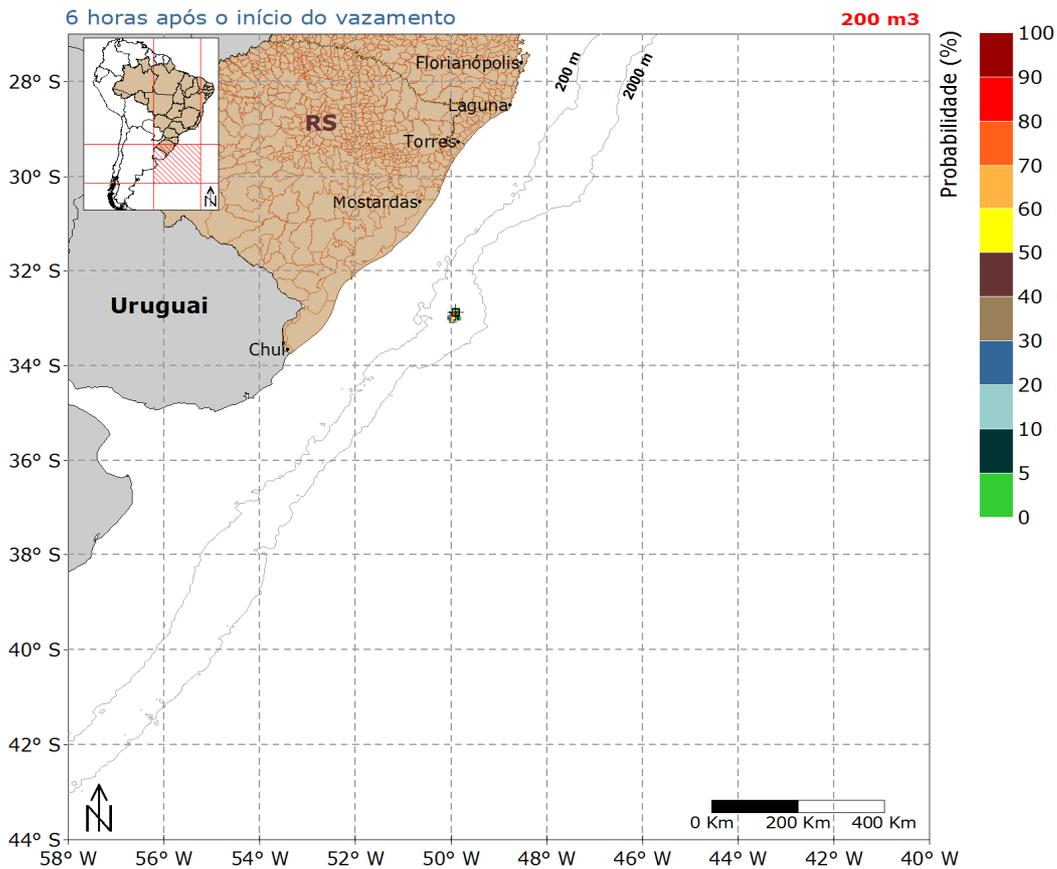


Figura 31: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 6 horas. Poço Guarani.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Simulação 30 dias | 360 simulações

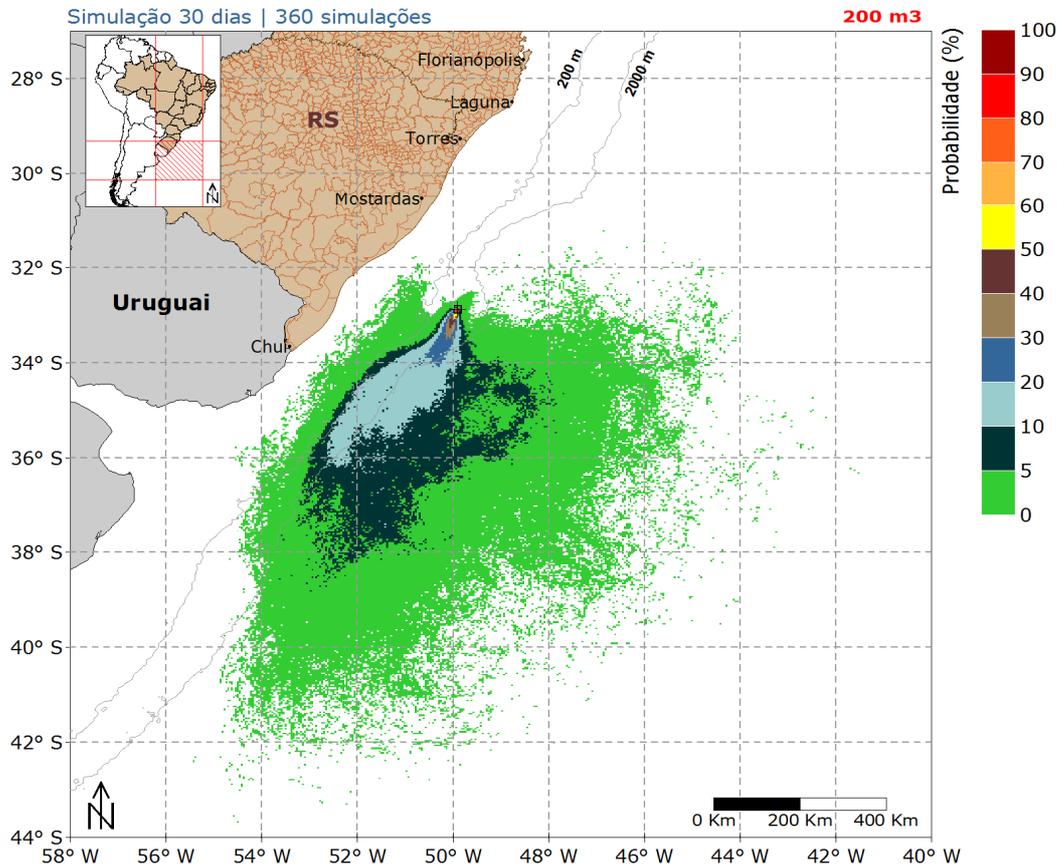


Figura 32: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.

Como ocorrido para a simulação de 8 m<sup>3</sup>, neste cenário a deriva do óleo foi para sudoeste do local de vazamento devido a influência da Corrente do Brasil e dos ventos do primeiro quadrante, abrangendo uma região semelhante.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Simulação 30 dias | 360 simulações

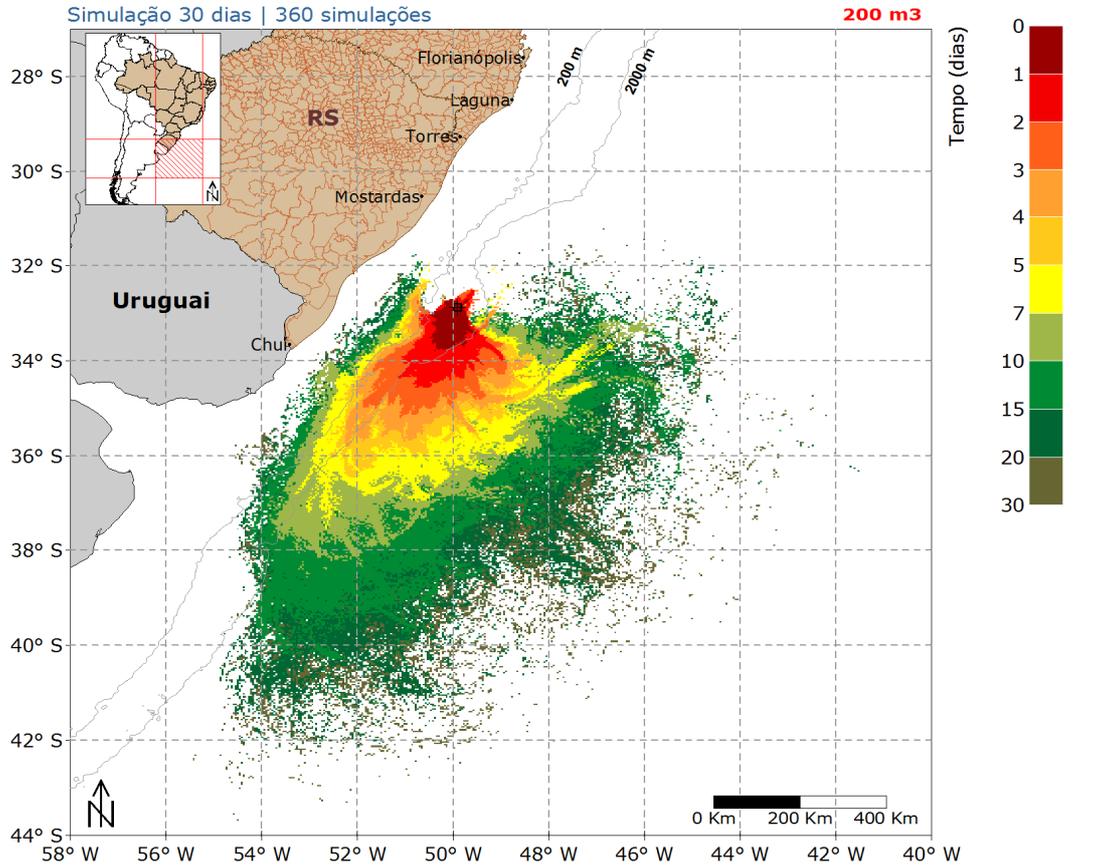


Figura 33: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.

É observado pelo mapa de tempo mínimo (Figura 33) que as regiões mais afastadas do ponto de vazamento com probabilidade de presença de óleo podem ser alcançadas em até 30 dias.

### 3.1.1.2.2 Inverno

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície (6 horas e 720 horas após o início do vazamento) para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>), no período de inverno, são apresentados na Figura 34 e Figura 35, respectivamente. O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 36.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

6 horas após o início do vazamento

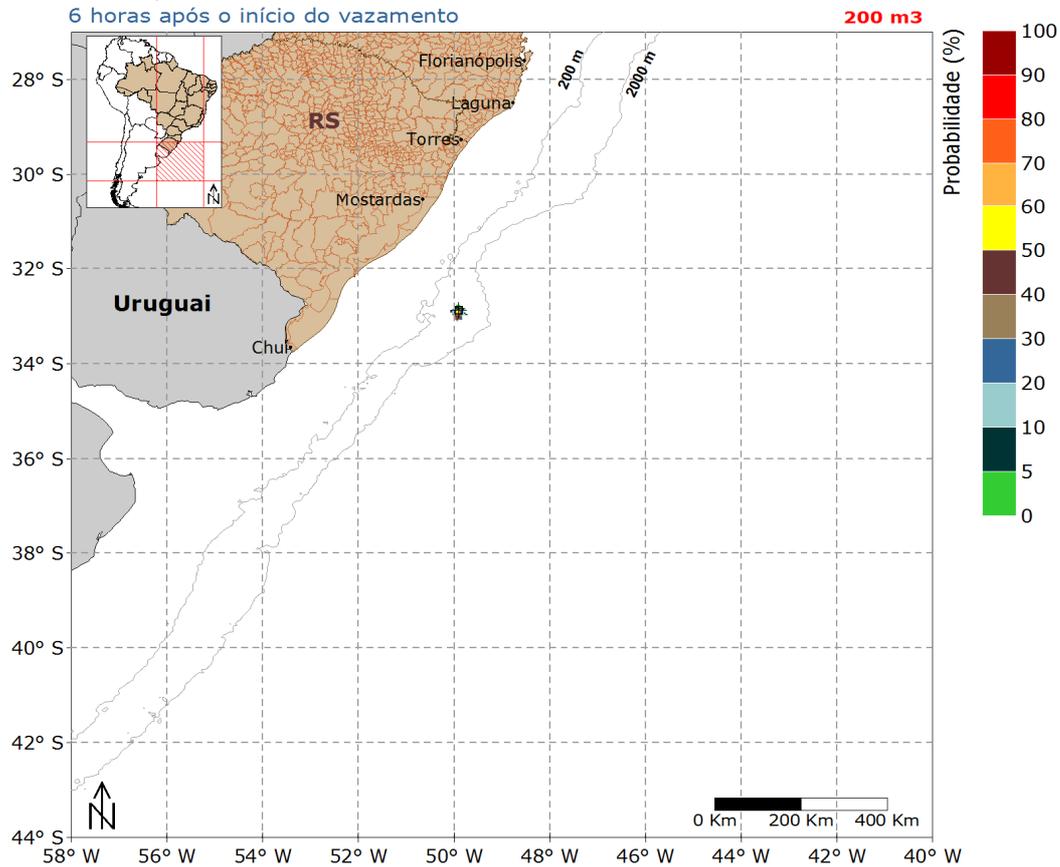


Figura 34: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 6 horas. Poço Guarani.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Probabilístico**



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície  
BM-P-2 | Cenário de Inverno  
Simulação 30 dias | 360 simulações

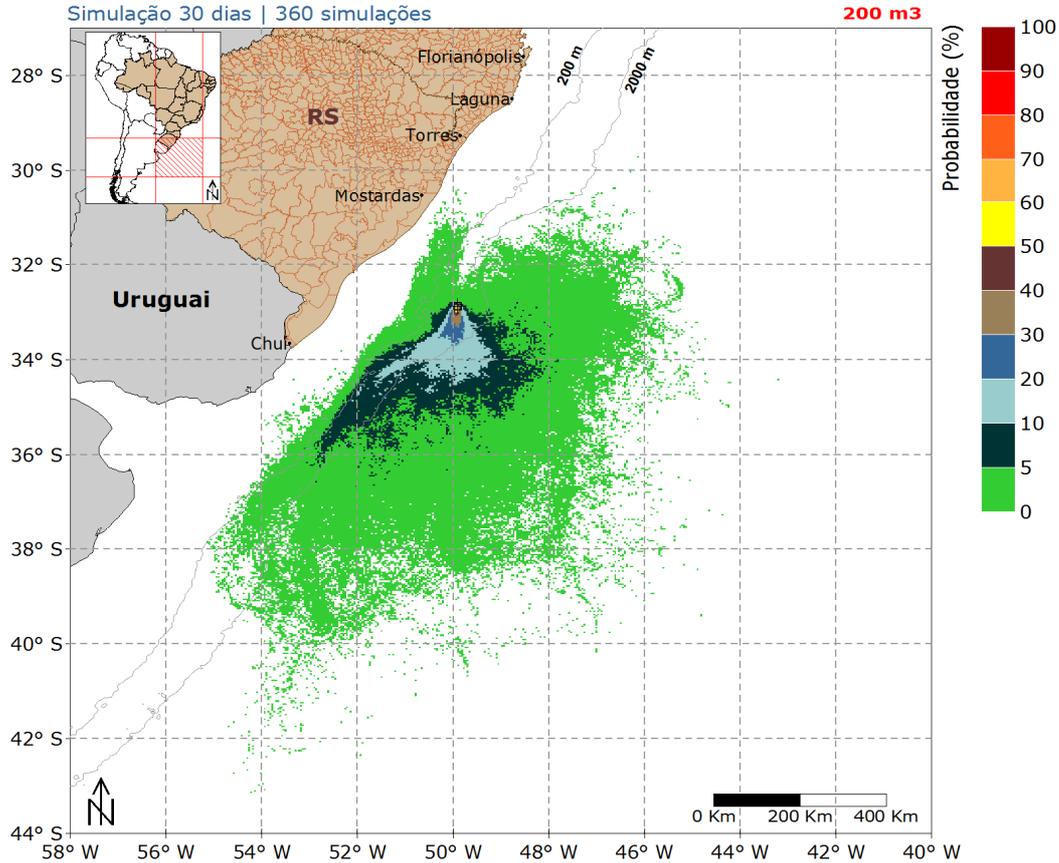


Figura 35: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.

A deriva do óleo neste cenário foi também preferencialmente para o sudoeste do local de vazamento, apresentando áreas com probabilidade de presença de óleo mais ao norte do ponto de vazamento. Esse comportamento está associado com os ventos de sul que são mais frequentes no inverno.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Simulação 30 dias | 360 simulações

200 m<sup>3</sup>

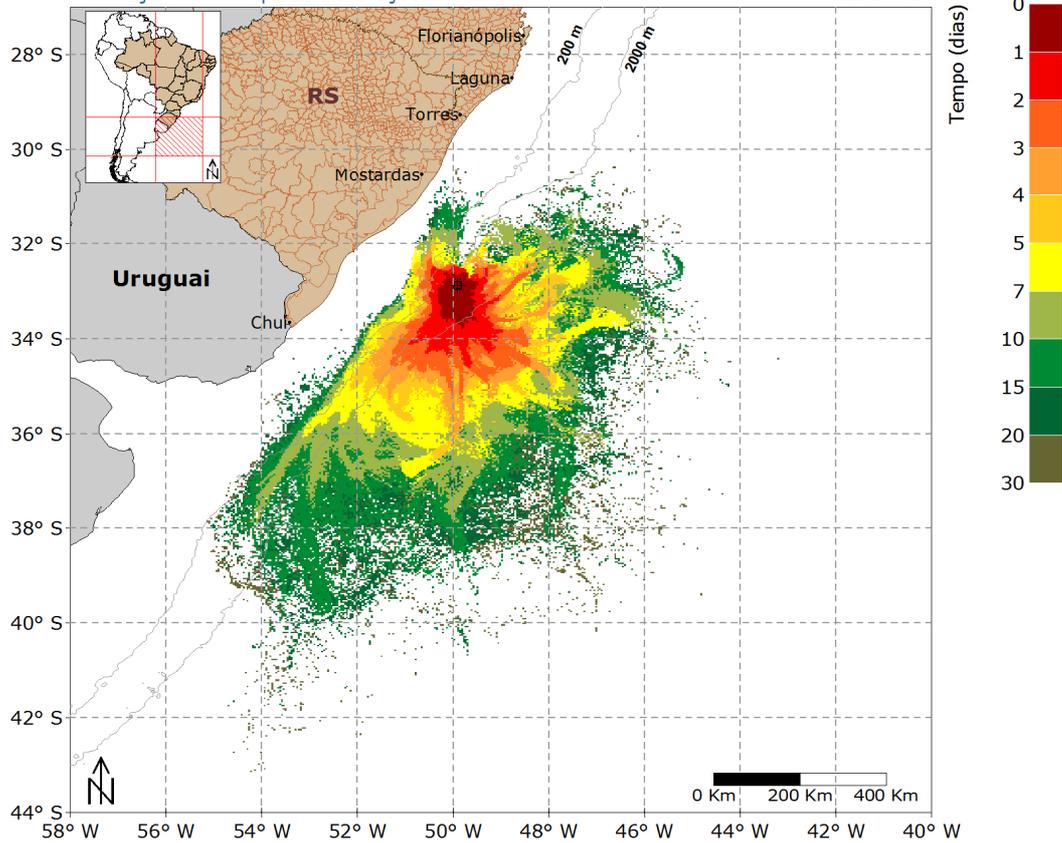


Figura 36: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Guarani.

Os mapas de tempo mínimo neste cenário indicam que as regiões com probabilidade de presença de óleo podem ser alcançadas em até 30 dias após o início do vazamento.

### 3.1.1.3 Vazamento de *Blowout*

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações probabilísticas de *blowout* (10.200 m<sup>3</sup>). Para esses cenários foi considerado um vazamento contínuo durante 30 (trinta) dias. O tempo simulado abrange os 30 dias de vazamento e mais 30 dias após o término do mesmo, totalizando 60 dias de simulação.

### 3.1.1.3.1 Verão

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície em 12, 36 e 60 horas após o início do vazamento encontram-se nas Figura 37, Figura 38 e Figura 39, respectivamente.

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para um evento de *blowout* (10.200 m<sup>3</sup>), em período de verão, 60 dias após o início do vazamento, encontra-se na Figura 40. O mapa de tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 41.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície  
BM-P-2 | Cenário de Verão  
12 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

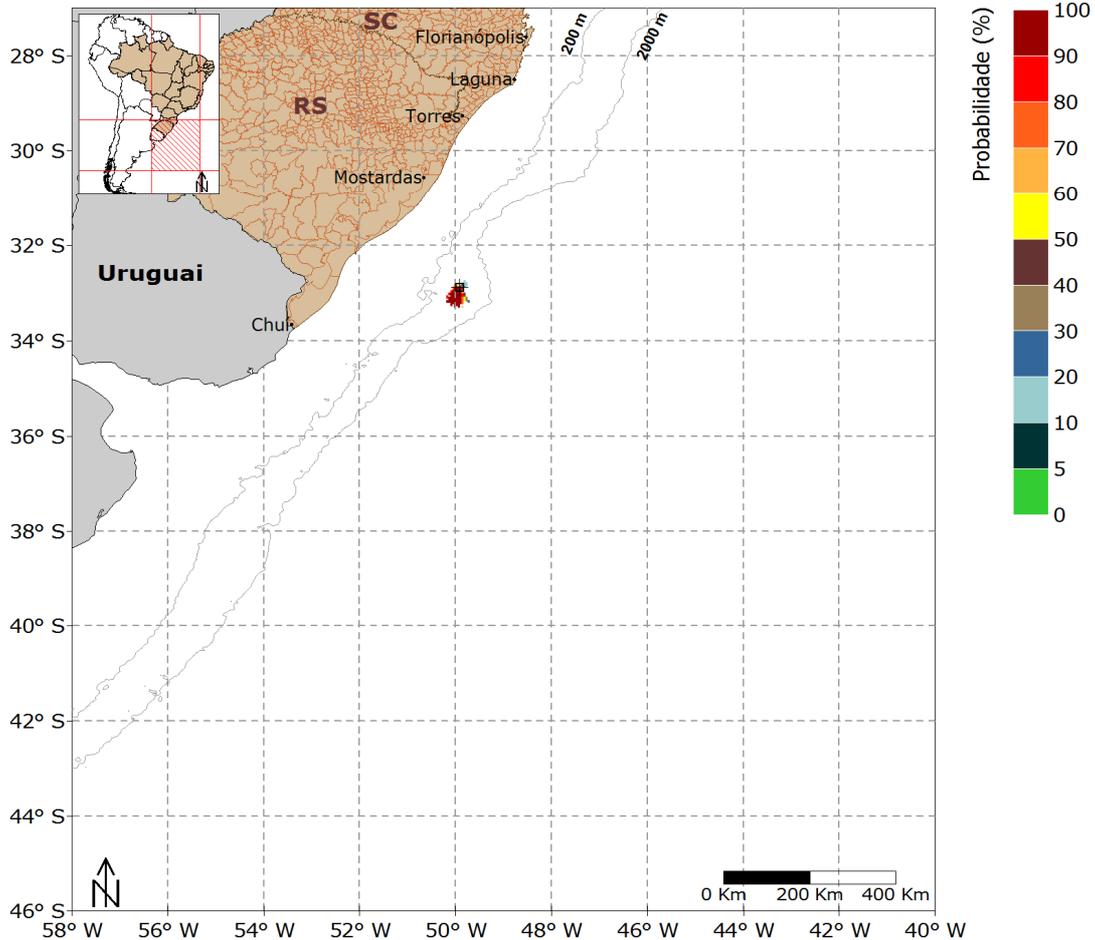


Figura 37: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 12 horas no período de verão. Poço Guarani.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

36 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

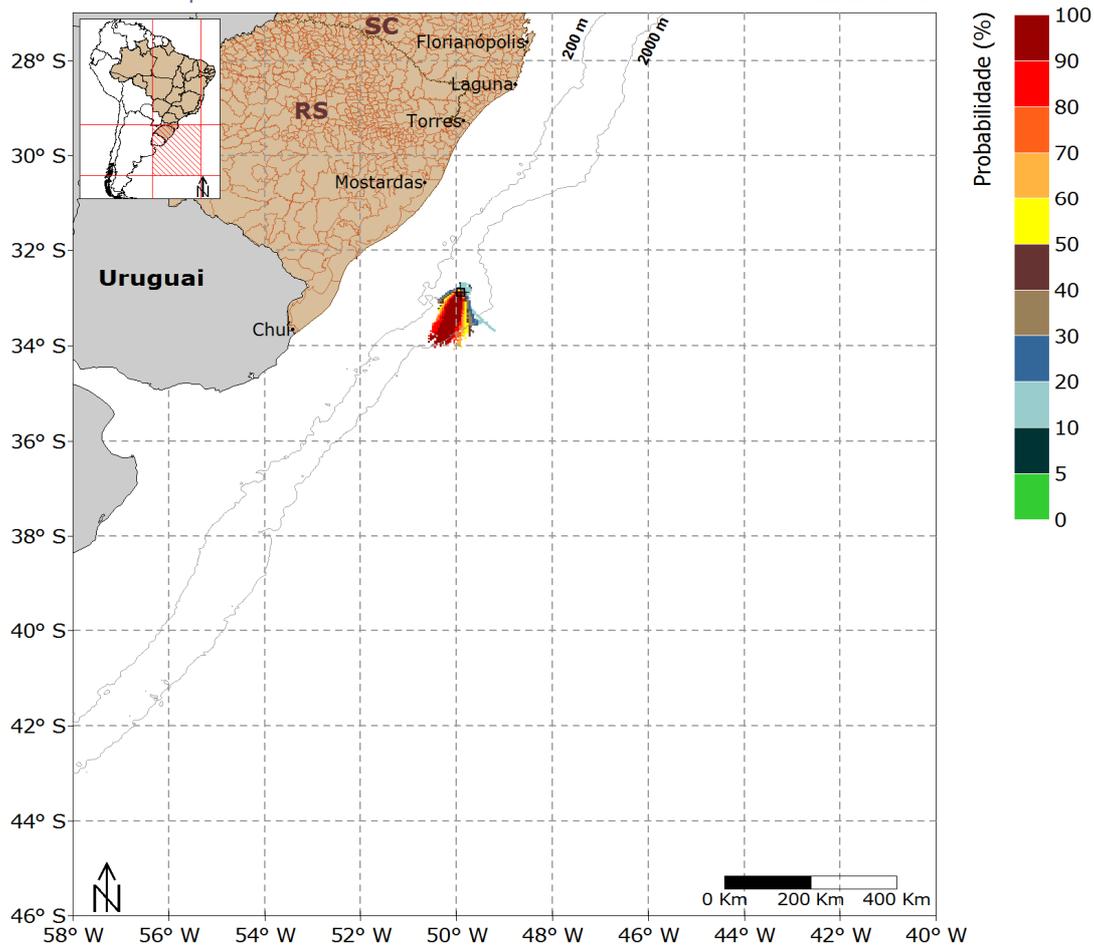


Figura 38: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 36 horas no período de verão. Poço Guarani.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

60 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

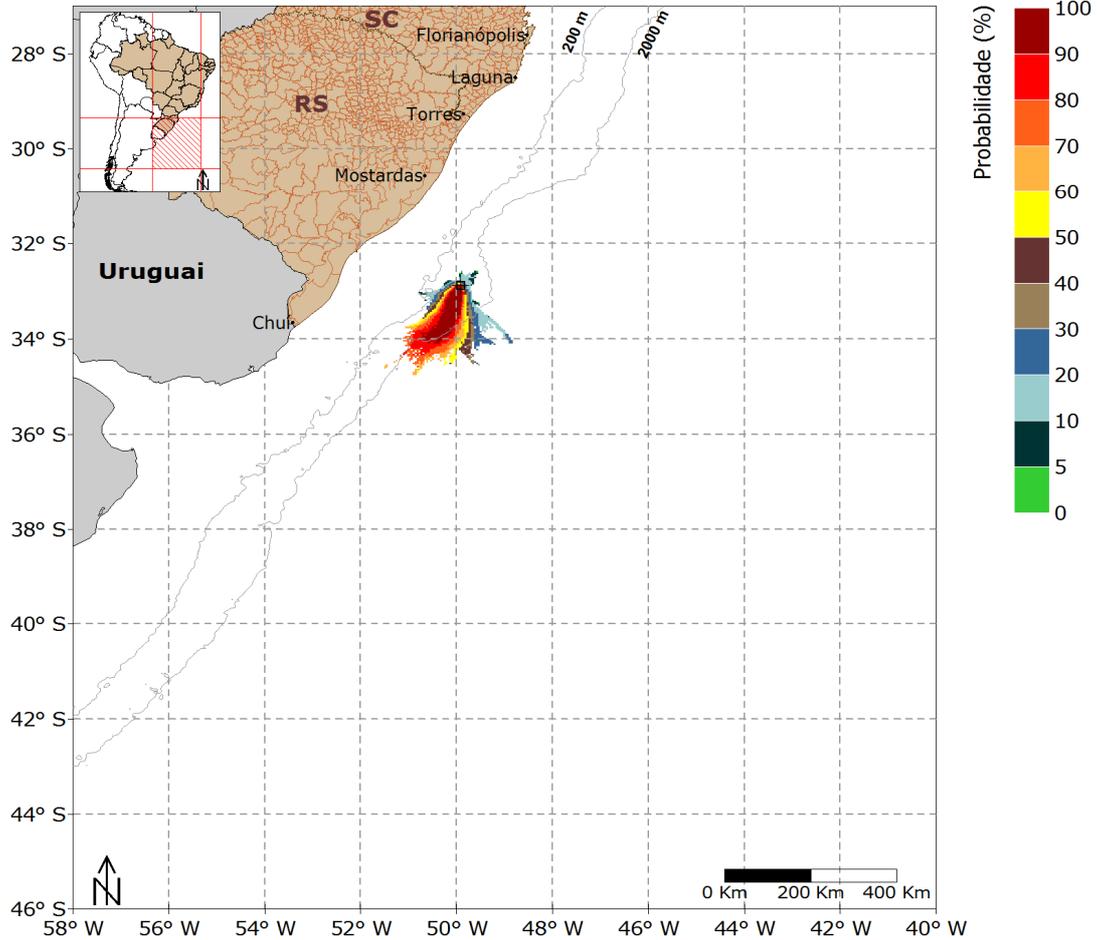


Figura 39: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 60 horas no período de verão. Poço Guarani.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Blowout 30 dias | Simulação 60 dias | 360 simulações

10.200 m<sup>3</sup>

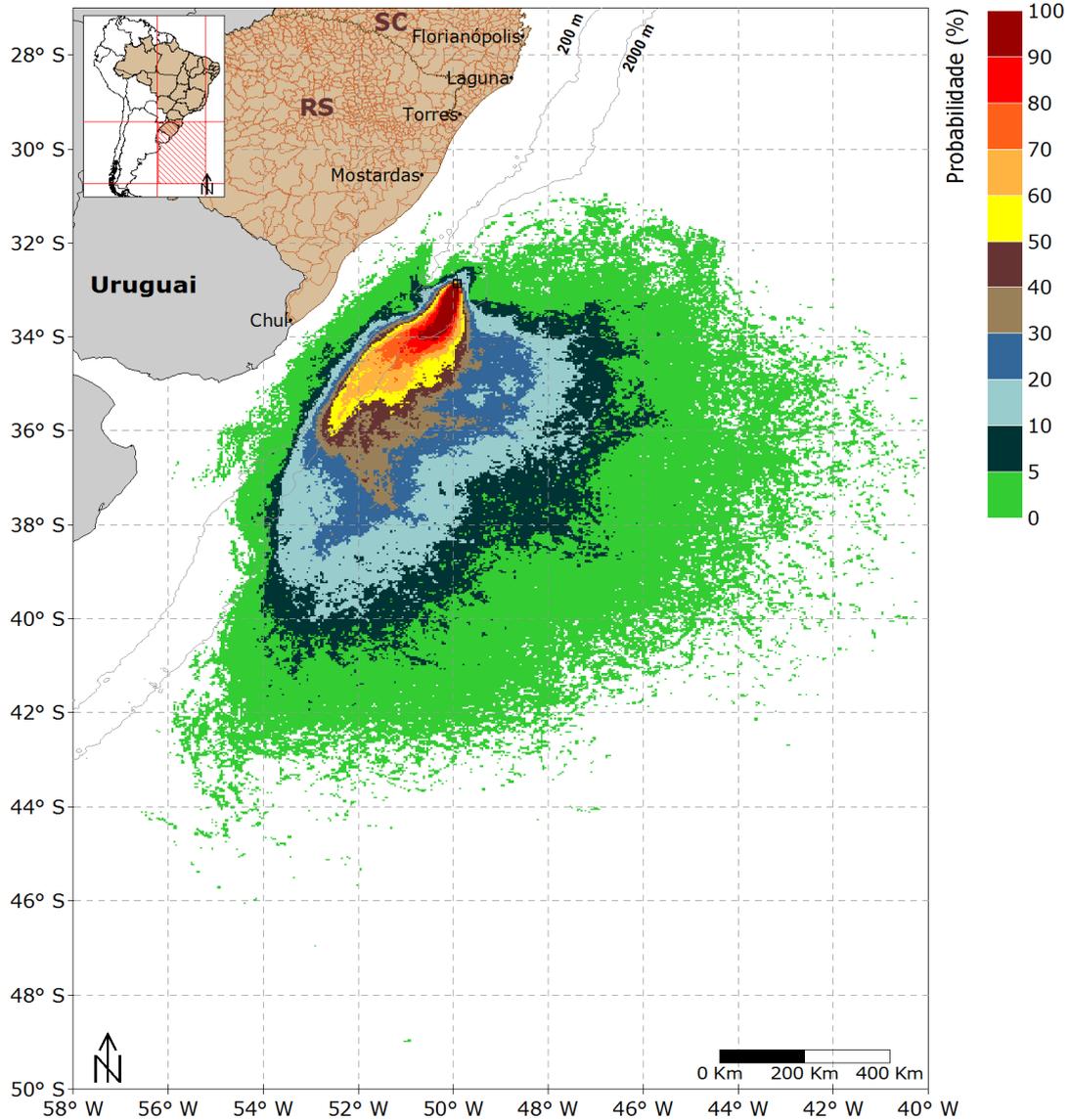


Figura 40: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias no período de verão. Poço Guarani.

A deriva do óleo ocorreu preferencialmente para sul e sudoeste do local do vazamento, sob a influência da Corrente do Brasil e dos ventos de primeiro quadrante.

É observado, com o aumento da latitude, que a área de probabilidade é deslocada em direção contrária a costa, devido a influência da Confluência Brasil-Malvinas que transporta o óleo em direção leste.

Observa-se que as maiores probabilidades, acima de 60%, são observadas, principalmente, na região compreendida entre as isóbatas de 200 m e 2000 m. Ressalta-se ainda, que não houve probabilidade de toque de óleo na costa.

A ausência de óleo na costa pode estar associado à presença da Corrente Costeira do Brasil (SOUZA & ROBINSON, 2004, SANTOS *et al.*, 2011) e a presença da pluma do estuário do Rio da Prata (PIOLA *et al.* 2005) que flui paralelamente à costa e em direção norte nesta região somada à intensificação da Corrente do Brasil em direção sul (ASSIREU, 2003). Essa frente, formada pela pluma de água fria do Rio da Prata com a quente Corrente do Brasil, pode atuar como barreira ao transporte de óleo em direção à costa. Esse efeito foi discutido recentemente por Assireu (2011), analisando derivadores.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Blowout 30 dias | Simulação 60 dias | 360 simulações

10.200 m<sup>3</sup>

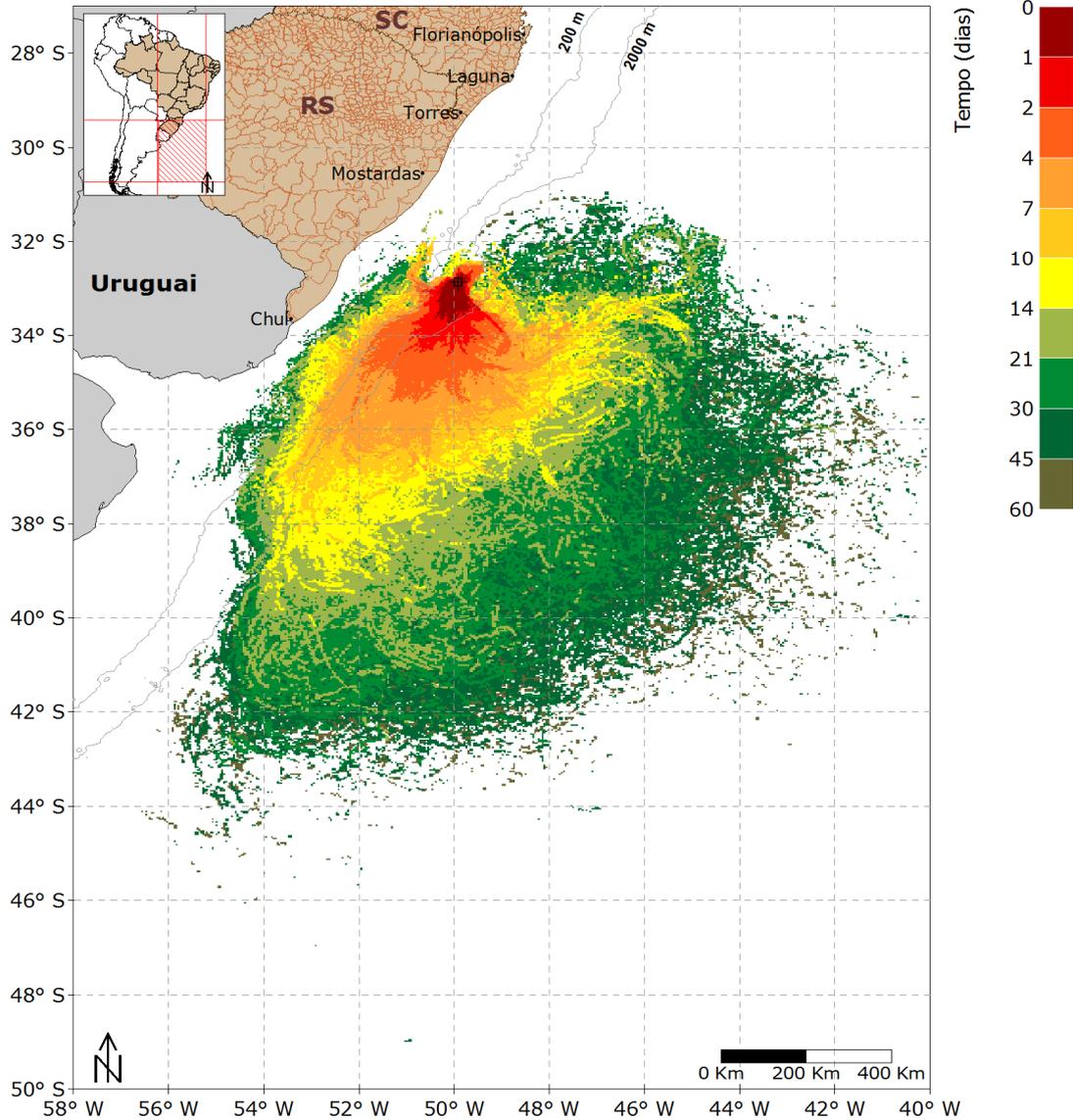


Figura 41: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de 30 dias no período de verão. Poço Guarani.

É observado que os locais na costa onde há aproximação da área de probabilidade o tempo mínimo de chegada de óleo é de até 60 dias.

### 3.1.1.3.2 Inverno

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície em 12, 36 e 60 horas após o início do vazamento encontram-se nas Figura 42, Figura 43 e Figura 44, respectivamente.

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para um evento de *blowout* (10.200 m<sup>3</sup>), em período de inverno 60 dias após o início do vazamento, encontra-se na Figura 45. O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 46.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

12 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

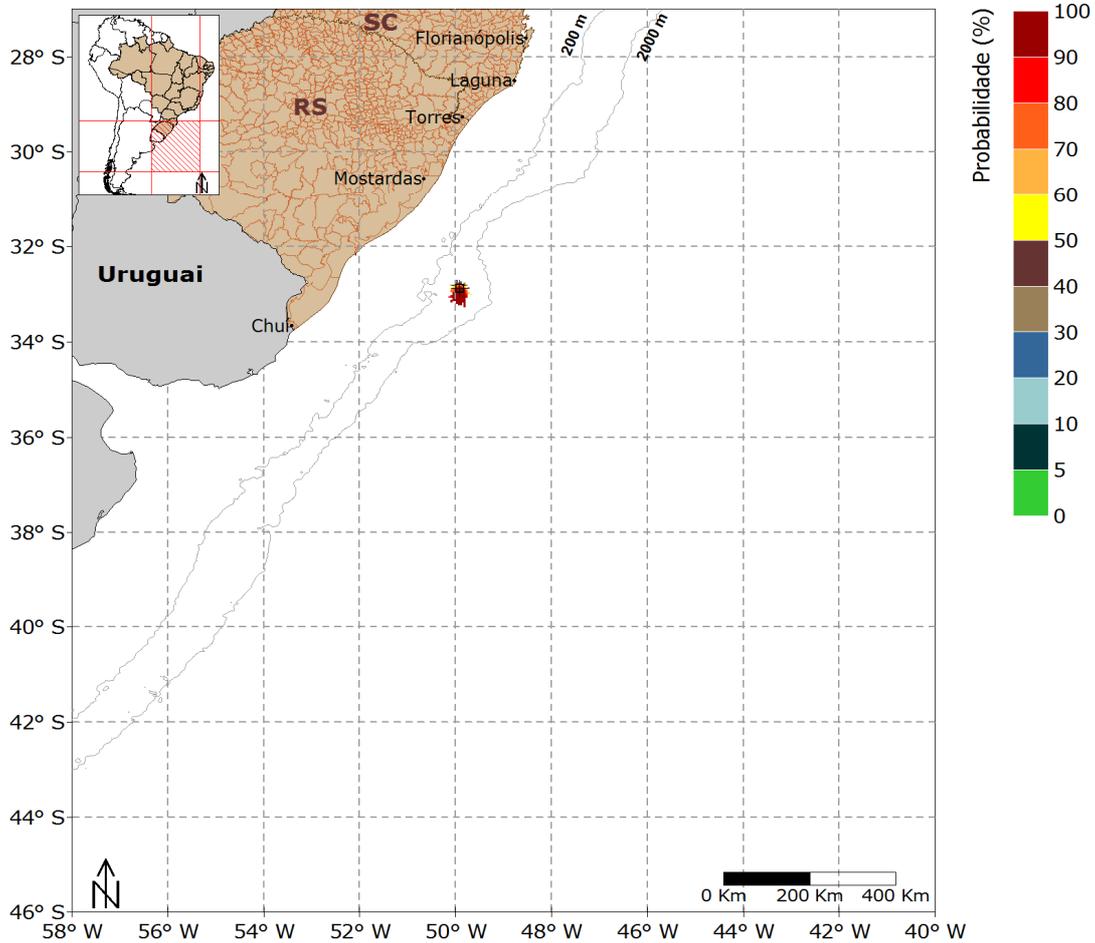


Figura 42: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 12 horas no período de inverno. Poço Guarani.

### Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



#### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

36 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

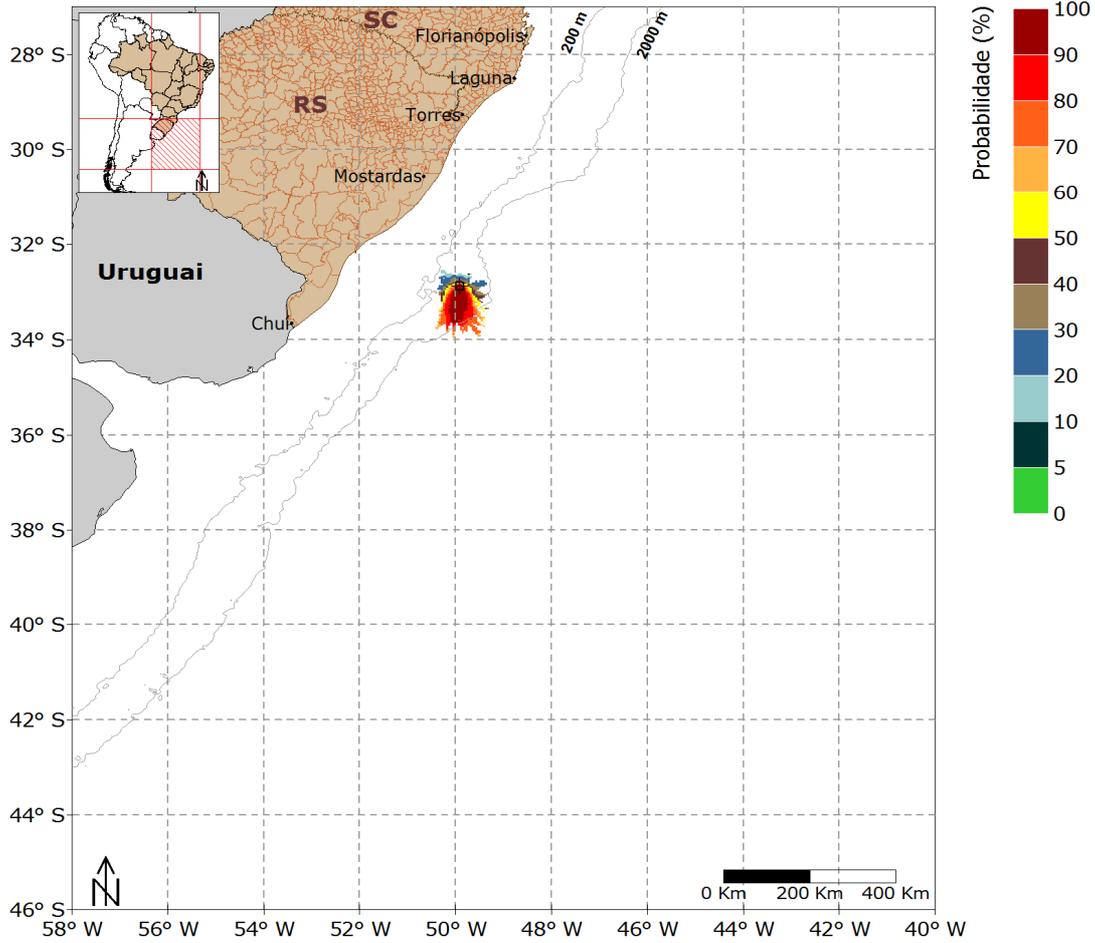


Figura 43: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 36 horas no período de inverno. Poço Guarani.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Probabilístico**



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

60 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

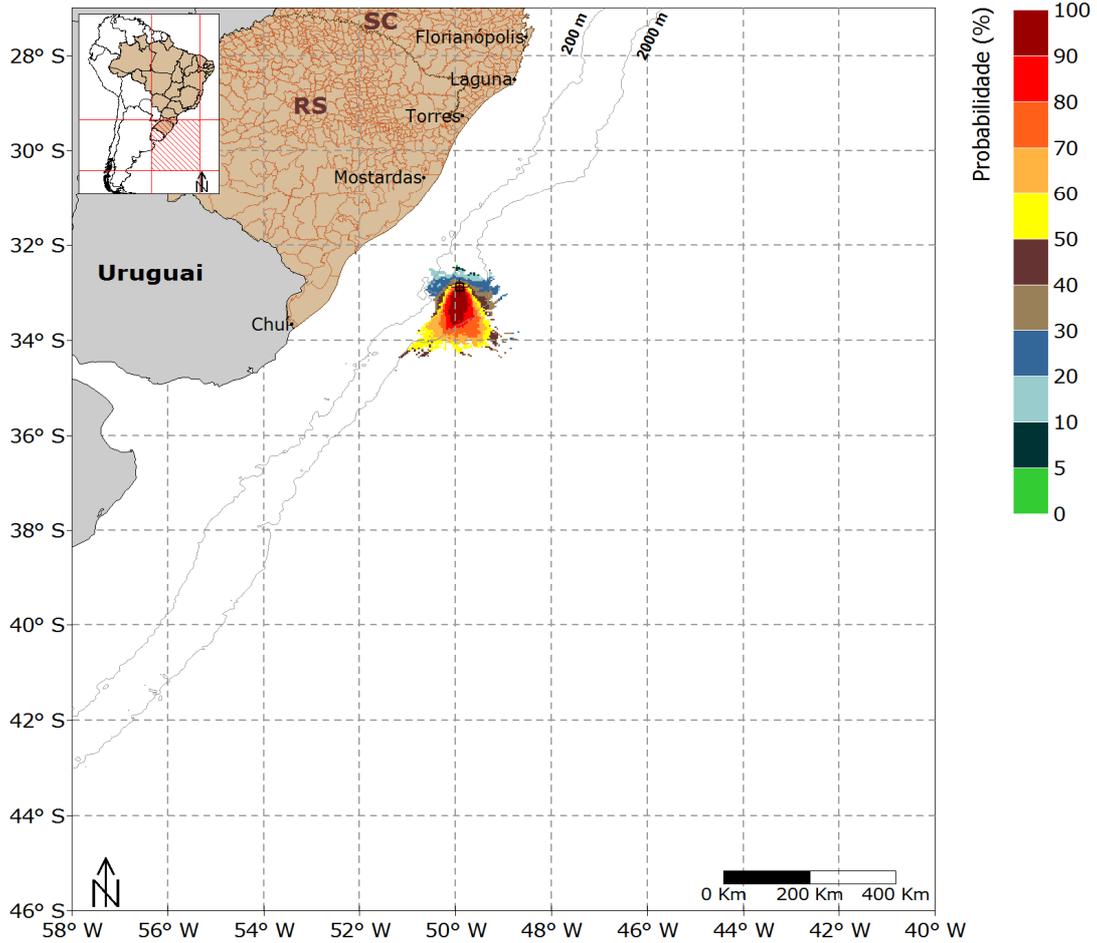


Figura 44: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 60 horas no período de inverno. Poço Guarani.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Blowout 30 dias | Simulação 60 dias | 360 simulações

10.200 m<sup>3</sup>

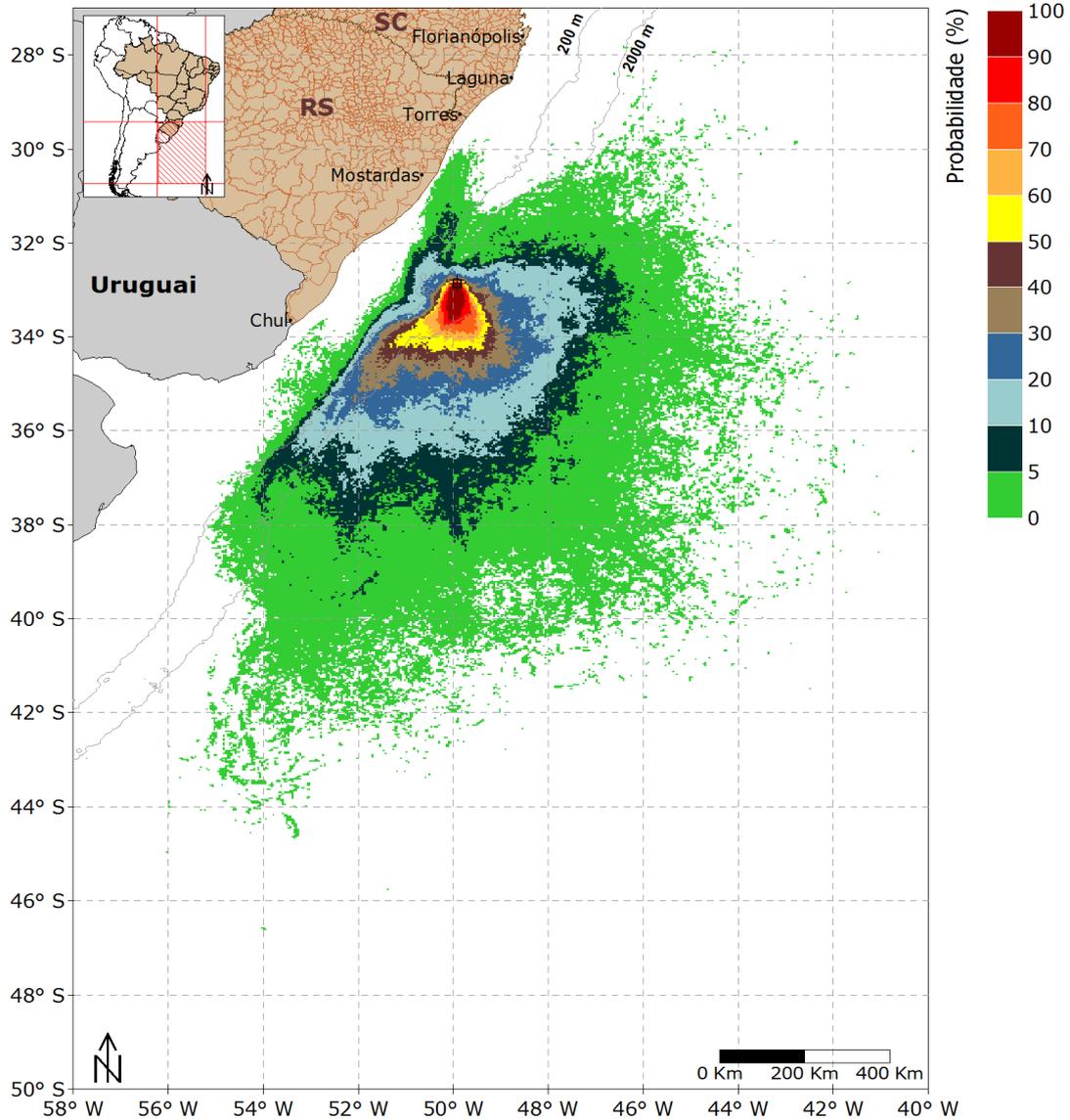


Figura 45: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias no período de inverno. Poço Guarani.

Neste cenário, a deriva do óleo ocorreu também preferencialmente para o sul do local de vazamento, porém diferentemente do período de verão, é observado que devido a presença de ventos de sul neste cenário, a área de probabilidade encontra-se menos alongada, com áreas mais ao norte do ponto de vazamento com probabilidade de presença de óleo.

Ressalta-se que não houve presença de óleo na costa, apesar de algumas localidades a área de probabilidade se aproximar bastante, como o município de Mostardas (Figura 65). Como no verão, acredita-se que esse fato está relacionado à frente Corrente Costeira do Brasil – Corrente do Brasil, com um possível efeito barreira.

### Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



#### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Blowout 30 dias | Simulação 60 dias | 360 simulações

10.200 m<sup>3</sup>

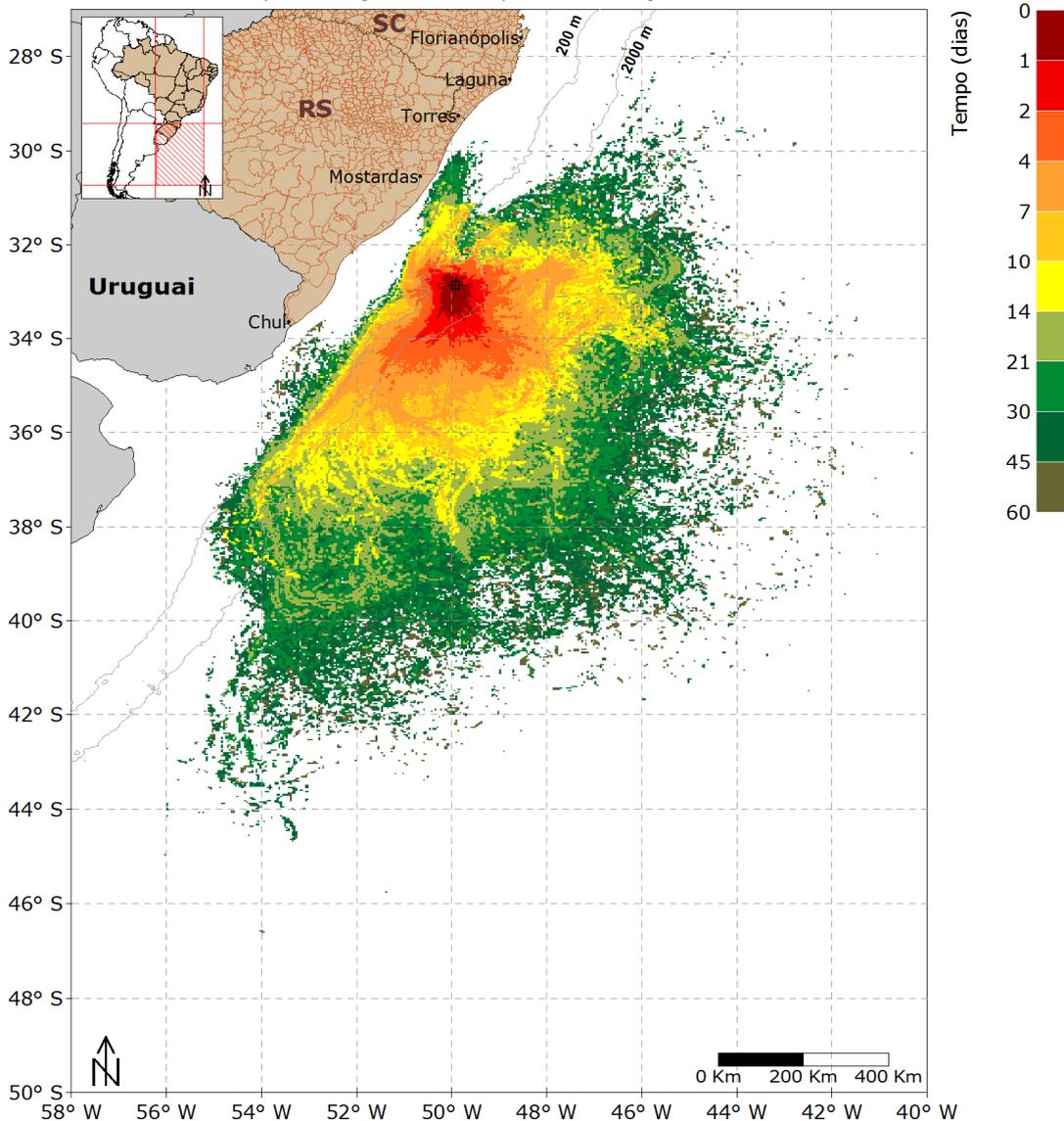


Figura 46: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias, no período de inverno. Poço Guarani.

É observado que os locais onde há aproximação da área de probabilidade o tempo mínimo de chegada de óleo é de até 21 dias.

### 3.1.2 Pampeano

#### 3.1.2.1 Vazamento de 8 m<sup>3</sup>

##### 3.1.2.1.1 Verão

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para o vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão é apresentado na Figura 47. O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 48.

### **Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**

#### **Modo Probabilístico**

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Simulação 30 dias | 360 simulações

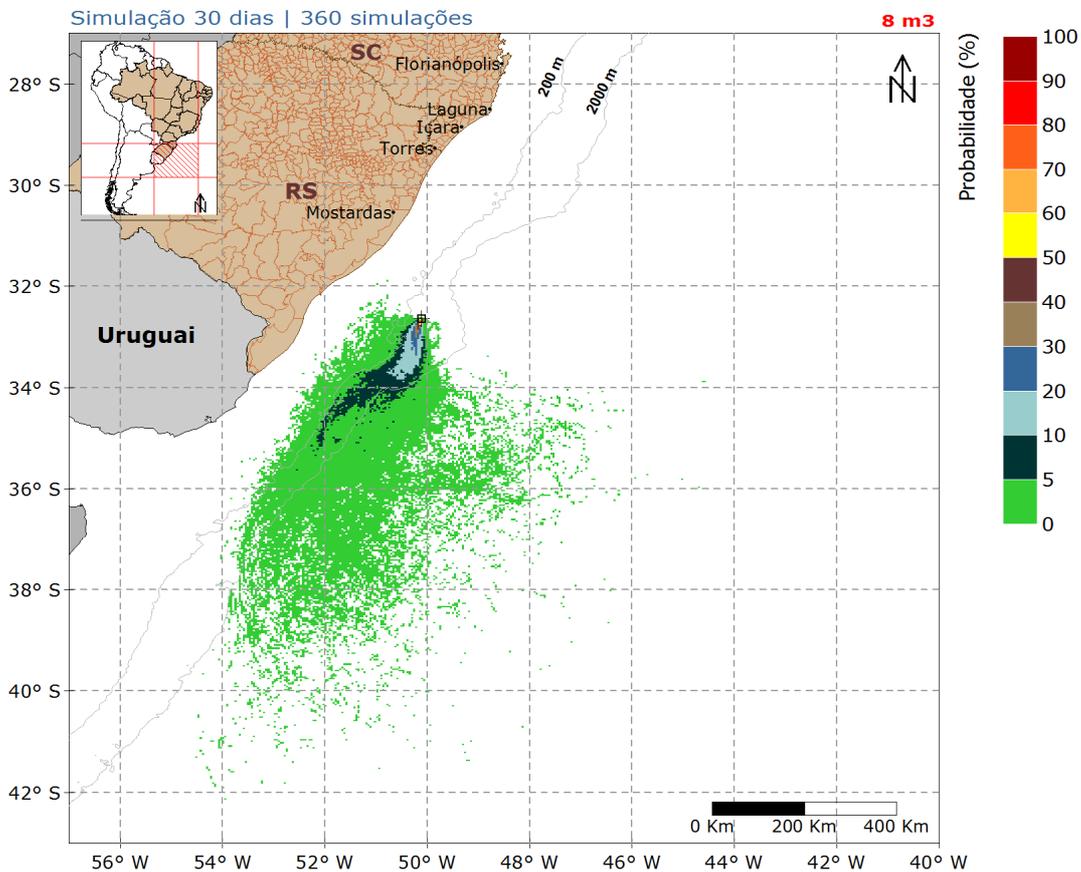


Figura 47: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.

A deriva do óleo foi preferencialmente para o sul e sudoeste do local de vazamento devido à influência da Corrente do Brasil e dos ventos do primeiro quadrante.

De forma semelhante às simulações de mesmo volume para o poço Guarani, as regiões com probabilidades superiores a 10% restringiram-se, principalmente, entre as isóbatas de 200 m e 2000 m.

### Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

#### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Simulação 30 dias | 360 simulações

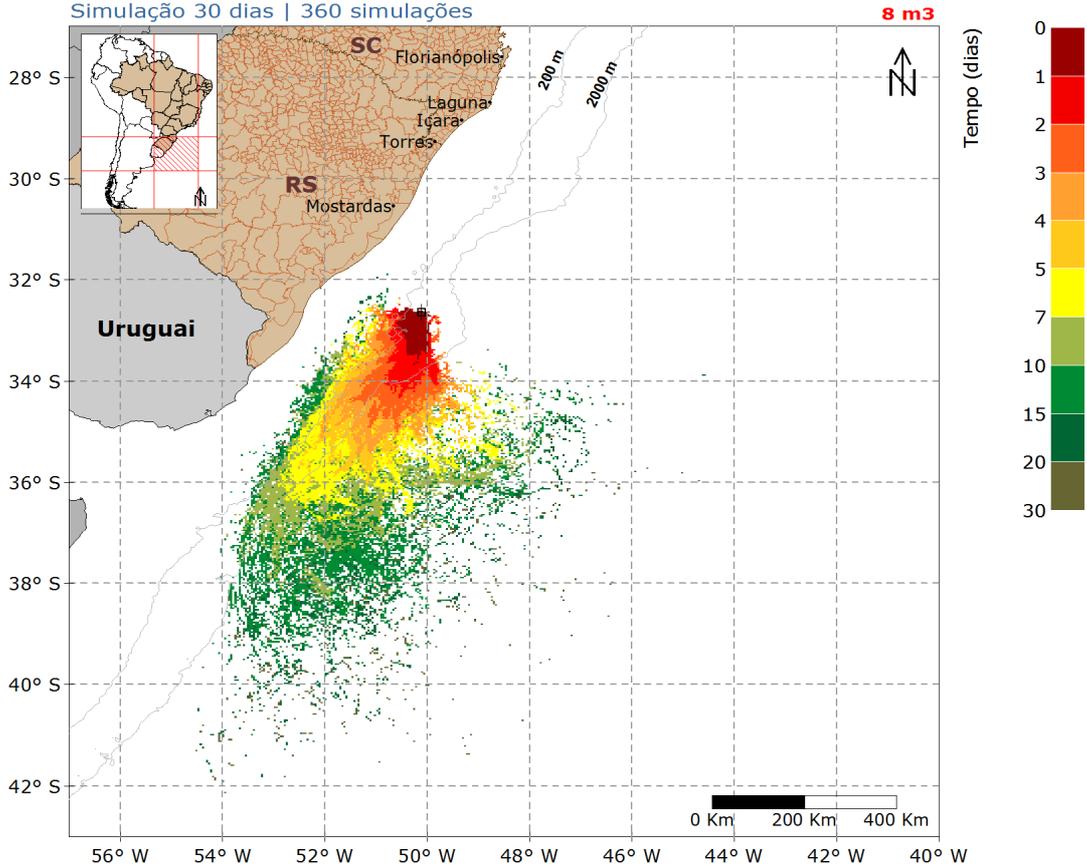


Figura 48: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.

Como observado na Figura 48, as regiões mais afastadas com probabilidade de presença de óleo em superfície podem ser alcançadas em até 30 dias após o vazamento.

#### 3.1.2.1.2 Inverno

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para o vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno encontra-se na Figura 49. O mapa de tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 50.

### Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

#### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Simulação 30 dias | 360 simulações

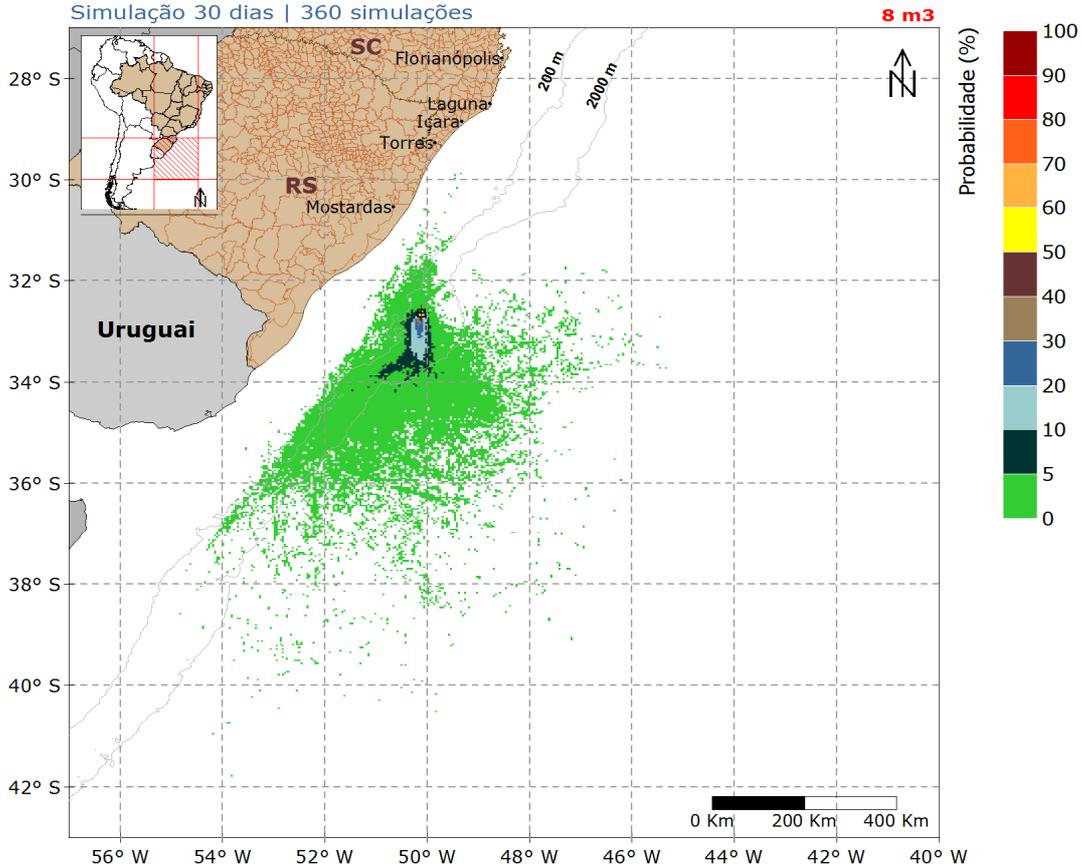


Figura 49: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.

A deriva do óleo neste cenário foi também preferencialmente para o sul do local de vazamento. Entretanto, é observado que há áreas mais ao norte com probabilidade de presença de óleo devido à presença de ventos de sul neste cenário.

Como os outros vazamentos de mesmo volume, as probabilidades superiores a 10% ficaram restritas entre as isóbatas de 200 m e 2000 m.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Simulação 30 dias | 360 simulações

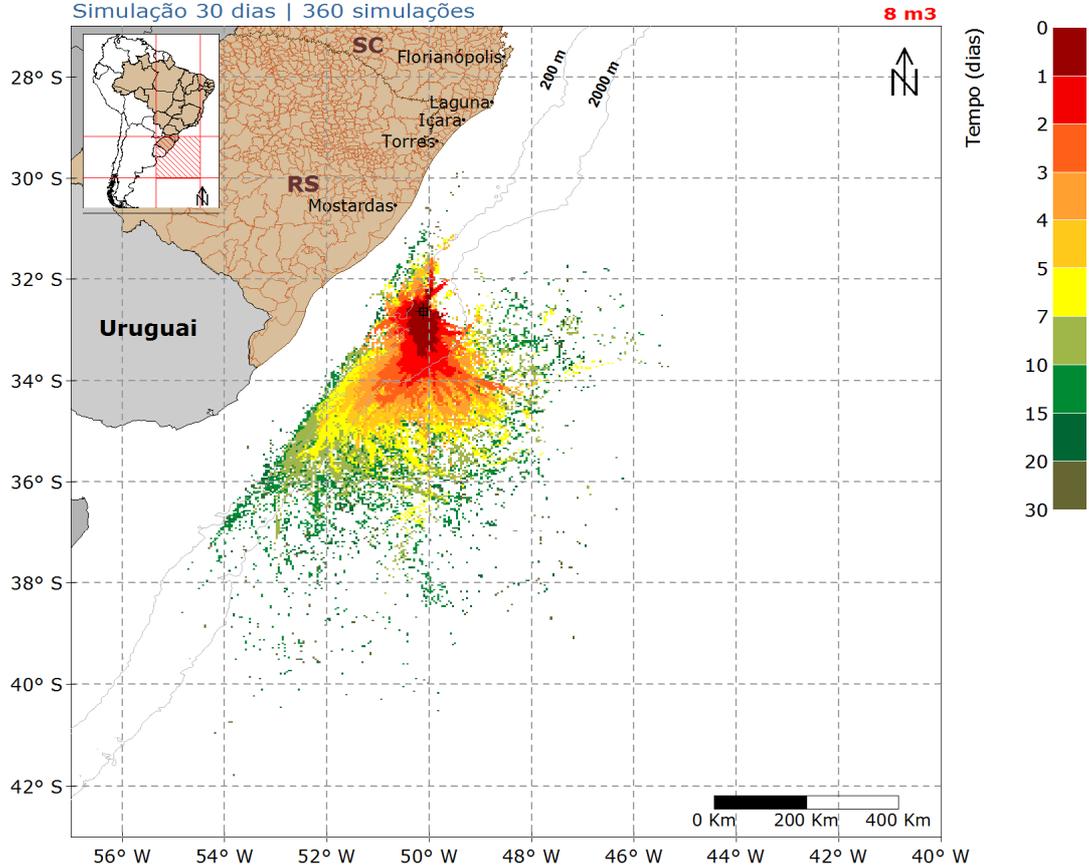


Figura 50: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.

Observa-se que em regiões mais afastadas com probabilidade de presença de óleo em superfície podem ser alcançadas em até 30 dias após o vazamento em superfície.

### 3.1.2.2 Vazamento de 200 m<sup>3</sup>

#### 3.1.2.2.1 Verão

A seguir, são apresentados os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície (6 horas e 720 horas após o início do vazamento) para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>) no

período de verão (Figura 51 e Figura 52). O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 53.

### Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

#### Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

6 horas após o início do vazamento

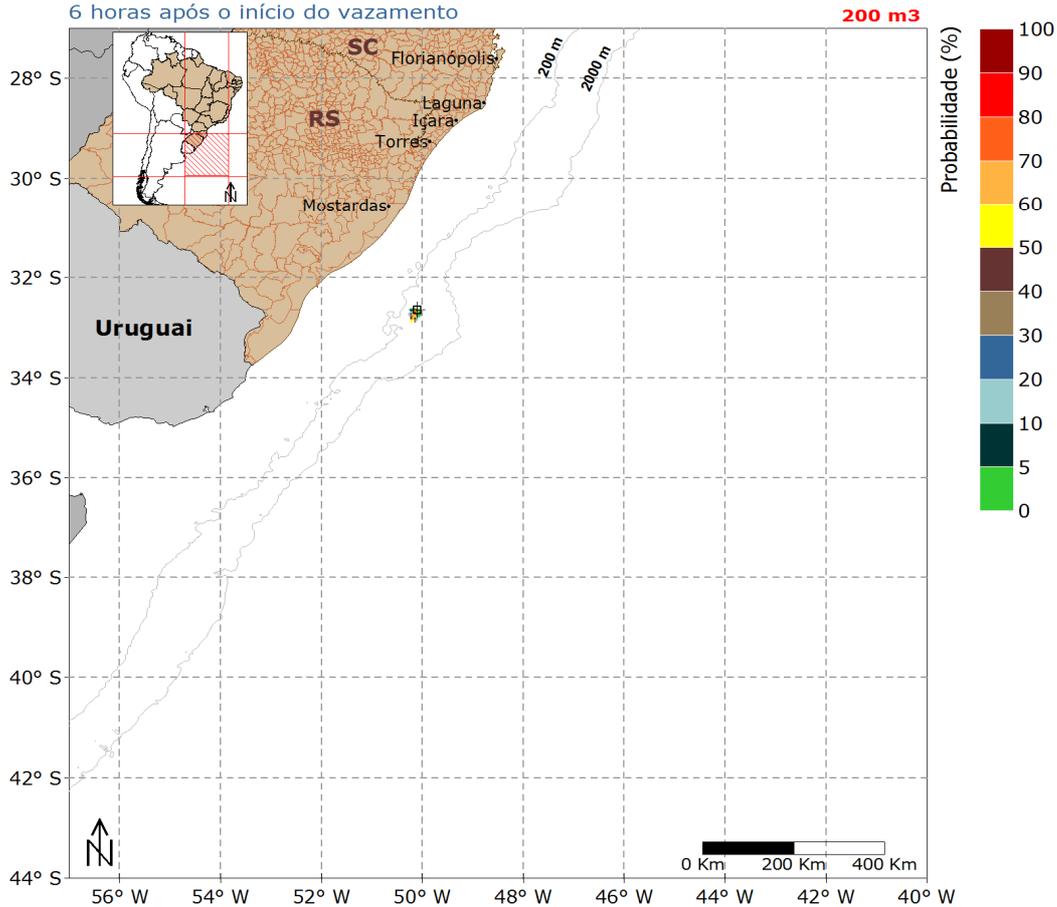


Figura 51: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 6 horas. Poço Pampeano.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Simulação 30 dias | 360 simulações

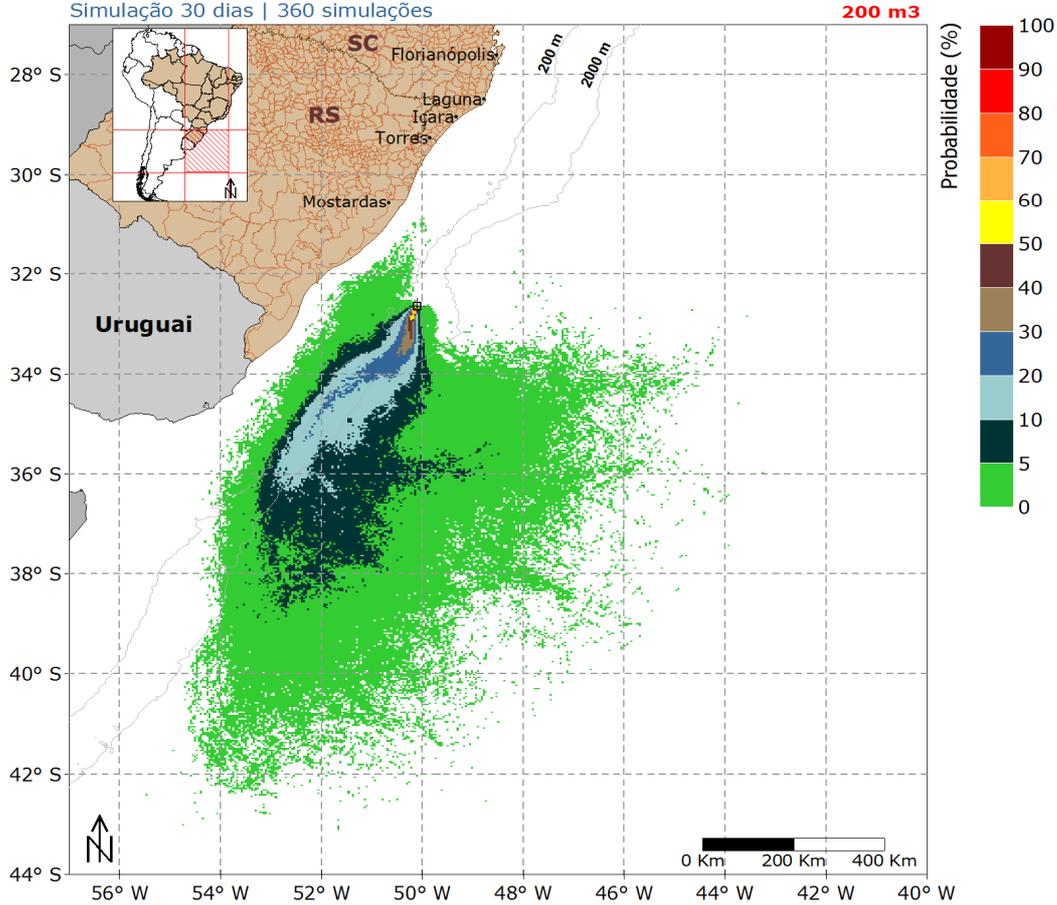


Figura 52: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.

Como ocorrido na simulação de 8 m<sup>3</sup>, neste cenário a deriva do óleo foi para sudoeste do local de vazamento devido a influência da Corrente do Brasil e dos ventos do primeiro quadrante. A área de probabilidade de presença de óleo abrangeu principalmente a região entre as isóbatas de 200 m e 2000 m.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Simulação 30 dias | 360 simulações

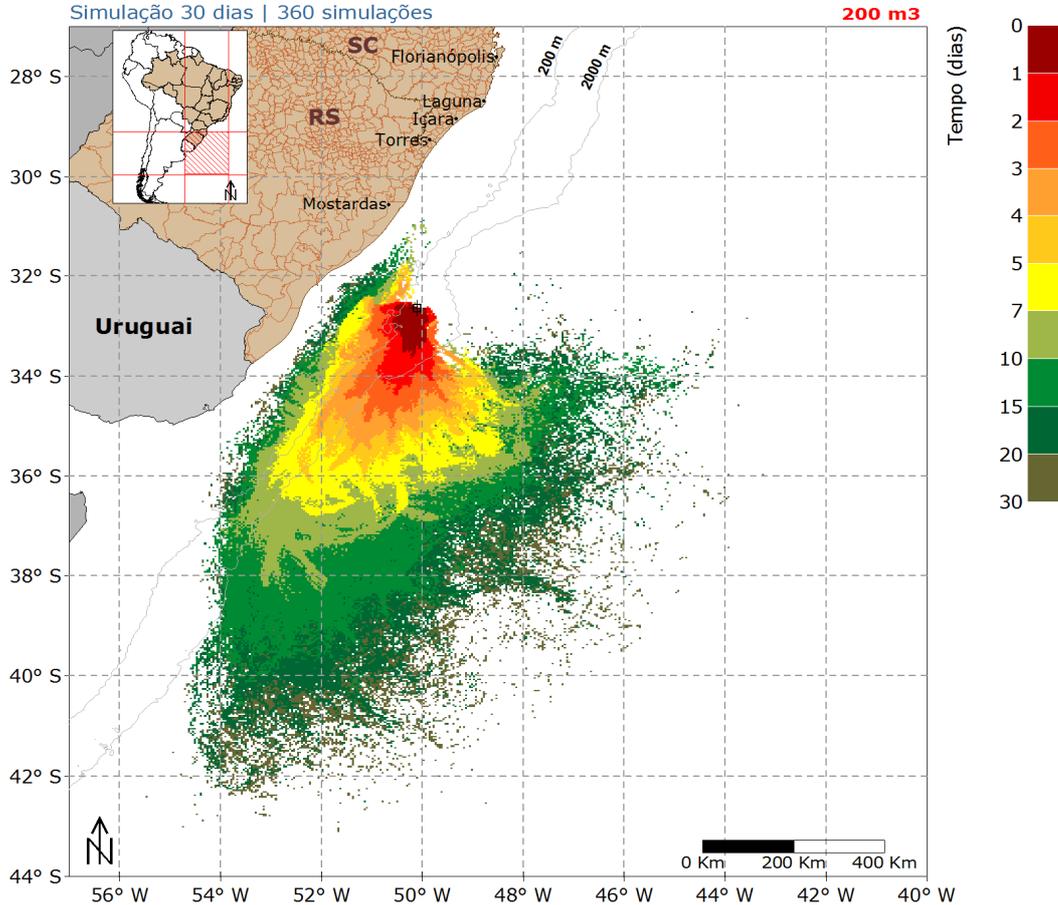


Figura 53: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.

É observado pelo mapa de tempo mínimo (Figura 53) que as regiões mais afastadas do ponto de vazamento com probabilidade de presença de óleo podem ser alcançadas em até 30 dias.

### 3.1.2.2.2 Inverno

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície (6 horas e 720 horas após o início do vazamento) para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>), no período de inverno, são apresentados na Figura 54 e Figura 55, respectivamente. O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 56.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**  
**Modo Probabilístico**



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície  
BM-P-2 | Cenário de Inverno  
6 horas após o início do vazamento

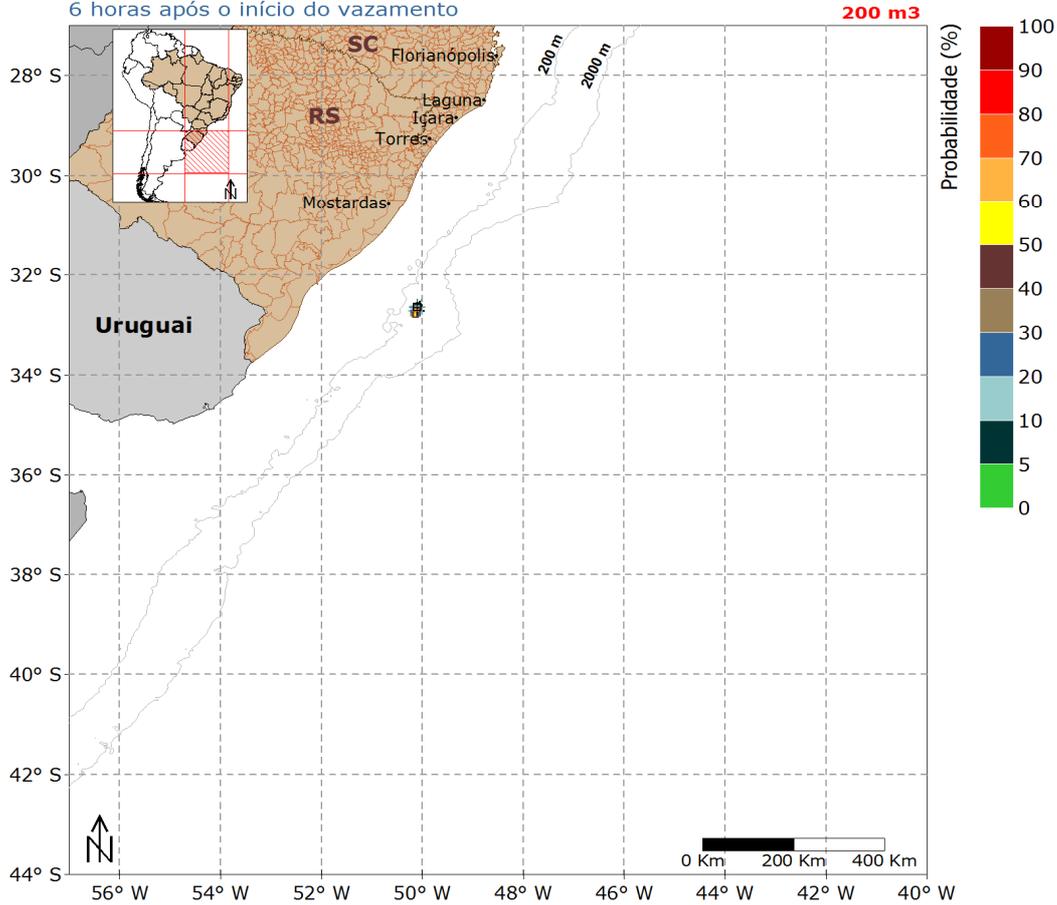


Figura 54: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m³ no período de inverno. Simulação de 6 horas. Poço Pampeano.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Simulação 30 dias | 360 simulações

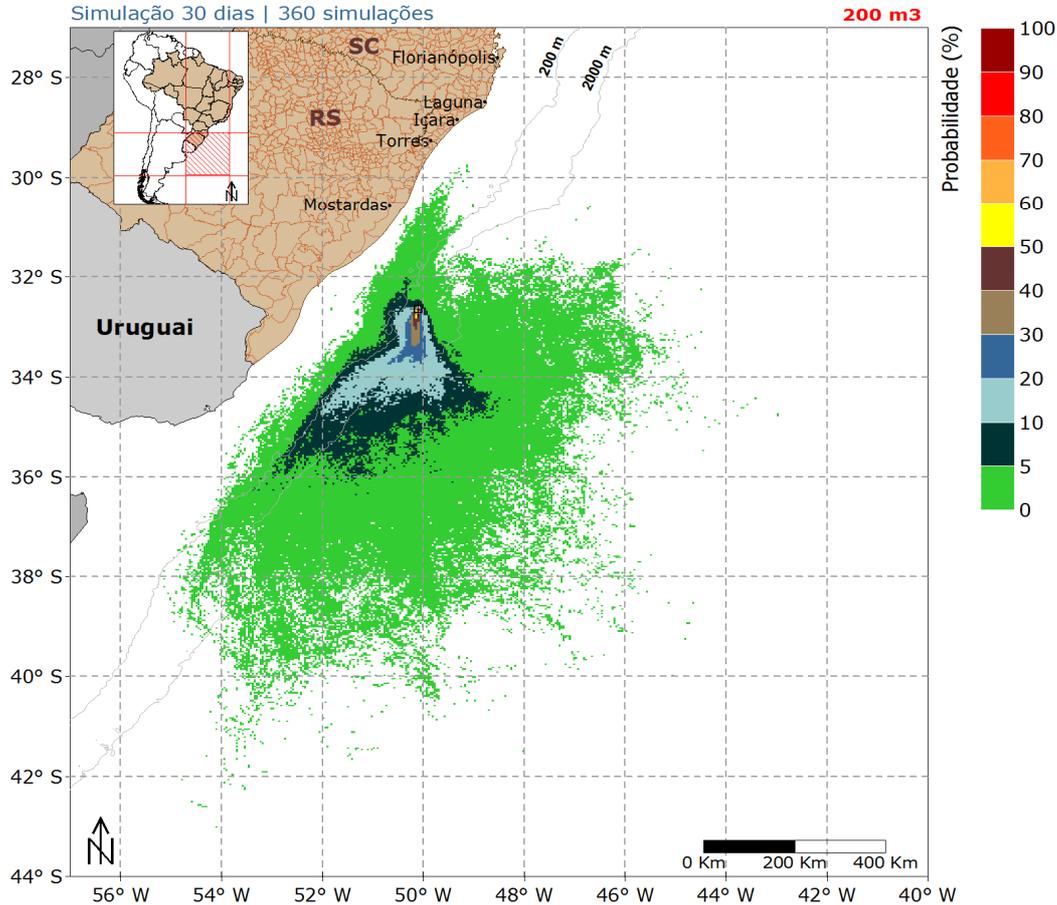


Figura 55: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.

A deriva do óleo neste cenário foi também preferencialmente para o sul do local de vazamento. A área de probabilidade de presença de óleo, comparada com o período de verão, apresenta-se menos alongada em direção ao sul e abrange regiões ao norte do ponto de vazamento. Esse comportamento está associado com os ventos de sul que são mais frequentes nesse cenário.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)

### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Simulação 30 dias | 360 simulações

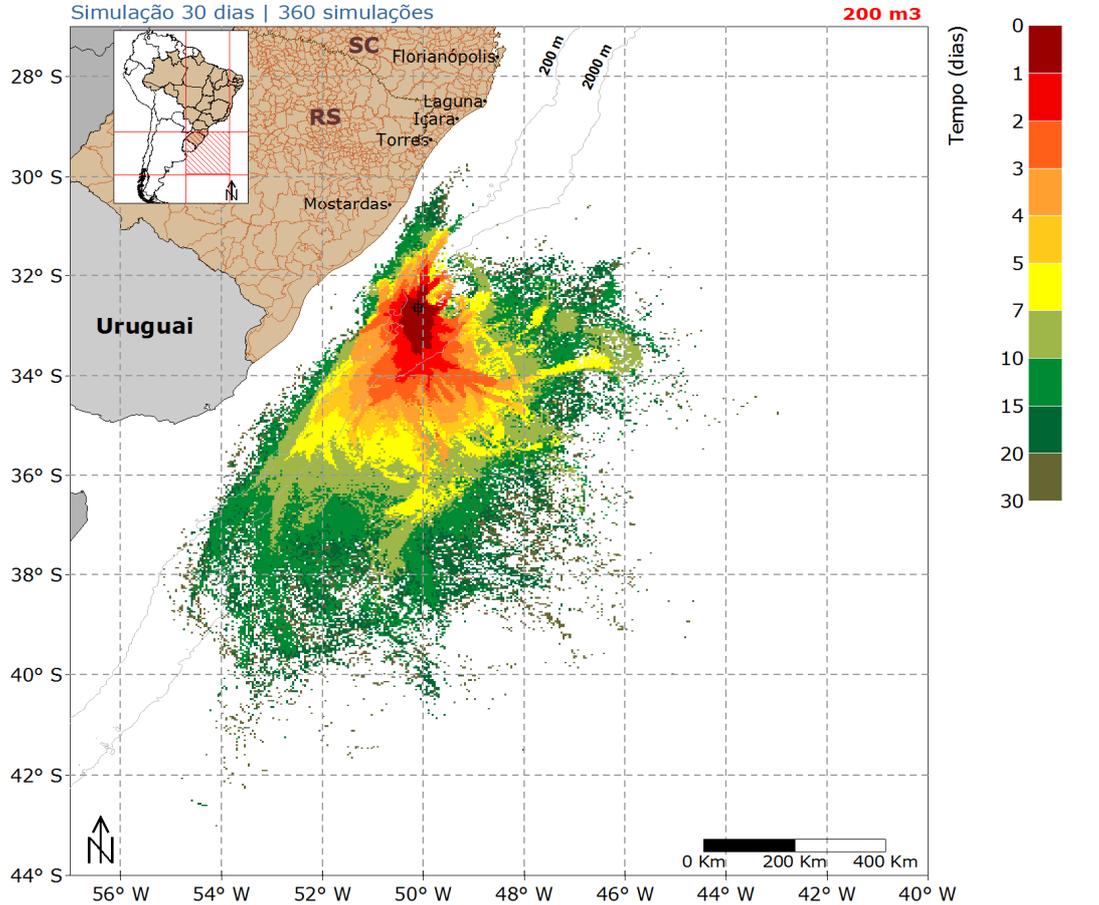


Figura 56: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no período de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias). Poço Pampeano.

O mapa de tempo mínimo neste cenário indica que as regiões com probabilidade de presença de óleo podem ser alcançadas em até 30 dias após o início do vazamento.

### 3.1.2.3 Vazamento de *Blowout*

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações probabilísticas de *blowout* (10.200 m<sup>3</sup>). Para esses cenários foi considerado um vazamento contínuo durante 30 (trinta) dias. O tempo simulado abrange os 30 dias de vazamento e mais 30 dias após o término do mesmo, totalizando 60 dias de simulação.

### 3.1.2.3.1 Verão

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície em 12, 36 e 60 horas após o início do vazamento encontram-se nas Figura 57, Figura 58 e Figura 59, respectivamente.

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para um evento de *blowout* (10.200 m<sup>3</sup>), em período de verão, 60 dias após o início do vazamento, encontra-se na Figura 60. O mapa de tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura 61.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

BM-P-2 | Cenário de Verão

12 horas após o início do vazamento

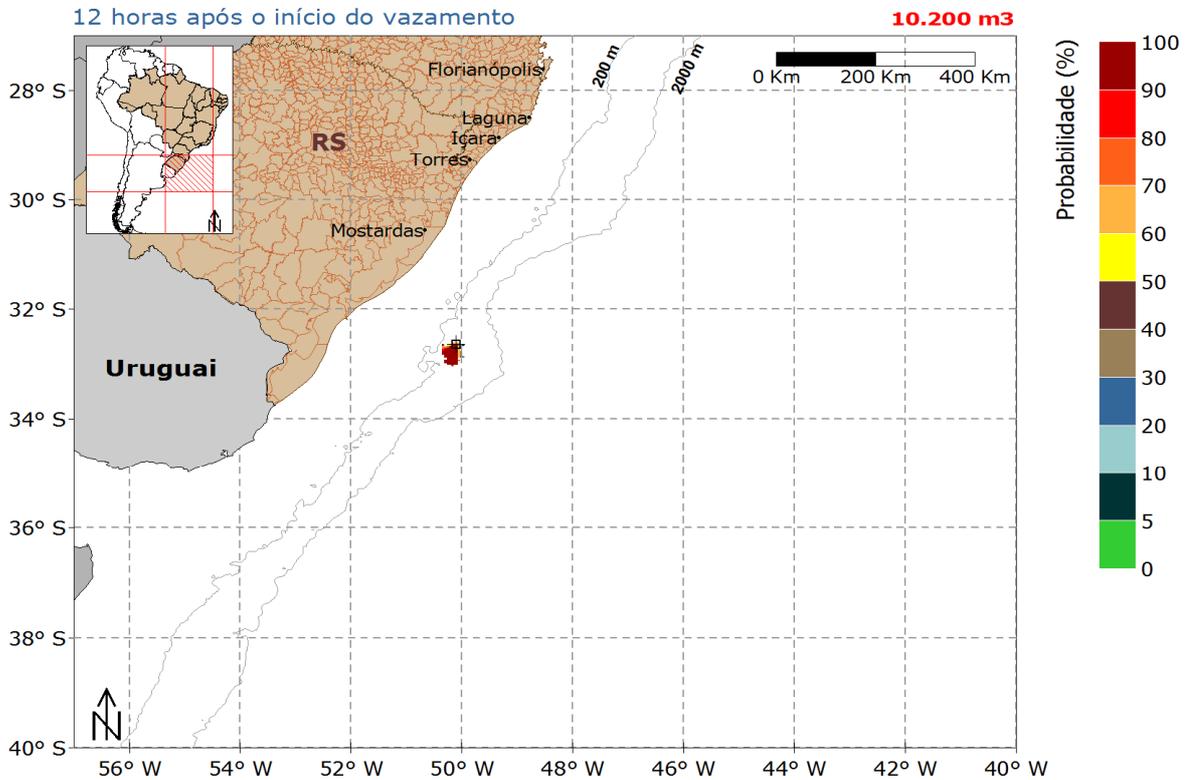


Figura 57: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 12 horas no período de verão. Poço Pampeano.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

BM-P-2 | Cenário de Verão

36 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

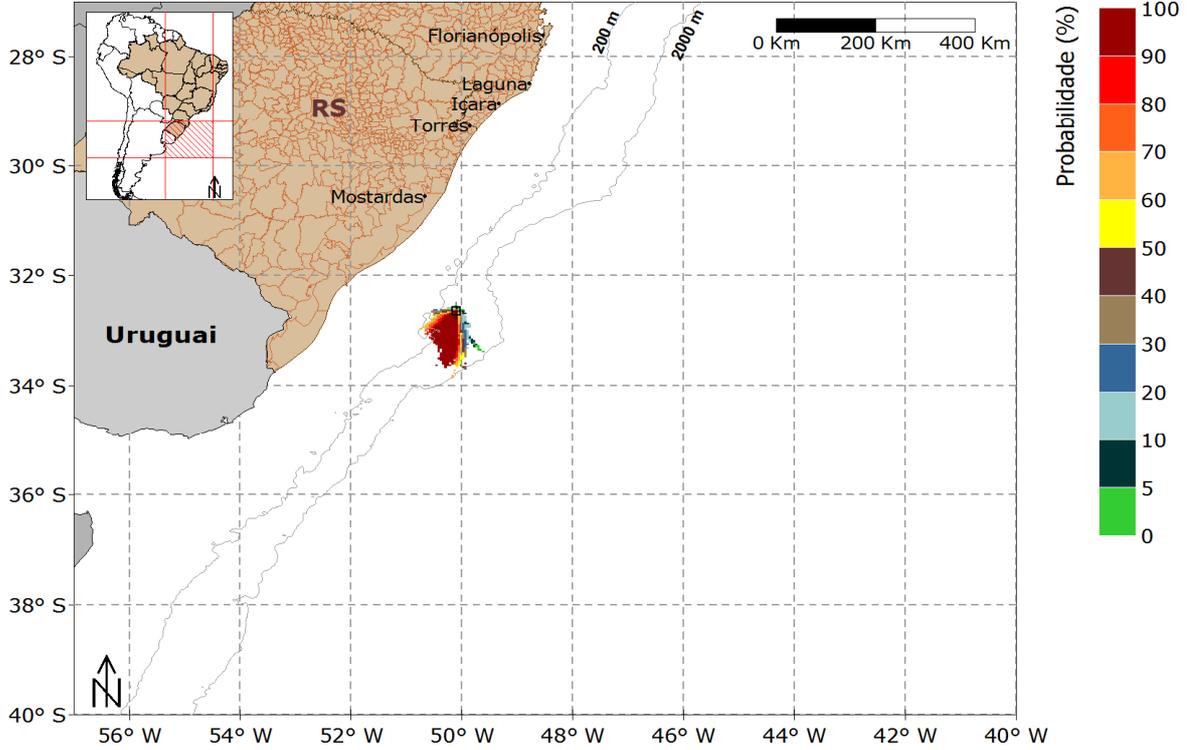


Figura 58: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 36 horas no período de verão. Poço Pampeano.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

BM-P-2 | Cenário de Verão

60 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

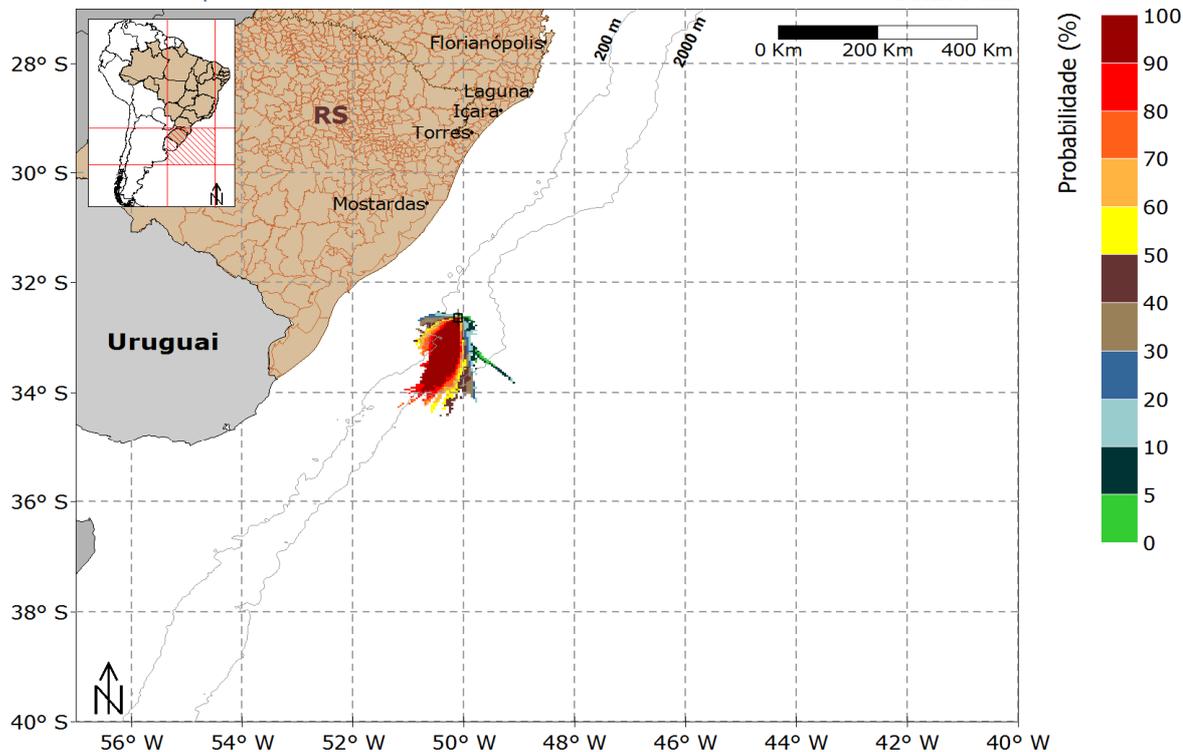


Figura 59: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 60 horas no período de verão. Poço Pampeano.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Blowout 30 dias | Simulação 60 dias | 360 simulações

10.200 m<sup>3</sup>

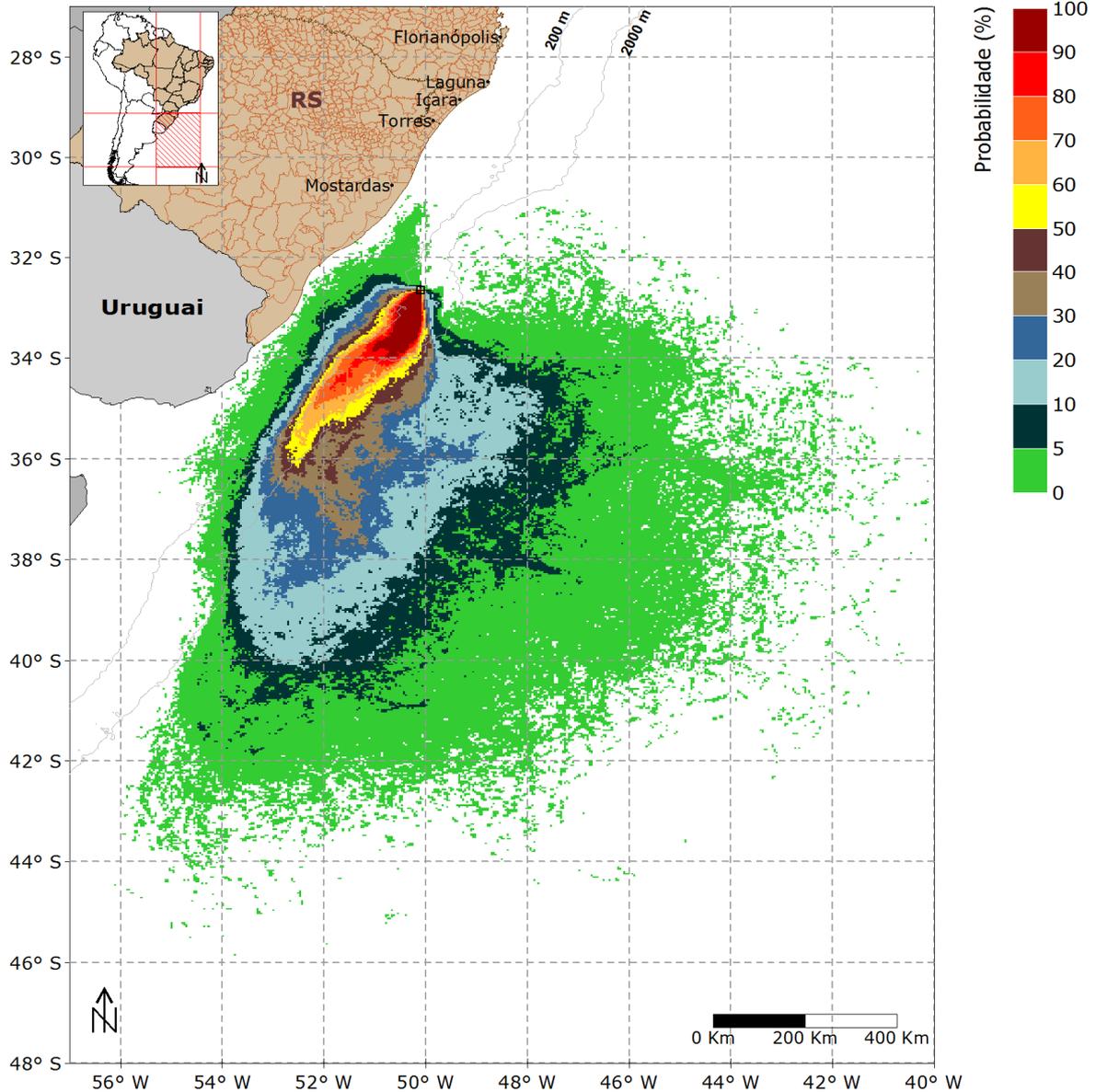


Figura 60: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias no período de verão. Poço Pampeano.

A deriva do óleo ocorreu preferencialmente para sul e sudoeste do local do vazamento, sob a influência da Corrente do Brasil e dos ventos de primeiro quadrante. É observado, com o

aumento da latitude, que a área de probabilidade é deslocada em direção contrária a costa, devido a influência da Confluência Brasil-Malvinas que transporta o óleo em direção leste.

Ressalta-se ainda que houve presença de óleo na costa somente no município de Santa Vitória do Palmar – RS, com uma probabilidade inferior a 0,3%, que representa uma simulação das 360 simulações realizadas. Além disso, nessa simulação, o valor de óleo na costa foi de 0,01% de todo óleo vazado.

Esses baixos valores de probabilidade e massa de óleo na costa estão associados com o o efeito barreira da frente Corrente Costeira do Brasil – Corrente do Brasil, descrito anteriormente.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Verão

Blowout 30 dias | Simulação 60 dias | 360 simulações

10.200 m<sup>3</sup>

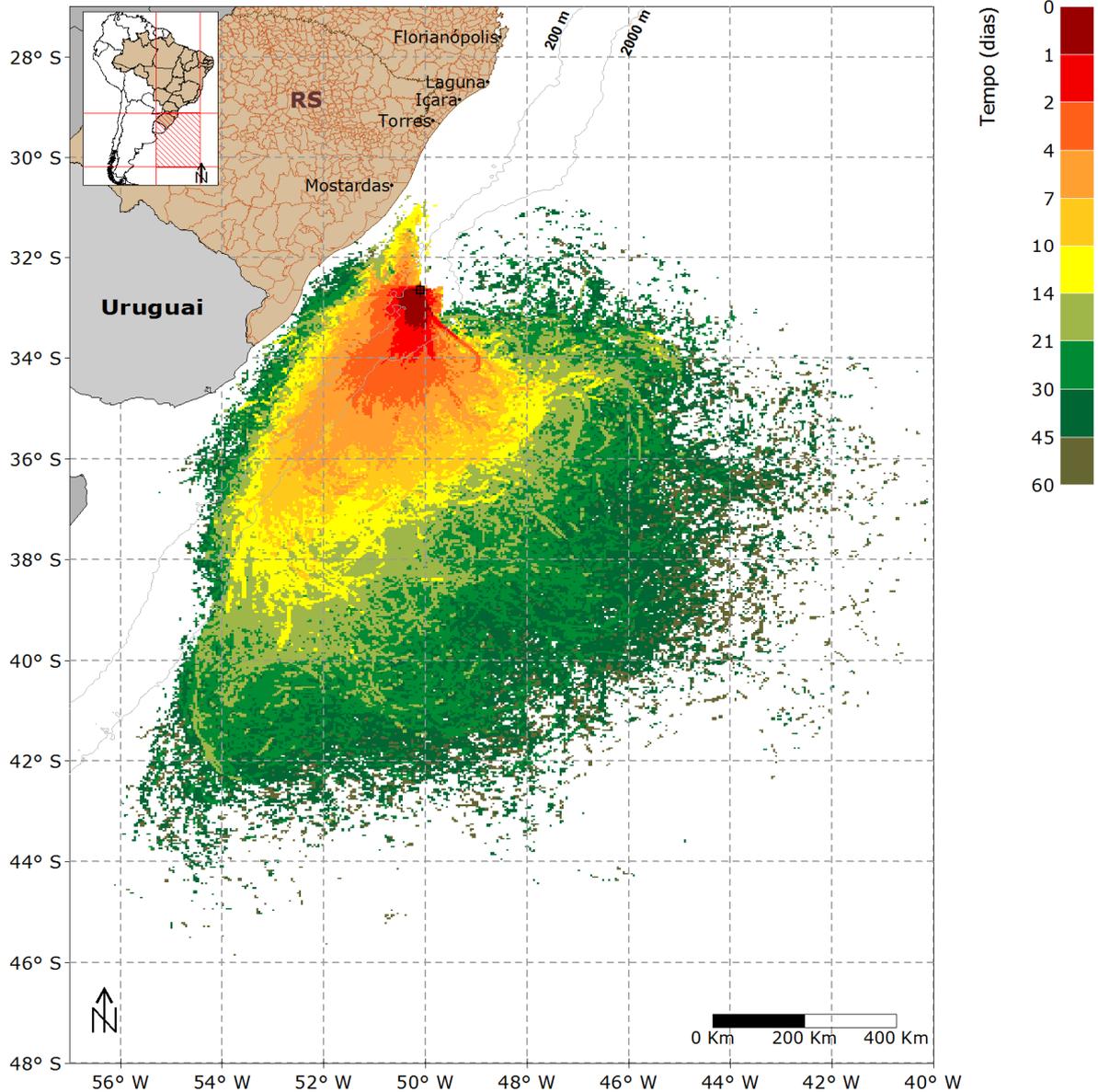


Figura 61: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de 30 dias no período de verão. Poço Pampeano.

É observado que os locais na costa onde há aproximação da área de probabilidade o tempo mínimo de chegada de óleo é de até 45 dias.

### 3.1.2.3.2 Inverno

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície em 12, 36 e 60 horas após o início do vazamento encontram-se nas Figura 62, Figura 63 e Figura 64, respectivamente.

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para um evento de *blowout* (10.200 m<sup>3</sup>), em período de inverno, 60 dias após o início do vazamento, encontra-se na Figura 65. O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 66.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Modo Probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

BM-P-2 | Cenário de Inverno

12 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

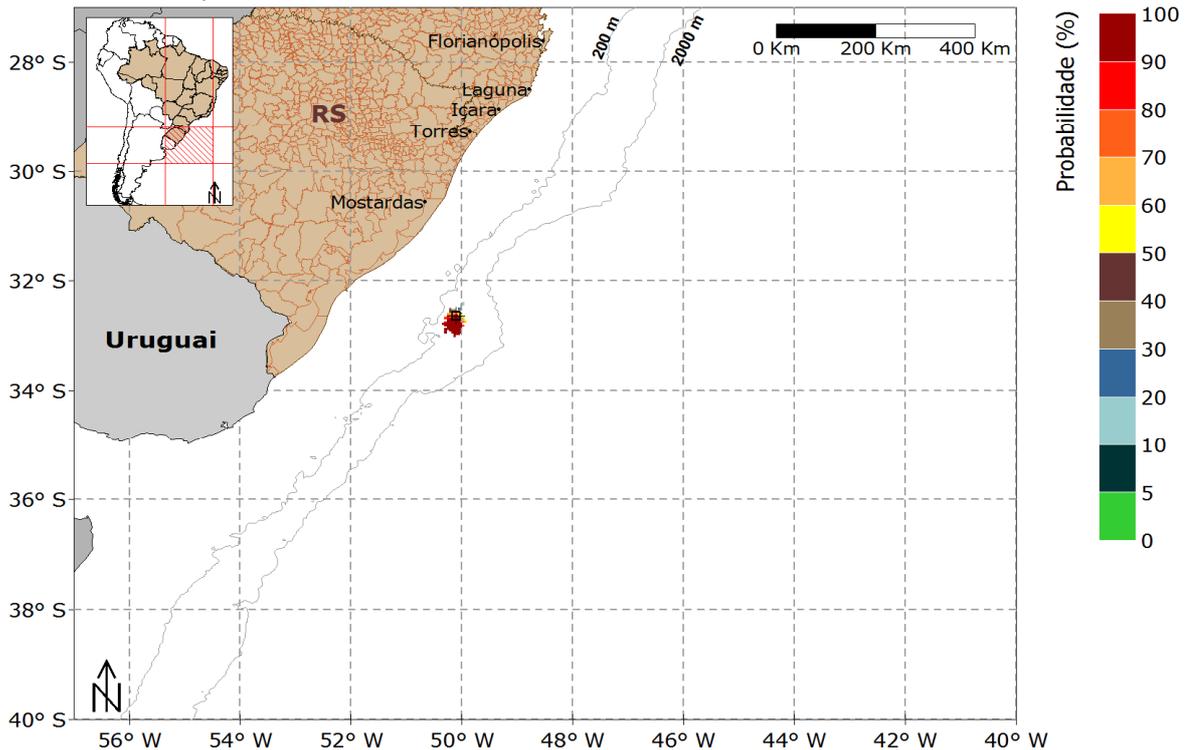


Figura 62: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 12 horas no período de inverno. Poço Pampeano.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

BM-P-2 | Cenário de Inverno

36 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

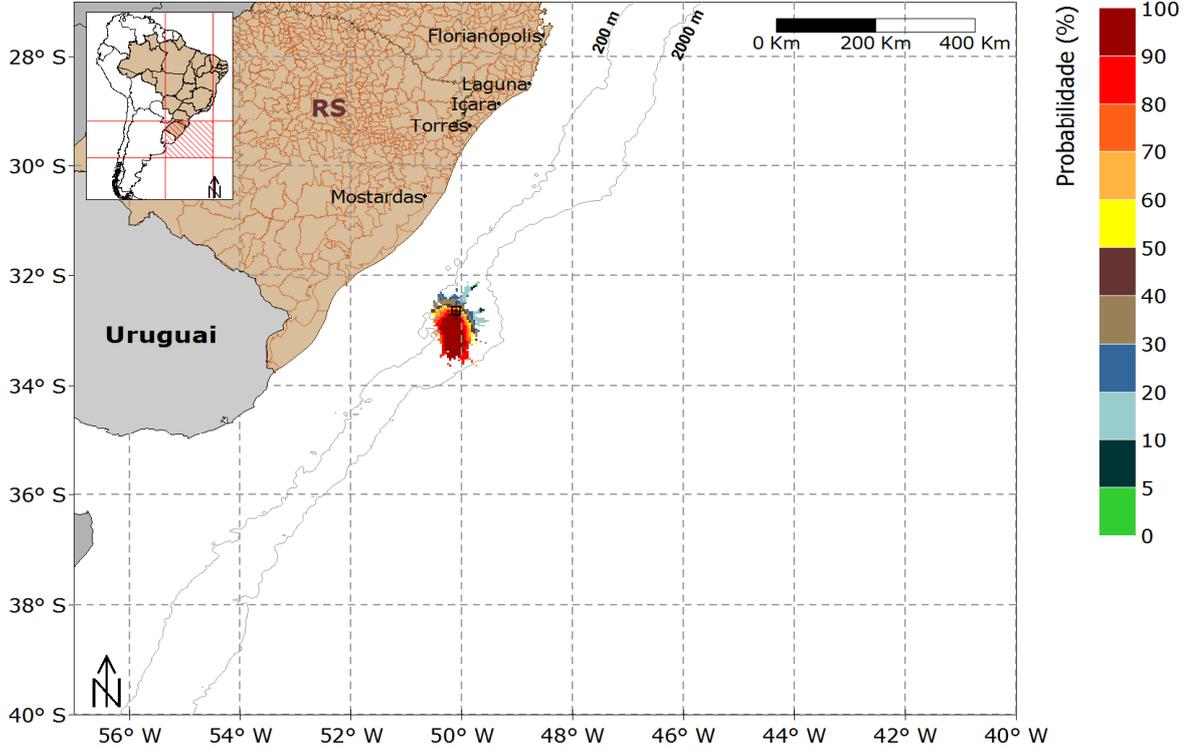


Figura 63: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 36 horas no período de inverno. Poço Pampeano.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

BM-P-2 | Cenário de Inverno

60 horas após o início do vazamento

10.200 m<sup>3</sup>

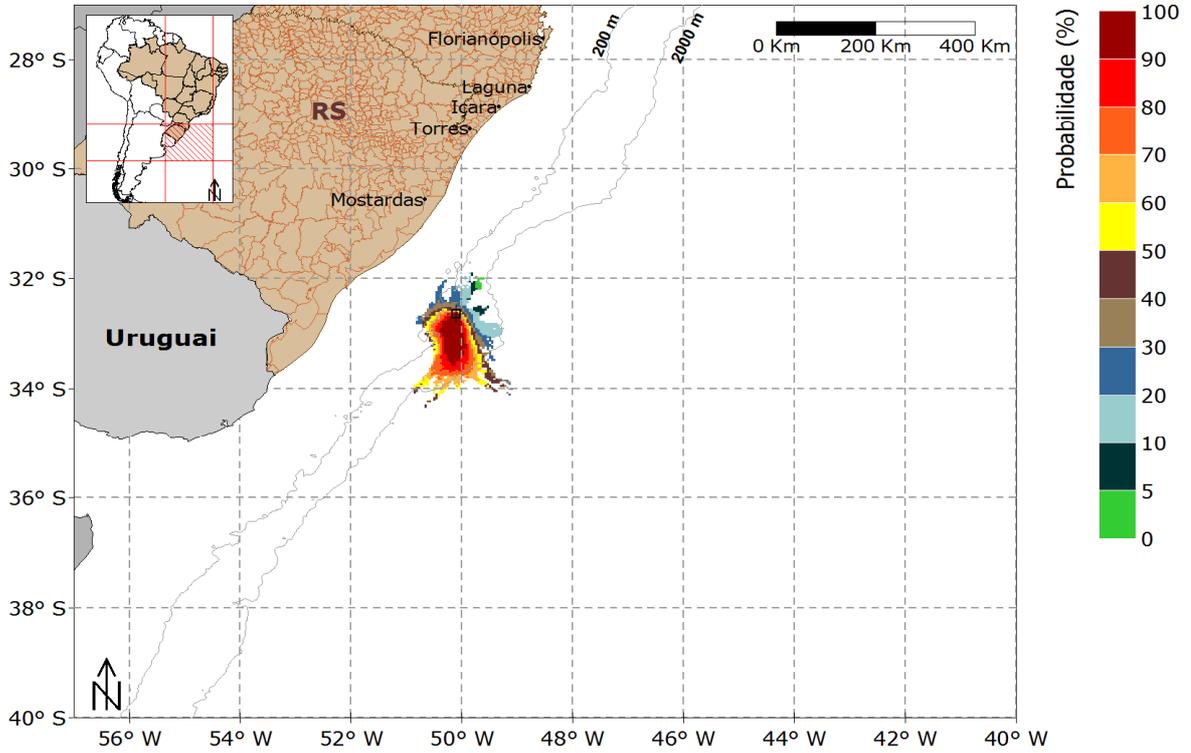


Figura 64: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para uma simulação de 60 horas no período de inverno. Poço Pampeano.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Blowout 30 dias | Simulação 60 dias | 360 simulações

10.200 m<sup>3</sup>

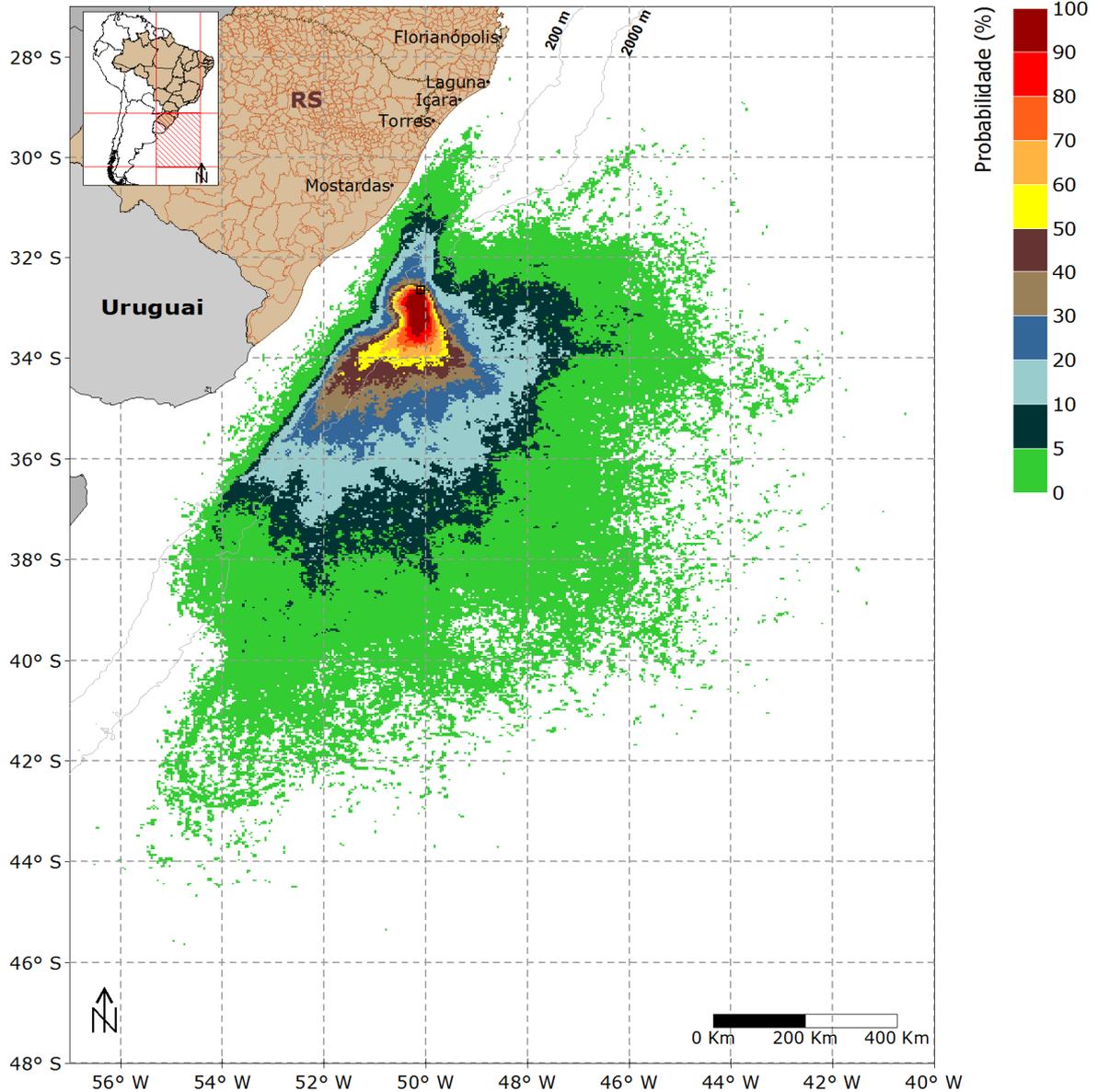


Figura 65: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias no período de inverno. Poço Pampeano.

A deriva do óleo neste cenário foi também preferencialmente para o sul do local de vazamento, porém diferentemente do período de verão, é observado que há áreas mais ao norte com

probabilidade de presença de óleo, até próximo de Florianópolis, devido a presença de ventos de sul neste cenário.

Ressalta-se que não houve presença de óleo na costa, apesar de algumas localidades a área de probabilidade se aproximar bastante, como o município de Florianópolis (Figura 65). Como no verão, acredita-se que esse fato está relacionado à frente Corrente Costeira do Brasil – Corrente do Brasil, com um possível efeito barreira.

## Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)



### Modo Probabilístico

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em superfície

BM-P-2 | Cenário de Inverno

Blowout 30 dias | Simulação 60 dias | 360 simulações

10.200 m<sup>3</sup>

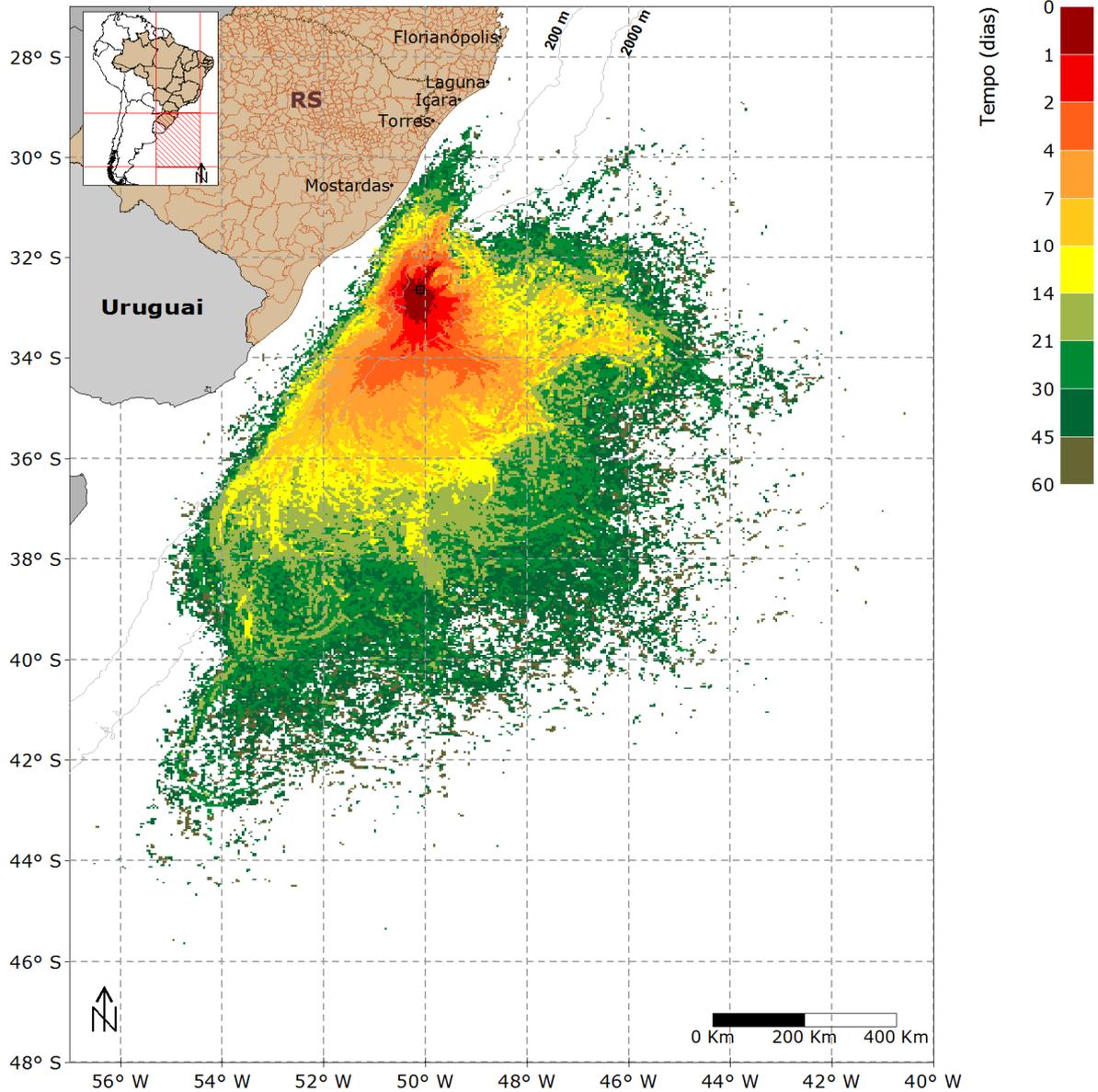


Figura 66: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de 30 dias, no período de inverno.

É observado que os locais onde há aproximação da área de probabilidade o tempo mínimo de chegada de óleo é de até 60 dias.

## 3.2. Resultados Determinísticos

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas foram eleitas, para as duas condições sazonais (verão e inverno), as trajetórias que representaram a deriva do óleo em condições meteo-oceanográficas mais frequentes da região, para cada um dos pontos de vazamento.

O modo determinístico para a situação crítica não foi apresentado em nenhum dos pontos de vazamento, pois não houve chegada de óleo no poço Guarani, e os valores máximos, considerando as duas condições ambientais, de, probabilidade e massa de óleo na costa no poço Pampeano apresentaram valores inferiores a 0,55% e 0,07%, respectivamente.

Para os casos de condições meteo-oceanográficas mais frequentes, foi identificado um domínio de correntes com direção S-SW no regime hidrodinâmico da região nas duas condições sazonais, isto se deve à presença da Corrente do Brasil. No regime de ventos, o período de verão é caracterizado pela maior frequência de ventos do primeiro quadrante, enquanto no período de inverno, existe a predominância de ventos de sul.

Com o intuito de representar da melhor forma as duas condições sazonais citadas anteriormente, foi conduzida uma investigação no vento, de forma a se obter o período de 60 dias que tivesse os ventos característicos de cada cenário ambiental (Figura 67). Este período é determinado após a varredura da série de dados, em janelas de 60 dias. Assim, extrai-se o período de 60 dias consecutivos, com maior percentual de ventos característicos de cada condição sazonal.

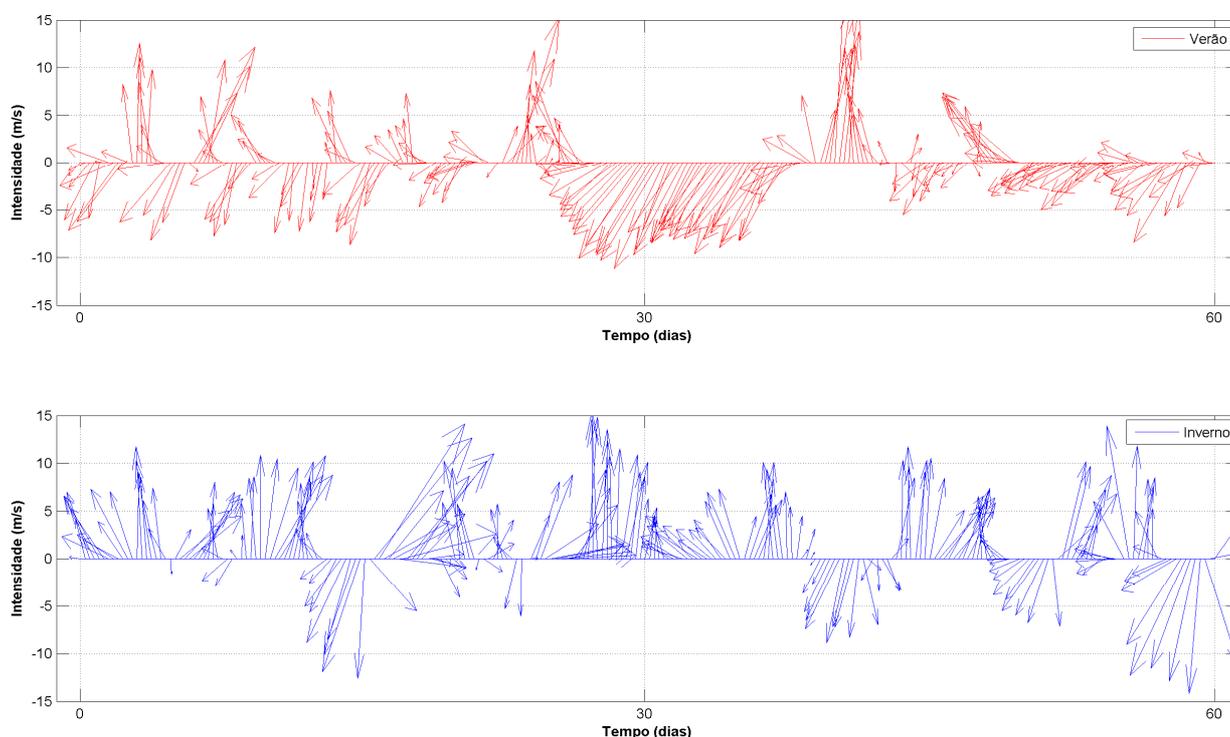


Figura 67: Vento utilizado nas simulações de condições meteo-oceanográficas.

### 3.2.1 Guarani

#### 3.2.1.1 Condições Meteo-Oceanográficas Frequentes

Nos itens a seguir serão apresentadas duas trajetórias em condições meteo-oceanográficas frequentes, sendo uma no período de verão e outra no inverno, para um vazamento de *blowout* (10.200 m<sup>3</sup>) contínuo por 30 dias, simulação de 60 dias.

##### 3.2.1.1.1 Verão

A deriva do óleo em condições meteo-oceanográficas frequentes de verão será apresentada da Figura 68 à Figura 77.

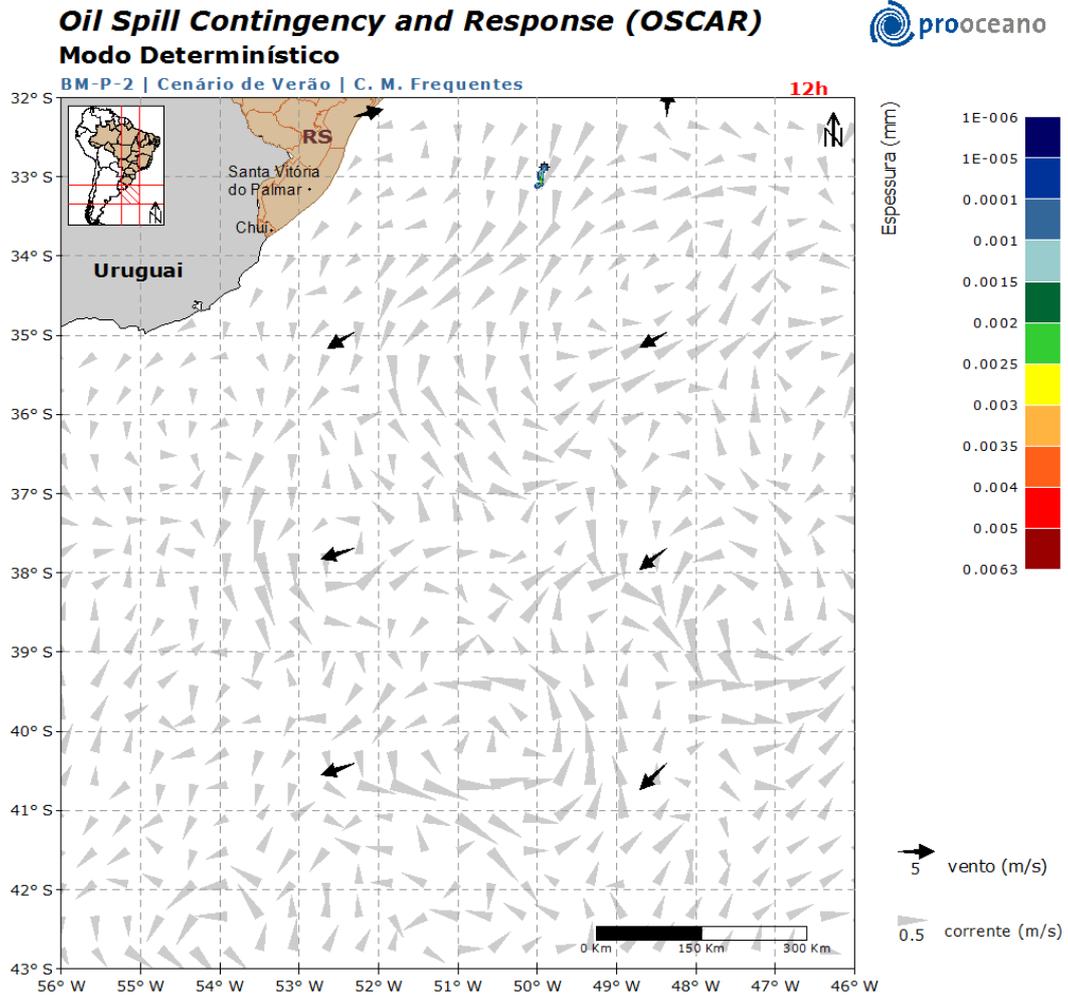


Figura 68: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

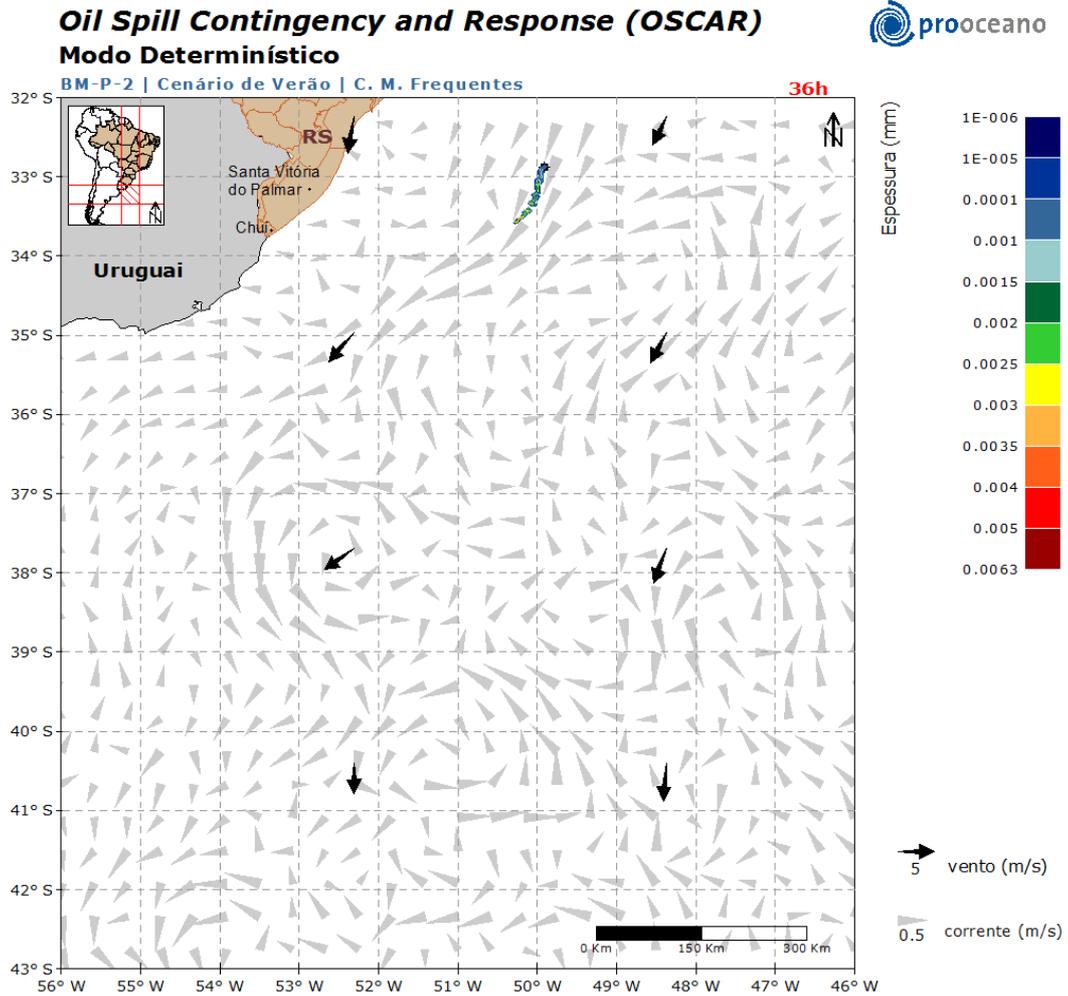


Figura 69: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

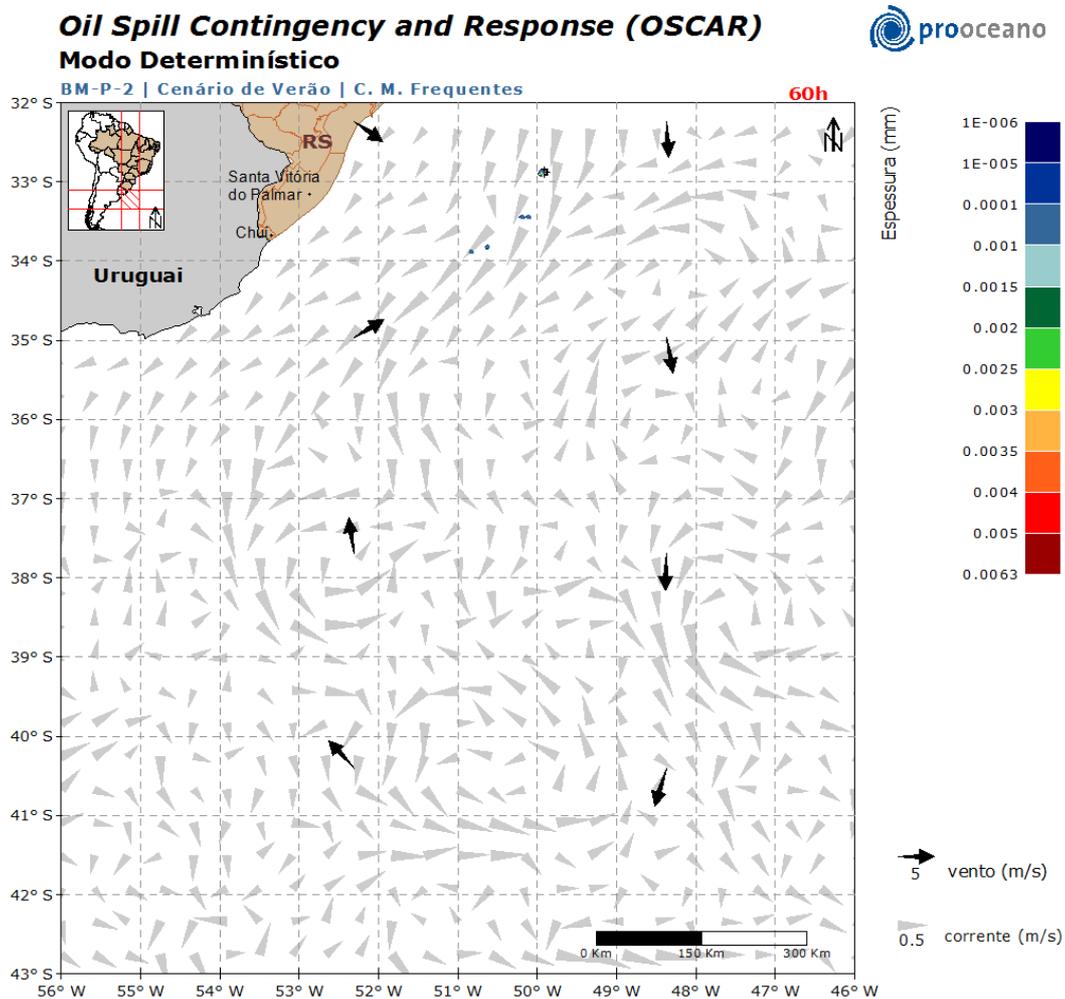


Figura 70: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

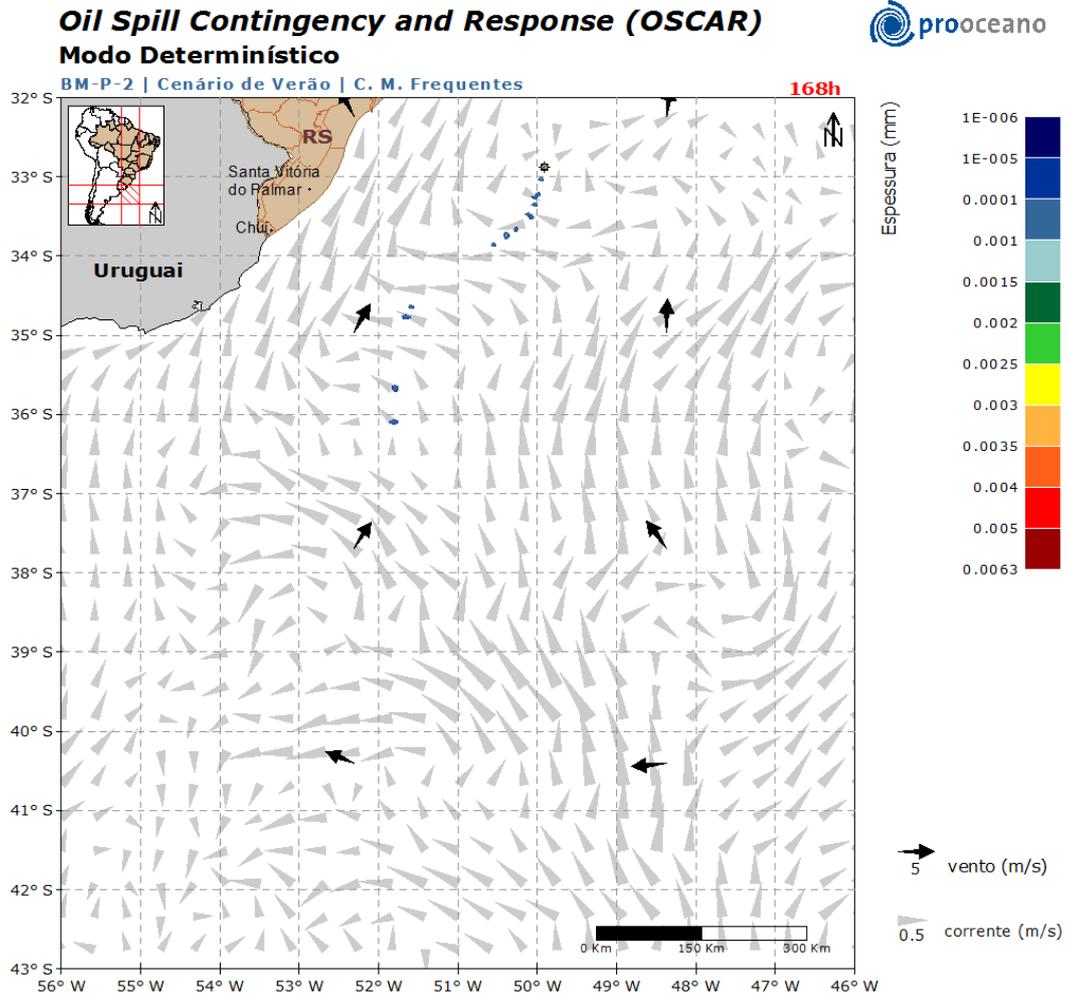


Figura 71: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

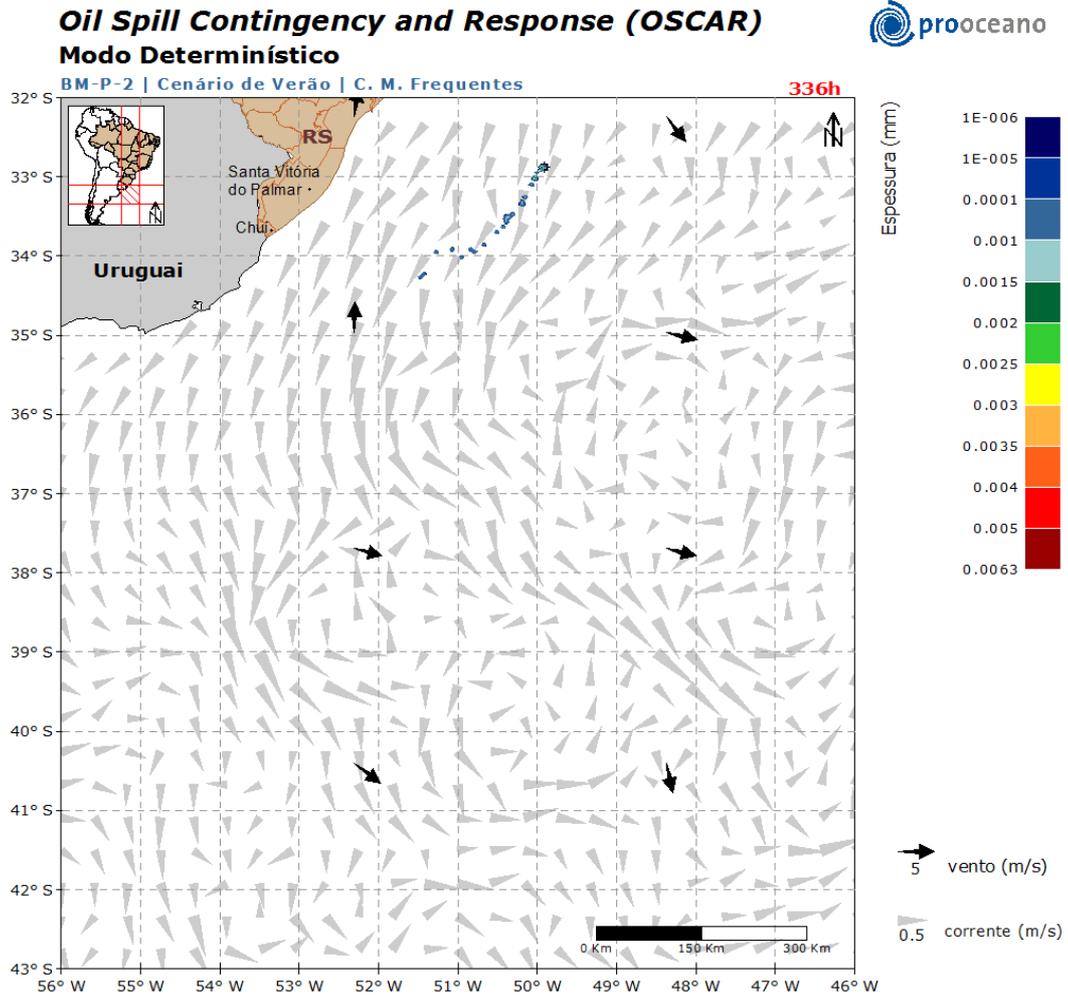


Figura 72: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

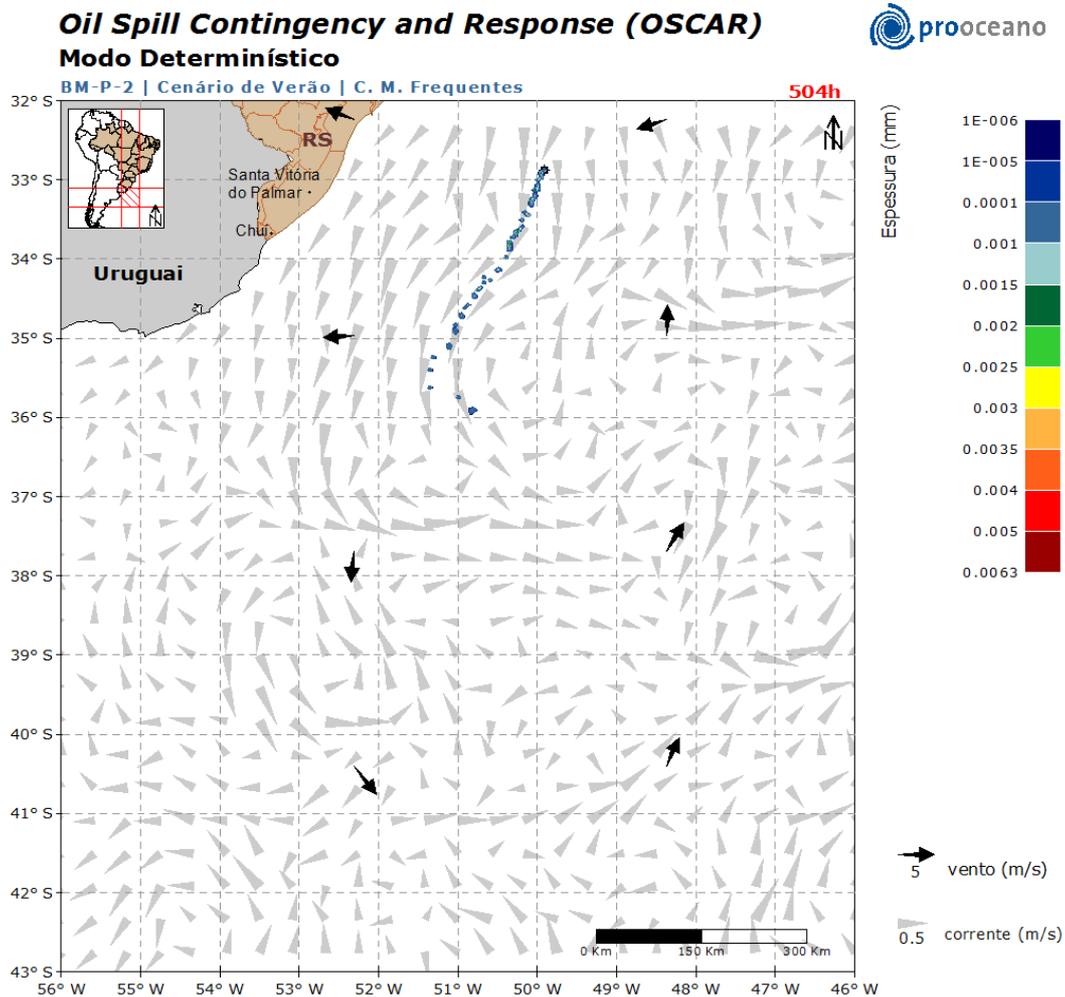


Figura 73: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

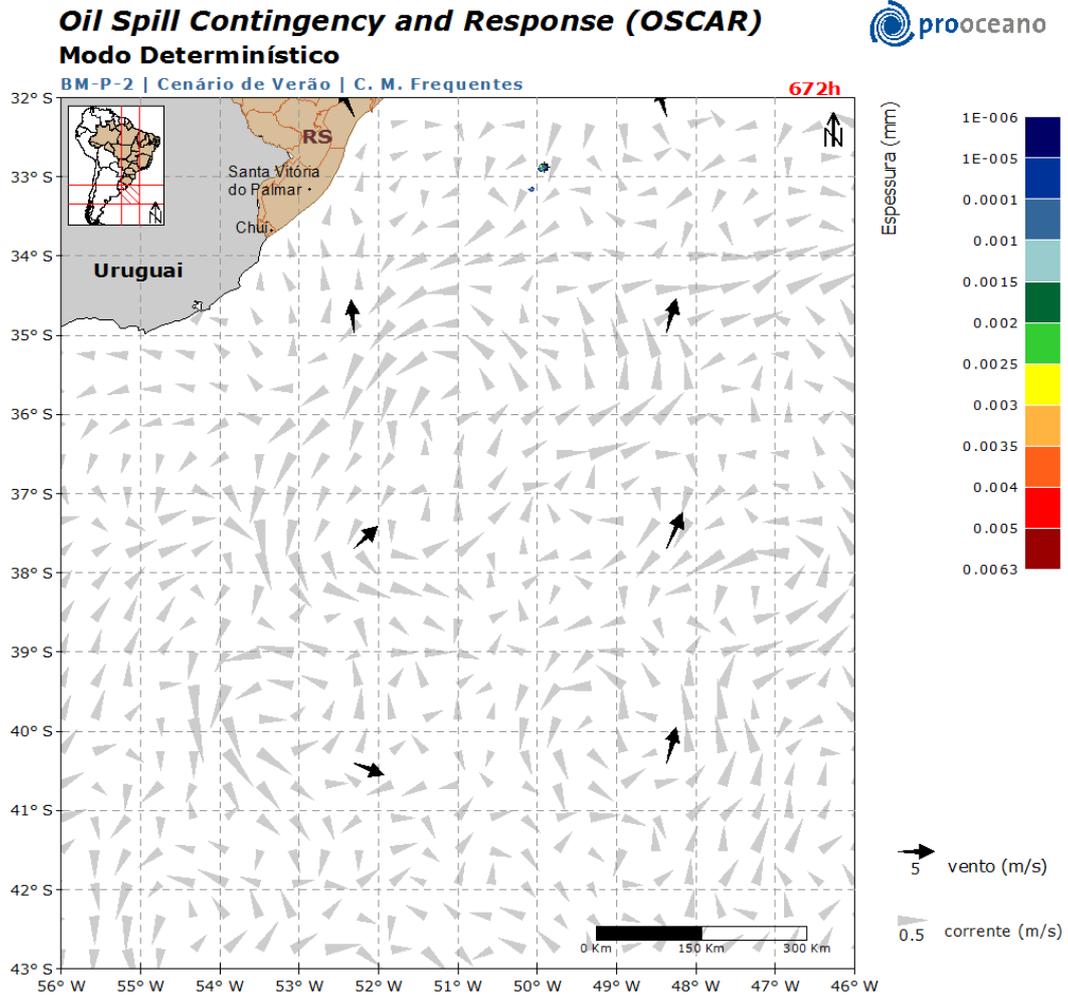


Figura 74: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

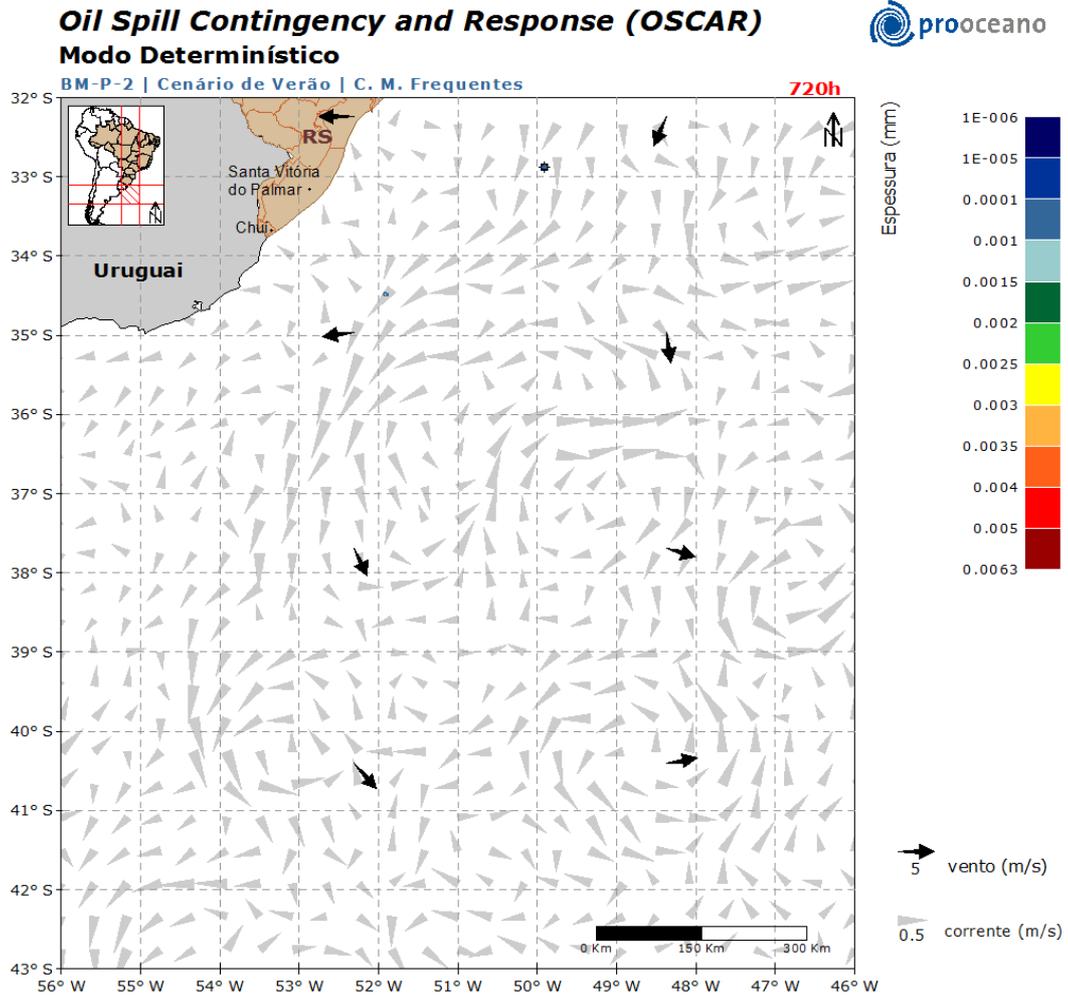


Figura 75: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

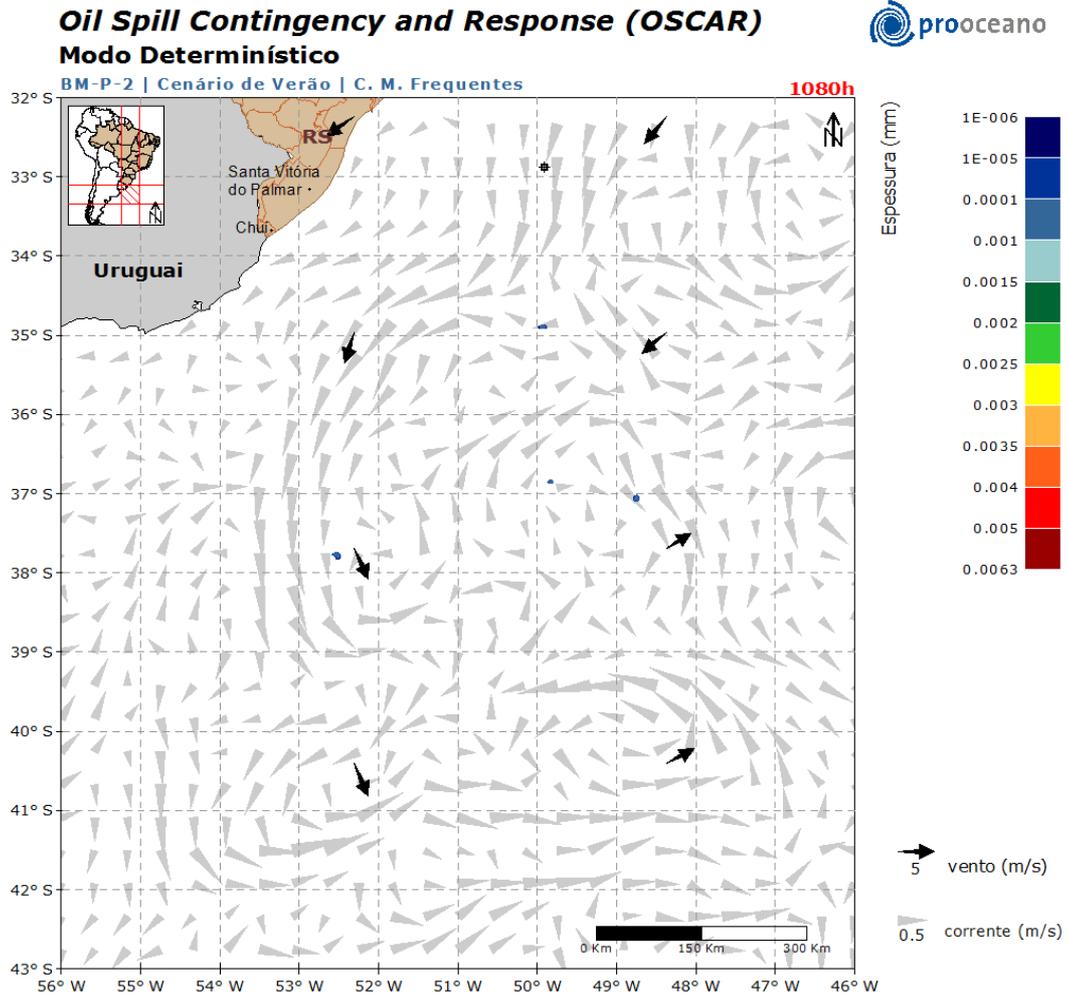


Figura 76: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

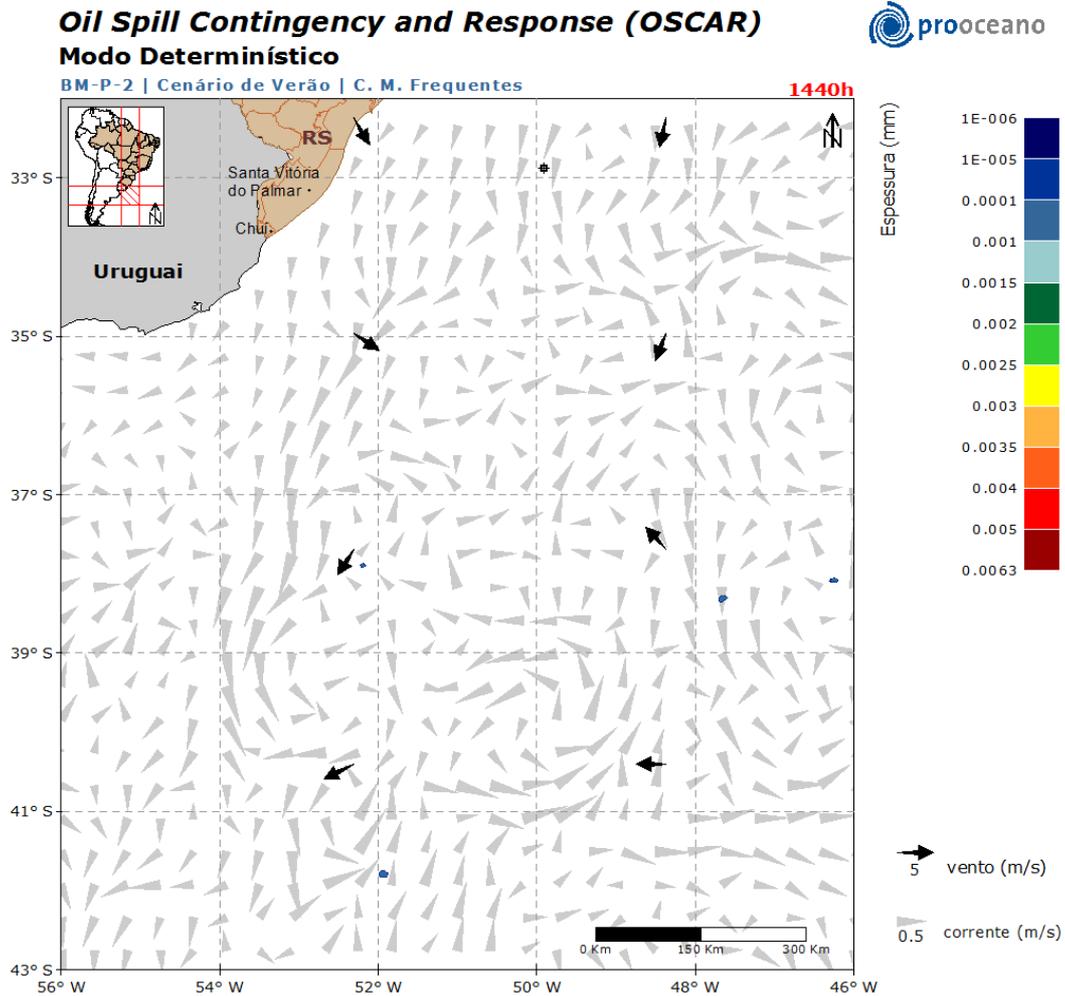


Figura 77: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

A deriva do óleo ocorreu inicialmente rumo a sudoeste, devido a influência da Corrente do Brasil. A partir de 672 horas até o final da simulação nota-se que somente em algumas regiões é possível observar óleo na superfície. Isto ocorre porque os processos de intemperismo atuam no óleo diminuindo a massa na superfície.

No gráfico (Figura 78), a seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo durante a simulação.

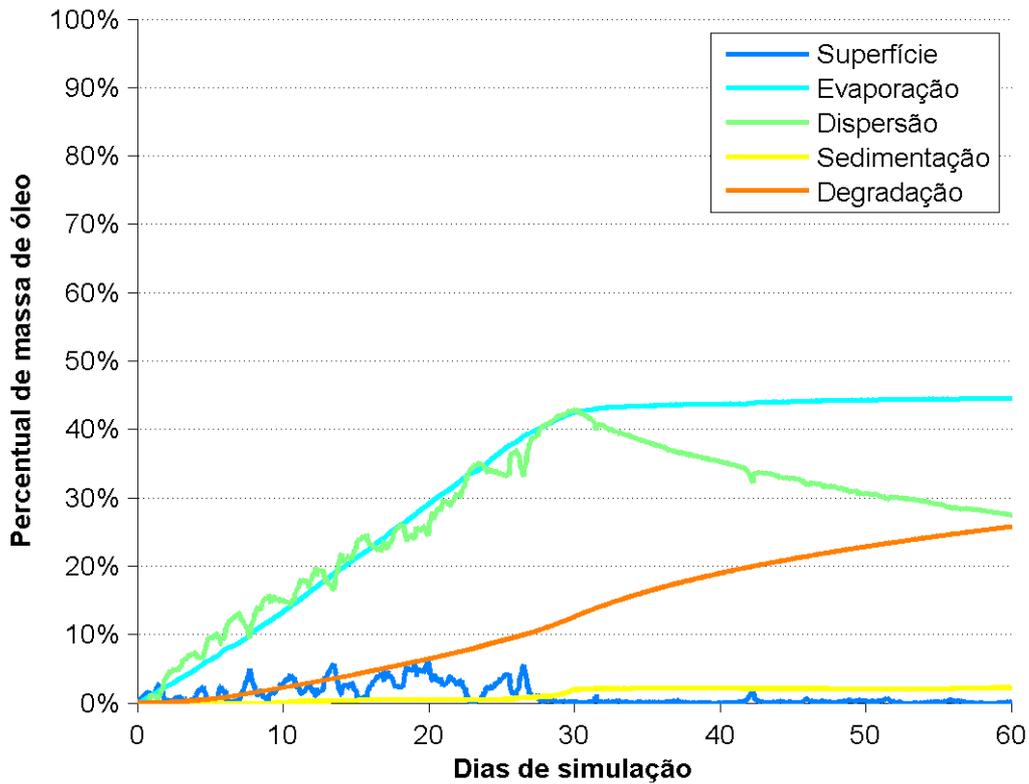


Figura 78: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de verão. Volume de blowout (10.200 m³). Poço Guarani.

A retirada de massa de óleo por evaporação foi o processo mais efetivo ao longo da simulação removendo, aproximadamente, 44% da massa, enquanto a degradação representou aproximadamente 26% da perda de massa. A dispersão, isto é, o óleo que vai para a coluna d'água, retirou da superfície da água 27,4% ao final da simulação. A massa de óleo acumulado no sedimento foi de 2% e houve menos de 1% óleo na superfície da água ao final da simulação

### 3.2.1.1.2 Inverno

A deriva do óleo em condições meteo-oceanográficas frequentes de inverno será apresentada da Figura 79 à Figura 80.

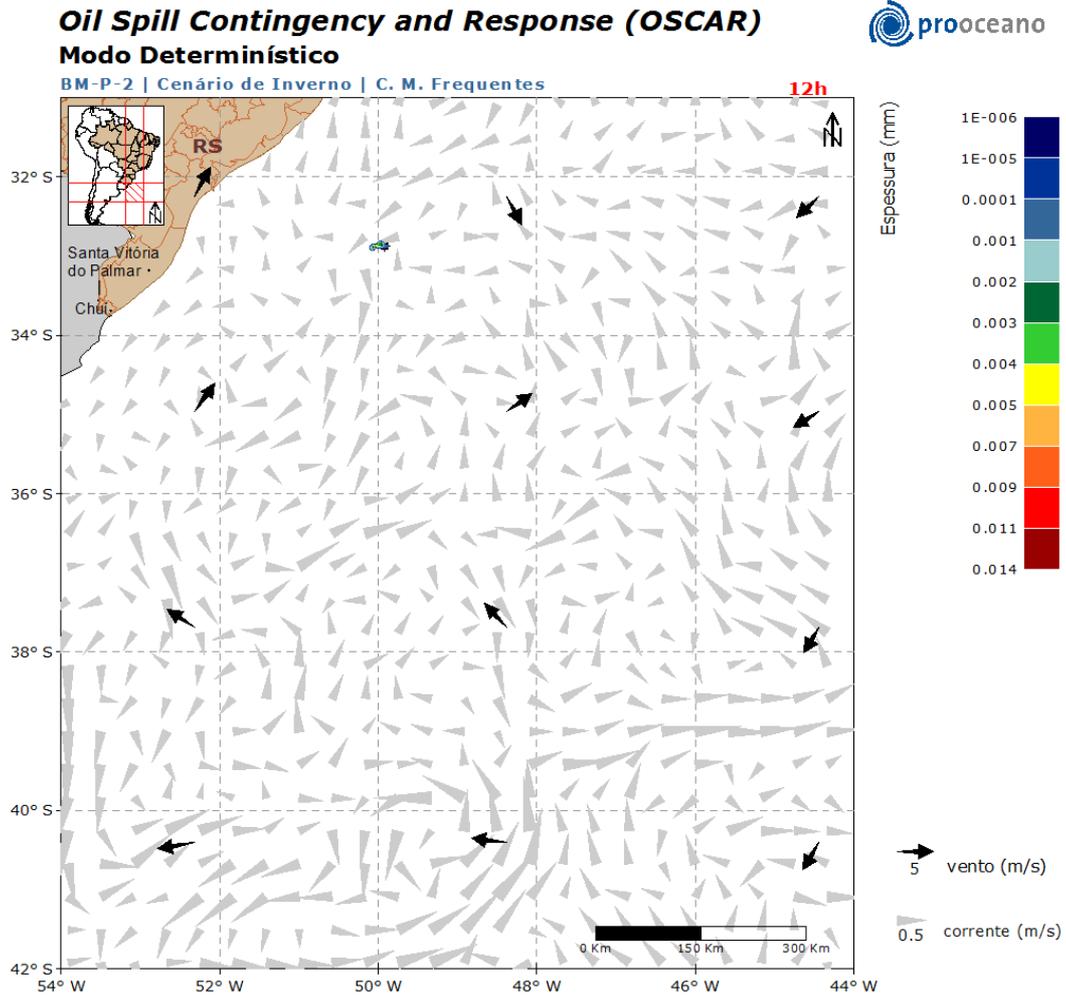


Figura 79: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

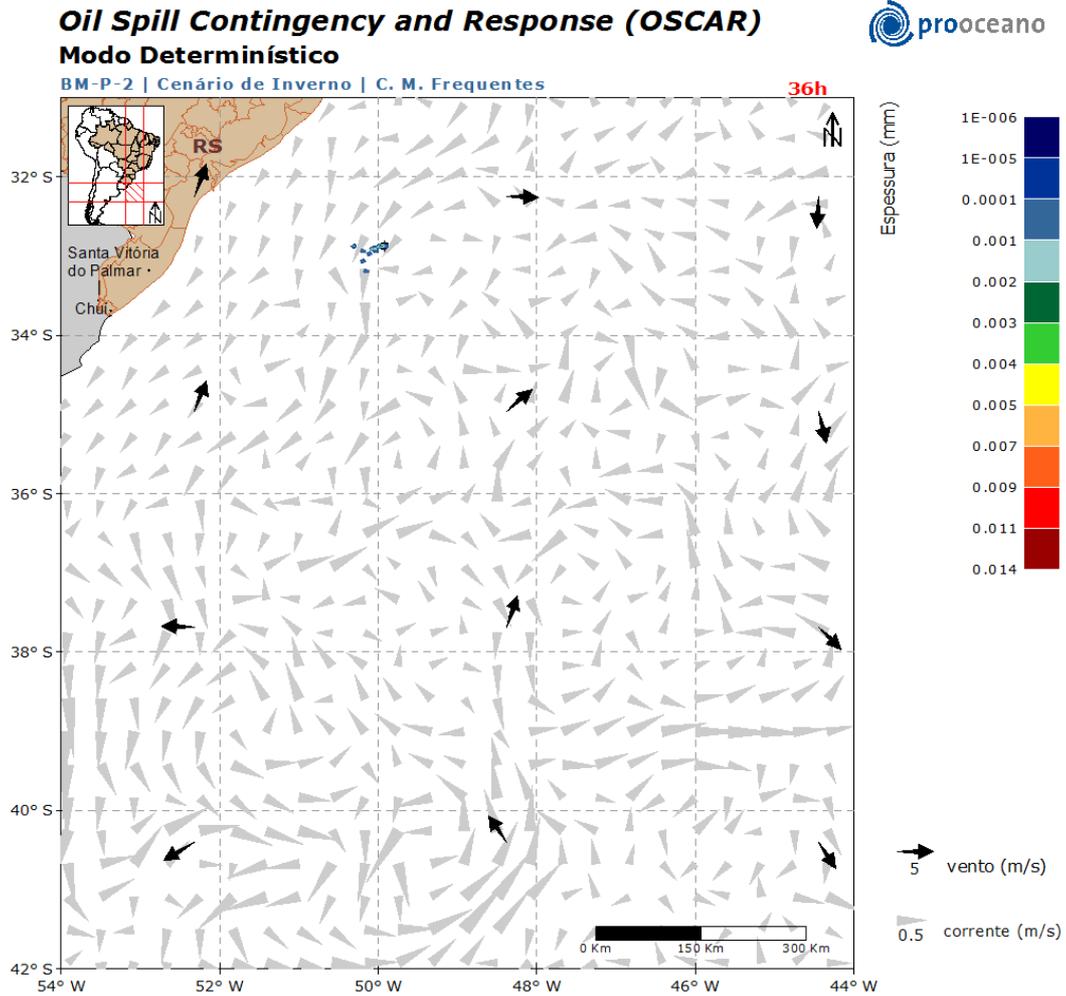


Figura 80: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

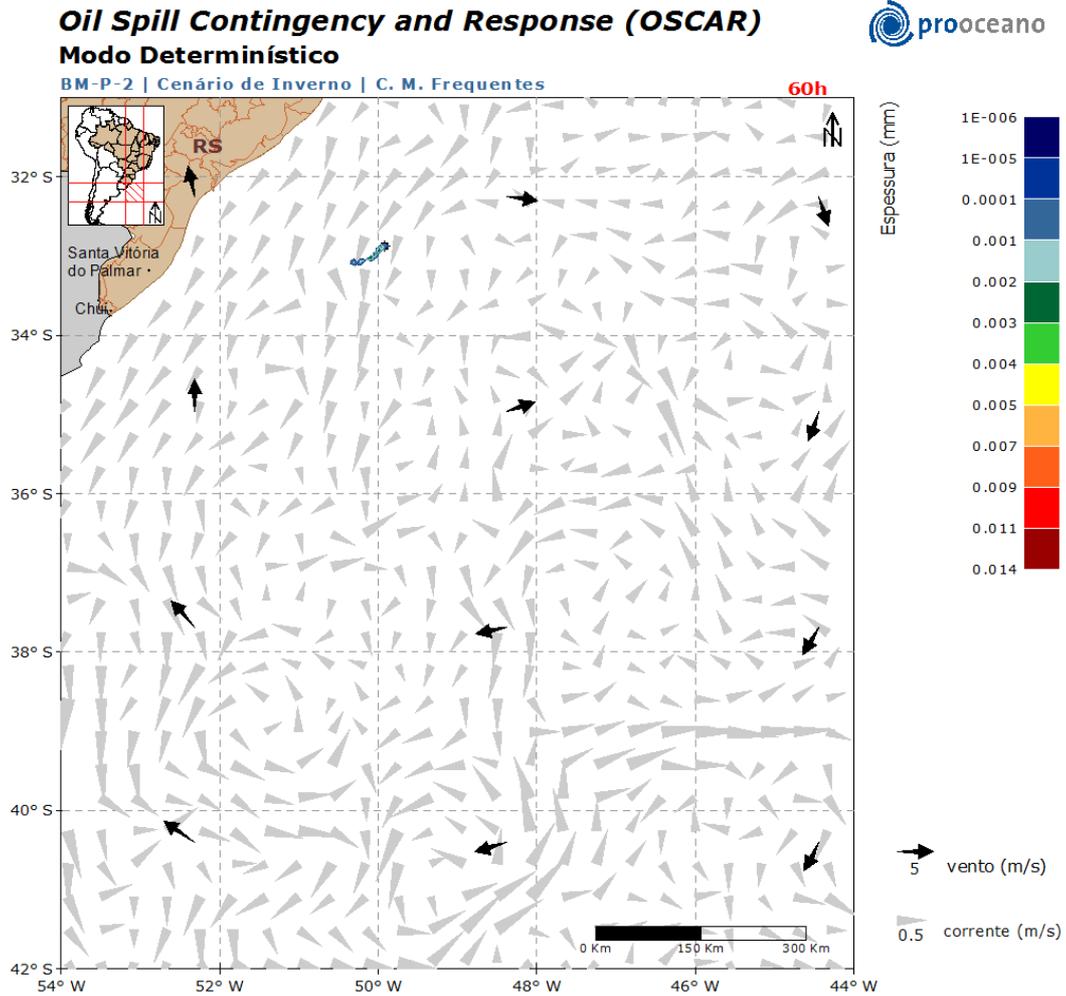


Figura 81: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

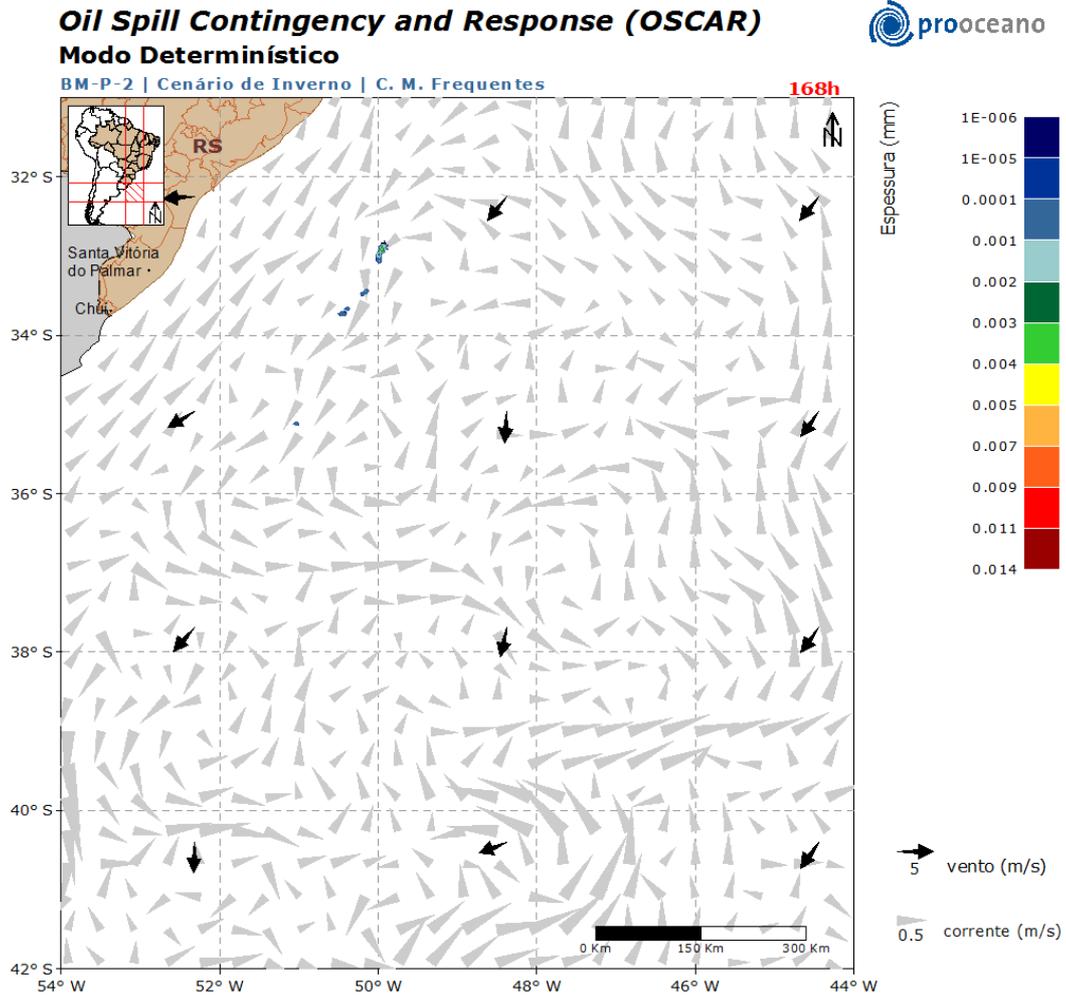


Figura 82: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

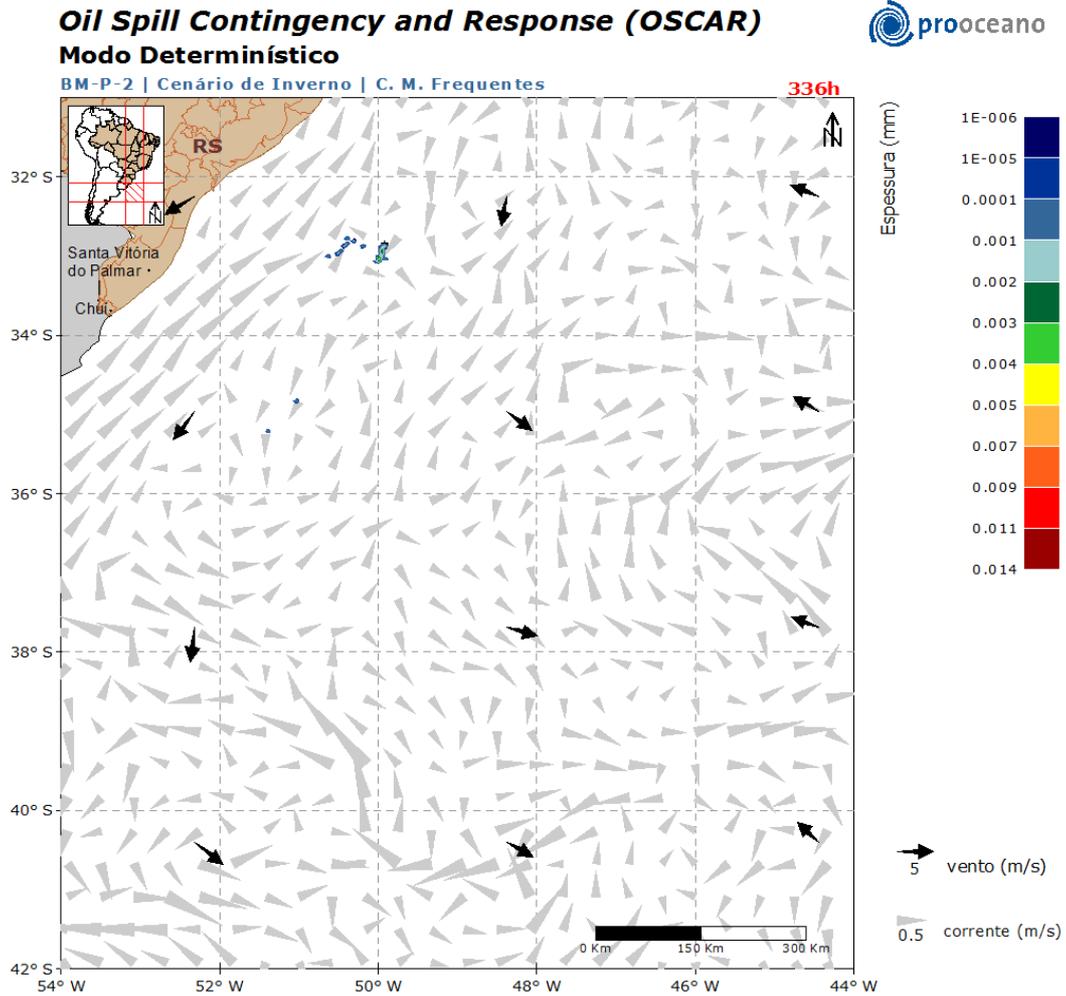


Figura 83: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

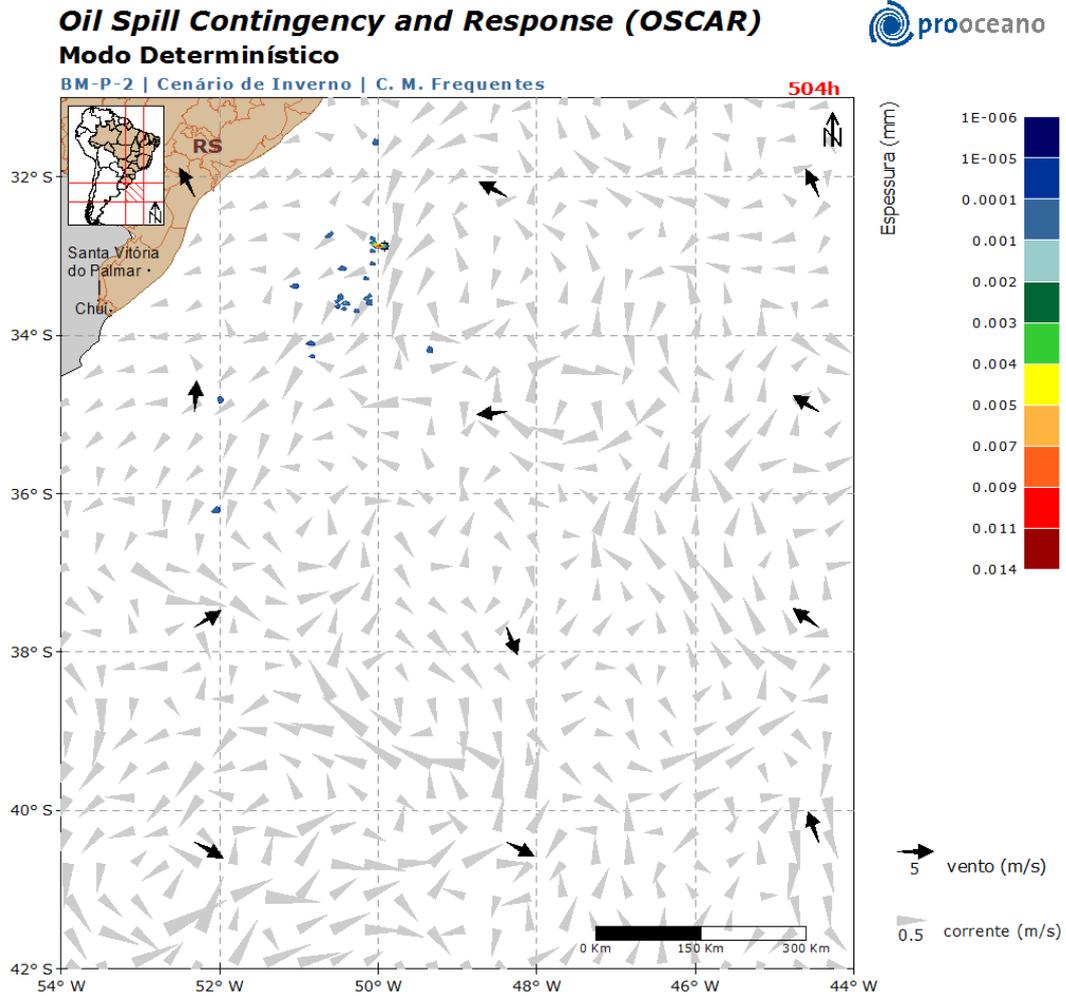


Figura 84: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

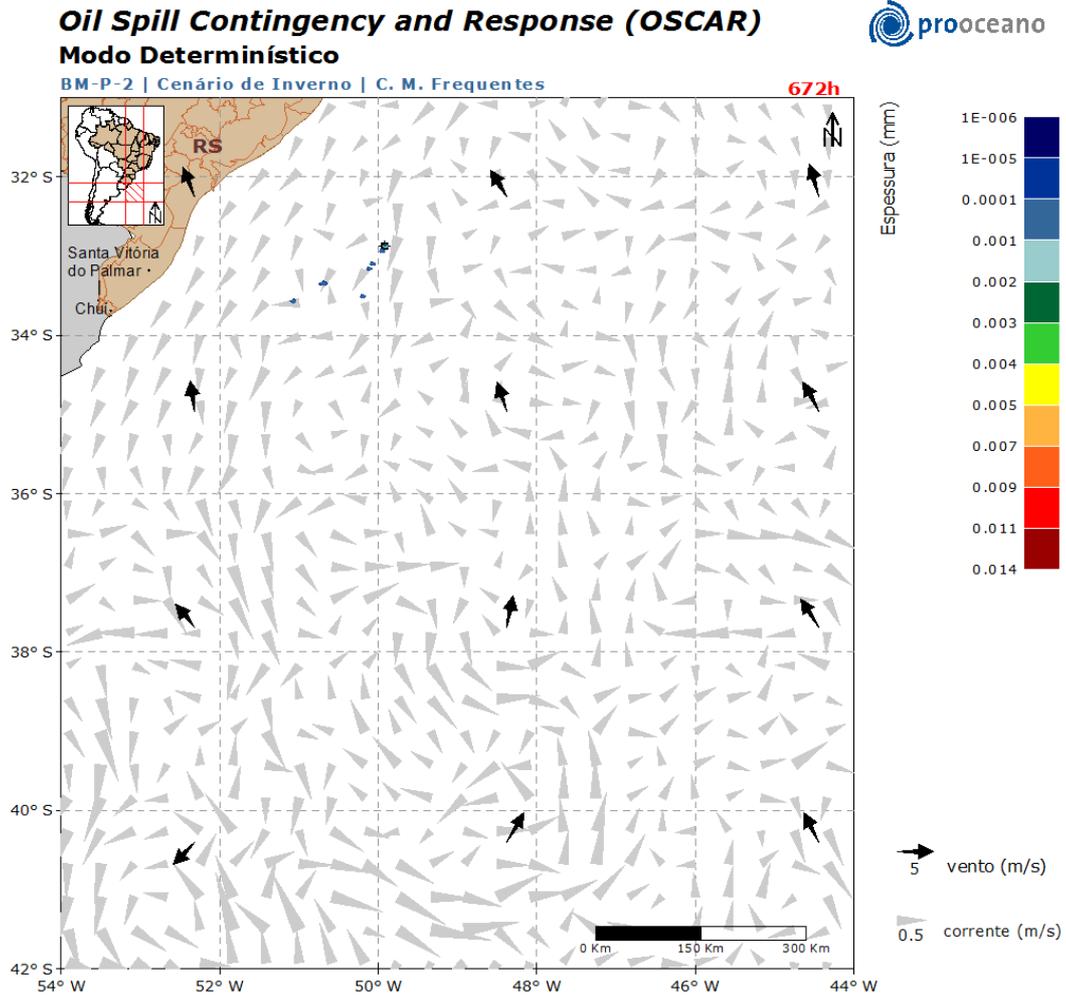


Figura 85: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

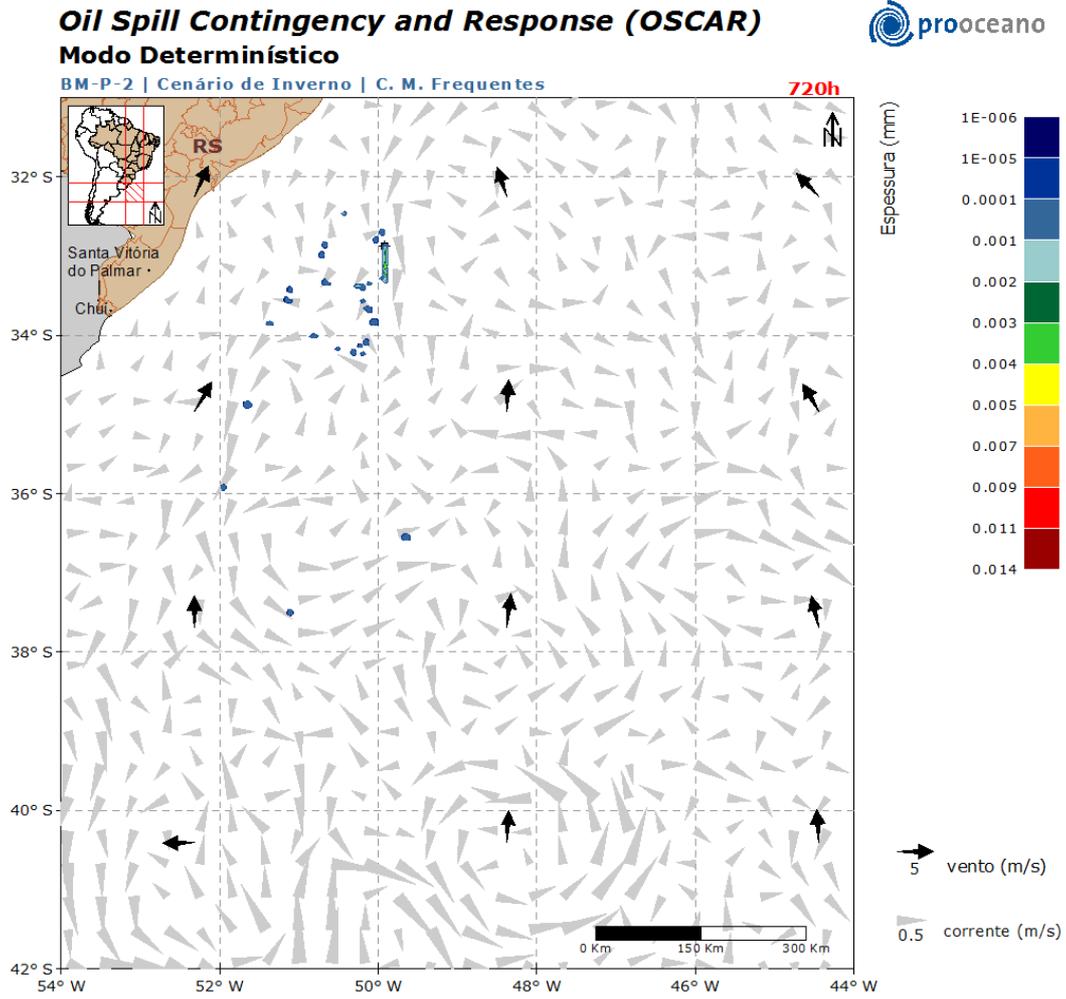


Figura 86: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

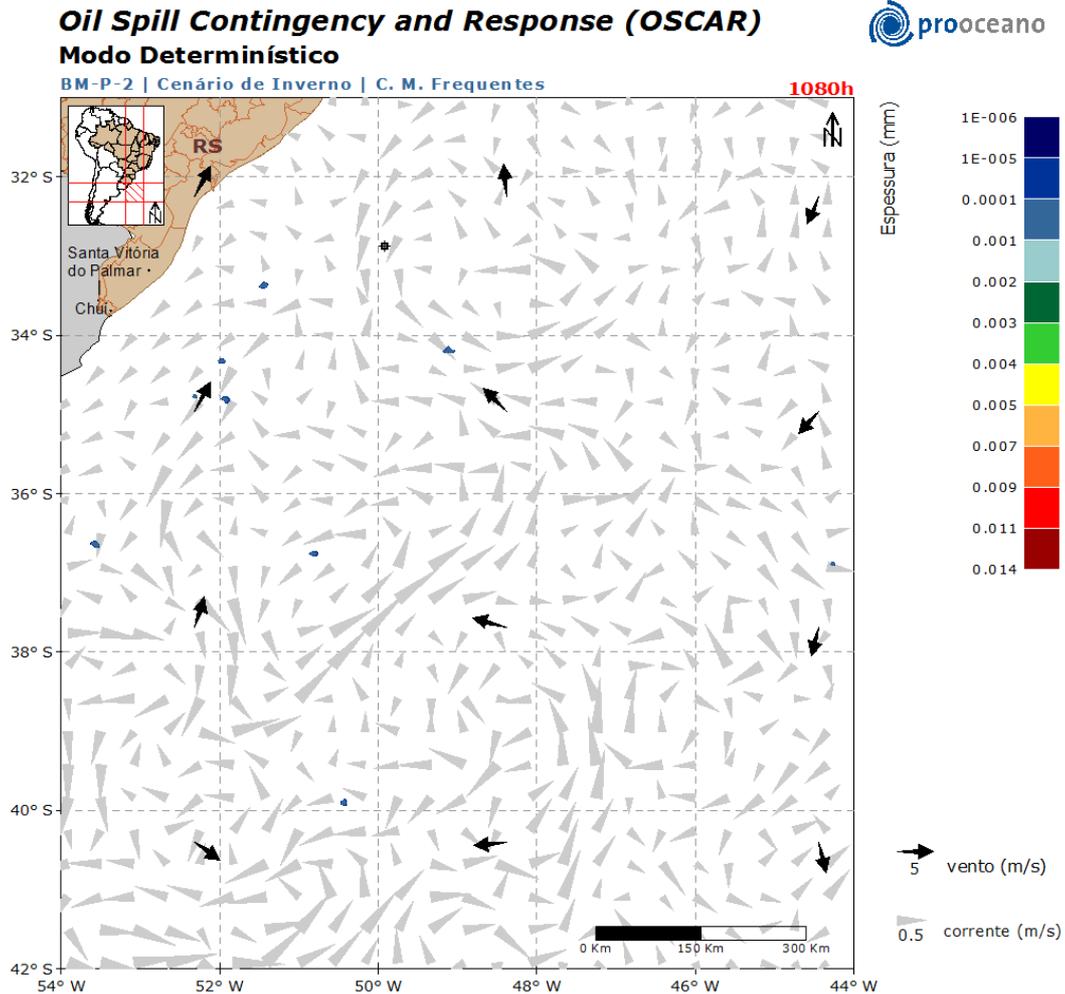


Figura 87: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Guarani.

Sob a influência da Corrente do Brasil (CB) e os ventos de sudeste, a deriva do óleo se iniciou rumo a oeste-sudoeste. Com a evolução da simulação, uma parte do óleo derivou para sudoeste sob a influência da CB e outra foi transportada para norte do ponto. Ao final da simulação não se observa óleo em superfície. Isto ocorre devido aos processos de intemperismo, que atuam no óleo diminuindo a massa em superfície, por este motivo não é apresentada a figura para o instante final da simulação.

No gráfico (Figura 88), a seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo durante a simulação.

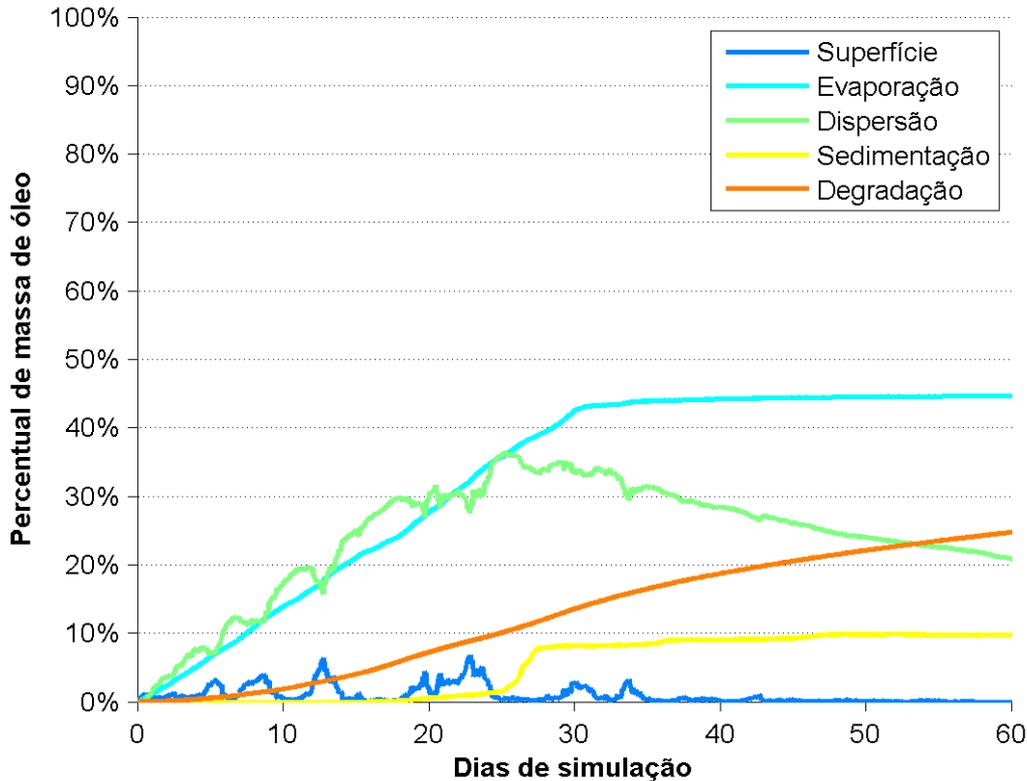


Figura 88: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de inverno. Volume de blowout (10.200 m<sup>3</sup>). Poço Guarani.

A evaporação foi o processo mais efetivo na retirada de massa de óleo ao longo da simulação removendo, aproximadamente, 44% da massa, enquanto a degradação representou aproximadamente 25% da perda de massa. A dispersão, isto é, o óleo que vai para a coluna d'água, retirou da superfície da água cerca de 21% ao final da simulação. A massa de óleo acumulado no sedimento foi de 10% e não houve óleo na superfície da água ao final da simulação.

### 3.2.2 Pampeano

#### 3.2.2.1 Condições Meteo-Oceanográficas Frequentes

Nos itens a seguir serão apresentadas duas trajetórias em condições meteo-oceanográficas frequentes, sendo uma no período de verão e outra no inverno, para um vazamento de *blowout* (10.200 m<sup>3</sup>) contínuo por 30 dias, simulação de 60 dias.

### 3.2.2.1.1 Verão

A deriva do óleo em condições meteo-oceanográficas frequentes de verão será apresentada da Figura 89 à Figura 98.

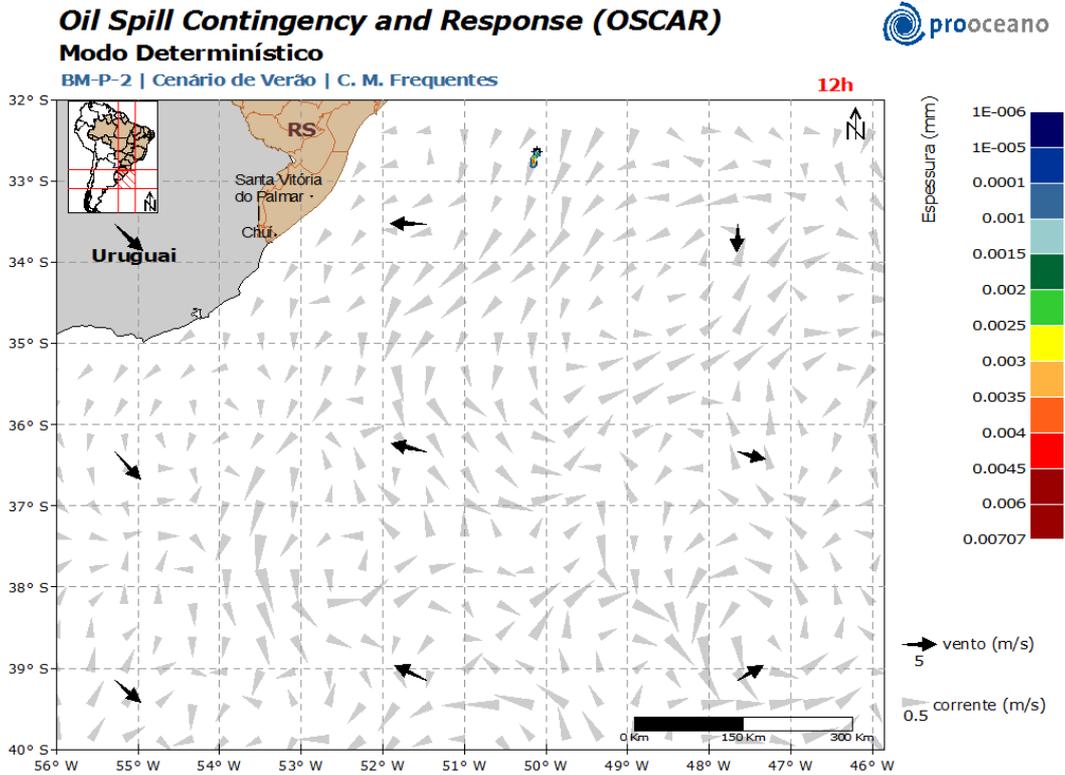


Figura 89: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

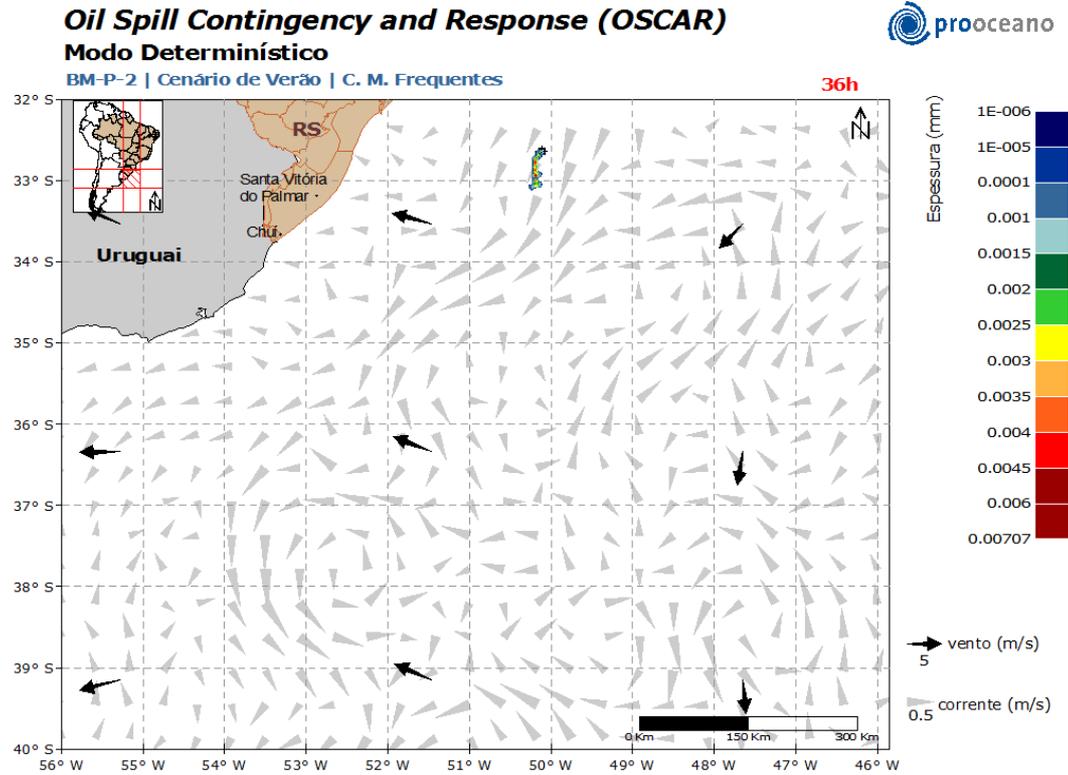


Figura 90: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

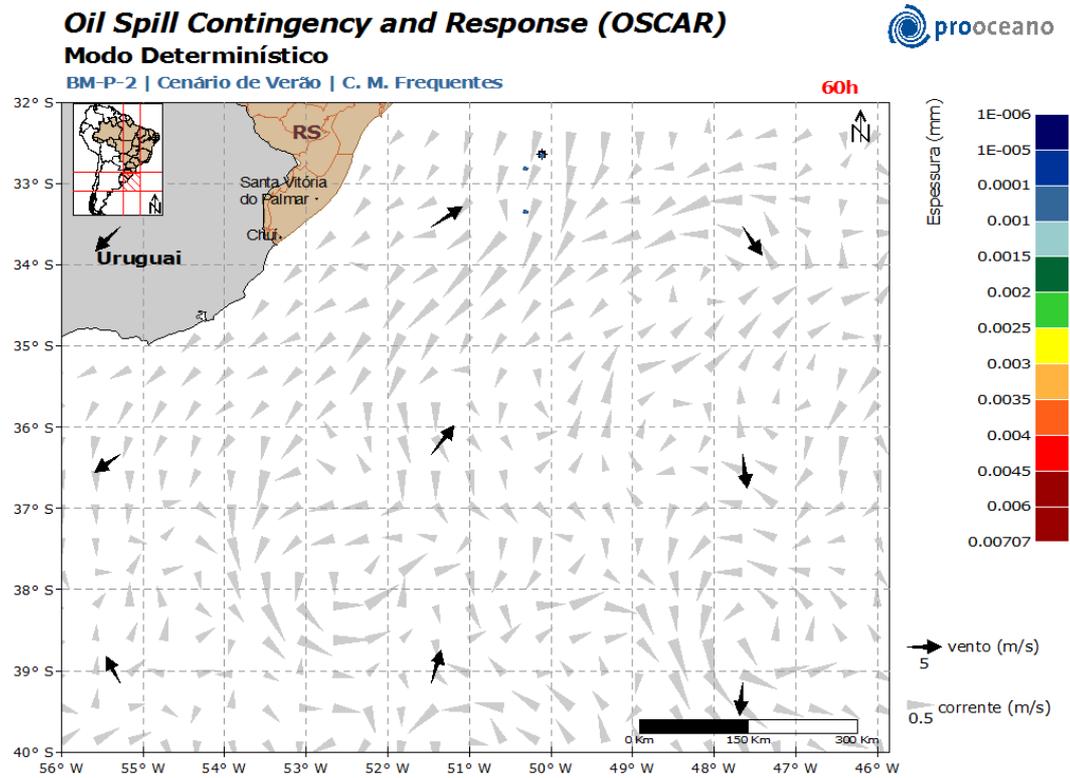


Figura 91: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

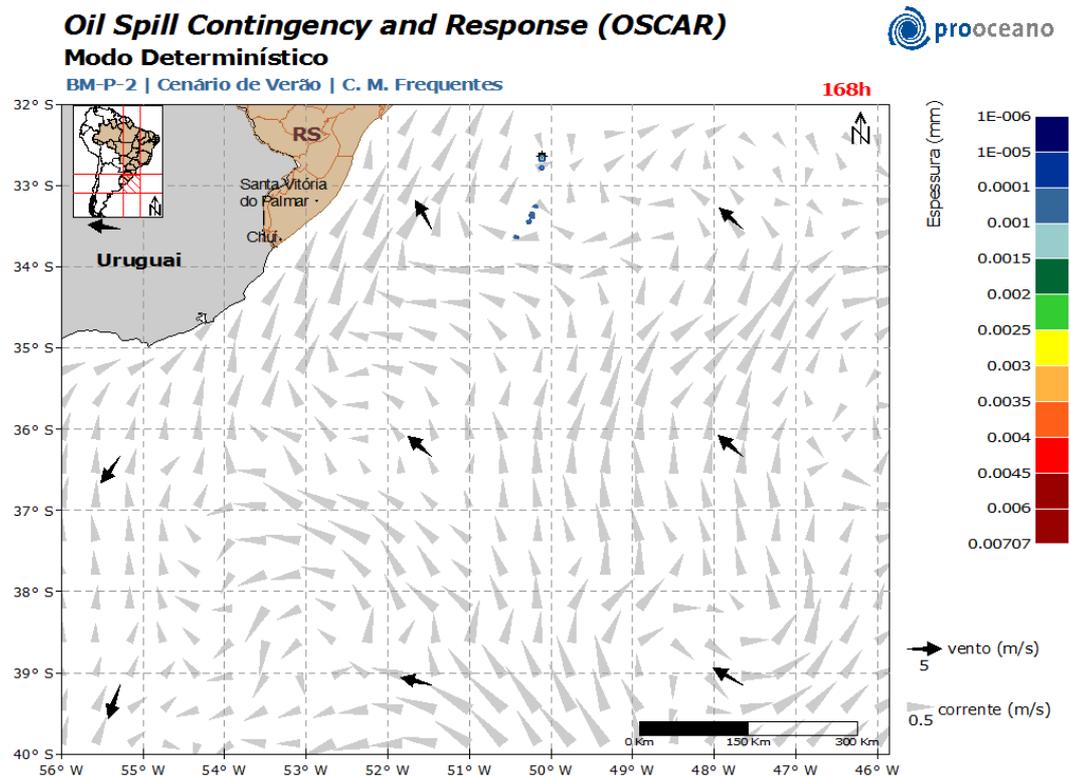


Figura 92: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

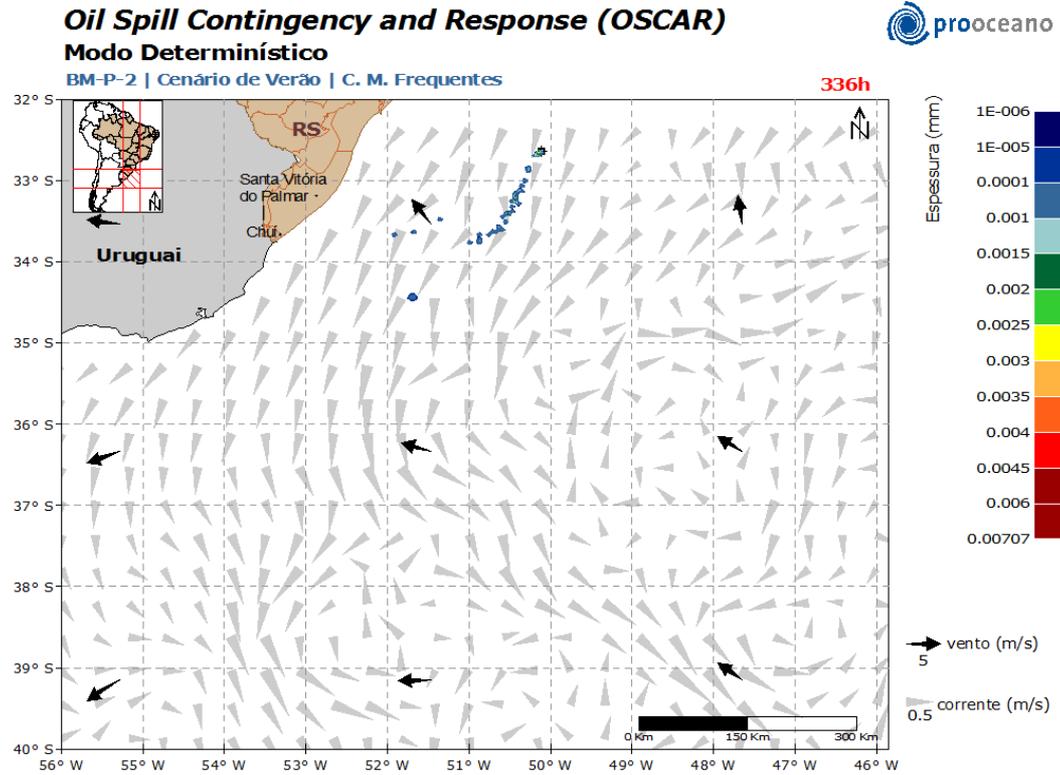


Figura 93: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

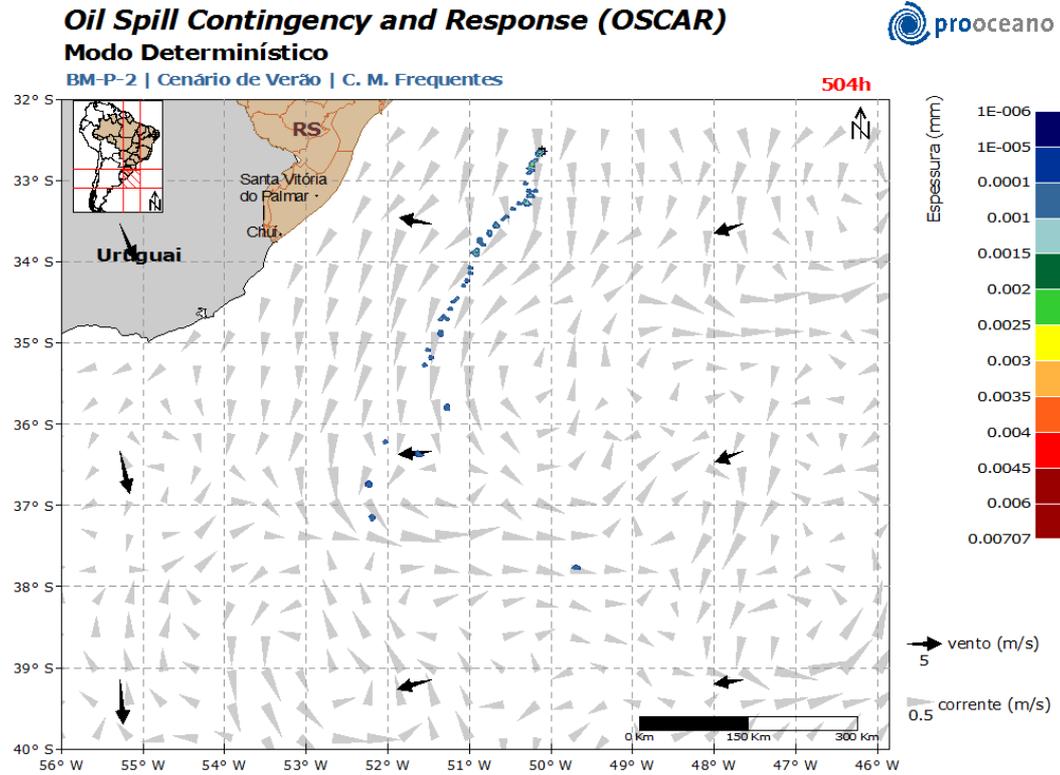


Figura 94: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

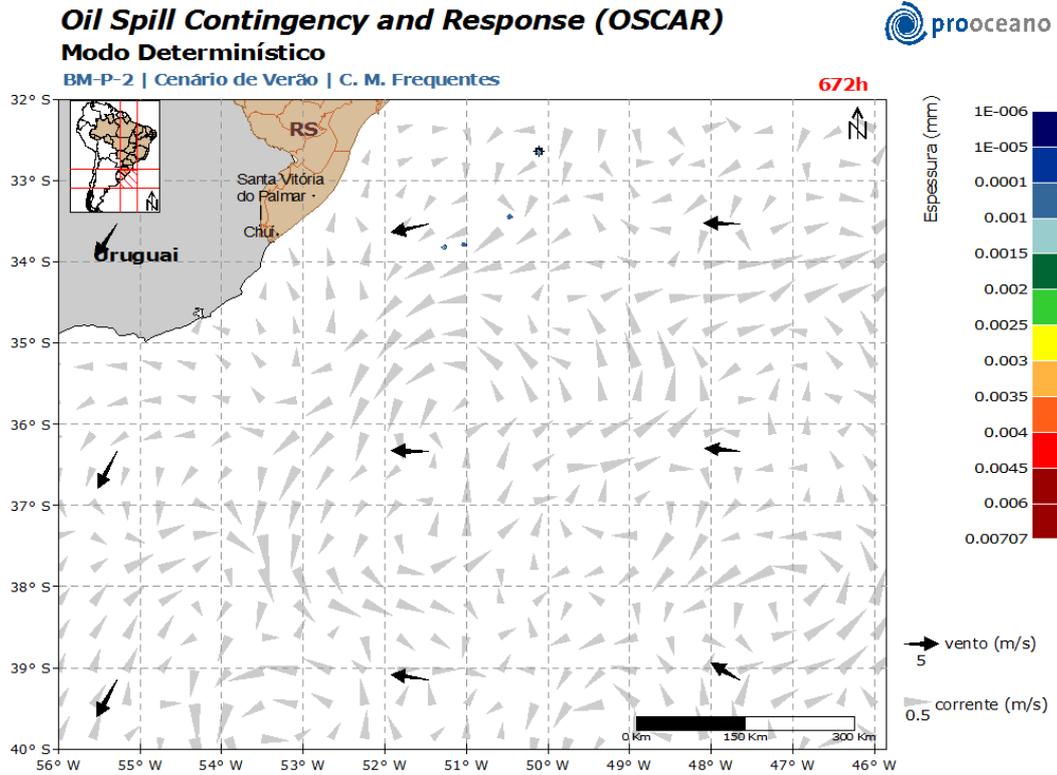


Figura 95: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

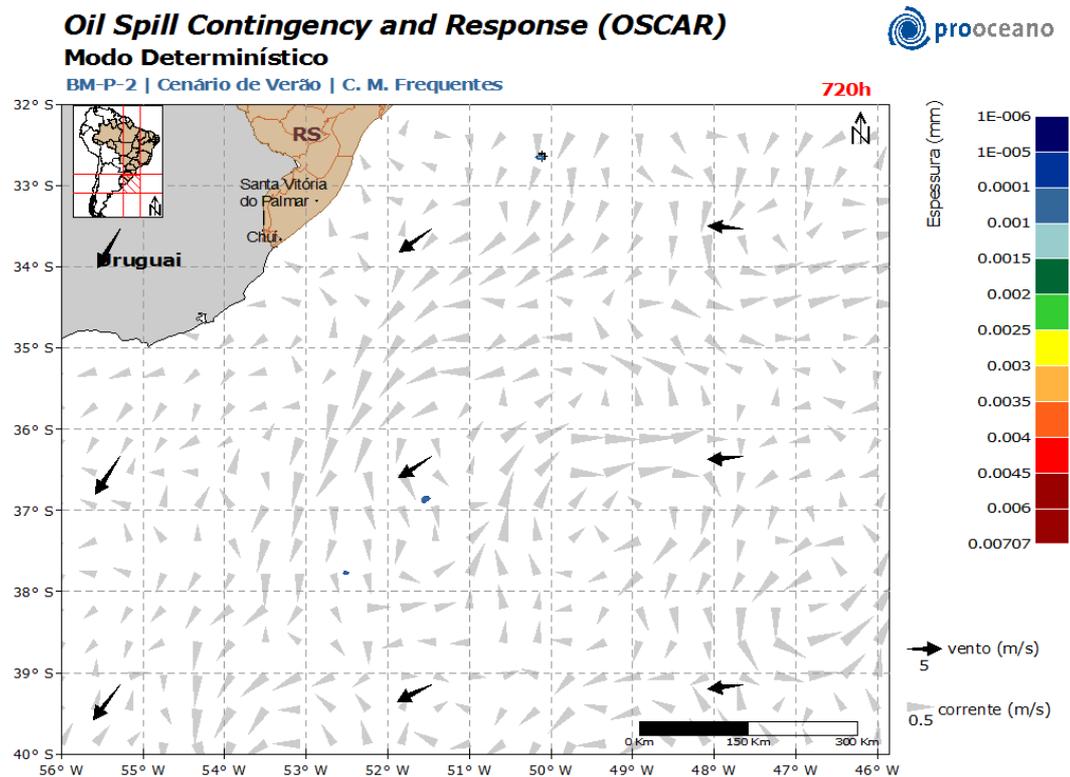


Figura 96: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

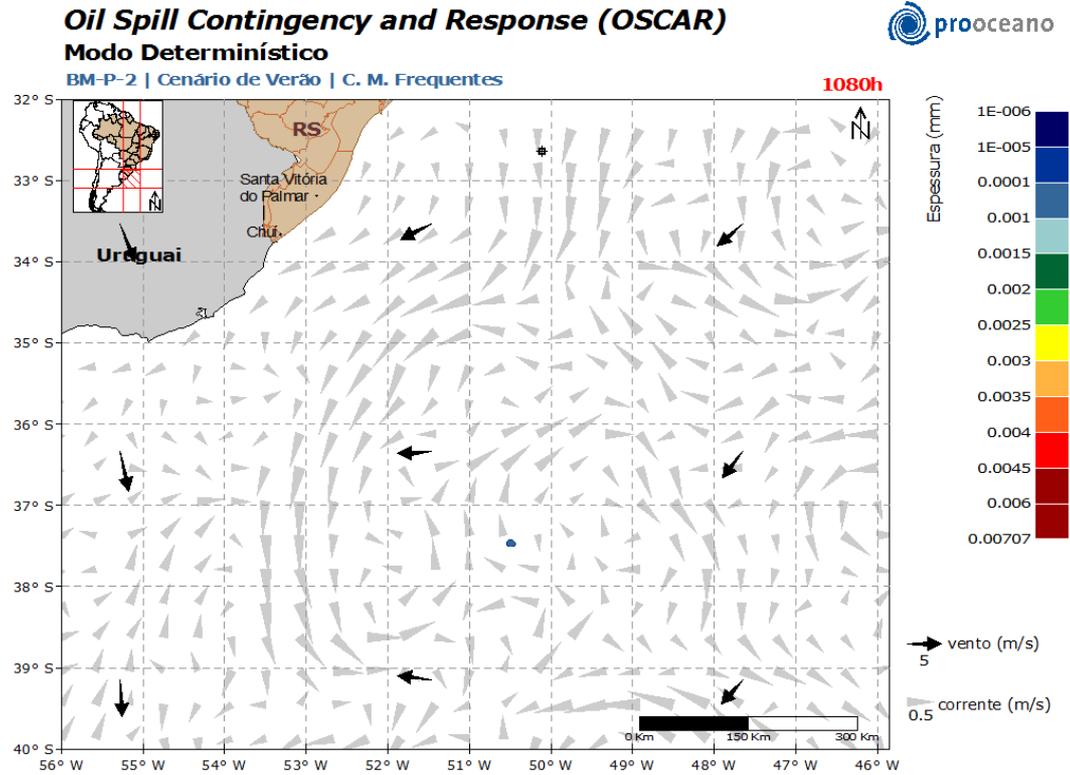


Figura 97: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

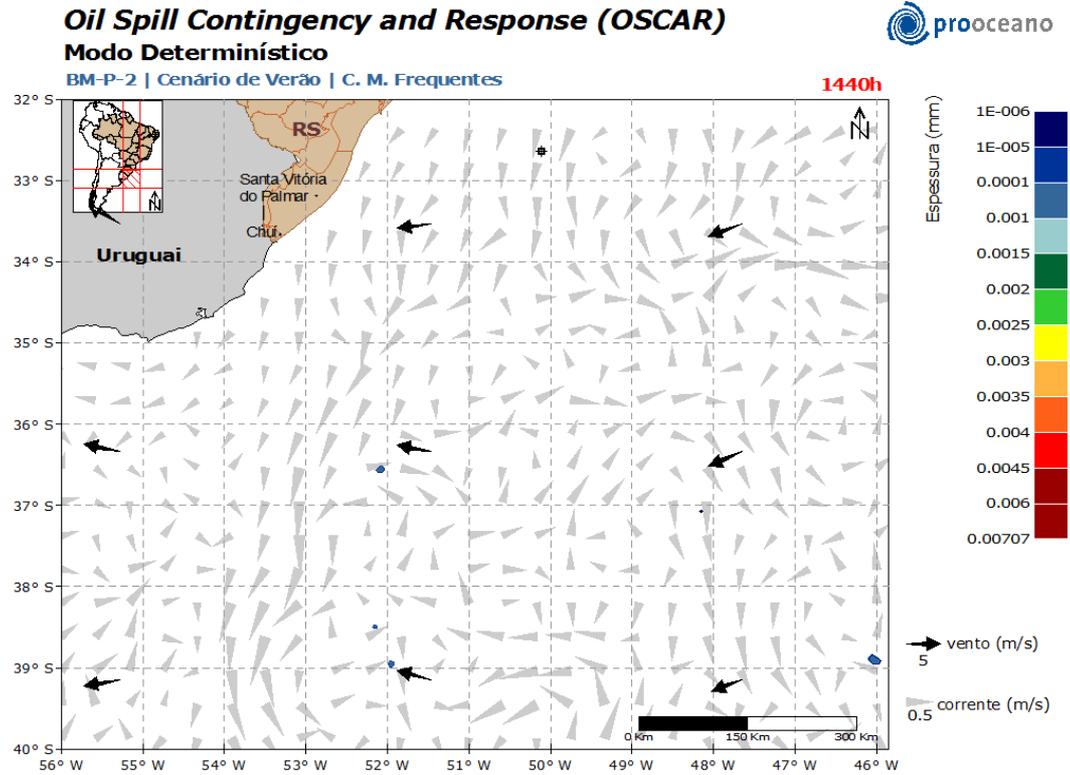


Figura 98: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de verão, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

Sob a influência da Corrente do Brasil, a deriva do óleo se iniciou rumo a sudoeste. A partir de 672 horas até o final da simulação nota-se que somente em algumas regiões é possível observar óleo na superfície. Isto ocorre porque os processos de intemperismo atuam no óleo diminuindo a massa na superfície.

No gráfico (Figura 99), a seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo durante a simulação.

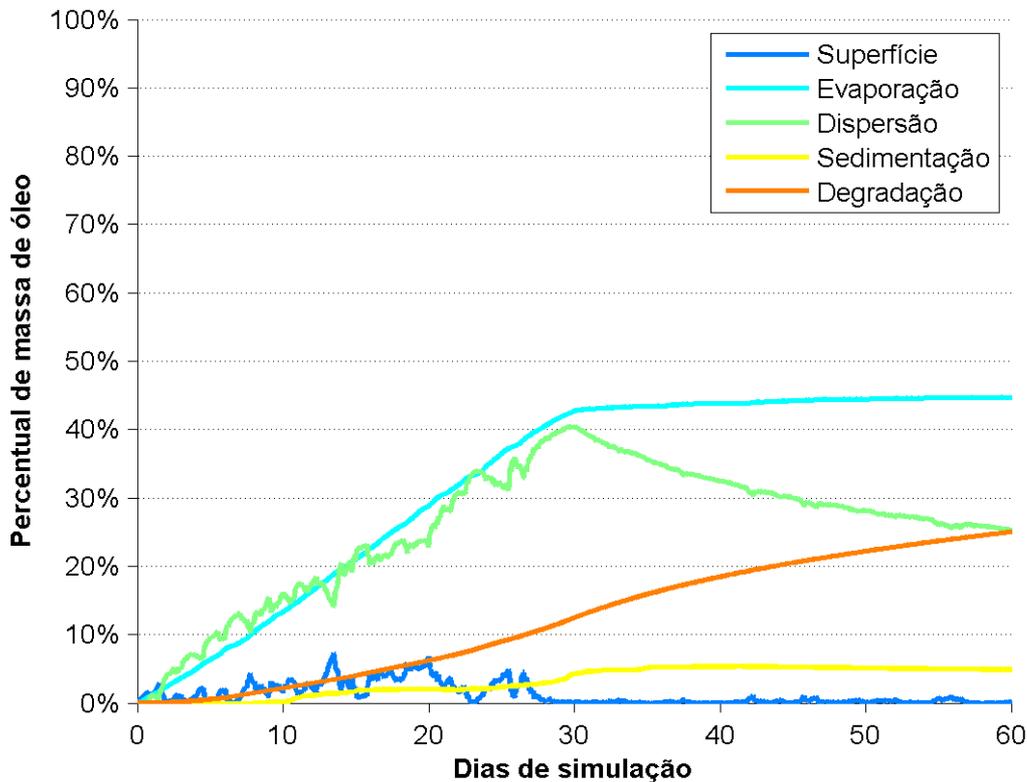


Figura 99: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de verão. Volume de blowout (10.200 m³). Poço Pampeano.

A retirada de massa de óleo por evaporação foi o processo mais efetivo ao longo da simulação removendo, aproximadamente, 45% da massa, enquanto a degradação representou aproximadamente 25% da perda de massa. A dispersão, isto é, o óleo que vai para a coluna d'água, retirou da superfície da água cerca de 25% ao final da simulação. A massa de óleo acumulado no sedimento foi de aproximadamente, 5% e houve menos de 1% óleo na superfície da água ao final da simulação.

### 3.2.2.1.2 Inverno

A deriva do óleo em condições meteo-oceanográficas frequentes de inverno será apresentada da Figura 100 à Figura 108.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

BM-P-2 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes

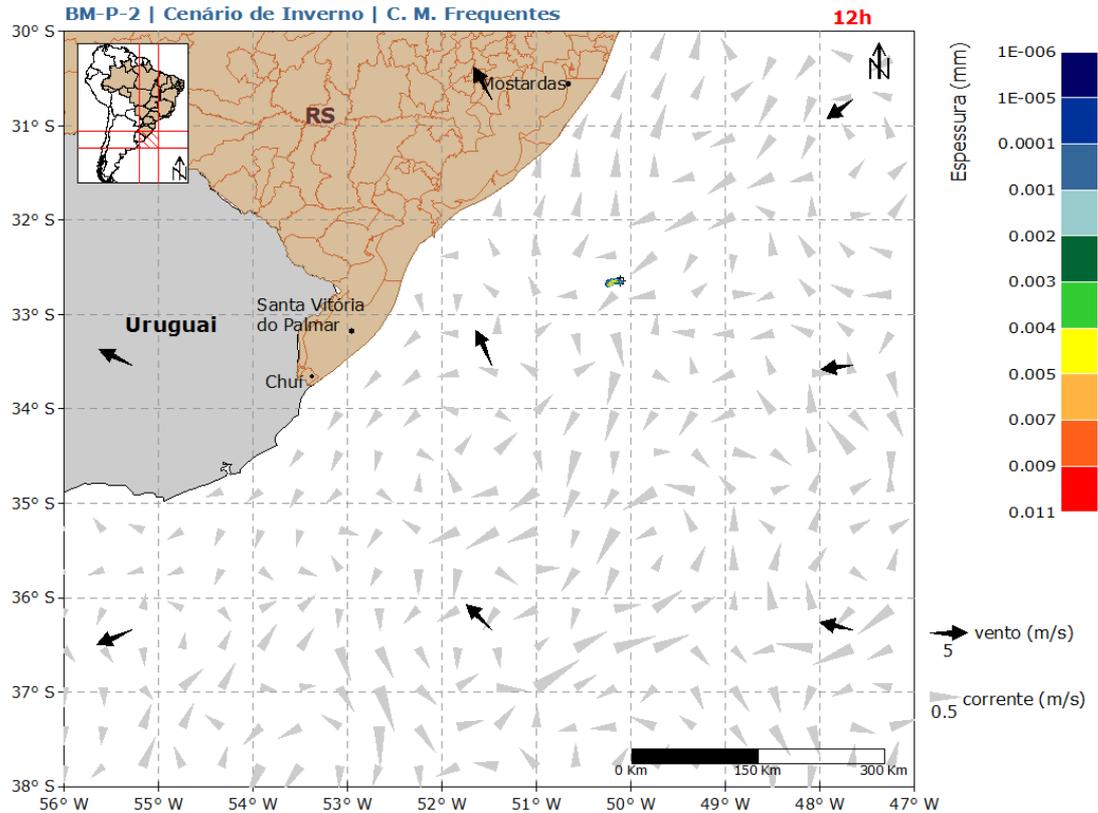


Figura 100: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 12 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

BM-P-2 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes

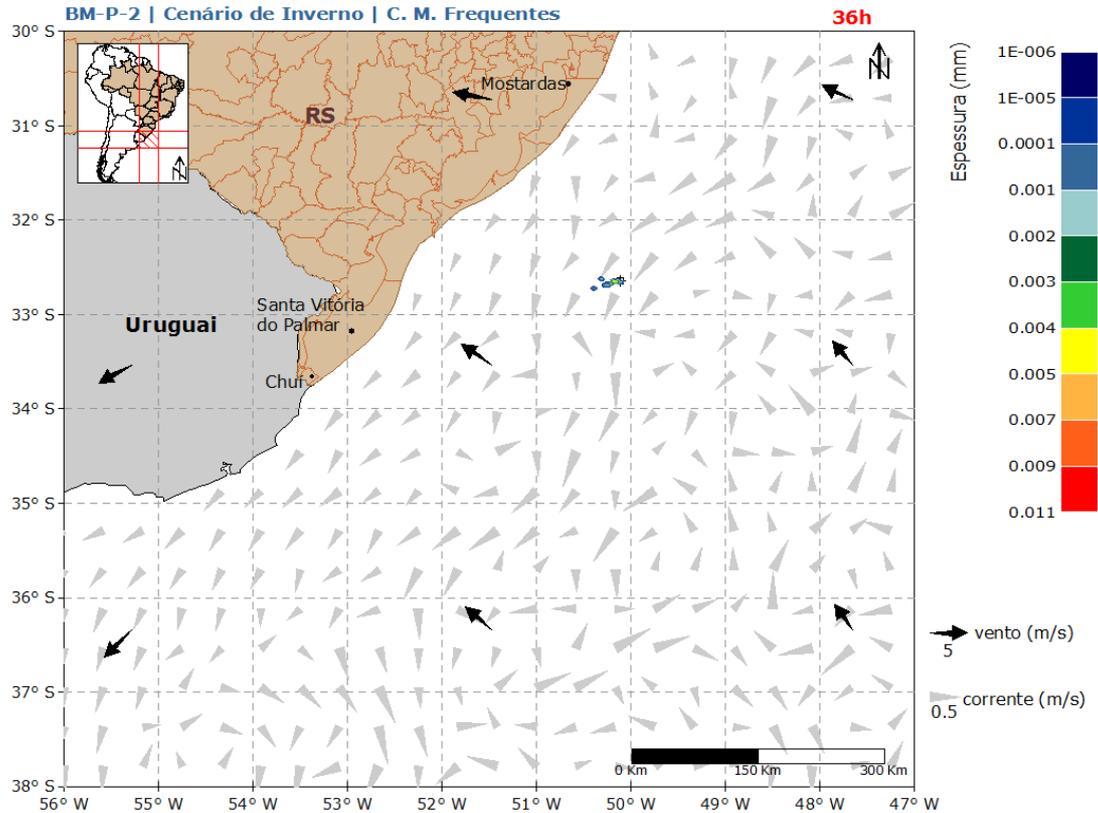


Figura 101: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 36 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

BM-P-2 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes

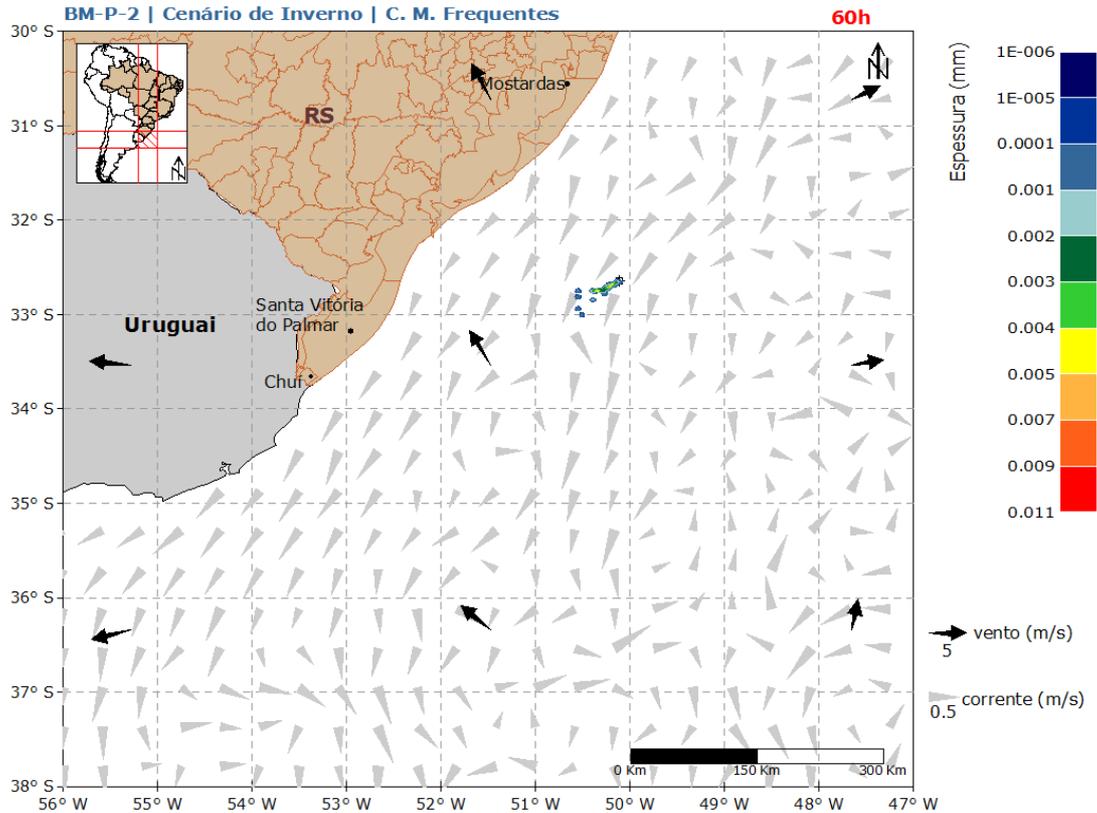


Figura 102: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 60 horas do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

BM-P-2 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes

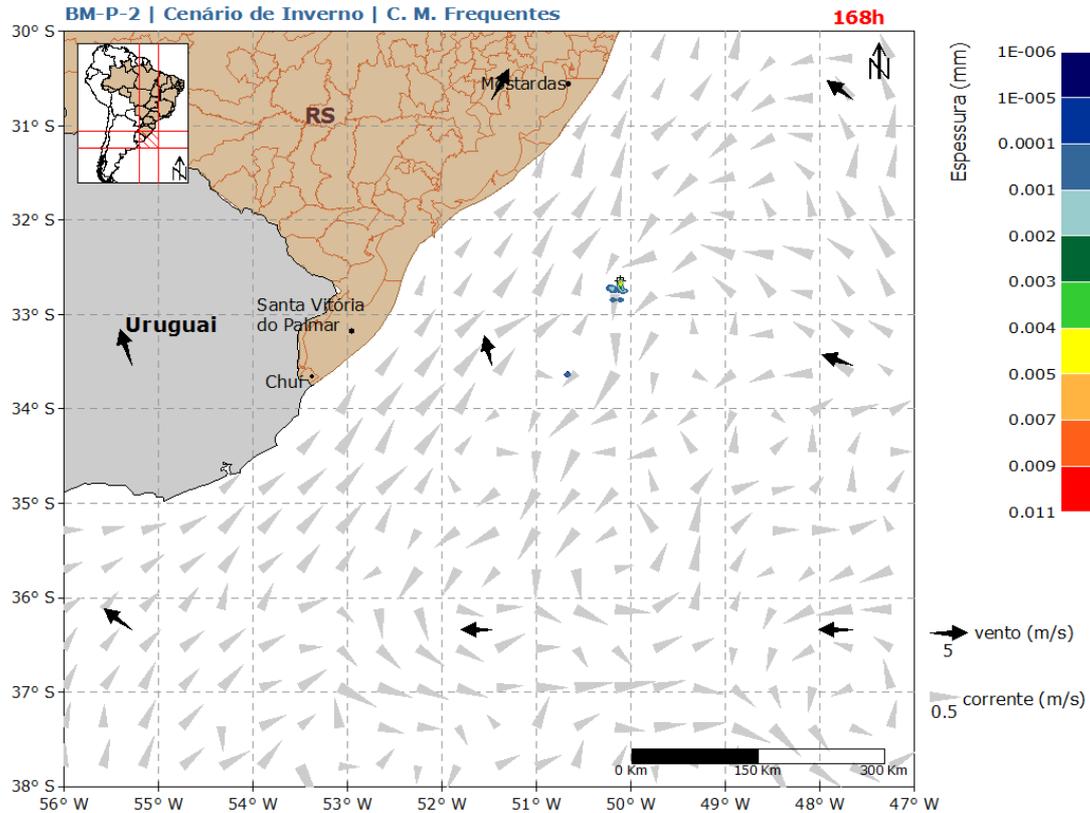


Figura 103: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

BM-P-2 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes

336h

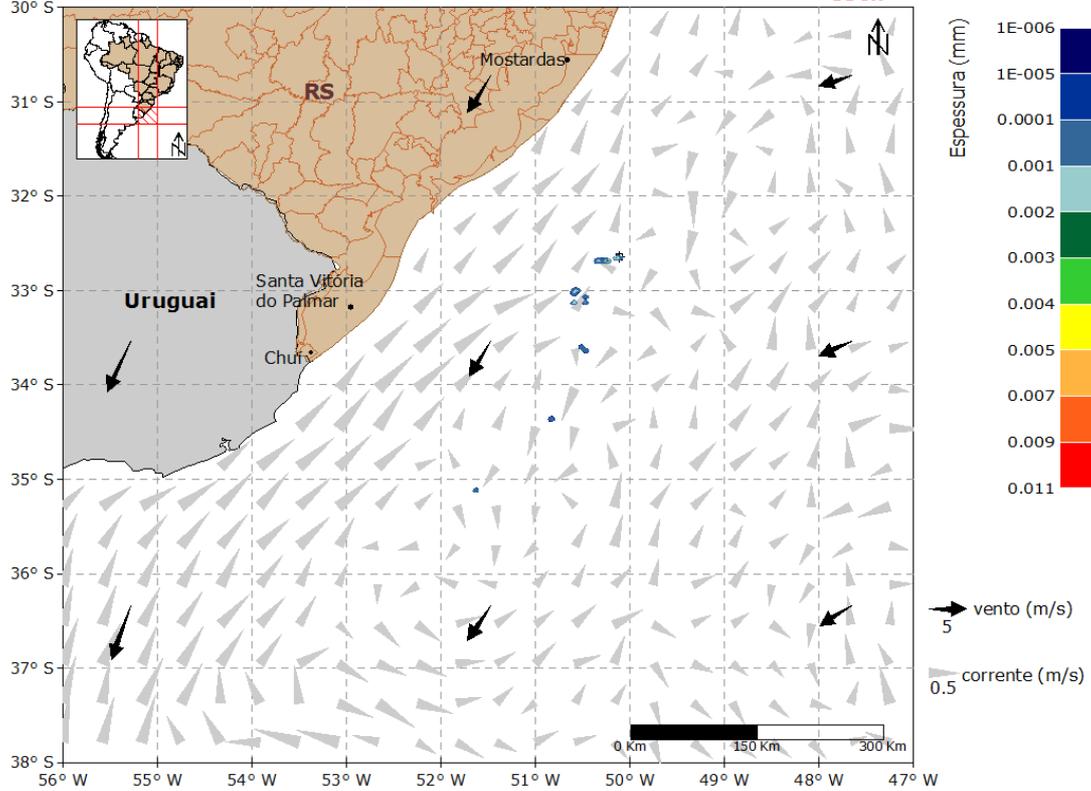


Figura 104: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

BM-P-2 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes

504h

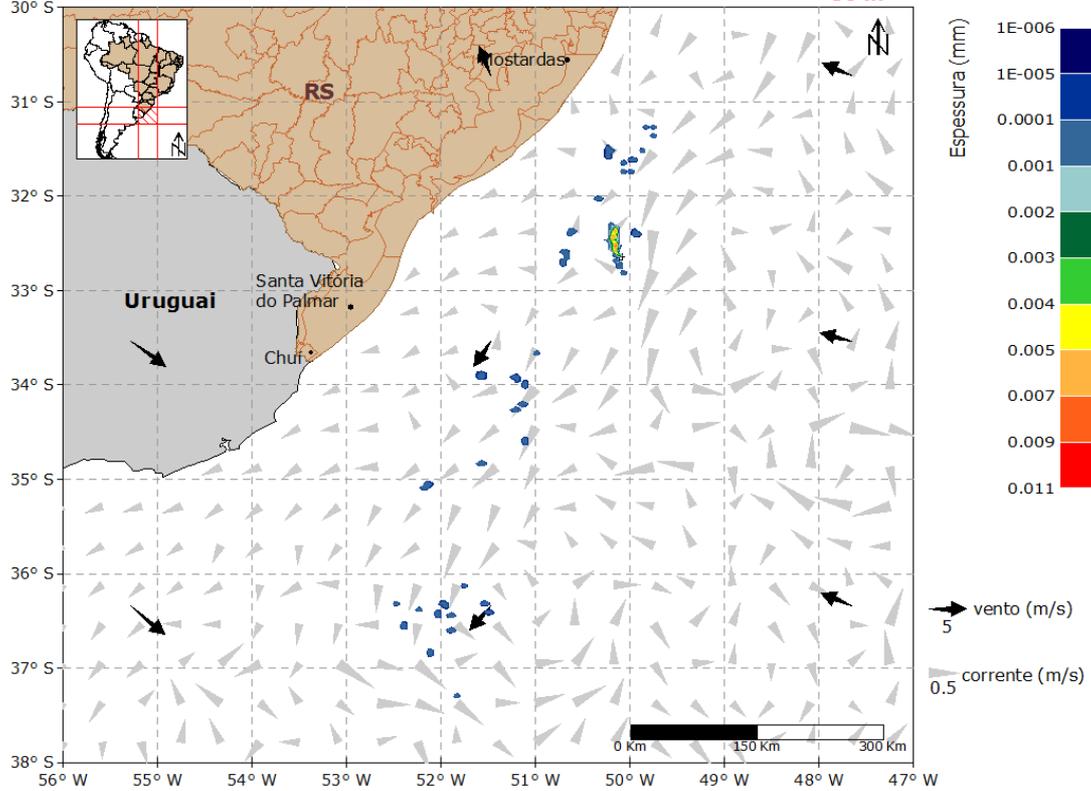


Figura 105: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

BM-P-2 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes

672h

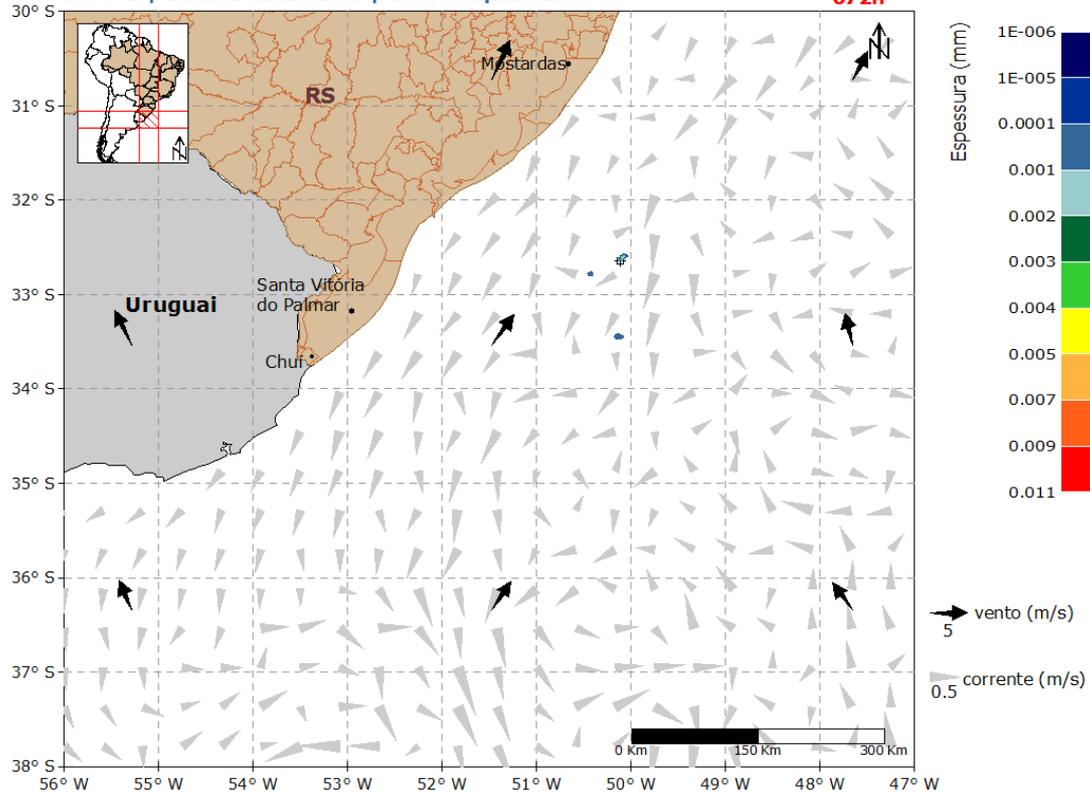


Figura 106: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 672 horas (4 semanas) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

BM-P-2 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes

720h

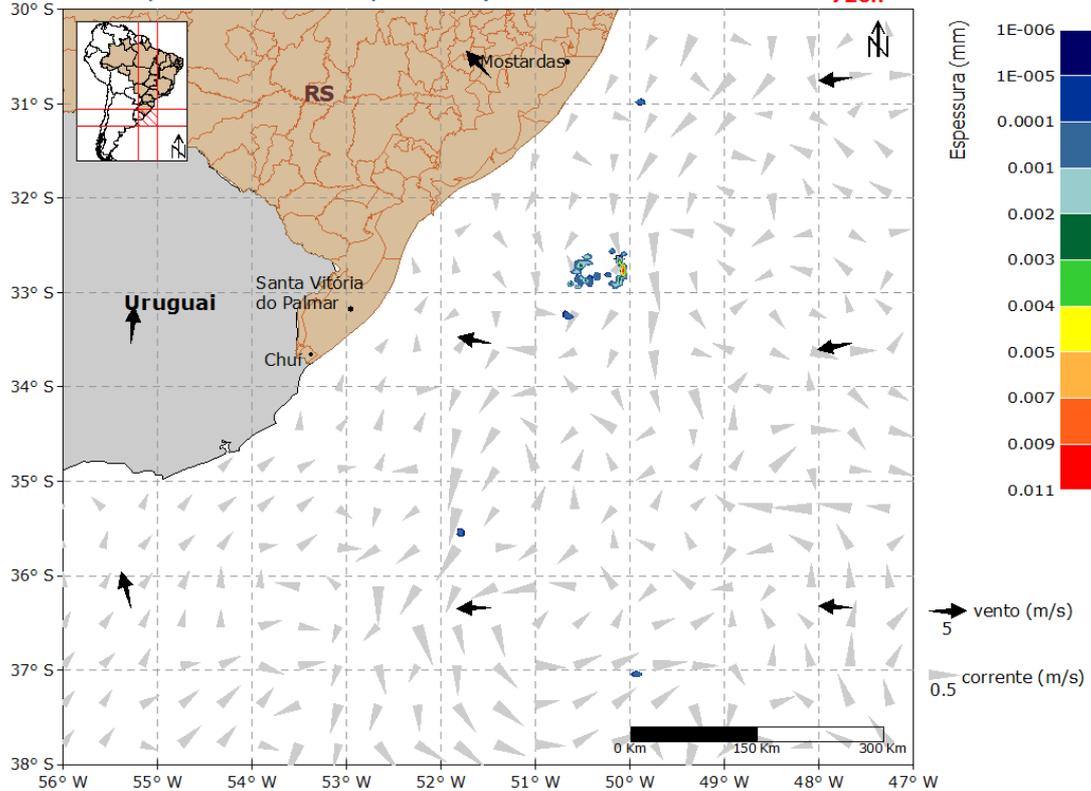


Figura 107: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

**Oil Spill Contingency and Response (OSCAR)**



**Modo Determinístico**

BM-P-2 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes

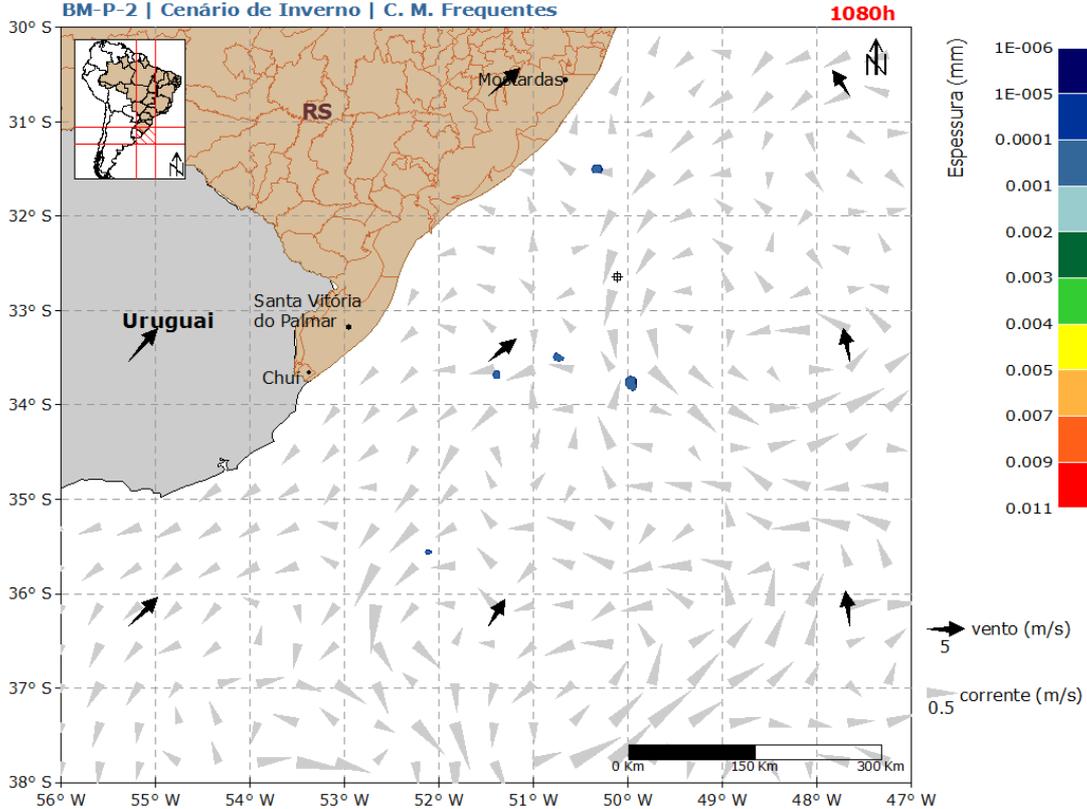


Figura 108: Resultado da simulação determinística em condições meteo-oceanográficas frequentes, período de inverno, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Vazamento de 10.200 m<sup>3</sup>. Poço Pampeano.

Sob a influência da Corrente do Brasil (CB) e os ventos de sudeste, a deriva do óleo se iniciou rumo a oeste-sudoeste. Com a evolução da simulação, uma parte do óleo derivou para sudoeste sob a influência da CB e outra foi transportada para norte do ponto. A partir de 672 horas até o final da simulação nota-se que somente em algumas regiões é possível observar óleo na superfície. Isto ocorre porque os processos de intemperismo atuam no óleo diminuindo a massa na superfície. Ao final da simulação, ou seja, 1440 horas após o início do vazamento não houve mais óleo na superfície do mar.

No gráfico (Figura 109), a seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo durante a simulação.

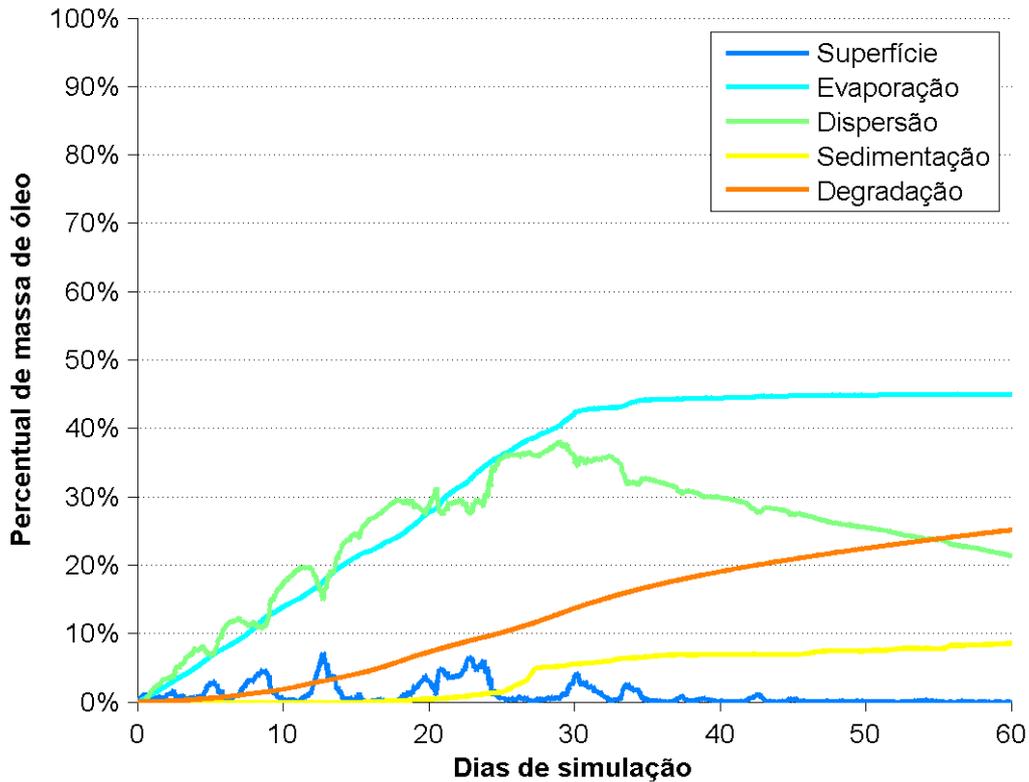


Figura 109: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condições meteo-oceanográficas frequentes, no período de inverno. Volume de blowout (10.200 m<sup>3</sup>). Poço Pampeano.

A evaporação foi o processo mais efetivo na retirada de massa de óleo ao longo da simulação removendo, aproximadamente, 45% da massa, enquanto a degradação representou aproximadamente 25% da perda de massa. A dispersão, isto é, o óleo que vai para a coluna d'água, retirou da superfície da água cerca de 21% ao final da simulação. A massa de óleo acumulado no sedimento foi de 9% e não foi observado óleo na superfície da água ao final da simulação.

## 4. Conclusão

Para os dois pontos de vazamento, as simulações probabilísticas mostraram comportamentos semelhantes, devido, principalmente, às características hidrodinâmicas do local. Entretanto, nas simulações probabilísticas de verão, a deriva do óleo se estendeu mais ao sudoeste, enquanto no inverno houve áreas mais a norte do ponto de vazamento devido à incidência de ventos sul neste cenário.

Em ambos os pontos de vazamento, em todos os volumes de vazamento (8, 200m<sup>3</sup> e *blowout*) e cenários sazonais não houve probabilidade do óleo atingir a costa.

Com base na análise das forçantes, foram realizadas simulações em condições meteo-oceanográficas frequentes em cada cenário, verão e inverno. De uma forma geral, foi possível observar que há óleo na superfície somente em algumas regiões a partir de 672 horas, devido a grande retirada de massa de óleo da superfície da água pelos processos de intemperismo.

Os resultados obtidos em relação ao intemperismo do óleo, para cada um dos pontos de vazamento em cada simulação determinística, mostraram que a evaporação foi o processo mais efetivo na retirada de massa de óleo, seguido pela degradação. Ao final das simulações, a porcentagem de óleo na superfície da água sempre foi inferior a 1%.

## 5. Bibliografia

- ASSIREU, A. T. 2003. Estudo das Características Cinemáticas e Dinâmicas das Águas de Superfície do Atlântico Sul Ocidental a partir de Derivadores Rastreados por Satélite. São Paulo, USP, Instituto Oceanográfico, 154 p. Tese de Doutorado.
- ASSIREU, A. T. 2011. Efeito Barreira da CB, o que os Derivadores Indicam? Apresentação Oral no IX OMAR-SAT. Marinha do Brasil. IEAPM, Arraial do Cabo, Rio de Janeiro.
- BECK, B., 2002. Model evaluation and performance. In Encyclopedia of Environmetrics, Eds. A. H. El-Shaarawi and W. W. Piegorsch, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- BLECK, R., 2002. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycniccartesian coordinates. *Ocean Modeling*, 4, 5588.
- CAMPOS, R. M. Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados a ciclones extratropicaisno Atlântico Sul, RJ. 2009. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ.
- CHANG, Y. S., ÖZGÖKMEN, T. M. PETERS, H. XU, X. 2008. Numerical Simulation of the Red Sea Outflow Using HYCOM. And Comparison With REDSOX Observations. *J. Phys. Oceanogr.* 38(2). 357 – 358.
- CHASSIGNET, E. P., SMITH, L. T., HALLIWEL, G. R., et al., 2003, “North Atlantic Simulations with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): Impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and termobaricity”, *Journal Physical Oceanography*, v. 33, n. 12, pp. 2504-2526.
- CHU, P.C., L.M. IVANOV, L.H. KANTHA, T.M. MARGOLINA, O.M. MELNICHENKO, and Y.A. POBERENZHNY, 2004: Lagrangian predictability of high-resolution regional ocean models: the special case of the Gulf of Mexico. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 47-66.
- DELVIGNE G.A.L.; SWEENEY C.E.. Natural dispersion of Oil. *Oil & Chemical Pollution* 4 (1988) 281-310.
- ELLIOTT A.J. A probabilistic description of the wind over Liverpool Bay with application to oil spill simulations *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61 (2004) 569–581.
- GABIOUX, M. Estudo numérico dos meandros e vórtices da corrente do Brasil entre 22°S e 30°S [Rio de Janeiro] 2008 XVII, 138 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2008) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

- GUO, W. J.; WANG, Y. X.; XIE, M. X.; CUI, Y. J. Modeling oil spill trajectory in coastal waters based on fractional Brownian motion. *Marine Pollution Bulletin*, v. 58, p. 1339-1346, 2009.
- HOULT, D. P. Oil spreading on the sea. *Annual Review of Fluid Mechanics*, p. 341-367, 1972.
- HYCOM, 2008. Assimilative Global Simulation (10/2008 to 11/2008), [online] Disponível via WWW. URL: [http://hycom.coaps.fsu.edu/data/glb\\_simulation.html](http://hycom.coaps.fsu.edu/data/glb_simulation.html).
- JOHANSEN, Ø. 2000. DeepBlow – A Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts. *Spill Science & Technology Bulletin*. Vol. 6, No. 2: 103 – 111.
- KALNAY, E, M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, M. CHELLIAH, W. EBISUZAK, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K.C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, A. LEETMAA, R. REYNOLDS, R. JENNE, D. JOSEPH, 1996: "The NCEP /NCAR 40-Year Reanalysis Project", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 437-470.
- KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.; HNILO, J.J.; FIORINO, M. & POTTER, G.L., 2002. "The NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1631-1643.
- KARA, A. B., WALLCRAFT, A. J., HULBURT, H. E. (2005). Sea Surface Temperature Sensitivity to Water Turbidity from Simulations of the Turbid Black Sea Using HYCOM. *J. Phys. Oceanogr.*, 35. 33-54.
- KELLY, K. A., THOMPSON, L., CHENG, W., METZGER, E. J. 2007. Evaluation of HYCOM in the Kuroshio Extension Region Using New Metrics. *J. Geophys. Res.* 112.
- KISTLER, R.; KALNAY, E; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; KANAMITSU, M.; KOUSKY, V.; DOOL, H.; JENNE, R. & FIORINO, 2001. "The NCEP-NCAR 50 Year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation." *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 247-267.
- MACKAY, D., I. BUIST, R. MASCARENHAS & S. PATERSON. 1980. Oil Spill Processes and Models. Environmental Protection Service. Canada. Report EE-8.
- PIOLA, A. R.; MATANO, R. P.; PALMA, E. D.; MOLLER, O. O.; CAMPOS, E. J. D., 2005. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, v. 32, pp. 1 - 4.

- REED, M. 2001. Technical Description and Verification Tests of OSCAR 2000, a Multi-Component 3-Dimensional Oil Spill Contingency And Response Model. SINTEF Report. 52p.
- REED, M., AAMO, O. M., DOWNING, K..1996. Calibration and Testing of IKU's Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Model System. Proceedings of the 1996 Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, pp.689-726.
- REED, M.; DALING, P.; LEWIS, A.; DITLEVSEN, M. K.; BRØRS, B.; CLARK, J.; AURAND, D. 2004. Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters. Environmental Modelling & Software, v. 19, p. 681-690.
- REED, M.; JOHANSEN, Ø.; BRANDVIK, P. J.; DALING, P.; LEWIS, A.; FIOCCO, R.; MACKAY, D.; PRENTKI, R. 1999. Oil Spill Modelling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. Spill Science and Technology Bulletin, 5 (1): pp 3-16.
- REED, M.; TURNER, C.; ODULO, A. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 1, Issue 2, pp 143-15, 1994.
- SANTOS, N.G., CERRONE, B.N., SOUZA, R.B., dos SANTOS, F.A. 2011. Estudo sobre a sazonalidade da corrente costeira do Brasil através de um algoritmo não-supervisionado de tratamento de dados de TSM. Apresentação no COLACMAR. Balneário Camboriú, Santa Catarina, Brasil.
- SHAJI, C., WANG, C., HALLIWEL, G. R., WALLCRAFT, A.J. 2005. Simulation of Tropical Pacific And Atlantic Oceans Using a Hybrid Coordinate Ocean Model. Ocean Modelling, 9, pp. 359-87.
- SMITH, W. H. F.; SANDWELL, D. T. 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. Science, v. 277, p. 1957-1962.
- SOUZA, R.B. and ROBINSON, I., 2004. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. Continental Shelf Research vol. 24 (2) pp. 241-262.
- WANG, S.D.; SHEN, Y. M; ZHENG, Y. H. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. Ocean Engineering, v.32, p. 1556-1571, 2005.