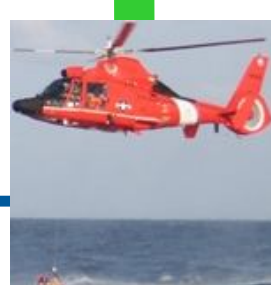
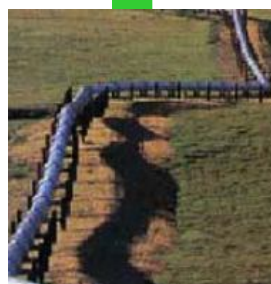
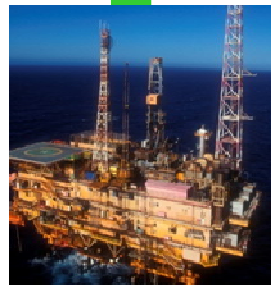
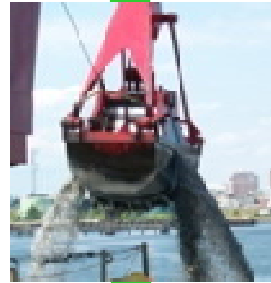


Modelagem de Derrame de Óleo para Suporte ao Plano de Emergência Individual (PEI) do Porto do Itaqui e Porto Grande, Baía de São Marcos (MA)



Revisão 00

Outubro/2012



ASA LatinAmerica
Rua Fidalga, 711
Vila Madalena - São Paulo - SP
CEP 05432-070
<http://www.asascience.com.br>

Empresa Maranhense de Administração
Portuária - Porto do Itaqui
Av. dos Portugueses, S/N
Itaqui - São Luís - MA
CEP 65085-370
<http://www.emap.ma.gov.br>

Modelagem de Derrame de Óleo para Suporte ao Plano de Emergência Individual (PEI) do Porto do Itaqui e Porto Grande, Baía de São Marcos (MA)

Equipe Técnica **ASA LatinAmerica:**

ANA CAROLINA R. LAMMARDO
EDUARDO AYRES YASSUDA
GABRIEL CLAUZET
GABRIELA FREIRE CASSIANO
MARCO ANTONIO CORRÊA
MARIA FERNANDA MENDES FIEDLER
PEDRO FABIANO M. SARMENTO
VIVIAN MARTINHO

(Nº IBAMA : 0325047)
(Nº IBAMA: 0094066)
(Nº IBAMA: 1031373)
(Nº IBAMA: 4730645)
(Nº IBAMA: 0434236)
(Nº IBAMA: 4968902)
(Nº IBAMA: 0800416)
(Nº IBAMA: 5057041)

Revisão 00
Outubro / 2012

A **ASA LatinAmerica** é responsável pelo conteúdo do presente relatório incluindo: tecnologias, metodologias, especificações técnicas, desenhos, figuras, cópias, diagramas, fórmulas, modelos, amostras, e fluxogramas.

A utilização deste material deverá ser compatível com o escopo do projeto/trabalho contratado, fazendo-se expressa menção ao nome da **ASA LatinAmerica** como autora do estudo. Da mesma forma, quando a equipe técnica da **ASA** for incorporada na equipe técnica da empresa contratante, esta deverá ser mencionada, e referenciada, como: “consultores da **ASA LatinAmerica**”. Qualquer dúvida ou alteração desta conduta deverá ser discutida entre o cliente e a **ASA LatinAmerica**.

ASA (Applied Science Associates LatinAmerica), 2012. Modelagem de Derrame de Óleo para Suporte ao Plano de Emergência Individual (PEI) do Porto do Itaqui e Porto Grande, Baía de São Marcos (MA). Relatório Técnico, Revisão 00 (09 de outubro de 2012). 116pp+Anexos.

CONTROLE DE REVISÕES

REV.	DESCRIÇÃO	DATA
00	Documento Original	09/10/2012

ÍNDICE GERAL

RESUMO	1
I INTRODUÇÃO	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO	I-2
II ANÁLISE DE DADOS	II-1
II.1 VENTOS	II-2
II.2 CORRENTES	II-6
II.3 ELEVAÇÃO	II-8
II.4 VAZÃO	II-14
II.5 TEMPERATURA E SALINIDADE	II-15
III MODELAGEM HIDRODINÂMICA	III-1
III.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	III-1
III.1.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E BATIMETRIA	III-1
III.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS	III-2
III.2 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA	III-4
III.2.1 AVALIAÇÃO PARA A MARÉ	III-6
III.2.2 AVALIAÇÃO PARA AS CORRENTES	III-8
III.2.3 COMENTÁRIOS SOBRE A MODELAGEM HIDRODINÂMICA	III-9
IV MODELAGEM DE TRANSPORTE E DISPERSÃO DE ÓLEO	IV-1
IV.1 DADOS DE ENTRADA	IV-1
IV.1.1 CAMPOS DE CORRENTES	IV-2
IV.1.2 DADOS DE VENTO	IV-3
IV.1.3 PONTOS DE RISCO E VOLUMES DE PIOR CASO	IV-3
IV.1.4 CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS UTILIZADOS	IV-4

IV.2	CRITÉRIO DE PARADA ADOTADO NAS SIMULAÇÕES	IV-5
IV.3	DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS	IV-5
V	RESULTADOS DA MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO	V-1
V.1	SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS	V-1
V.1.1	PORTO DO ITAQUI	V-3
V.1.2	PORTO GRANDE	V-15
V.2	SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS	V-21
V.2.1	PORTO DO ITAQUI	V-23
V.2.2	PORTO GRANDE	V-41
VI	CONSIDERAÇÕES FINAIS	VI-1
VII	BIBLIOGRAFIA	VII-1
ANEXO A	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D	A-1
ANEXO B	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS OILMAP	B-1

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (INFRAERO) medido no Aeroporto Internacional de São Luís (MA) para o período de cheia (março a maio), com intervalo de amostragem $dt=1h$ (convenção meteorológica).....	II-5
Tabela 2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (INFRAERO) medido no Aeroporto Internacional de São Luís (MA) para o período de seca (setembro a novembro), com intervalo de amostragem $dt=1h$ (convenção meteorológica).....	II-5
Tabela 3 - Amplitude (cm) e fase local (o) das principais componentes harmônicas para os dados coletados no Terminal da Ponta da Madeira - Itaqui (MA) de 1° de outubro a 5 de novembro de 2002.	II-11
Tabela 4 - Localização das estações fluviométricas da ANA (coordenadas em WGS 84) e período de coleta dos dados de vazões.....	II-14
Tabela 5 - Classificação do RMAE por ranges.	III-4
Tabela 6 - Coordenadas geográficas (WGS 84) dos pontos de risco considerados na modelagem de óleo.....	IV-3
Tabela 7 - Características do óleo tipo MF-380.....	IV-4
Tabela 8 - Características do óleo Diesel.....	IV-5
Tabela 9 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames de óleo.....	IV-6
Tabela 10 - Cenários considerados nas simulações determinísticas de derrames de óleo.....	IV-7
Tabela 11 - Resultados das simulações probabilísticas (extensão da costa com probabilidade de toque e área com probabilidade de ocorrência de óleo na água).....	V-2
Tabela 12 - Resumo dos cenários determinísticos críticos simulados.....	V-22
Tabela 13 - Descrição dos pontos de risco e da hipótese acidental simulada (Sistema de Coordenadas geográficas - WGS 84).....	VI-1
Tabela 14 - Resultados das simulações probabilísticas (extensão da costa com probabilidade de toque e área com probabilidade de ocorrência de óleo na água).....	VI-3

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Localização do Porto do Itaqui e do Porto Grande e dos pontos de risco.I-2
- Figura 2** - Localização (WGS 84) das estações de medição dos dados de vento, maré, vazão, corrente e TS.....II-1
- Figura 3** - Diagrama stick plot dos valores médios diários de dados de vento (INFRAERO) para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2002. ...II-2
- Figura 4** - Histograma direcional dos vetores de vento (INFRAERO) para os períodos de cheia (março a maio), o intervalo de amostragem é de 1h.II-3
- Figura 5** - Histograma direcional dos vetores de vento (INFRAERO) para os períodos de seca (setembro a novembro), o intervalo de amostragem é de 1h.....II-4
- Figura 6** - Séries temporais das componentes Leste (superior) e Norte (inferior) dos vetores de corrente medidos a 1 m de profundidade, em São Luís, entre 6 de outubro e 4 de novembro de 2002, dt = 20 min.II-7
- Figura 7** - Histograma direcional para os dados coletados a 1 m de profundidade, em São Luís, entre 6 de outubro e 4 de novembro de 2002, dt = 20 min.II-8
- Figura 8** - Série temporal de nível do mar medido no Terminal da Ponta da Madeira de 1º de outubro a 5 de novembro de 2002.....II-9
- Figura 9** - Espectro de amplitudes calculado a partir da série temporal de variação do nível do mar registrada no período entre 1º de outubro de 2002 e 5 de novembro de 2002.II-10
- Figura 10** - Constantes harmônicas da FEMAR referentes à estação Porto do Itaqui (MA).II-12
- Figura 12** - Espectro de amplitudes calculado a partir da série temporal de maré apresentada na Figura 11, registrada para o período compreendido entre 1º de outubro e 1º de dezembro de 2002.....II-14
- Figura 13** - Vazões médias mensais (m³/s) dos rios Grajaú, Pindaré, Munim e Mearim.II-15
- Figura 14** - Perfil de salinidade e temperatura realizado nas coordenadas: 2,59350°S e 44,37367°W, às 14h55 do dia 14/06/2002.II-16
- Figura 16** - Constantes harmônicas da FEMAR referentes à estação JP-15 (MA).....III-3

- Figura 17** - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m), para o período de 7 a 22 de outubro de 2002. A série temporal dos dados coletados é plotada em azul, enquanto que a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica é plotada em vermelho..... III-7
- Figura 18** - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m), para o período de 14 a 29 de março de 2002. A série temporal obtida através de previsão harmônica é plotada em azul, enquanto que a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica é plotada em vermelho..... III-7
- Figura 19** - Séries temporais das componentes de corrente (m/s), para o período de 7 a 22 de outubro de 2002. O painel superior apresenta a componente u (E-W) e o painel inferior, a componente v (N-S). A série temporal dos dados coletados é plotada em azul, enquanto que a série temporal dos resultados da modelagem hidrodinâmica, é plotada em vermelho. III-8
- Figura 20** - Instantâneo do campo de correntes para um momento de enchente de sizígia. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores, a intensidade (em metros). III-9
- Figura 21** - Instantâneo do campo de correntes para um momento de vazante de sizígia. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores, a intensidade (em metros). III-10
- Figura 22** - Grade definindo os contornos de terra (grade land-water) utilizada na modelagem. IV-2
- Figura 23** - Cenário P1_MF-380_PC_CHEIA_72H: Contornos de probabilidade de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-3
- Figura 24** - Cenário P1_MF-380_PC_CHEIA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-4
- Figura 25** - Cenário P1_MF-380_PC_CHEIA_72H Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo MF-380 ocorrendo durante o período de cheia no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-5
- Figura 26** - Cenário P2_MF-380_PC_CHEIA_72H: Contornos de probabilidade de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P2, Bacia de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-6

- Figura 27** - Cenário P2_MF-380_PC_CHEIA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P2, Bacia de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação..... V-7
- Figura 28** - Cenário P2_MF-380_PC_CHEIA_72H Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo MF-380 ocorrendo durante o período de cheia no ponto P2, Bacia de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação..... V-8
- Figura 29** - Cenário P1_MF-380_PC_SECA_72H: Contornos de probabilidade de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de seca no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-9
- Figura 30** - Cenário P1_MF-380_PC_SECA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo MF-380 na água para um acidente durante o período de seca no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-10
- Figura 31** - Cenário P1_MF-380_PC_SECA_72H: Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo MF-380 ocorrendo durante o período de seca no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-11
- Figura 32** - Cenário P2_MF-380_PC_SECA_72H: Contornos de probabilidade de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de seca no ponto P2, Bacia de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-12
- Figura 33** - Cenário P2_MF-380_PC_SECA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo MF-380 na água para um acidente durante o período de seca no ponto P2, Bacia de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-13
- Figura 34** - Cenário P2_MF-380_PC_SECA_72H: Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo MF-380 ocorrendo durante o período de seca no ponto P2, Bacia de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação..... V-14
- Figura 35** - Cenário P3_DIESEL_PC_CHEIA_72H: Contornos de probabilidade de óleo Diesel na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-15

- Figura 36** - Cenário P3_DIESEL_PC_CHEIA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo Diesel na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação. V-16
- Figura 37** - Cenário P3_DIESEL_PC_CHEIA_72H Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo Diesel ocorrendo durante o período de cheia no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação..... V-17
- Figura 38** - Cenário P3_DIESEL_PC_SECA_72H: Contornos de probabilidade de óleo Diesel na água para um acidente ocorrendo durante o período de seca no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação..... V-18
- Figura 39** - Cenário P3_DIESEL_PC_SECA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo Diesel na água para um acidente durante o período de seca no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação..... V-19
- Figura 40** - Cenário P3_DIESEL_PC_SECA_72H: Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo Diesel ocorrendo durante o período de seca no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação..... V-20
- Figura 41** - Cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação. V-24
- Figura 42** - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H..... V-24
- Figura 43** - Cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação. V-25
- Figura 44** - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H..... V-25
- Figura 45** - Cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação. V-26
- Figura 46** - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H..... V-26

Figura 47 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.....	V-27
Figura 48 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H.....	V-27
Figura 49 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.	V-28
Figura 50 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H.....	V-28
Figura 51 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.....	V-29
Figura 52 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H.	V-29
Figura 53 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.	V-30
Figura 54 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H.....	V-30
Figura 55 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.....	V-31
Figura 56 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H.....	V-31
Figura 57 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.	V-33
Figura 58 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H.....	V-33

- Figura 59** - Cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação. V-34
- Figura 60** - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H. V-34
- Figura 61** - Cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação. V-35
- Figura 62** - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H. V-35
- Figura 63** - Cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação. V-36
- Figura 64** - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H. V-36
- Figura 65** - Cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação. V-37
- Figura 66** - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H. V-37
- Figura 67** - Cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação. V-38
- Figura 68** - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H. V-38
- Figura 69** - Cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação. V-39
- Figura 70** - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H. V-39

- Figura 71** - Cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação..... V-40
- Figura 72** - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H..... V-40
- Figura 73** - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação. V-42
- Figura 74** - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_EN_72H..... V-42
- Figura 75** - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação..... V-43
- Figura 76** - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H. V-43
- Figura 77** - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação. V-44
- Figura 78** - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_EN_72H. V-44
- Figura 79** - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação..... V-45
- Figura 80** - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_VZ_72H. V-45
- Figura 81** - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação. V-47
- Figura 82** - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_EN_72H..... V-47

- Figura 83** - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação. V-48
- Figura 84** - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_VZ_72H. V-48
- Figura 85** - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação. V-49
- Figura 86** - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_EN_72H. V-49
- Figura 87** - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação. V-50
- Figura 88** - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_VZ_72H. V-50

RESUMO

Este relatório apresenta os resultados das simulações numéricas do transporte de óleo decorrentes de potenciais acidentes no Porto do Itaqui e no Porto Grande, localizados na Baía de São Marcos, região portuária do Município de São Luís, Estado do Maranhão.

A modelagem foi conduzida através da utilização de um sistema de modelos conhecido como OILMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida a partir de resultados do Delft3D-FLOW, implementado pela **ASA**.

Para determinar os contornos de probabilidade de ocorrência do óleo na água e na costa, foram conduzidas simulações probabilísticas considerando duas condições hidrológicas (cheia e seca), três pontos de risco e dois volumes de pior caso (200 m^3 e 10.000 m^3) e dois tipos de óleo (MF-380 e Diesel). A partir da análise da modelagem hidrodinâmica foram selecionados os cenários determinísticos que contemplassem os períodos de maré de sizígia e quadratura e os regimes de enchente e vazante, para ambas as condições hidrológicas (cheia e seca).

O critério de parada utilizado foi o tempo de 72 horas para o acompanhamento das manchas de óleo, 12 horas além do tempo máximo estabelecido na Resolução do CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008), para a disponibilização de recursos de contenção/limpeza no local da ocorrência da descarga.

Os resultados das simulações probabilísticas demonstraram que a magnitude do transporte do óleo está principalmente associada à localização do ponto de vazamento. Quanto mais exposto a hidrodinâmica do canal principal da Baía de São Marcos, maior será a magnitude do transporte do óleo. Também se observou que o período sazonal apresenta menor significância na magnitude dos impactos, quando comparado à localização do ponto de risco.

I INTRODUÇÃO

Este relatório tem a finalidade de subsidiar a Hidroclean Proteção Ambiental na elaboração do Plano de Emergência Individual (PEI) do Porto do Itaqui e do Porto Grande, localizados na Baía de São Marcos, região portuária do Município de São Luís, Estado do Maranhão. Assim, apresenta-se neste estudo a modelagem de derrame de óleo decorrente de potenciais acidentes referentes às operações no Porto do Itaqui e no Porto Grande.

As simulações foram conduzidas através da utilização de um sistema de modelos conhecido como OILMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** dos EUA. A **ASA** possui mais de 30 anos de experiência com utilização de ferramentas computacionais para estudos de impacto ambiental causado por acidentes com petróleo.

Para estudos de modelagem, como o realizado neste trabalho, são necessários: (a) um conhecimento detalhado das características geomorfológicas do local (morfologia da linha de costa e fundo oceânico), (b) padrões de circulação local, (c) séries temporais de vento de longa duração e (d) caracterização físico-química do óleo.

A caracterização dos padrões de circulação foi obtida a partir dos resultados do sistema de modelos numéricos Delft3D implementado pela **ASA LatinAmerica** na região de estudo. O campo de vento utilizado para os processamentos do modelo hidrodinâmico e de deriva de óleo foi determinado a partir dos dados fornecidos pela INFRAERO¹, para o Aeroporto Internacional de São Luís (MA).

O Capítulo I, além de apresentar os objetivos deste estudo, fornece informações sobre a área em questão. O Capítulo II apresenta a análise dos dados meteorológicos, oceanográficos e hidrológicos utilizados neste estudo, enquanto o Capítulo III descreve a modelagem hidrodinâmica realizada e sua avaliação. O Capítulo IV descreve os dados de entrada do modelo OILMAP utilizado na modelagem dos cenários acidentais de óleo, as simulações

¹ Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária.

realizadas e suas características. Os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas são apresentados no Capítulo V. Por fim, o Capítulo VI discute os resultados obtidos neste estudo. Os Anexos A e B apresentam, respectivamente, a descrição dos sistemas de modelos Delft3D e OILMAP.

1.1 ÁREA DE ESTUDO

Na Figura 1 é apresentada a região de estudo, na Baía de São Marcos, onde é possível visualizar a localização do Porto do Itaqui e o Porto Grande. Também são apresentadas as localizações dos três pontos de risco utilizados na modelagem de óleo.

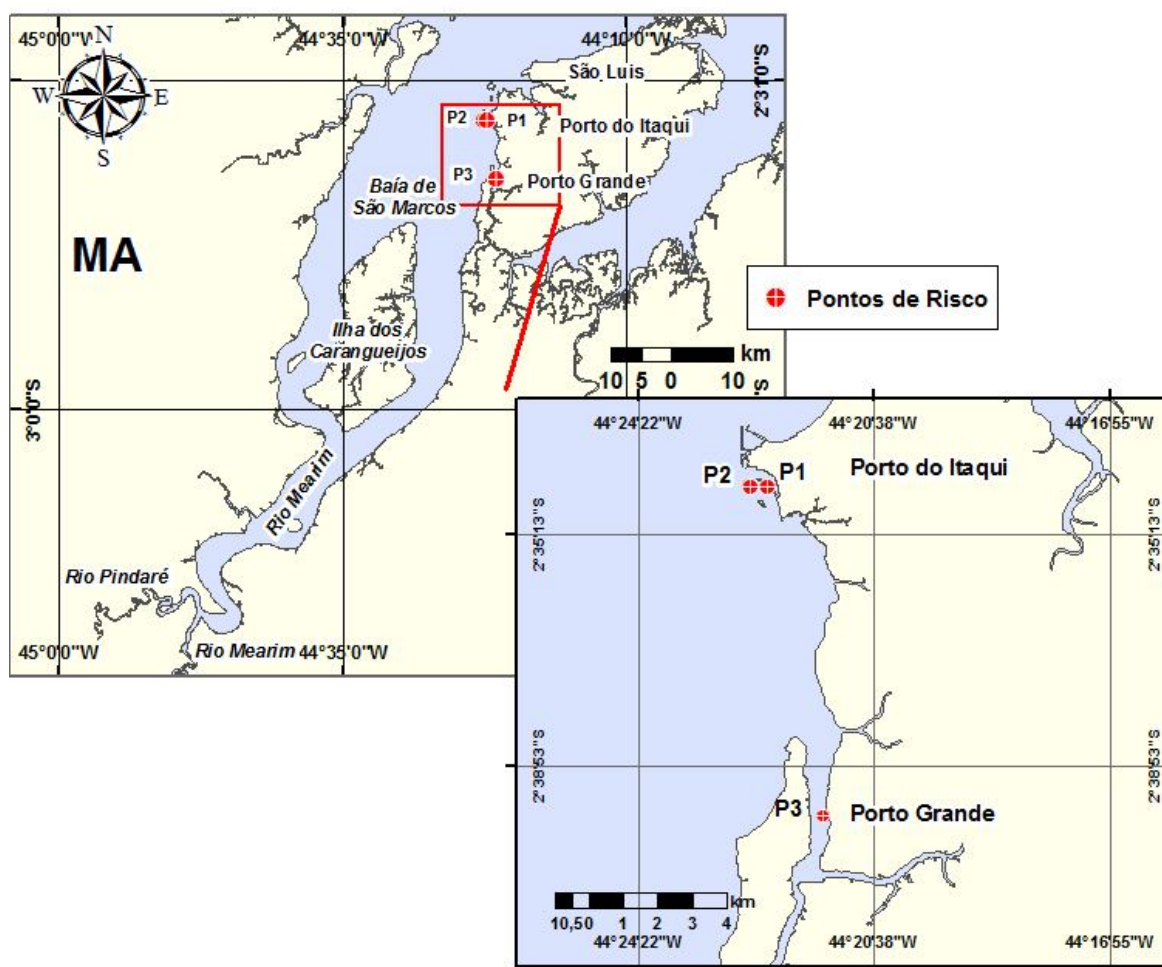


Figura 1 - Localização do Porto do Itaqui e do Porto Grande e dos pontos de risco.

Como pode ser observado na Figura 1, o Rio Mearim divide-se em dois braços em volta da Ilha dos Caranguejos para formar no seu estuário a Baía de São Marcos (LOPES, 2006).

Do encontro dos rios Mearim e Pindaré, ao sul da Baía de São Marcos, até o mar aberto, a Baía de São Marcos apresenta uma extensão de, aproximadamente, 50 milhas e largura de 13 milhas na entrada, diminuindo para 7 milhas na metade da extensão, atingindo, já nas condições essencialmente marinhas, a largura de 26 milhas. (SUDENE, 1978 *apud* LOPES, 2006). As formações estuarinas dos rios Pindaré, Itapecuru e Mearim (com o Grajaú sendo seu principal afluente) se reúnem para formar o Golfão Maranhense. A grande Ilha do Maranhão (também conhecida por Ilha de São Luís) ocupa o centro deste golfo, deixando a leste a Baía de São José e a oeste a Baía de São Marcos (LOPES, 2006).

O clima da região é quente e úmido com temperatura de 26 °C. O litoral tem grandes variações de marés, cujas máximas atingem 7,1 m (março e setembro) com variação média de 3,4 m (FURTADO, 2007).

A região estudada é caracterizada por um regime de ventos de leste, conhecidos por ventos alísios. A intensidade desses ventos aumenta do verão para o inverno (RIEHL, 1965). Variações sazonais podem ocorrer devido à interação entre o fluxo médio e o sistema de ventos locais, como observado por Kousky (1980).

O Golfão Maranhense se enquadra como uma zona macrotidal, onde as marés, especificamente na Baía de São Marcos, atingem amplitudes maiores do que 4 metros e correntes com velocidades superiores a 7,5 nós (3,9 m/s) registradas pela DHN (1972 *apud* ALCÂNTARA & SANTOS, 2005).

Segundo Silva *et al.* (2006), a orla costeira de São Luís está submetida a uma hidrodinâmica regida pelo domínio de marés semidiurnas (duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar), com amplitude média de 4,6 m que podem chegar a 7,2 m na maré de sizígia;. Porém, em 75% do tempo, as amplitudes das marés são inferiores a 5,5 m.

Esse regime de maré com duração de, aproximadamente, 25 horas (24 horas e 50 minutos, dia lunar), atinge a velocidade máxima de corrente na terceira hora de enchente e na terceira hora de vazante, descendo proporcionalmente até as estofas de preamar e baixa-mar (SILVA *et al.*, 2006).

A mesma afirmação é feita por Garcia (2007), na qual segundo a autora, em levantamentos realizados em marés de sizígia, constatou-se que as maiores velocidades correspondem aos períodos de meia maré.

De acordo com Pereira & Harari (1995), há grande predominância da energia da maré na circulação da plataforma com um efeito ressonante da componente M_2 dentro da Baía de São Marcos. O modo de propagação da onda de maré é predominantemente progressivo na plataforma e estacionário dentro da baía.

II ANÁLISE DE DADOS

O levantamento de dados meteorológicos, oceanográficos e hidrográficos, nas imediações da região de estudo, teve por objetivo: 1) obter informações para uma melhor compreensão e descrição da dinâmica da área; e 2) auxiliar a preparação das forçantes para as modelagens, bem como para a validação e avaliação da modelagem hidrodinâmica. As informações consistem de dados pretéritos cujos pontos de coleta apresentados na Figura 2, são descritos e analisados neste capítulo.

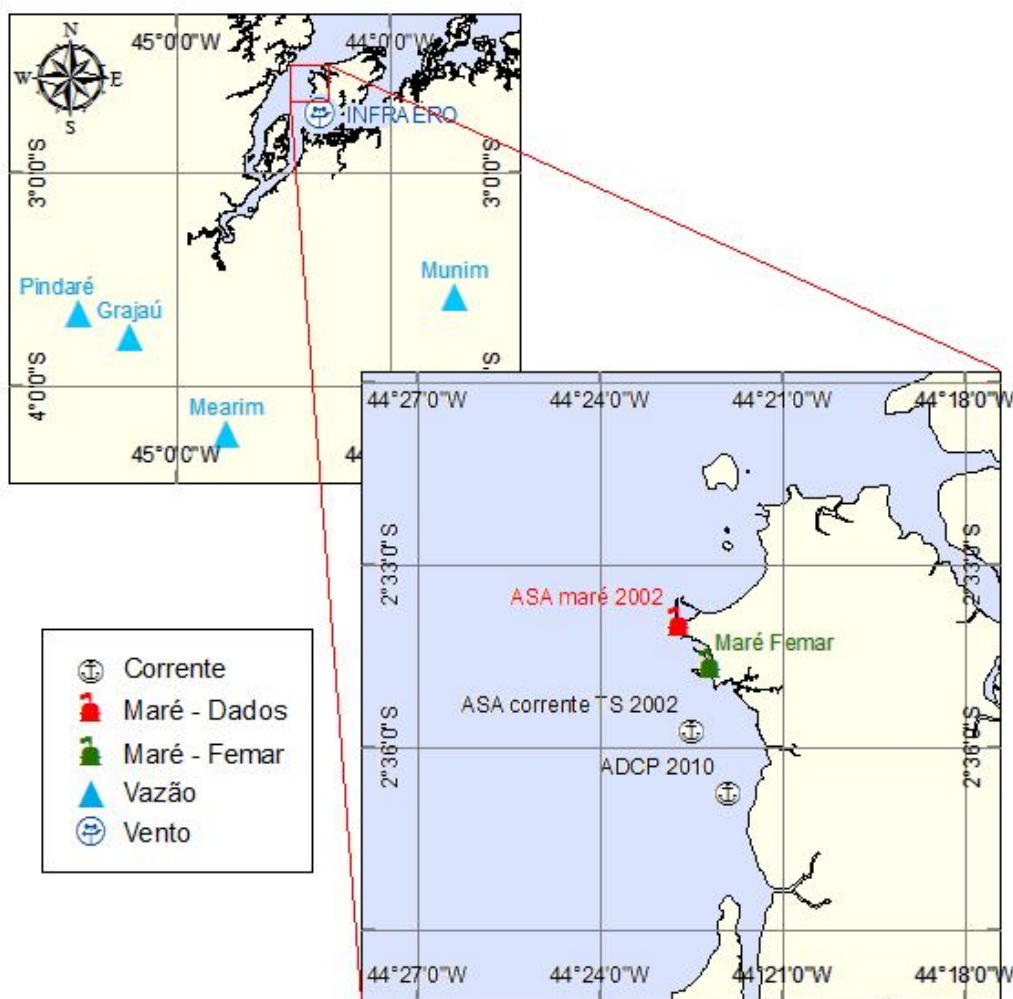


Figura 2 - Localização (WGS 84) das estações de medição dos dados de vento, maré, vazão, corrente e TS.

II.1 VENTOS

Os dados de vento utilizados neste estudo foram fornecidos pela INFRAERO, e coletados na estação meteorológica do Aeroporto Internacional de São Luís (MA) em intervalos de 1h, durante o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2002, nas coordenadas 02º35,00'S e 44º14,00'W (WGS 84). A Figura 3 apresenta o diagrama *stick plot* dos valores médios diários calculados para estes dados de vento. Nesta figura, pode-se observar que os ventos mais frequentes e mais intensos são provenientes do quadrante NE, associados à incidência dos ventos alísios na região. Pode-se observar, também, um aumento na intensidade entre os meses de julho e dezembro, com a transição mais significativa ocorrendo no mês de agosto.

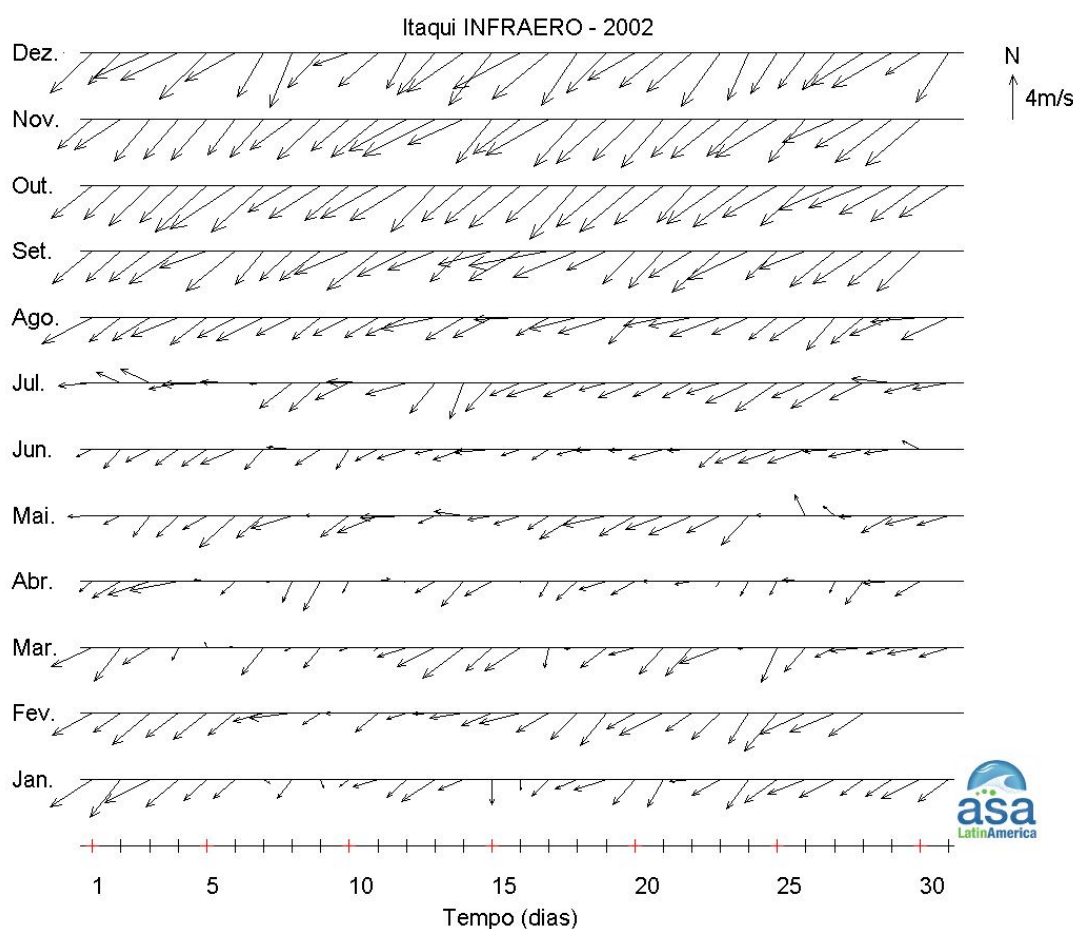


Figura 3 - Diagrama *stick plot* dos valores médios diários de dados de vento (INFRAERO) para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2002.

As Figuras 4 e 5 apresentam os histogramas direcionais dos dados de vento para os períodos de cheia (março, abril e maio) e seca (setembro, outubro e novembro), respectivamente. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica. Os círculos concêntricos indicam a intensidade do vento (em m/s) e a escala de cores representa a porcentagem de incidência (Perc. Obs.).

Analisando as figuras, observa-se o predomínio de ventos de nordeste para ambos os períodos. As intensidades médias para o período de cheia são de, aproximadamente, 3,5 m/s atingindo máximos de 9,0 m/s. Já as intensidades médias para o período de seca são de, aproximadamente, 5,5 m/s, atingindo máximos de 12 m/s.

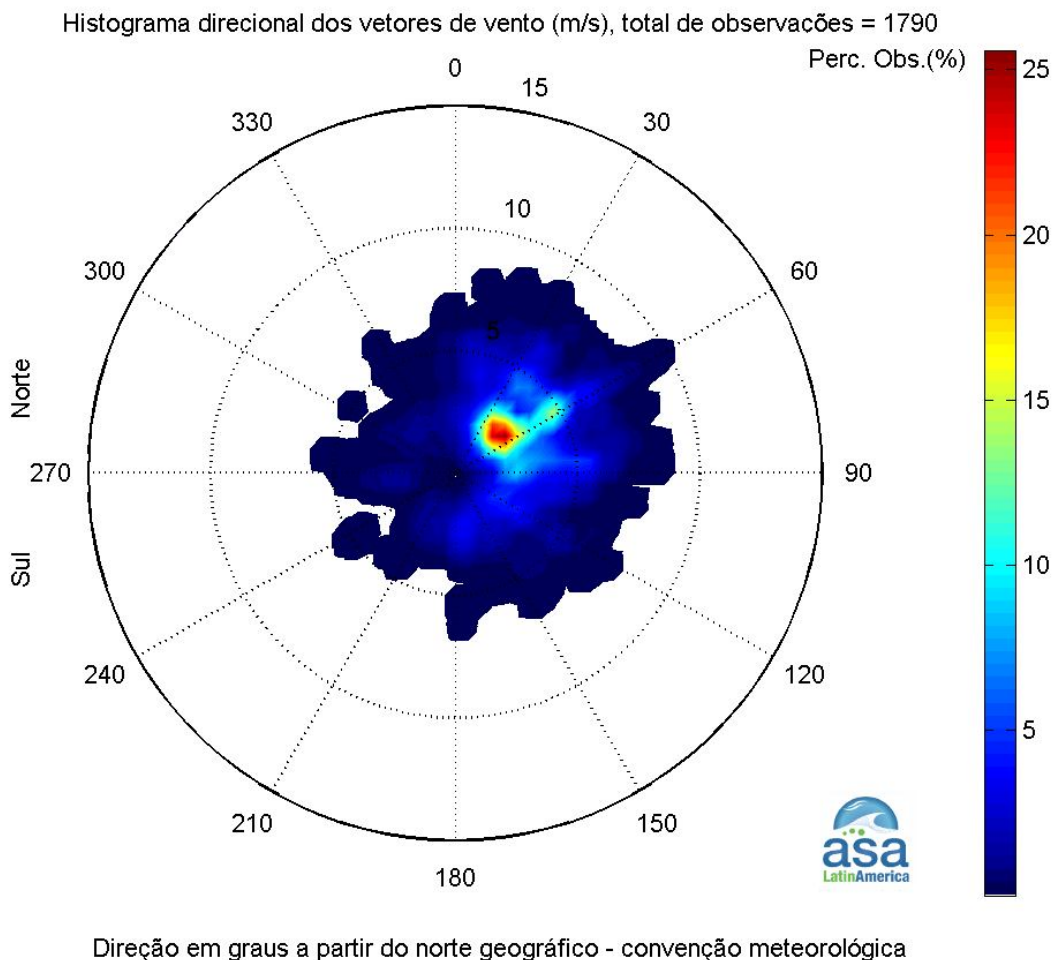


Figura 4 - Histograma direcional dos vetores de vento (INFRAERO) para os períodos de cheia (março a maio), o intervalo de amostragem é de 1h.

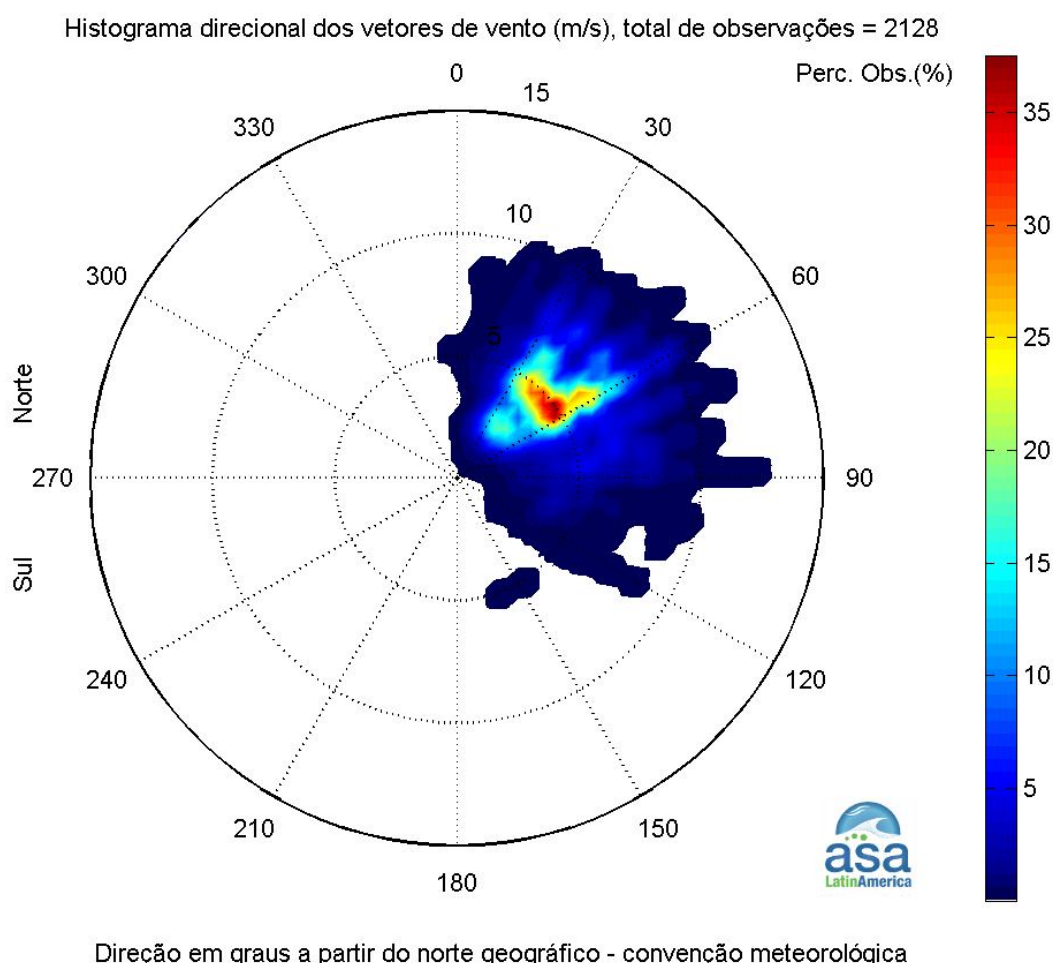


Figura 5 - Histograma direcional dos vetores de vento (INFRAERO) para os períodos de seca (setembro a novembro), o intervalo de amostragem é de 1h.

A Tabela 1 apresenta a distribuição conjunta de intensidades e direções desses ventos durante o período de cheia. Os ventos mais frequentes foram os de ENE (23,7%) e NE (20,7%). Os ventos com velocidade média máxima são originários de ENE (3,7m/s), NNE e E (3,6 m/s). Os ventos mais intensos registrados foram provenientes das direções E e ENE (9,3 m/s). Do total de registros dos ventos, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 6,0m/s, como indicam os percentis apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (INFRAERO) medido no Aeroporto Internacional de São Luís (MA) para o período de cheia (março a maio), com intervalo de amostragem dt=1h (convenção meteorológica).

Vel oc. (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tot.	Perc.	Di r. Méd.
0, 0- 1,0	1	2	4	0	3	5	5	2	0	0	0	0	1	3	0	1	27	1,2	90
1, 0- 2,0	17	20	33	27	28	33	14	19	18	7	4	4	3	3	6	239	10,8	84	
2, 0- 3,0	33	83	200	151	101	47	19	24	36	9	1	1	9	3	5	10	732	33,2	63
3, 0- 4,0	14	51	87	108	83	27	13	13	10	4	2	0	5	4	4	3	428	19,4	65
4, 0- 5,0	24	48	59	89	66	13	2	7	1	0	1	1	4	0	0	2	317	14,4	58
5, 0- 6,0	24	41	43	81	63	11	6	3	3	0	0	3	2	1	0	4	285	12,9	59
6, 0- 7,0	6	21	21	46	24	7	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	129	5,8	61
7, 0- 8,0	1	5	9	15	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	1,7	57
8, 0- 9,0	0	2	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0,5	62
9, 0-10,0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,1	73
Total	120	273	456	524	378	145	60	70	69	20	8	9	24	14	12	26	2208		
Porc.	5,4	12,4	20,7	23,7	17,1	6,6	2,7	3,2	3,1	0,9	0,4	0,4	1,1	0,6	0,5	1,2			
Vel. méd.	3,4	3,6	3,2	3,7	3,6	2,9	2,6	2,6	2,4	2,2	2,3	3,1	2,8	2,2	2,4	2,8			
Vel. máx.	7,7	8,2	7,7	9,3	9,3	7,7	6,2	6,2	6,2	3,1	4,1	5,1	5,1	5,1	3,1	5,1			
Percts. (0, 9)	5,0	6,0	5,0	6,0	5,0	5,0	5,0	4,0	3,0	3,0	3,7	5,0	4,1	3,2	3,0	5,0			

A Tabela 2 apresenta a distribuição conjunta de intensidades e direções desses ventos durante o período de seca, utilizando a convenção meteorológica. Os ventos mais frequentes vieram de NE (37,6%) e ENE (34,1%). Os ventos com velocidade média máxima vieram de E (6,0 m/s), N e ENE (5,9 m/s). Os ventos mais intensos registrados foram provenientes das direções E (12,3 m/s), NE e ENE (11,3 m/s).

Tabela 2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (°) do vento (INFRAERO) medido no Aeroporto Internacional de São Luís (MA) para o período de seca (setembro a novembro), com intervalo de amostragem dt=1h (convenção meteorológica).

Vel oc. (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tot.	Perc.	Di r. Méd.
0, 0- 1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
1, 0- 2,0	0	4	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0,3	41
2, 0- 3,0	0	34	40	19	8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	103	4,8	45
3, 0- 4,0	0	40	97	46	14	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	202	9,5	50
4, 0- 5,0	4	60	147	108	28	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	354	16,6	52
5, 0- 6,0	4	78	204	160	41	7	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	496	23,3	52
6, 0- 7,0	3	60	160	184	49	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	459	21,6	54
7, 0- 8,0	1	40	81	111	35	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	269	12,6	55
8, 0- 9,0	3	20	41	46	14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	126	5,9	54
9, 0-10,0	0	11	22	33	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81	3,8	58
10, 0-11,0	0	1	5	15	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	1,1	61
11, 0-12,0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,2	68
12, 0-13,0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,0	90
Total	15	348	800	725	210	27	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2127		
Porc.	0,7	16,4	37,6	34,1	9,9	1,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
Vel. méd.	5,9	5,2	5,3	5,9	6,0	4,8	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
Vel. máx.	8,2	10,3	11,3	11,3	12,3	8,7	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
Percts. (0, 9)	8,0	7,0	7,0	8,0	8,0	6,8	0,0	5,0											

II.2 CORRENTES

Neste capítulo são analisados os dados de correntes coletados pela equipe da **ASA LatinAmerica** durante um período em 2002. Estes dados foram coletados com um correntógrafo acústico *Falmouth 2-D*, instalado numa armação de ferro disposta pelo través de uma embarcação fundeada na posição 02°35,36'S e 44°22,25'W (WGS 84). A coleta foi realizada na profundidade de 1 m, durante o período de 6 de outubro a 4 de novembro de 2002, com intervalo de 20 minutos.

A Figura 6 apresenta as séries temporais das componentes zonal e meridional da corrente. A componente zonal (figura superior) tem intensidades inferiores à da componente meridional. Isto se deve à forma da Baía de São Marcos, com orientação aproximadamente norte-sul, resultando num escoamento quase unidirecional. A simples inspeção visual dos gráficos das séries temporais indica que na região ocorre a predominância da maré semi diurna.

A Figura 7 apresenta o histograma direcional de corrente para estes dados. Analisando a figura, observa-se um pequeno desvio de direção da corrente de maré enchente e uma pequena predominância energética na vazante. Estas características estão diretamente associadas à proximidade entre o ponto de coleta e a costa e, as maiores intensidades observadas na vazante, devem-se, ao aporte fluvial.

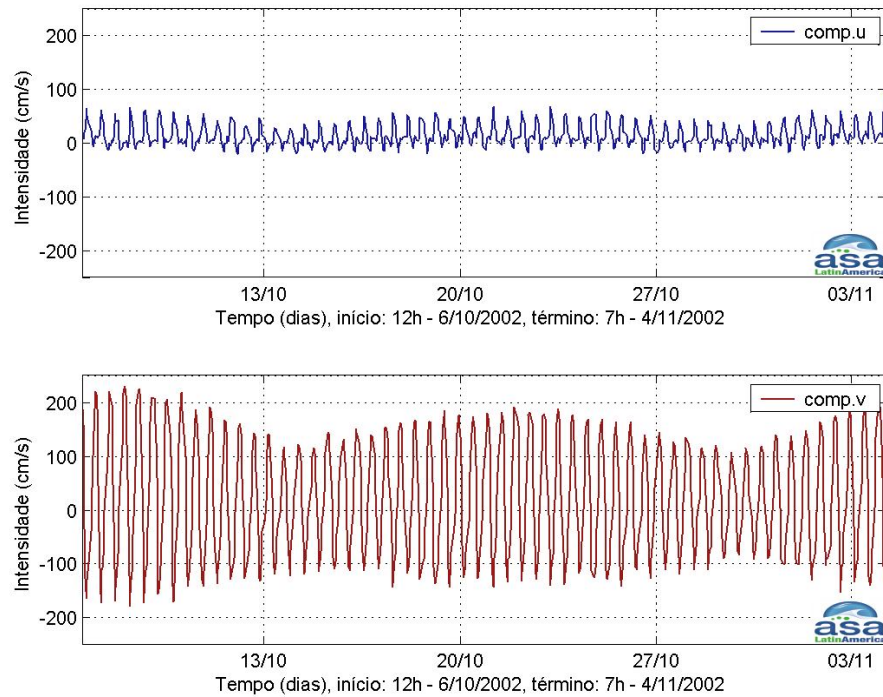
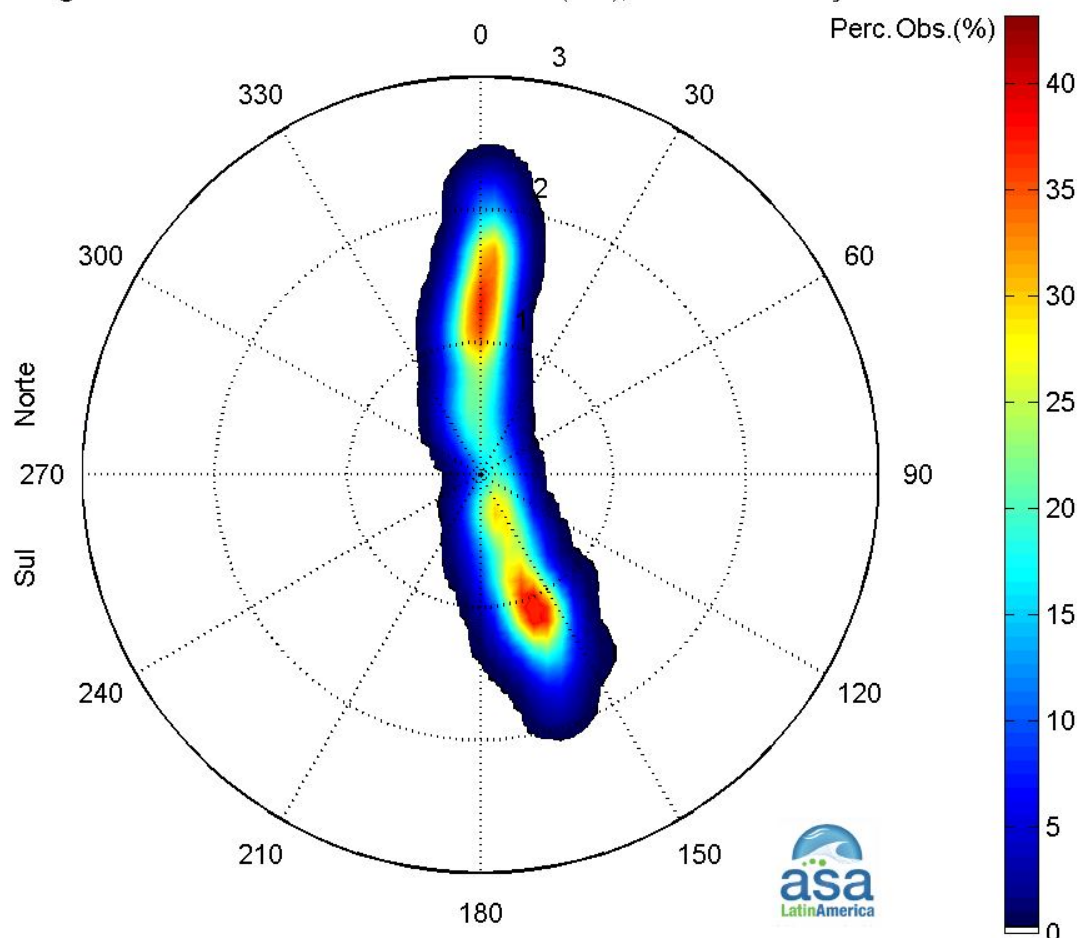


Figura 6 - Séries temporais das componentes Leste (superior) e Norte (inferior) dos vetores de corrente medidos a 1 m de profundidade, em São Luís, entre 6 de outubro e 4 de novembro de 2002, $dt = 20$ min.

Histograma direcional dos vetores de corrente (m/s), total de observações = 691



Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.94 m/s

Figura 7 - Histograma direcional para os dados coletados a 1 m de profundidade, em São Luís, entre 6 de outubro e 4 de novembro de 2002, $dt = 20$ min.

II.3 ELEVAÇÃO

Para identificar o padrão da elevação de superfície do mar na região de estudo, foram realizadas análises com os dados coletados pela **ASA Latin America** e com os dados disponibilizados pela FEMAR², para a estação maregráfica do Porto do Itaqui (MA).

² Fundação de Estudos do Mar. Disponível em <<http://www.fundacaofemar.org.br/#>>.

Os dados coletados pela **ASA LatinAmerica** foram obtidos a partir de um marégrafo instalado no cais de rebocadores da VALE, nas coordenadas 02°33'56"S e 44°22'42"W (WGS 84), durante o período de 1º de outubro a 5 de novembro de 2002. A estação maregráfica da FEMAR no Porto do Itaqui (MA), localiza-se nas coordenadas 02°34'36"S e 44°22'13"W.

A análise dos dados coletados pela **ASA** (Figura 8) demonstrou que a maré astronômica apresenta oscilações máximas da ordem de 6,26 metros, com o nível d'água variando entre -3,27 e 2,99 metros.

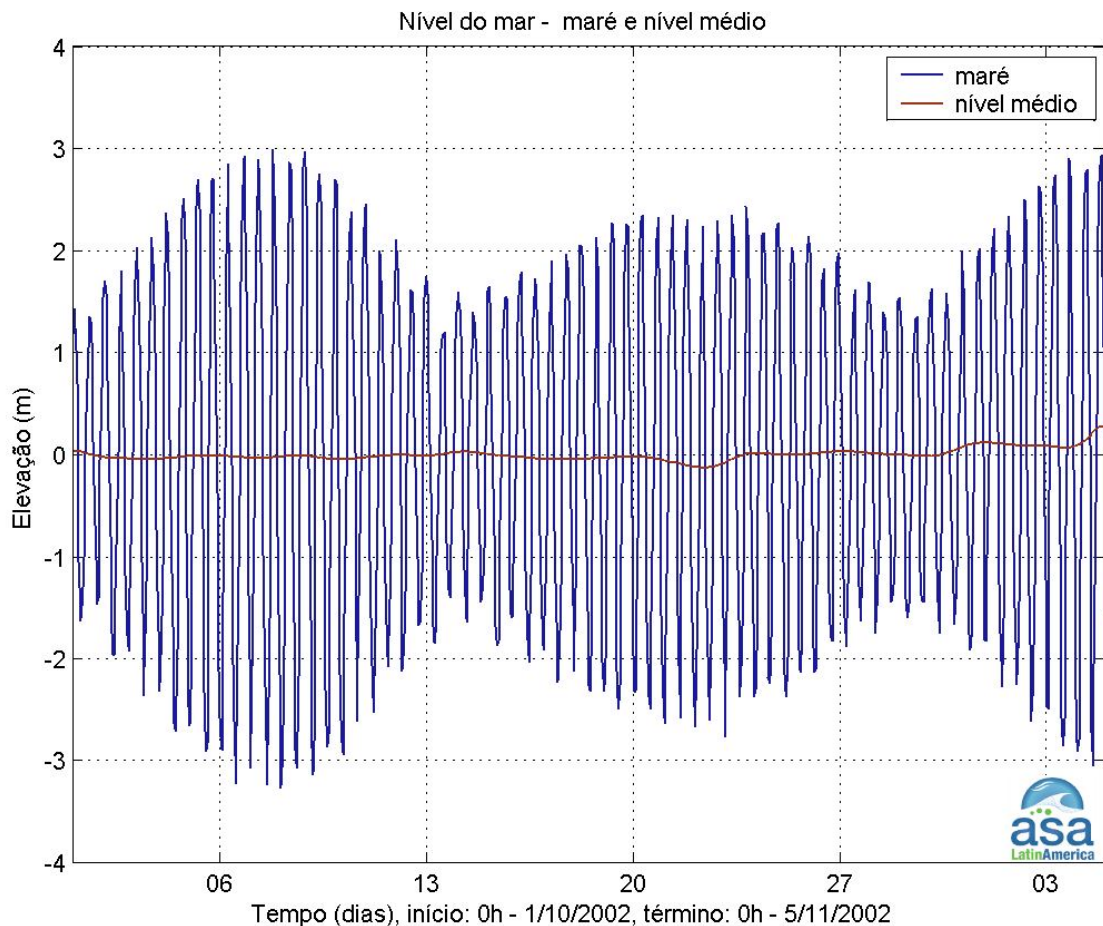


Figura 8 - Série temporal de nível do mar medido no Terminal da Ponta da Madeira de 1º de outubro a 5 de novembro de 2002.

O espectro de amplitudes de maré destes dados (Figura 9) apresenta um pico com amplitude de quase 1,7 m na faixa de frequência de dois ciclos por dia (cpd),

correspondente à maré semidiurna. Um segundo pico pode ser observado na faixa de 1 cpd (maré diurna), com amplitude na ordem dos 10 cm.

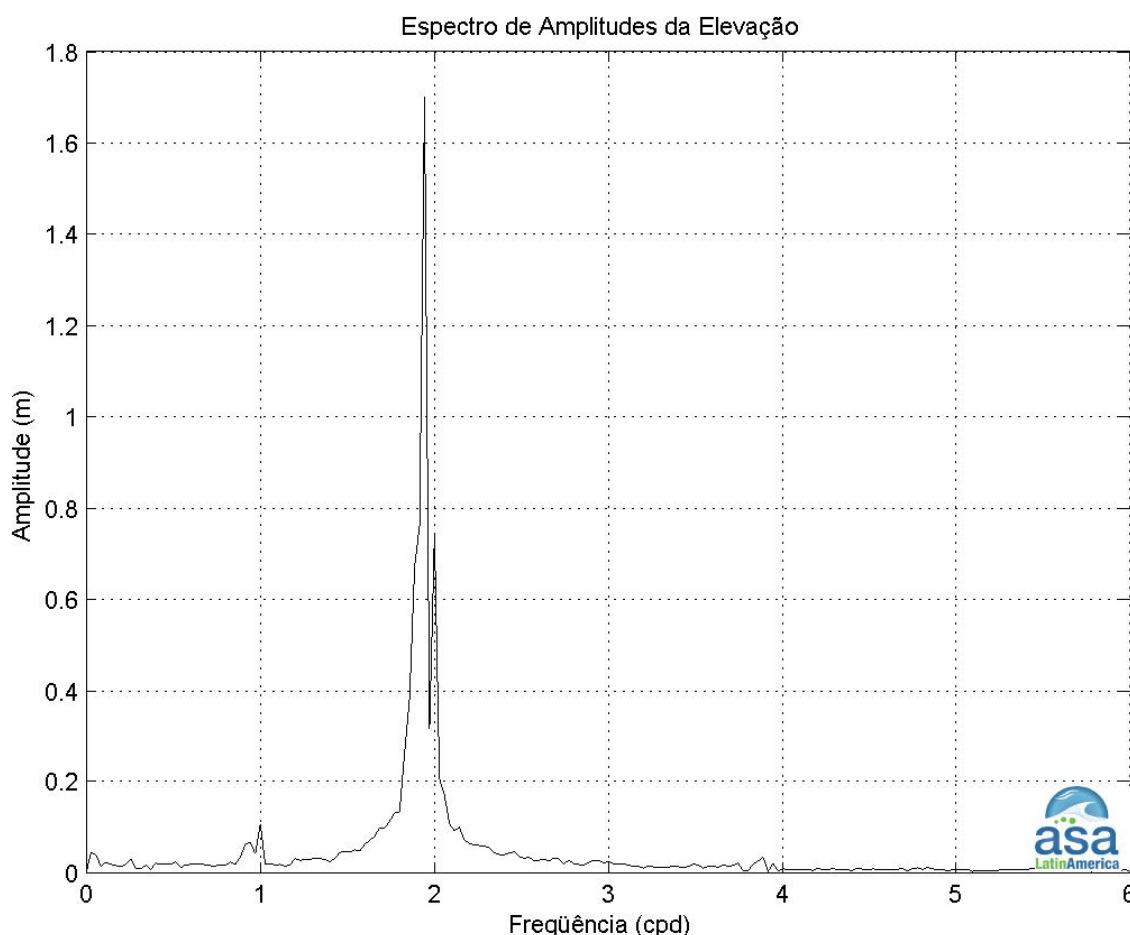


Figura 9 - Espectro de amplitudes calculado a partir da série temporal de variação do nível do mar registrada no período entre 1^o de outubro de 2002 e 5 de novembro de 2002.

A Tabela 3 apresenta as constantes harmônicas obtidas através da análise harmônica de maré (SCHUREMANN, 1941), aplicada a este conjunto de dados. As principais componentes são a M2 e S2 com amplitude de 203,36 e 68,78 cm, respectivamente. A componente N2 tem amplitude de 48,98 cm, K2 de 15,70 cm e K1 de 12,36 cm. Todas as demais componentes apresentam amplitudes inferiores a 10 cm.

Tabela 3 - Amplitude (cm) e fase local (o) das principais componentes harmônicas para os dados coletados no Terminal da Ponta da Madeira - Itaqui (MA) de 1^o de outubro a 5 de novembro de 2002.

Análise Harmônica de Marés		
Componente	Amplitude (cm)	Fase Local
Q1	1,63	185
O1	8,90	209
P1	3,99	173
K1	12,36	231
N2	49,98	185
S2	203,36	203
K2	68,78	213
M3	15,70	329
MN4	2,43	322
M4	4,30	175
MS4	2,63	211

Na Figura 10 é apresentada a tabela da FEMAR, com os valores das constantes harmônicas identificadas para a estação maregráfica do Porto do Itaqui. Na Figura 11 é possível visualizar a série temporal de elevação da superfície do mar, obtida através do cálculo da previsão harmônica para as respectivas constantes.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

Nome da Estação :		PORTO DE ITAQUI – MA			
Localização :		Na extremidade sul do Porto			
Organ. Responsável :		INPH / CODOMAR / DHN			
Latitude :		02° 34,6' S	Longitude :		44° 22,2' W
Período Analisado :		01/01/85 a 31/03/85		Nº de Componentes : 35	
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		VII H 17 min	Nível Médio (Zo):		343 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		625 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		502 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		61 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		184 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	9,6	291
Ssa	-	-	N ₂	44,5	199
Mm	-	-	NU ₂	8,5	199
Mf	-	-	M ₂	220,5	201
MTM	-	-	L ₂	28,1	141
Msf	-	-	T ₂	3,6	248
Q ₁	-	-	S ₂	61,5	250
O ₁	9,8	213	K ₂	16,7	254
M ₁	-	-	MO ₃	-	-
P ₁	3,1	235	M ₃	1,4	260
K ₁	9,3	237	MK ₃	-	-
J ₁	-	-	MN ₄	2,3	214
OO ₁	-	-	M ₄	7,3	220
MNS ₂	-	-	SN ₄	-	-
2N ₂	5,9	198	MS ₄	3,3	264
Referências de Nível: RN-1: fixada na calçada do edifício da Administração do Porto.					
Obs: Outros Períodos: 18/04/60 a 02/05/60; 23/08/72 a 23/09/72; 27/05/80 a 27/06/80; 21/06/85 a 26/08/85; 15/08/86 a 29/09/86; 19/11/89 a 07/12/89; 06/06/84 a 04/10/84. O INPH tem observações de 1972 a 1988 Consta das Tábuas das Marés					

Código BNDO: 30110

Figura 10 - Constantes harmônicas da FEMAR referentes à estação Porto do Itaqui (MA).

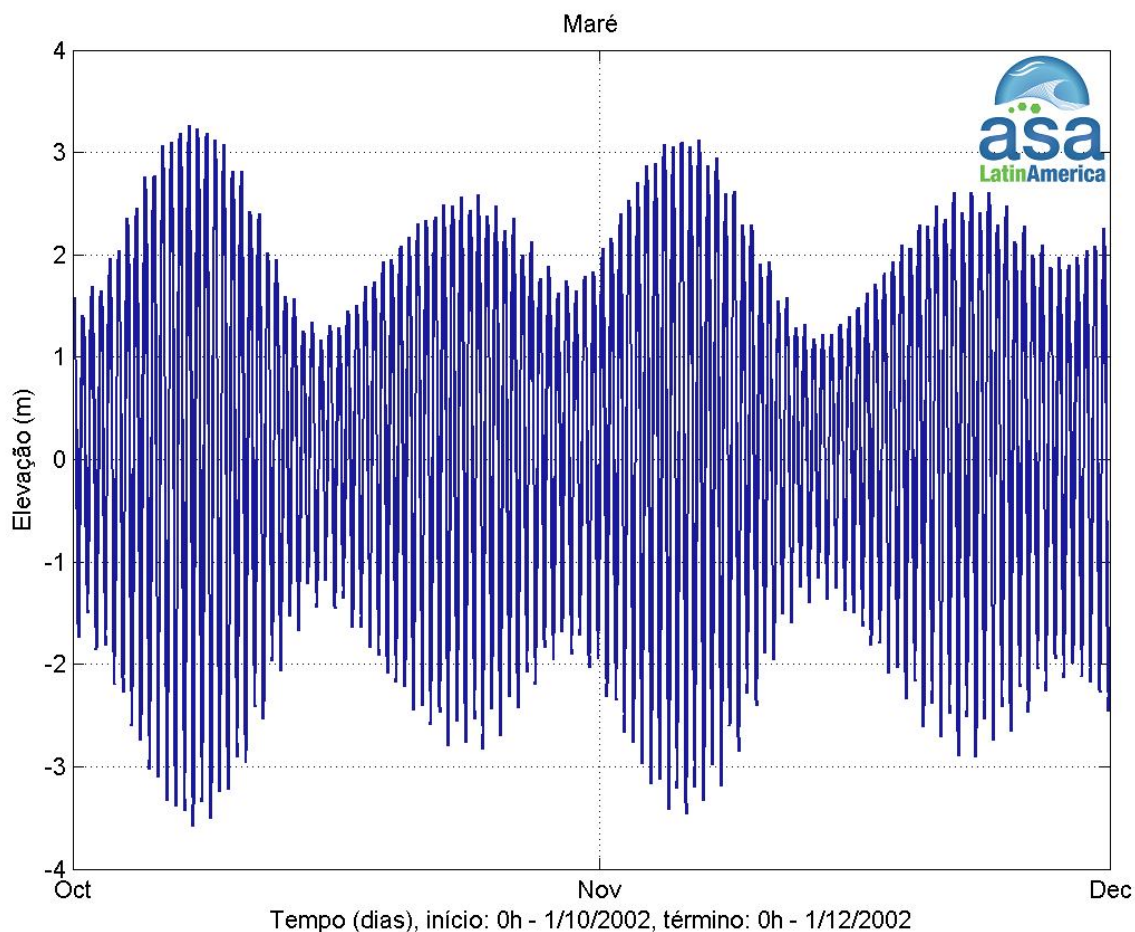


Figura 11 - Série temporal de maré prevista, para a estação Porto do Itaqui, da FEMAR, para o período compreendido entre 1 de outubro e 1 de dezembro de 2002.

O espectro de amplitudes de maré (Figura 12) apresenta um pico com amplitude superior à 2 m na faixa de frequência de dois cpd, que corresponde à maré semidiurna. São observados, ainda, picos nas faixas de frequência de 1 e 4 cpd, porém em uma ordem de grandeza muito inferior ao pico de 2 cpd.

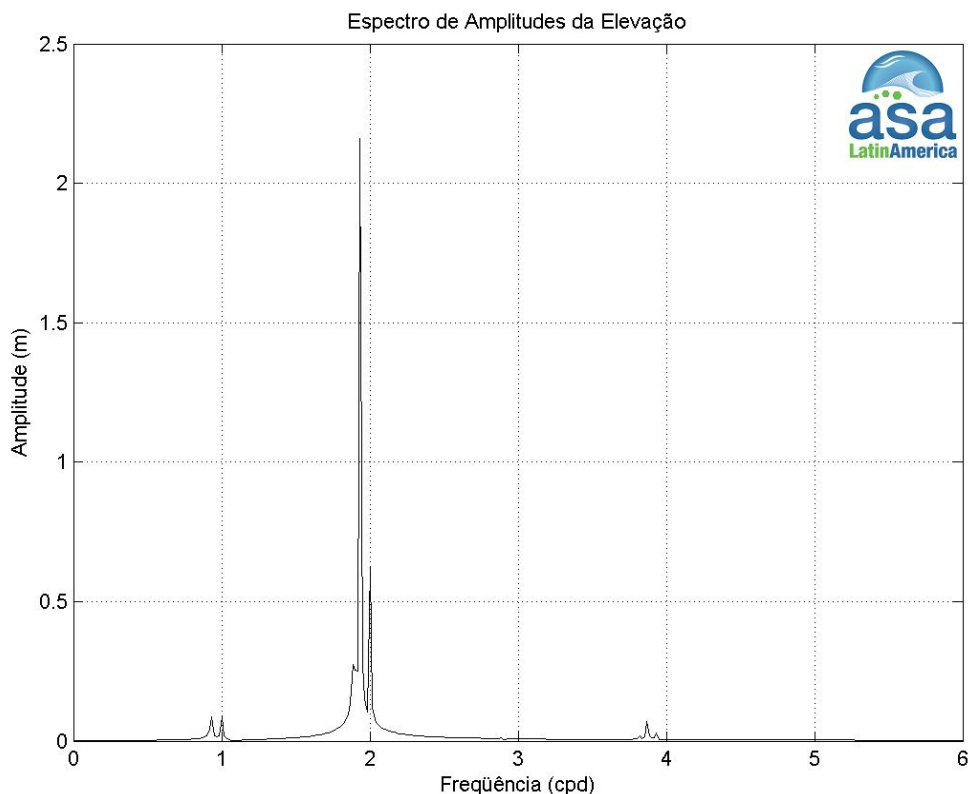


Figura 12 - Espectro de amplitudes calculado a partir da série temporal de maré apresentada na Figura 11, registrada para o período compreendido entre 1º de outubro e 1º de dezembro de 2002.

II.4 VAZÃO

Os dados de vazão foram obtidos nas estações fluviométricas da ANA³ para os rios Pindaré, Grajaú, Munim e Mearim como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Localização das estações fluviométricas da ANA (coordenadas em WGS 84) e período de coleta dos dados de vazões.

RIOS	ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	PERÍODO
Grajaú	33380000	03°46'11"S	45°13'4"W	1970 a 2000
Pindaré	33190000	03°39'40"S	45°27'30"W	1972 a 2000
Munim	33730000	03°34'50"S	43°41'50"W	1971 a 2001
Mearim	33290000	04°13'10"S	44°45'55"W	1976 a 2000

³ Agência Nacional de Águas.

A Figura 13 apresenta o ciclo sazonal das vazões dos rios Pindaré, Grajaú, Munim e Mearim. Somando os valores máximos de vazão medidos nas estações fluviométricas, obtém-se uma estimativa da vazão máxima total na região de aproximadamente 1.300 m³/s.

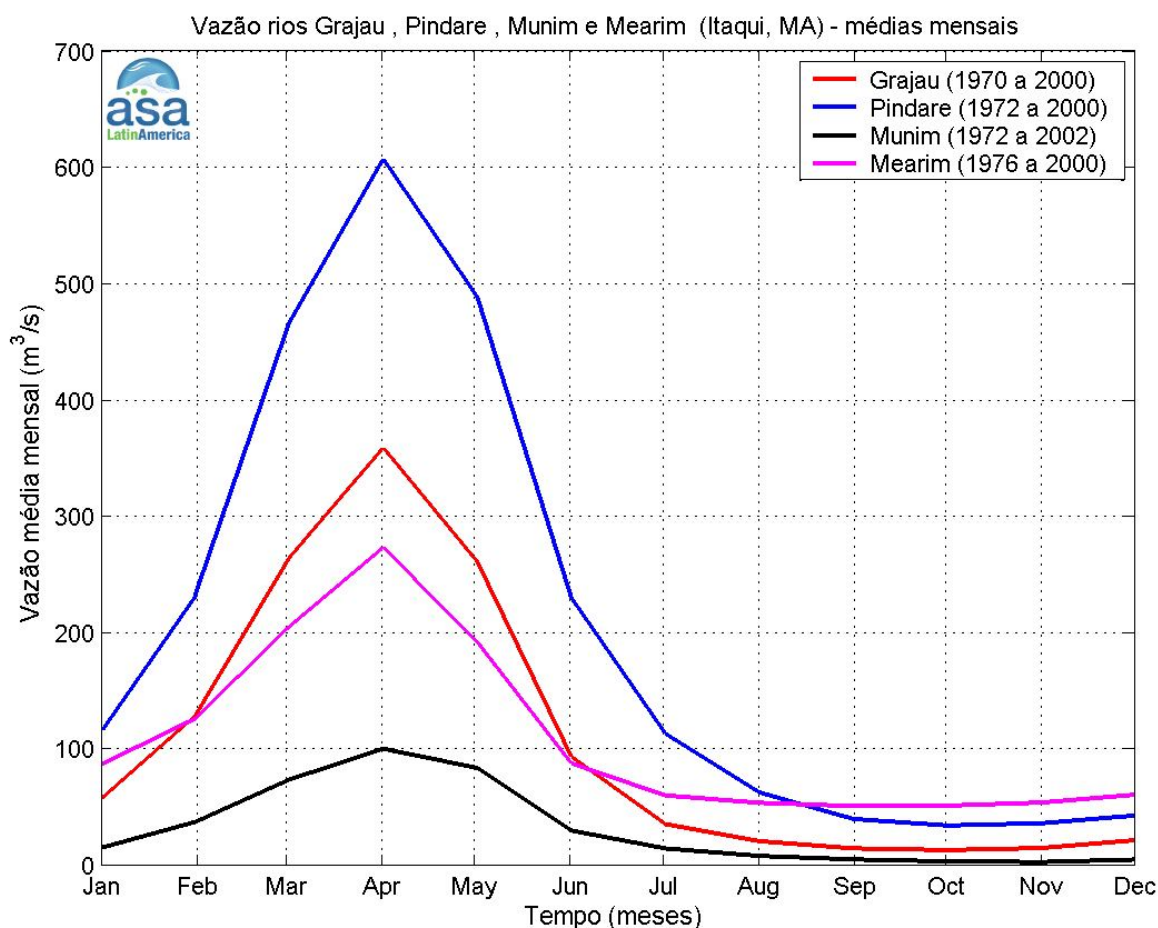


Figura 13 - Vazões médias mensais (m³/s) dos rios Grajaú, Pindaré, Munim e Mearim.

II.5 TEMPERATURA E SALINIDADE

Os dados de temperatura e salinidade apresentados, a seguir, foram obtidos pela **ASA LatinAmerica** no dia 6 de junho de 2002, às 14h55. Nesta amostragem utilizou-se um *STD Sensoredata SD-200*, com o qual se efetuou um perfil de salinidade e temperatura nas coordenadas 2,59350°S e 44,37367°W (WGS 84).

A salinidade praticamente não apresentou estratificação vertical significativa ao longo do perfil realizado. Os valores de salinidade observados variaram de 22,09 a 22,15 psu. A temperatura oscilou de 28,89 a 28,91 °C, portanto, também sem grandes variações ao longo do perfil. A Figura 14 apresenta os dados amostrados e os valores de sigmaT calculados a partir deles.

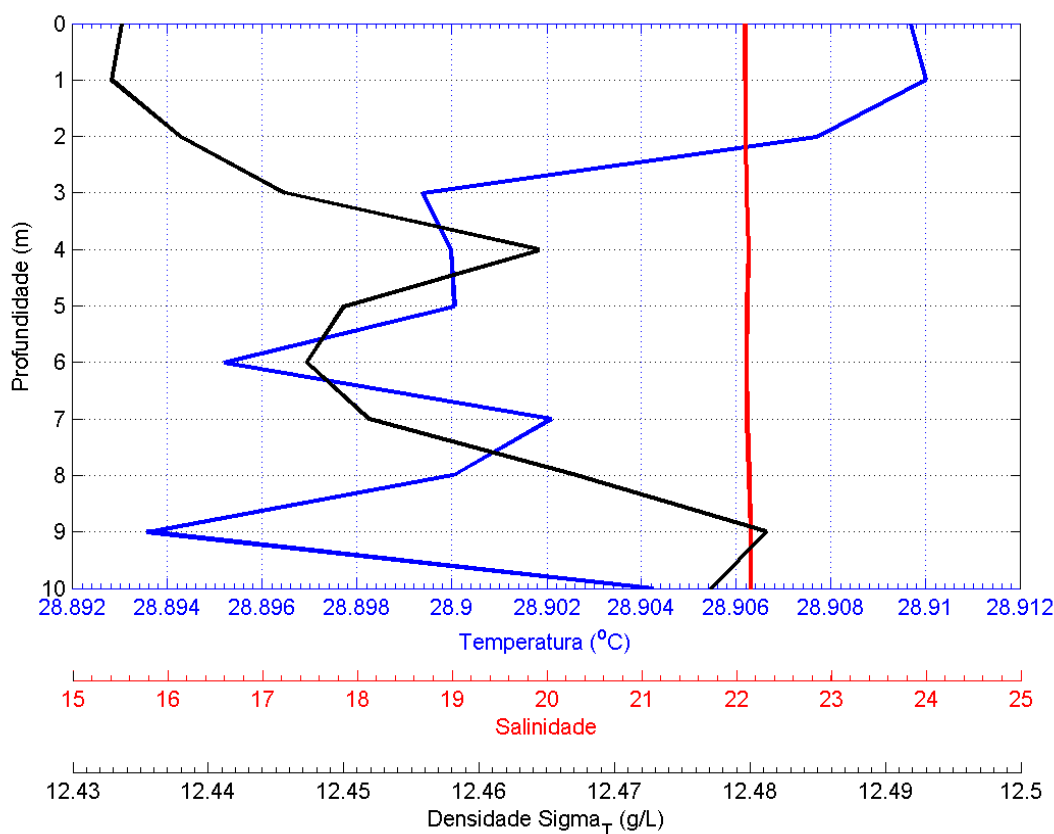


Figura 14 - Perfil de salinidade e temperatura realizado nas coordenadas: 2,59350°S e 44,37367°W, às 14h55 do dia 14/06/2002.

III MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Para a realização da modelagem hidrodinâmica, visando simular o campo de correntes na Baía de São Marcos, utilizou-se o sistema de modelos numéricos Delft3D (DELTARES, 2011), implementado pelo grupo de modelagem da **ASA LatinAmerica**.

As principais características desse sistema de modelos são descritas no Anexo A deste relatório, através de seu módulo hidrodinâmico (Delft3D-FLOW).

III.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

III.1.1 Discretização do Domínio e Batimetria

A grade numérica utilizada representa um compromisso entre os objetivos do projeto de modelagem final e a descrição dos processos hidrodinâmicos na região. A especificação desta é feita pela fixação dos pontos de grade ao longo da linha de costa (no plano) e pela batimetria (eixo vertical). Uma vez que estes pontos ao longo da linha de costa são determinados, as demais características batimétricas são associadas ao domínio.

Para este estudo foi implementada uma grade numérica abrangendo toda a Baía de São Marcos e Baía de São José, com maior resolução espacial e centrada na região de interesse. A grade tem dimensão horizontal de 115x105 pontos e o espaçamento horizontal dessa grade varia entre 8.000 m (na região de menor resolução) e 50 m (na região de maior resolução). Os resultados finais da discretização da grade numérica estão ilustrados na Figura 15, a seguir.

As informações de profundidade foram obtidas através da digitalização de cotas batimétricas das cartas náuticas da DHN⁴, n^{os} 400, 410, 411, 413 e 414, e

⁴ Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil.

complementados com levantamentos pertencentes ao banco de dados da **ASA LatinAmerica**.

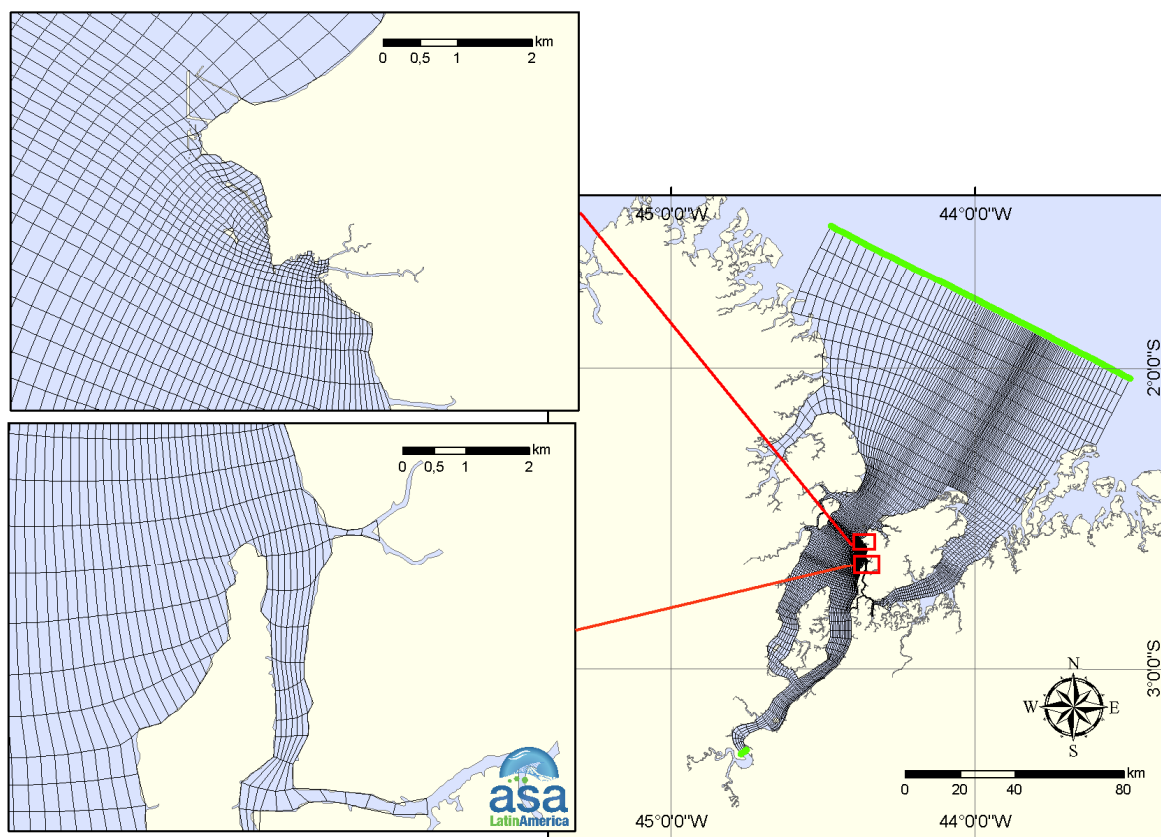


Figura 15 - Grade numérica do modelo hidrodinâmico com a localização das bordas abertas (em verde). No lado esquerdo apresenta-se em detalhe as regiões mais refinadas da grade, onde estão localizados os pontos de risco.

III.1.2 Condições de Contorno Adotadas

Nos contornos (ou bordas abertas) podem ser atribuídas condições forçantes (ativas) ou condições radiacionais (passivas). Quando são aplicadas forçantes nas bordas abertas, pode se utilizar séries temporais ou valores constantes para diferentes variáveis pertinentes ao sistema estudado.

Nas simulações numéricas foi considerado um conjunto de duas bordas abertas. As condições hidrodinâmicas impostas a estas bordas foram: variação da superfície nas bordas marítimas, obtida a partir das constantes harmônicas da

estação da FEMAR JP-15 (Figura 16), e médias mensais de vazão na borda fluvial (ver Item II.4). A Figura 15 apresenta a disposição geográfica dessas bordas (em verde).

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

Nome da Estação :		JP-15 (Plataforma) – MA			
Localização :		Baía de São Marcos, no início do canal de acesso ao Terminal da Ponta da Madeira (CVRD)			
Organ. Responsável :		DHN			
Latitude :		01° 52,2' S	Longitude :		43° 57,1' W
Período Analisado :		27/05/80 a 27/06/80		Nº de Componentes : 23	
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		V H 55 min	Nível Médio (Zo):		226 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		408 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		326 cm acima do NR
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		45 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		127 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	9,5	241
Ssa	-	-	N ₂	33,6	141
Mm	-	-	NU ₂	6,4	144
Mf	-	-	M ₂	140,5	162
MTM	-	-	L ₂	18,4	210
Msf	-	-	T ₂	2,4	203
Q ₁	-	-	S ₂	41,2	205
O ₁	9,4	176	K ₂	11,2	209
M ₁	-	-	MO ₃	-	-
P ₁	2,5	219	M ₃	-	-
K ₁	7,6	223	MK ₃	-	-
J ₁	-	-	MN ₄	-	-
OO ₁	-	-	M ₄	-	-
MNS ₂	-	-	SN ₄	-	-
2N ₂	4,4	120	MS ₄	-	-
Referências de Nível: Não foram implantadas					
Obs: Não há referências a outros períodos. Maré observada de plataforma oceânica, posteriormente retirada					

Código BNDO: 30122

Figura 16 - Constantes harmônicas da FEMAR referentes à estação JP-15 (MA).

III.2 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A metodologia de validação utilizada fundamenta-se na avaliação da modelagem quanto à sua capacidade de reprodução da circulação hidrodinâmica na região em estudo. Com este intuito são apresentadas comparações entre resultados da modelagem hidrodinâmica e as séries de dados obtidos na região de interesse, previamente apresentados no Capítulo II.

A comparação entre os resultados da modelagem e os dados foi quantificada através de seis parâmetros, são eles:

1. Erro Estatístico Relativo (*Relative Error Statistic*) O erro estatístico relativo entre o previsto pelo modelo e as observações é definido como (EPA, 2000):

$$E_{\text{rel}} = \frac{\sum_{i=1}^n |\text{dado}_i - \text{modelo}_i|}{\sum_{i=1}^n |\text{dado}_i|} \quad (\text{III.2-1})$$

Como erro estatístico relativo é a razão entre o erro absoluto médio (o numerador da expressão acima) e a média das observações ele pode ser expresso como uma porcentagem. O erro estatístico relativo ideal é nulo.

Esta mesma definição é apresentada em Walstra *et al.* (2001), a qual é denominada pelos autores como: *Relative Mean Absolute Error* (RMAE). Os autores apresentam, também, uma tabela na qual classificam (qualificam) os valores dos erros, Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação do RMAE por ranges.

ERRO PERCENTUAL (RMAE) (%)	QUALIFICAÇÃO
RMAE < 20	Excelente
20 < RMAE < 40	Bom
40 < RMAE < 70	Razoável
70 < RMAE < 100	Ruim
RMAE > 100	Péssimo

2. Erro Estatístico Absoluto Médio (*Absolute Mean Error Statistic*). O erro estatístico absoluto médio é definido como (WILLMOTT, 1982; EPA, 2000):

$$E_{\text{abs}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{dado}_i - \text{modelo}_i| \quad (\text{III.2-2})$$

O erro estatístico absoluto médio é o desvio médio entre o previsto pelo modelo e o observado nos dados. O desvio médio ideal é zero. O erro estatístico absoluto tem a mesma dimensão física (unidade) do dado.

3. Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root-Mean-Square Error Statistic*). A raiz do erro médio quadrático é definida como (WILLMOTT, 1982; EPA, 2000):

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2} \quad (\text{III.2-3})$$

A raiz do erro médio quadrático é um indicador do desvio entre o previsto pelo modelo e as observações assim como o desvio médio, contudo é em geral maior do que ele. A raiz do erro médio quadrático ideal é nula. A raiz do erro médio quadrático tem a mesma dimensão física (unidade) do dado.

4. Hess & Bosley (1992) propuseram o *skill parameter* uma forma de quantificar a capacidade do modelo de reproduzir os dados observados. O *skill parameter* é definido por:

$$\text{Skill} = 1 - D' \quad (\text{III.2-4})$$

O termo D' é dado pelo erro quadrático médio normalizado pelo range médio do dado:

$$D' = \frac{\text{RMS}}{\text{range médio do dado}} \quad (\text{III.2-5})$$

O range médio do dado é definido por:

$$\text{Range médio} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n |\text{dado}_i - \text{média do dado}| \quad (\text{III.2-6})$$

O *skill parameter* tem seu valor variando entre 0 e 1 e o valor ideal é 1 (um).

5. Willmott & Wicks, 1980 (*apud* WILLMOTT, 1982) propuseram o Índice de concordância (*Index of Agreement*), definido por:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\text{dado}_i - \text{modelo}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\text{modelo}_i - \overline{\text{dado}}| + |\text{dado}_i - \overline{\text{dado}}|)^2} \right] \quad (\text{III.2-7})$$

Onde: $\overline{\text{dado}}$ = média do dado.

A avaliação dos resultados da modelagem hidrodinâmica para elevação do nível do mar foi realizada através da comparação entre os valores previstos pelo modelo e os dados coletados pela **ASA** nas proximidades do Porto do Itaqui, durante o período de 6 de outubro a 04 de novembro de 2002. Para os resultados de corrente a comparação foi feita para o mesmo período, utilizando-se os dados descritos na análise de dados (Capítulo II.). Utilizaram-se, ainda, dados obtidos através de previsão harmônica para avaliação da elevação da superfície do mar gerada pelo modelo.

III.2.1 Avaliação para a Maré

Para a avaliação da modelagem hidrodinâmica com relação à elevação da superfície do mar, utilizaram-se: (1) dados coletados nas proximidades do Porto do Itaqui e (2) dados obtidos a partir da previsão harmônica realizada para a estação Itaqui, da FEMAR.

As séries temporais de elevação de superfície, tanto dos dados coletados em campo quanto dos resultados do modelo, são apresentadas na Figura 17. Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) são apresentados a seguir.

RMAE = 23%;

Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,32 m;

Raiz Quadrática Média = 0,39 m;

Skill parameter = 0,86;

Índice de Concordância = 96%.

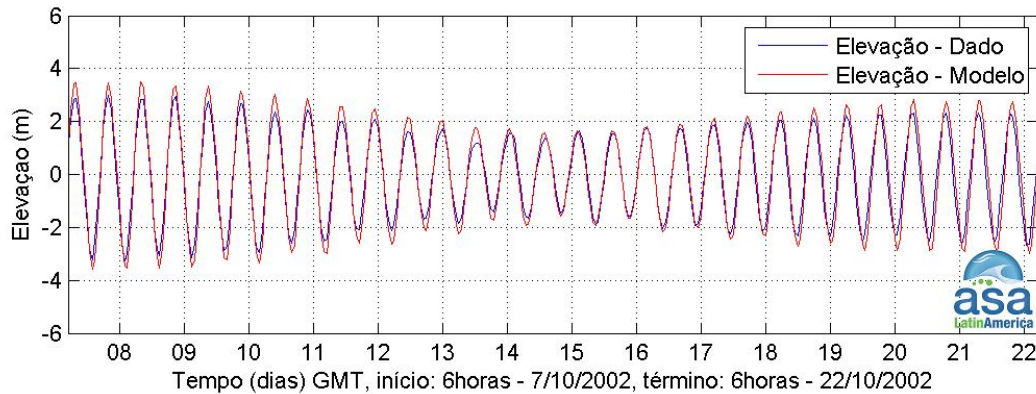


Figura 17 - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m), para o período de 7 a 22 de outubro de 2002. A série temporal dos dados coletados é plotada em azul, enquanto que a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica é plotada em vermelho.

As séries temporais de elevação de superfície, tanto da previsão harmônica para a estação Itaqui (FEMAR) quanto dos resultados do modelo para a mesma posição, são apresentadas na Figura 18. Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) são apresentados a seguir.

RMAE = 20%;

Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,30 m;

Raiz Quadrática Média = 0,37 m;

Skill parameter = 0,88;

Índice de Concordância = 99%.

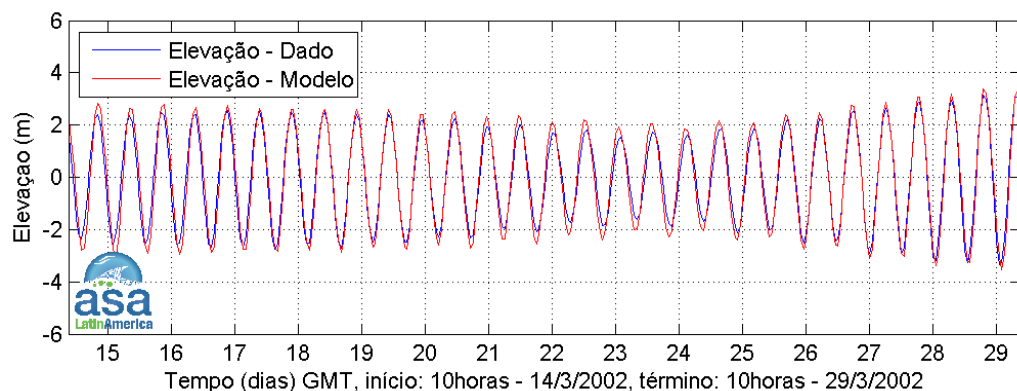


Figura 18 - Séries temporais de elevação de superfície do mar (m), para o período de 14 a 29 de março de 2002. A série temporal obtida através de previsão harmônica é plotada em azul, enquanto que a série temporal resultante da modelagem hidrodinâmica é plotada em vermelho.

III.2.2 Avaliação para as Correntes

As séries temporais de corrente, tanto dos dados coletados quanto dos resultados do modelo, são apresentadas na Figura 19. Os parâmetros estimados para quantificar a comparação (dado x modelo) forneceram os seguintes resultados:

RMAE = 22% (Comp. u); 22% (Comp. v);

Erro Estatístico Absoluto Médio = 0,15 m/s (Comp. u); 0,23 m/s (Comp. v);

Raiz Quadrática Média = 0,20 m/s (Comp. u); 0,31 m/s (Comp. v);

Skill parameter = 0,37 (Comp. u); 0,83 (Comp. v);

Índice de Concordância = 78% (Comp. u); 98% (Comp. v).

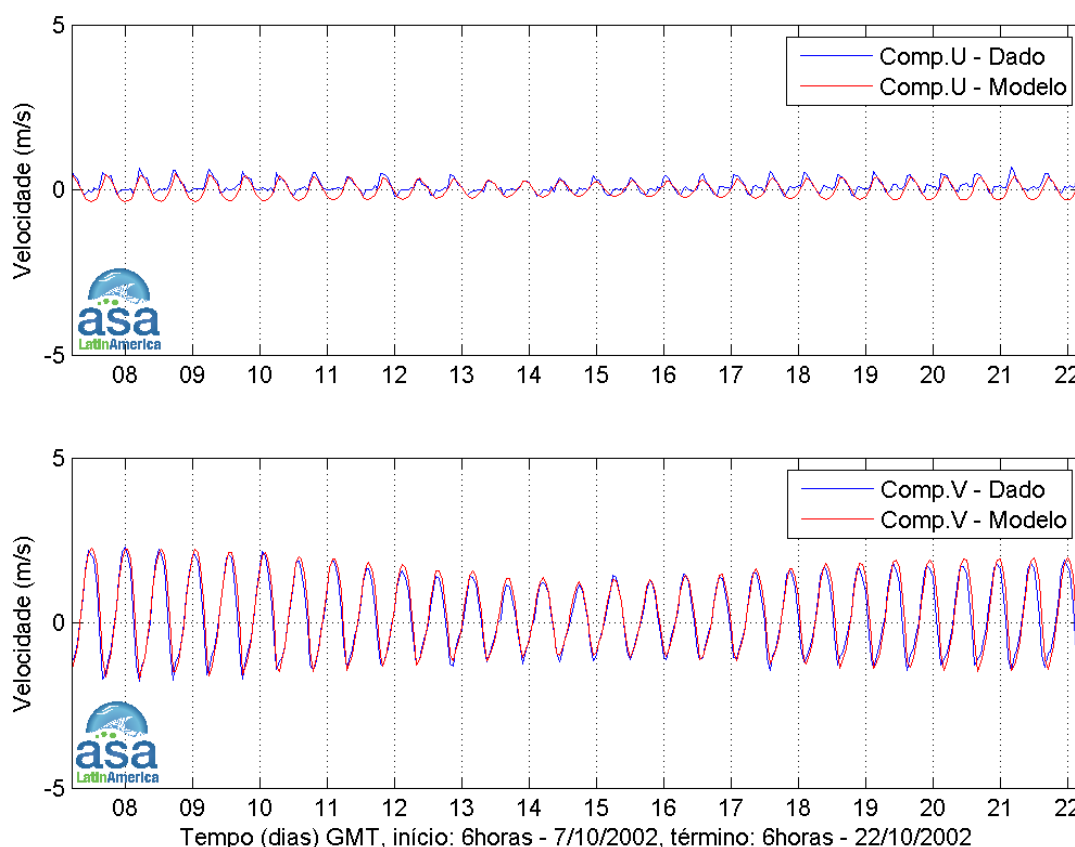


Figura 19 - Séries temporais das componentes de corrente (m/s), para o período de 7 a 22 de outubro de 2002. O painel superior apresenta a componente u (E-W) e o painel inferior, a componente v (N-S). A série temporal dos dados coletados é plotada em azul, enquanto que a série temporal dos resultados da modelagem hidrodinâmica, é plotada em vermelho.

III.2.3 Comentários sobre a Modelagem Hidrodinâmica

Os parâmetros utilizados e apresentados para quantificar a comparação entre as observações e os resultados da modelagem são de natureza estatística e, portanto, somente expressam o quanto duas séries temporais se assemelham. Por outro lado, é importante também, considerar os principais aspectos físicos envolvidos na circulação. No caso da modelagem em questão tanto a análise estatística dos resultados quanto a observação dos campos de corrente e elevação modelados mostram que, a modelagem conseguiu reproduzir de forma satisfatória as principais características da dinâmica oceânica da região em escalas espacial e temporal.

A Figura 20 e a Figura 21 mostram os campos de corrente modelados para instantes de enchente e vazante, respectivamente, ambos durante um período de sizígia.

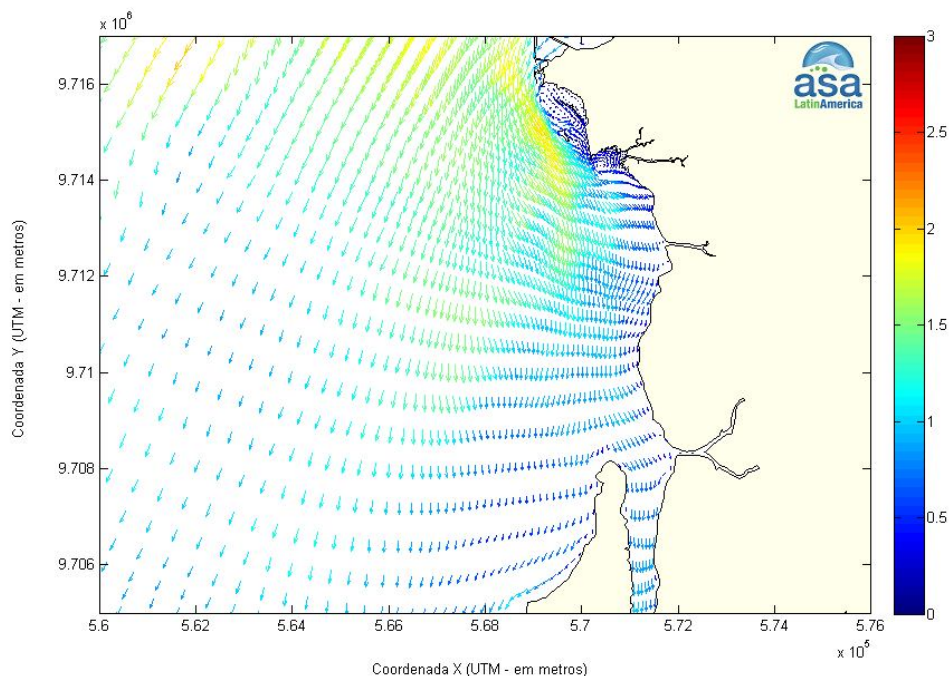


Figura 20 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de enchente de sizígia. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores, a intensidade (em metros).

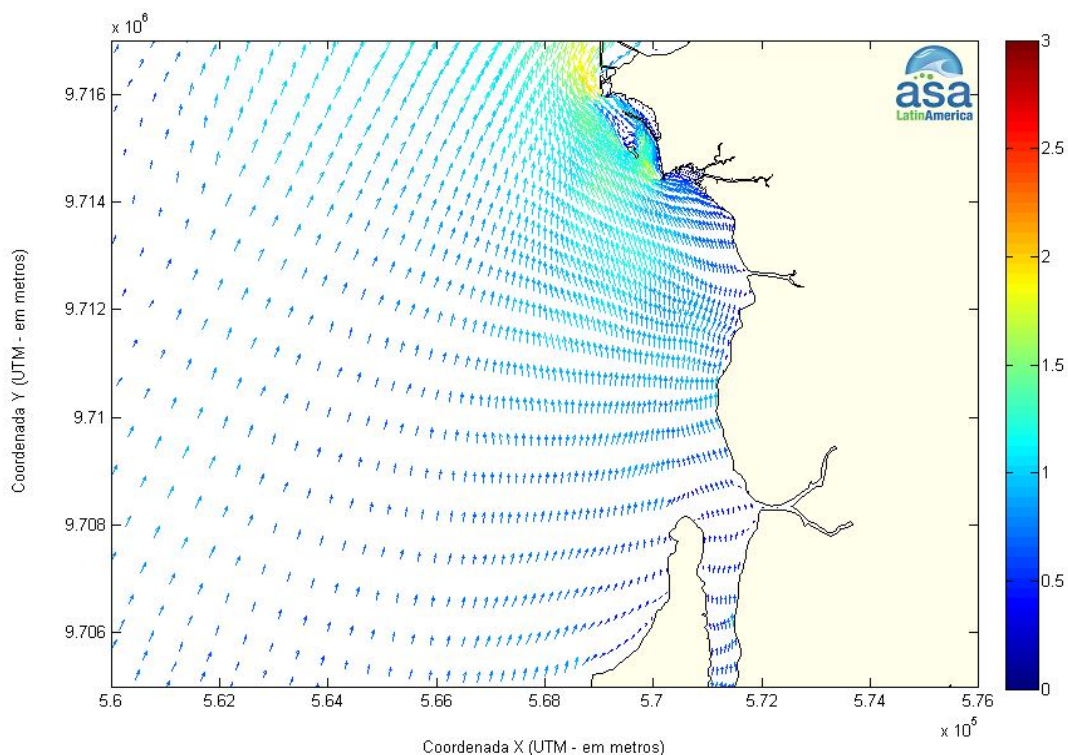


Figura 21 - Instantâneo do campo de correntes para um momento de vazante de sizígia. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores, a intensidade (em metros).

IV MODELAGEM DE TRANSPORTE E DISPERSÃO DE ÓLEO

Para a realização da modelagem do derrame de óleo foi utilizado o modelo OILMAP, desenvolvido pela **ASA**. Este modelo é uma ferramenta utilizada para o acompanhamento e previsão do deslocamento e intemperismo de qualquer tipo de óleo derramado em acidentes com petróleo. A descrição mais detalhada do OILMAP encontra-se no Anexo B.

IV.1 DADOS DE ENTRADA

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

- ✓ localização geográfica do ponto de derrame;
- ✓ período de simulação;
- ✓ duração do derrame;
- ✓ volume derramado;
- ✓ tipo de óleo;
- ✓ duração da simulação;
- ✓ opções de resposta (e.g., barreiras, sobrevoo, dispersantes);
- ✓ campo de correntes;
- ✓ arquivo de dados meteorológicos.

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

IV.1.1 Campos de Correntes

Os campos de correntes utilizados na modelagem do transporte e dispersão de óleo para este estudo foram gerados através da modelagem hidrodinâmica, como descrito no Capítulo III. Para avaliar a sazonalidade das forçantes ambientais nos padrões de circulação e transporte, foram definidos dois campos hidrodinâmicos representativos dos períodos de cheia (março a maio) e de seca (setembro a novembro).

Para a elaboração dos cenários de deriva para acidentes com óleo simulados neste estudo, foi definido uma grade *land-water* com dimensões de 170x170 pontos (Figura 22).

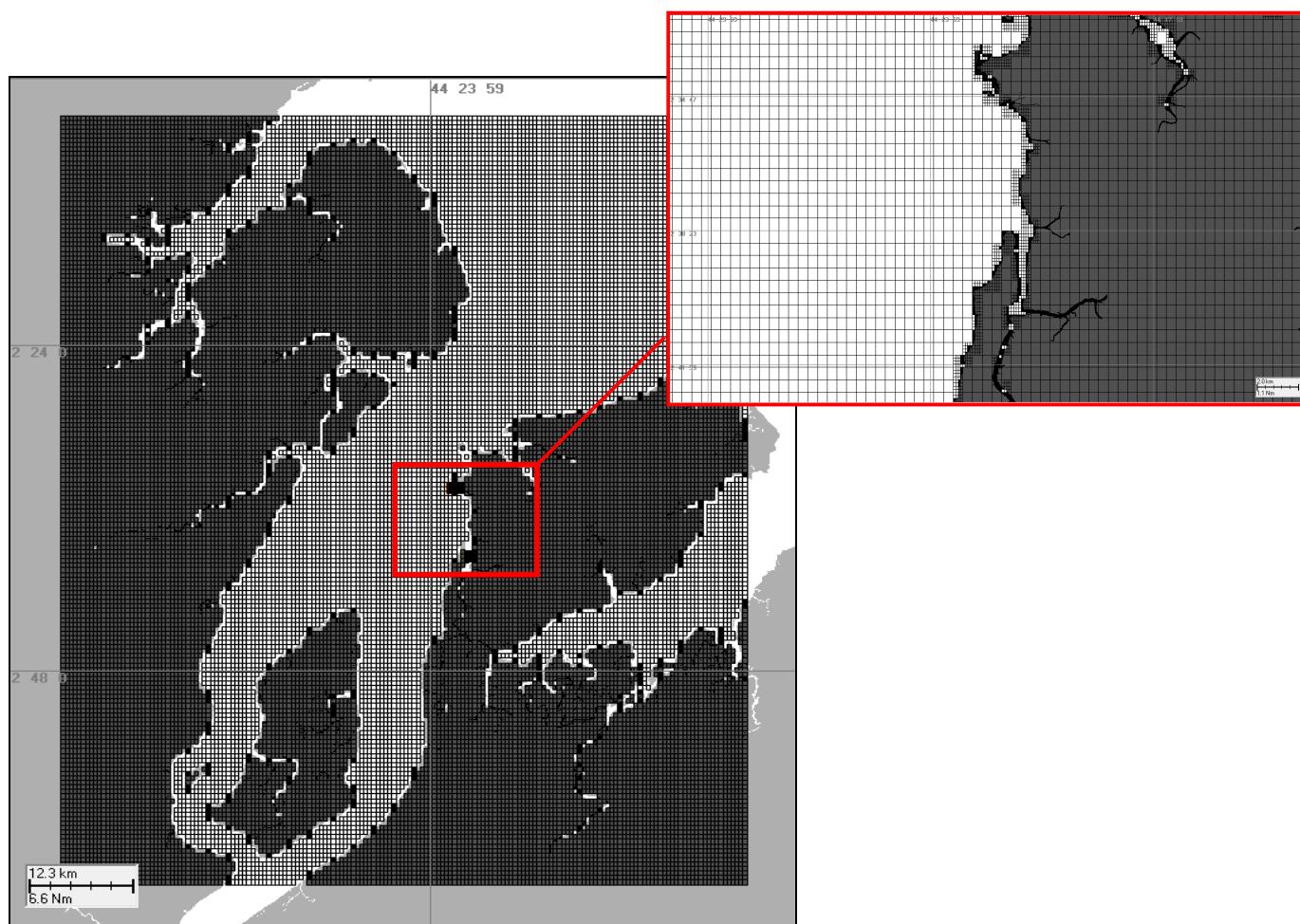


Figura 22 - Grade definindo os contornos de terra (*grade land-water*) utilizada na modelagem.

IV.1.2 Dados de Vento

Para a modelagem de transporte e dispersão de óleo, foram utilizados os dados de vento apresentados no Item II.1.

IV.1.3 Pontos de Risco e Volumes de Pior Caso

Para este estudo de modelagem de derrame de óleo foram considerados três pontos de risco, dois localizados no Porto do Itaqui (P1 - Berço 105 e P2 - Bacia de Evolução) e um no Porto Grande (P3). Foram utilizados dois tipos de óleo (Óleo Combustível Marítimo MF-380 para os pontos do Porto do Itaqui e Diesel para o Porto Grande). As coordenadas dos pontos de risco, os tipos de óleo e os volumes de pior caso são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Coordenadas geográficas (WGS 84) dos pontos de risco considerados na modelagem de óleo.

PONTO DE RISCO	LATITUDE	LONGITUDE	TIPO DE ÓLEO	VOLUME (m ³)
P1 – Berço 105 do Porto do Itaqui	02°34'27,29"S	44°22'18,62"W	Óleo MF-380	10.000,0
P2 – Bacia de evolução do Porto do Itaqui	02°34'28,41"S	44°22'35,51"W	Óleo MF-380	10.000,0
P3 – Porto Grande	02°39'39,63"S	44°21'25,90"W	Diesel	200,0

As simulações foram conduzidas considerando a hipótese acidental de pior caso, com os volumes de vazamento definidos de acordo com o prescrito na Resolução do CONAMA⁵ nº 398/08 (BRASIL, 2008). Desta forma, adotaram-se volumes de vazamento específicos para cada porto, conforme descrito abaixo:

⁵ Conselho Nacional do Meio Ambiente.

- ✓ Porto do Itaqui (P1 e P2): volume de 10.000 m³, devido à ruptura do costado e do maior tanque de carga do navio devido à colisão entre navios em trânsito, colisão do navio com embarcação menor ou colisão com superfície fixa;
- ✓ Porto Grande (P3): volume de 200 m³, devido à ruptura do costado e do tanque de combustível de embarcação devido à colisão com embarcação ou colisão de superfície fixa.

Ressalta-se que, nas simulações, considerou-se o vazamento de todo o volume de óleo ao longo de 12 horas.

IV.1.4 Características dos Produtos Utilizados

As simulações foram realizadas com o Óleo Combustível Marítimo MF-380 para os pontos P1 e P2 e Diesel para o ponto P3, cujas informações necessárias ao OILMAP foram obtidas do banco de dados da [ASA](#) e estão apresentadas na Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 7 - Características do óleo tipo MF-380.

PARÂMETRO	VALOR
Nome do óleo	MF-380
Densidade (g/cm ³) a 20°C	0,972
Viscosidade dinâmica a 25°C (Cp)	3.180,00
Tensão interfacial (dina/cm)	39,80
Conteúdo máximo de água para emulsões (%)	80,00
Espessura mínima (mm)	0,10
Ponto de ebulição inicial (K)	582,30
Gradiente da curva de evaporação	141,51
Constante de evaporação A	27,49
Constante de evaporação B	22,06

Fonte: Banco de Dados da ASA

Tabela 8 - Características do óleo Diesel.

PARÂMETRO	VALOR
Nome do óleo	Diesel
Densidade (g/cm ³) a 20°C	0,892
Viscosidade dinâmica a 25°C (Cp)	11,50
Tensão interfacial (dina/cm)	30,00
Conteúdo máximo de água para emulsões (%)	0,00
Espessura mínima (mm)	0,10
Ponto de ebulição inicial (K)	508,20
Gradiente da curva de evaporação	129,60
Constante de evaporação A	20,30
Constante de evaporação B	18,10

Fonte: Banco de Dados da ASA

IV.2 CRITÉRIO DE PARADA ADOTADO NAS SIMULAÇÕES

O tempo de 72 horas para o acompanhamento da mancha de óleo foi o critério de parada adotado nas simulações. O tempo máximo para a disponibilização de recursos de contenção/limpeza no local da ocorrência da descarga especificados na Resolução do CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008) é de 60 horas. Nas simulações foi adotado um critério conservativo, ou seja, estas contemplam 12 horas além do estabelecido nessa resolução.

IV.3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Para a determinação do transporte e dispersão do óleo foram realizadas simulações de derrame de óleo utilizando-se o modelo OILMAP no modo probabilístico e determinístico. No modo probabilístico é considerada a variabilidade das forçantes ambientais meteorológicas e oceanográficas. Para que se pudesse incorporar esta variabilidade nos resultados, foi realizada uma série de 500 simulações, em cada cenário probabilístico. Desta forma cada cenário probabilístico representa 500 trajetórias do produto derramado, iniciando-se o

derrame em instantes escolhidos aleatoriamente pelo modelo dentro dos meses definidos para as condições sazonais de cheia (março a maio) e de seca (setembro a novembro) e criando conseqüentemente os contornos de probabilidade de ocorrência do óleo na região de estudo. A Tabela 9 apresenta os cenários probabilísticos simulados neste estudo.

A terminologia adotada para a identificação dos cenários probabilísticos e determinísticos é apresentada, a seguir:

- DET indica os cenários determinísticos críticos;
- P1, P2 e P3 indicam os pontos de risco, localizados no Porto do Itaqui (Berço 105 - P1 e Bacia de Evolução - P2) e no Porto Grande (P3);
- MF-380 e DIESEL indicam os tipos de óleo utilizados nas simulações;
- PC indica o volume de óleo derramado no volume de Pior Caso (10.000 m³ para os pontos P1 e P2 e 200 m³ para o ponto P3);
- CHEIA e SECA indicam as condições hidrológicas consideradas no estudo;
- 72H indica o tempo de duração das simulações de óleo;
- SZ e QD indicam os períodos de maré de sizígia e de quadratura, respectivamente;
- EN e VZ indicam os regimes de enchente e de vazante, respectivamente.

Tabela 9 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames de óleo.

CENÁRIOS	PRODUTO	VOLUME (m ³)	ESTAÇÃO DO ANO	DURAÇÃO DO DERRAME	TEMPO DE SIMULAÇÃO
P1_MF-380_PC_CHEIA_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
P1_MF-380_PC_SECA_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
P2_MF-380_PC_CHEIA_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
P2_MF-380_PC_SECA_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
P3_DIESEL_PC_CHEIA_72H	DIESEL	200	Cheia	12 horas	72 horas
P3_DIESEL_PC_SECA_72H	DIESEL	200	Seca	12 horas	72 horas

A partir da análise da modelagem hidrodinâmica foram selecionados os cenários determinísticos que contemplassem os períodos de maré de sizígia e quadratura e os regimes de enchente e vazante, para ambas as condições hidrológicas (cheia e seca). Os cenários determinísticos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Cenários considerados nas simulações determinísticas de derrames de óleo.

CENÁRIOS	PRODUTO	VOLUME (m³)	CONDIÇÃO SAZONAL	DURAÇÃO DO DERRAME	TEMPO DE SIMULAÇÃO
DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H	ÓLEO MF-380	10.000	Seca	12 horas	72 horas
DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_EN_72H	DIESEL	200	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H	DIESEL	200	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_EN_72H	DIESEL	200	Seca	12 horas	72 horas
DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_VZ_72H	DIESEL	200	Seca	12 horas	72 horas
DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_EN_72H	DIESEL	200	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_VZ_72H	DIESEL	200	Cheia	12 horas	72 horas
DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_EN_72H	DIESEL	200	Seca	12 horas	72 horas
DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_VZ_72H	DIESEL	200	Seca	12 horas	72 horas

V RESULTADOS DA MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas de potenciais derrames de Óleo Combustível Marítimo MF-380 e de Diesel no Porto do Itaqui e no Porto Grande, respectivamente.

V.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

O modelo OILMAP foi utilizado para simular os cenários probabilísticos descritos no Item IV.3 e produzir as curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da área de estudo.

A Tabela 11 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os cenários probabilísticos de cheia (março a maio) e seca (setembro a novembro). Observam-se diferenças inferiores a 10% nos resultados extensão de toque do óleo na costa e inferiores a 15% nos resultados de área total do óleo na superfície da água. A maior área com probabilidade de ocorrência de óleo na água (aproximadamente 1.668 km²) e a maior extensão de probabilidades de toque na costa (com aproximadamente 342,9 km) foram obtidas para a simulação do ponto P2, período de cheia.

Também observou-se que as simulações conduzidas para o período de cheia, apresentaram sempre áreas maiores com probabilidade de óleo na superfície da água. Isto ocorre devido à maior vazão neste período o que propicia um maior espalhamento do óleo na água em direção ao mar. No período de seca, a baixa vazão favorece a permanência do óleo no interior da Baía de São Marcos, diminuindo a área superficial dos contornos de probabilidade e ocasionando, na maioria dos cenários, maiores extensões de toque do óleo na costa.

Tabela 11 - Resultados das simulações probabilísticas (extensão da costa com probabilidade de toque e área com probabilidade de ocorrência de óleo na água).

CENÁRIO	EXTENSÃO DE TOQUE NA COSTA (km)	ÁREA TOTAL NA ÁGUA (km ²)
P1_MF-380_PC_CHEIA_72H	286,9	1.564,0
P1_MF-380_PC_SECA_72H	313,0	1.417,0
P2_MF-380_PC_CHEIA_72H	342,9	1.668,0
P2_MF-380_PC_SECA_72H	336,7	1.439,0
P3_DIESEL_PC_CHEIA_72H	101,4	968,0
P3_DIESEL_PC_SECA_72H	106,4	942,0

A seguir, são apresentados os resultados das simulações probabilísticas de forma gráfica, separados para ambos os portos (Porto do Itaqui e Porto Grande). São apresentados os intervalos de probabilidade da presença de óleo na água e na costa, além do tempo de deslocamento do óleo na superfície da água, em decorrência de derrames acidentais hipotéticos durante os períodos de cheia e de seca. Cabe ressaltar que as simulações realizadas consideram a trajetória e o intemperismo do óleo na ausência de medidas de contenção e remoção do mesmo.

Em todas as ilustrações de intervalos de probabilidade de óleo na água e na costa, o valor correspondente ao limite superior dos intervalos da escala de cores está incluído na classe. Assim, por exemplo, no intervalo de probabilidade de 10-20% estão incluídas as probabilidades superiores a 10% e menores ou iguais a 20%.

As ilustrações dos contornos de tempo correspondem ao tempo mínimo de deslocamento de óleo na água calculado (para cada posição da grade) entre todos os cenários determinísticos que compõem o cenário probabilístico. Nestas ilustrações são apresentados os tempos de 2, 6, 12, 36, 60 e 72 horas após o início do derrame, selecionados de acordo com o tempo máximo para a disponibilização de recursos de contenção/limpeza no local da ocorrência da descarga especificados na Resolução do CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008). O tempo de 72 horas foi o critério de parada adotado nas simulações.

V.1.1 Porto do Itaqui

Da Figura 23 a Figura 34 são apresentados os resultados das simulações probabilísticas de cheia e seca para o Porto do Itaqui, pontos P1 e P2. Observa-se que os resultados do ponto de risco P2 apresentam maiores áreas superficiais com probabilidade de óleo. Isto ocorreu devido à localização dos pontos de risco, que para o ponto P2 é mais exposta e apresenta intensidades de corrente mais elevada que o observado para o ponto P1.

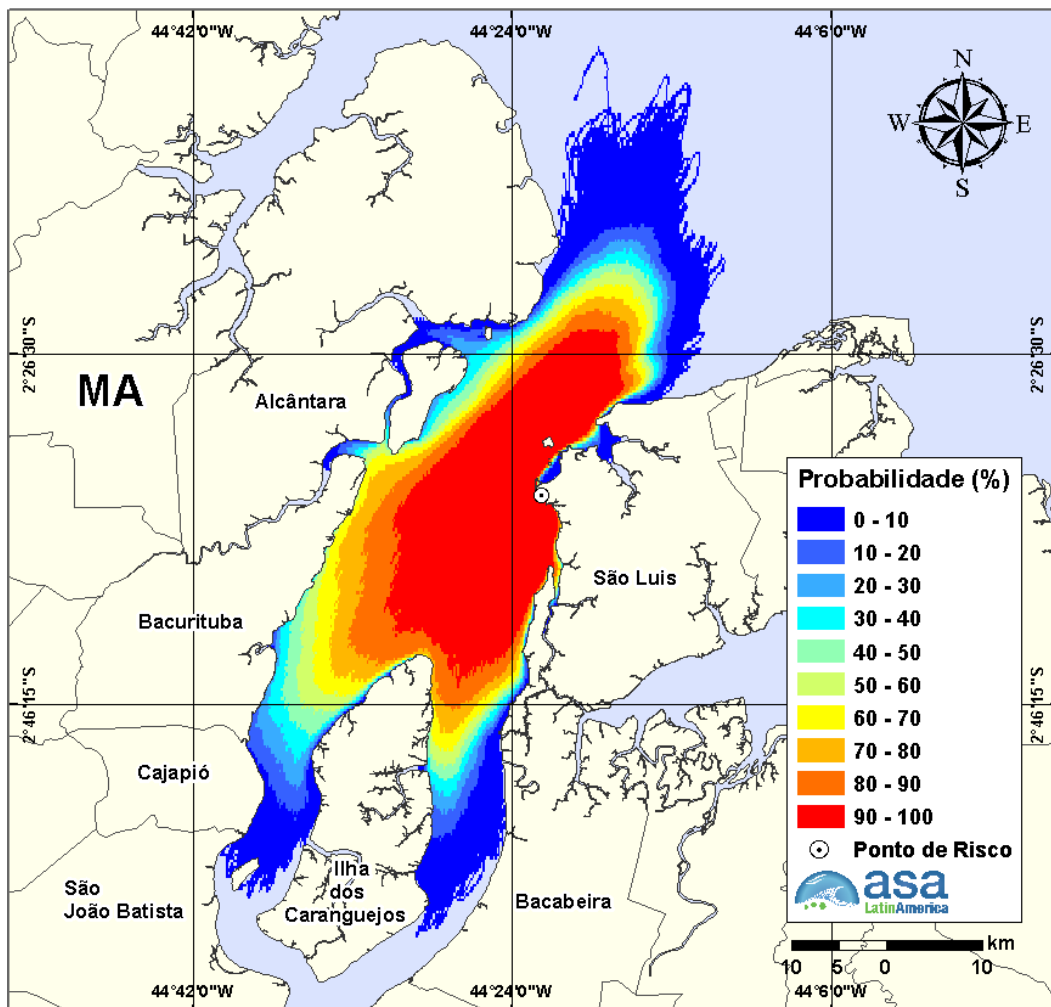


Figura 23 - Cenário P1_MF-380_PC_CHEIA_72H: Contornos de probabilidade de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

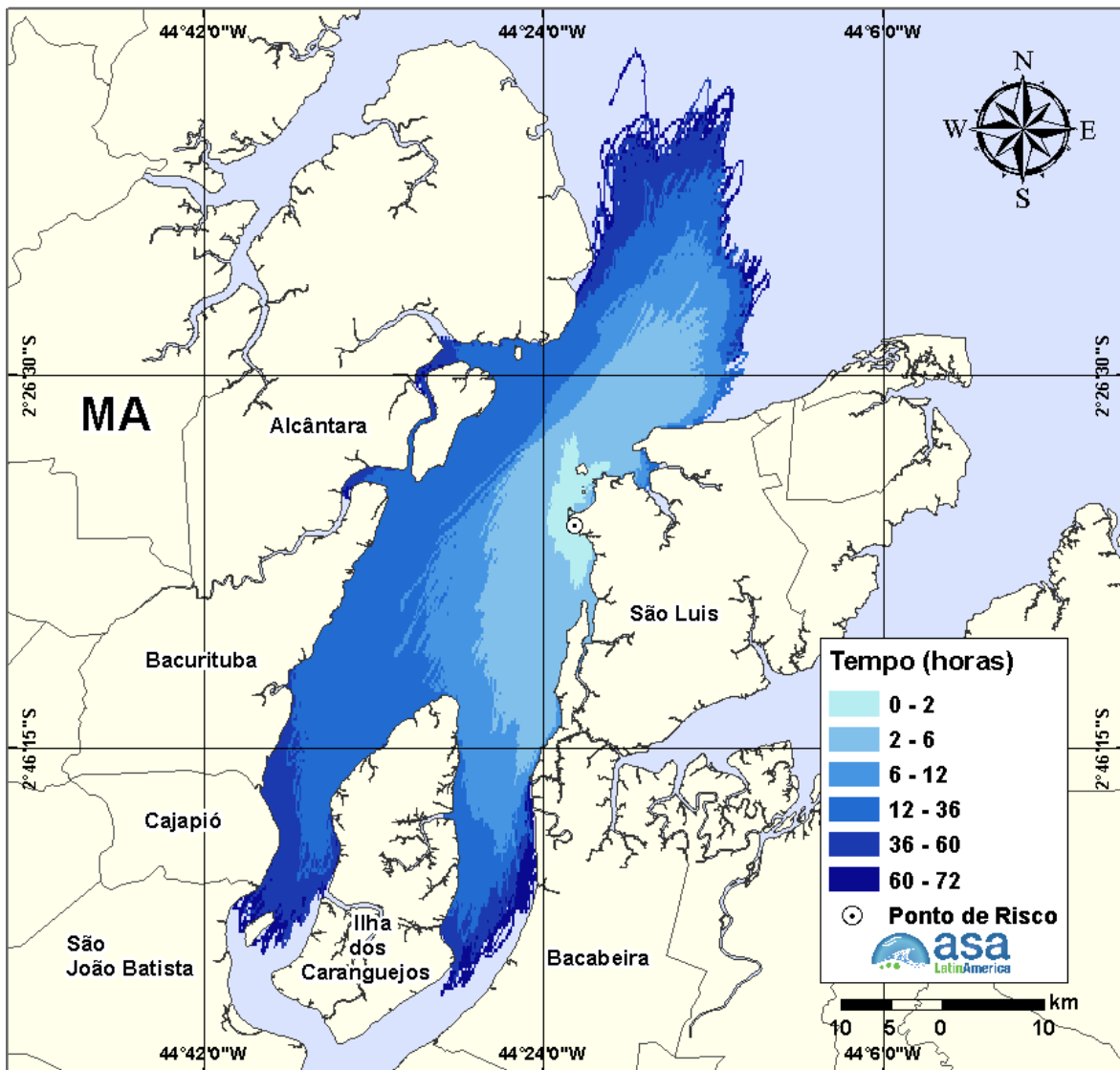


Figura 24 - Cenário P1_MF-380_PC_CHEIA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

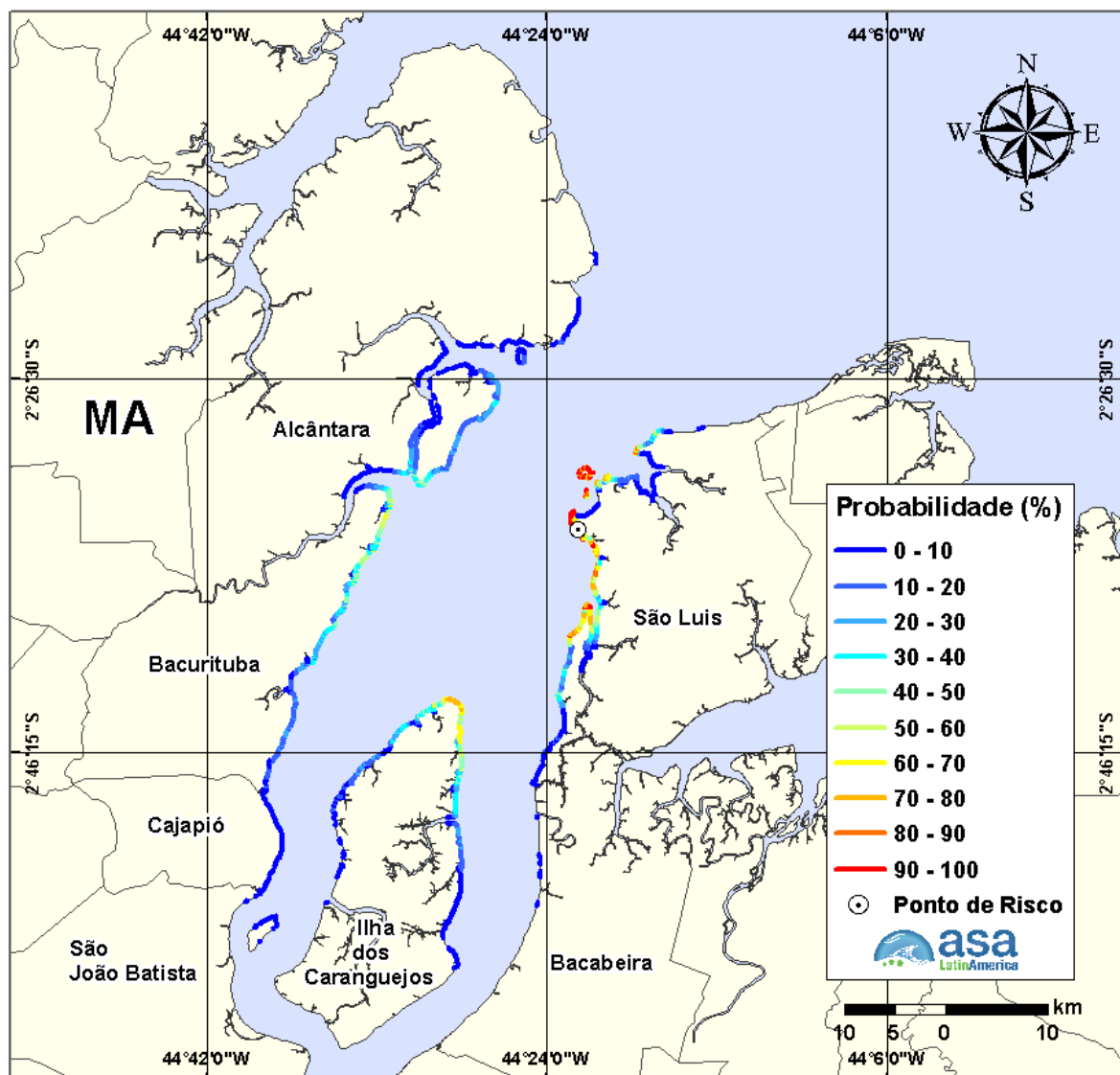


Figura 25 - Cenário P1_MF-380_PC_CHEIA_72H Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo MF-380 ocorrendo durante o período de cheia no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

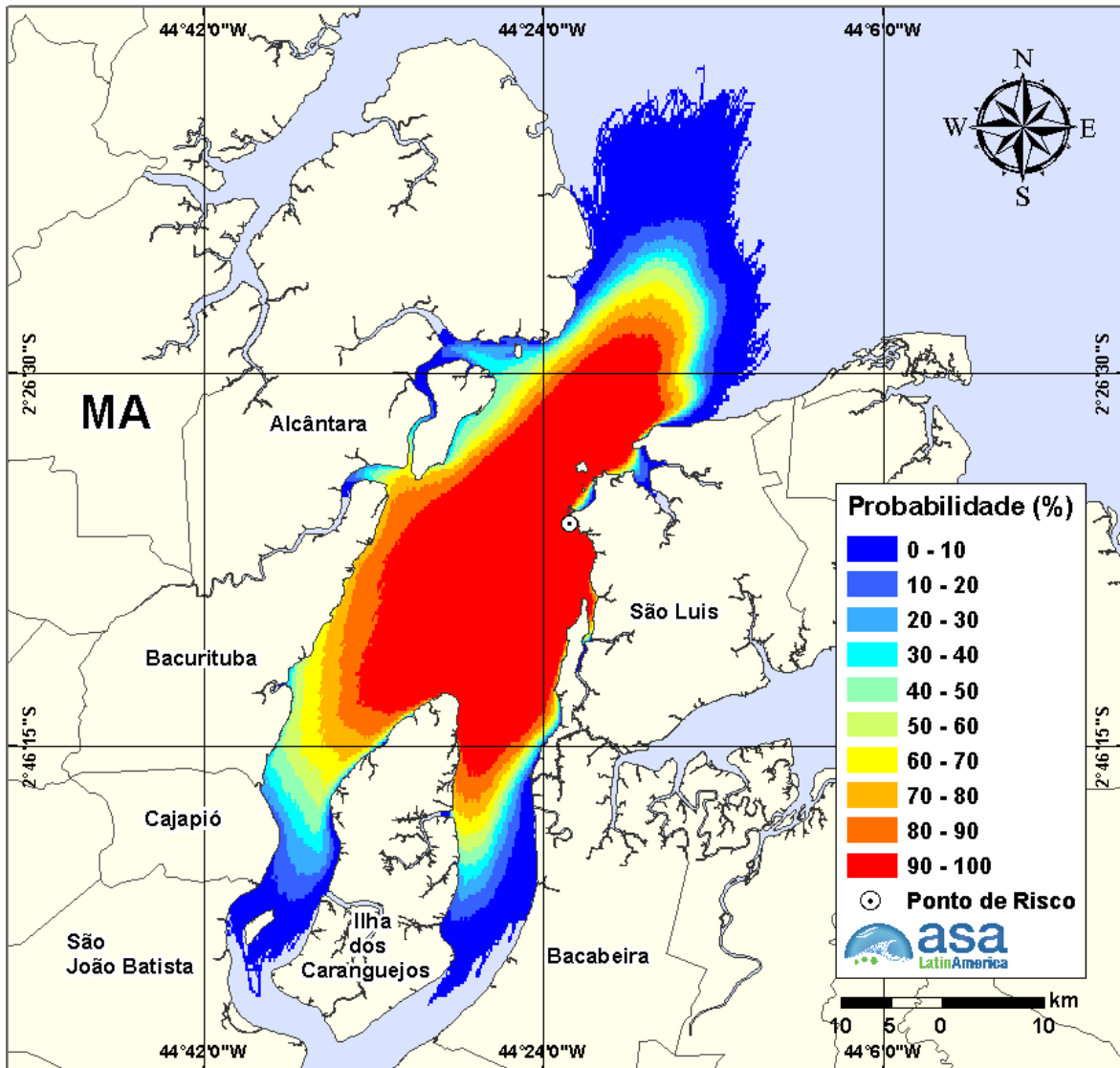


Figura 26 - Cenário P2_MF-380_PC_CHEIA_72H: Contornos de probabilidade de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P2, Baía de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

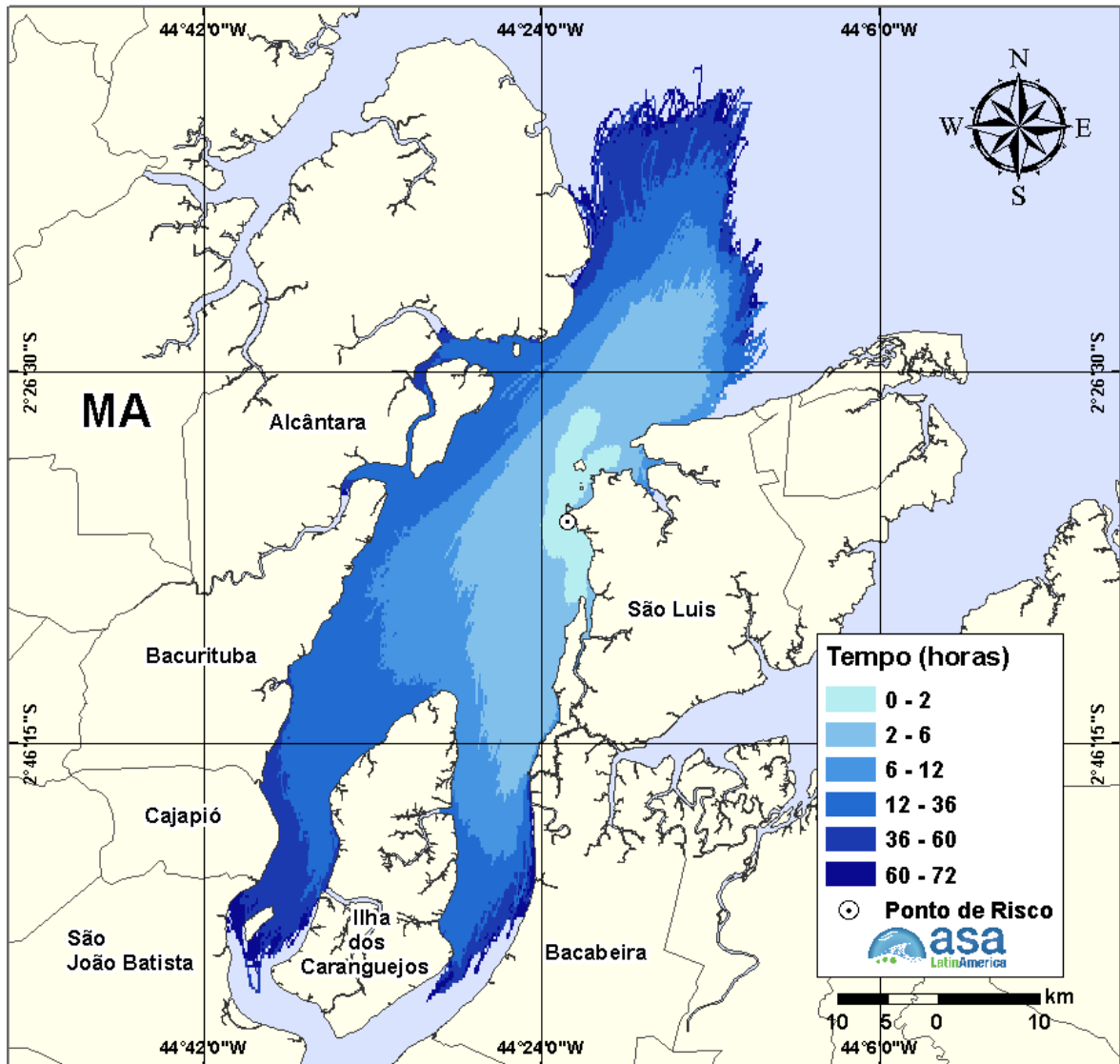


Figura 27 - Cenário P2_MF-380_PC_CHEIA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P2, Baía de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

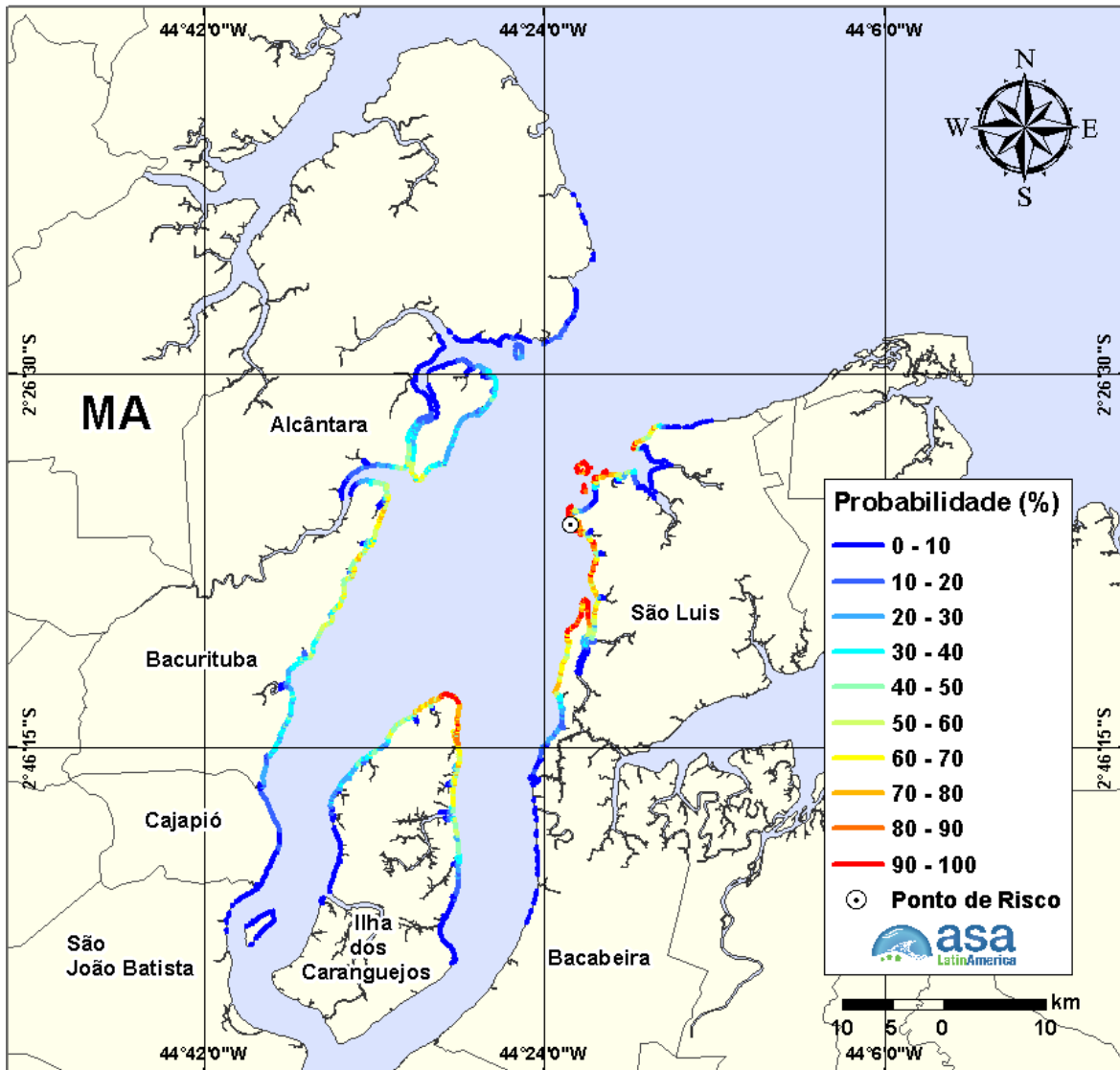


Figura 28 - Cenário P2_MF-380_PC_CHEIA_72H Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo MF-380 ocorrendo durante o período de cheia no ponto P2, Bacia de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

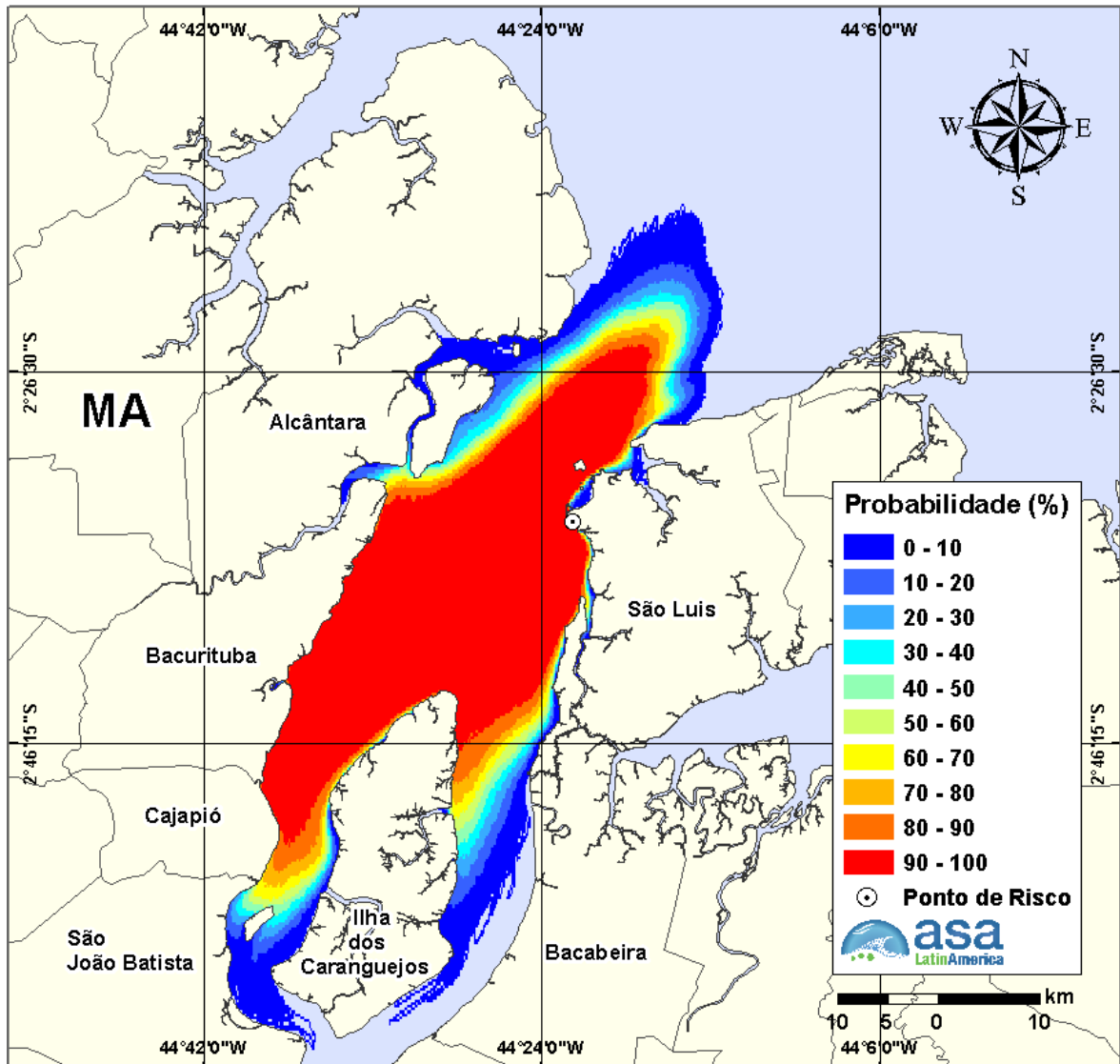


Figura 29 - Cenário P1_MF-380_PC_SECA_72H: Contornos de probabilidade de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de seca no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

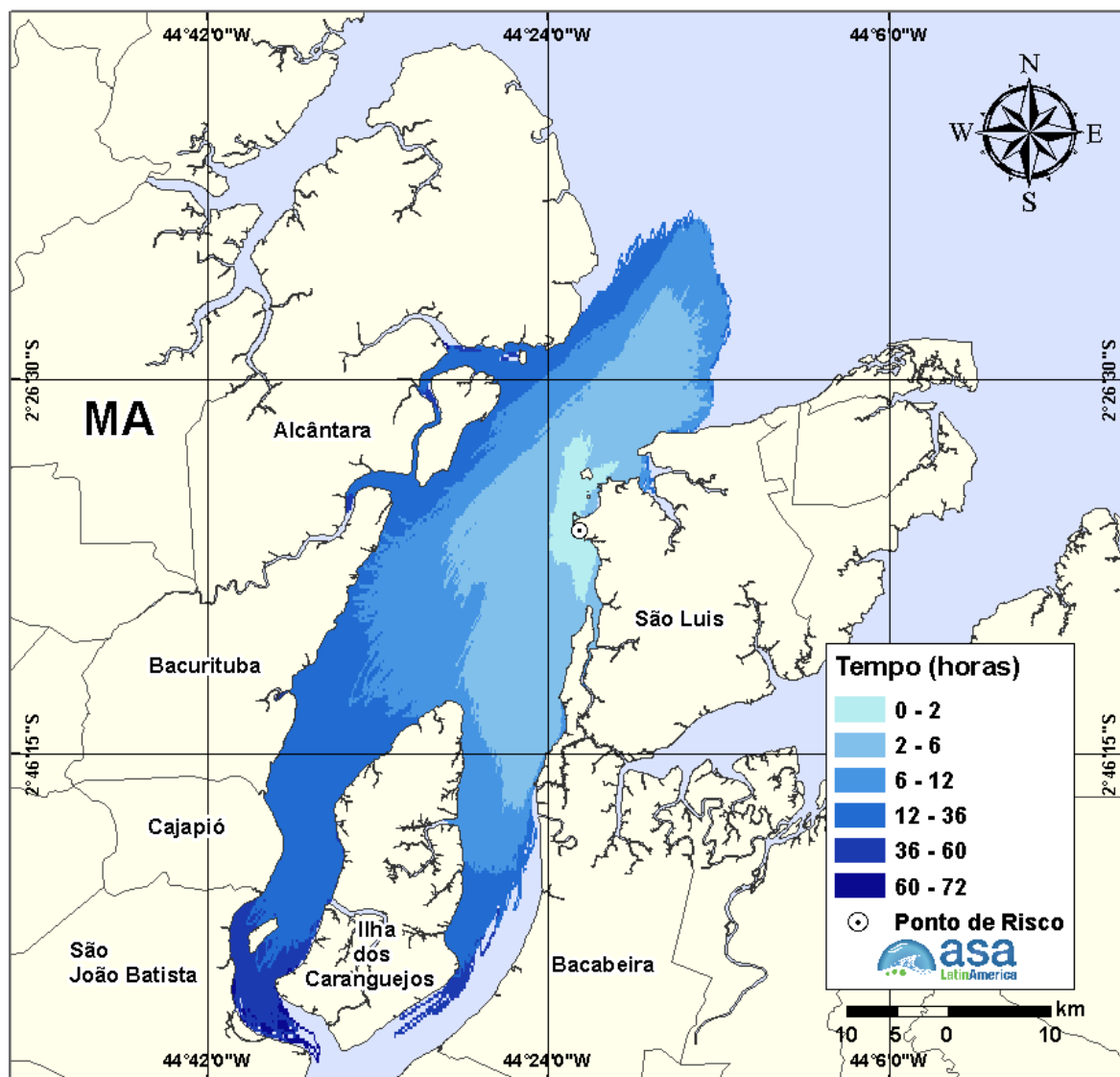


Figura 30 - Cenário P1_MF-380_PC_SECA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo MF-380 na água para um acidente durante o período de seca no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

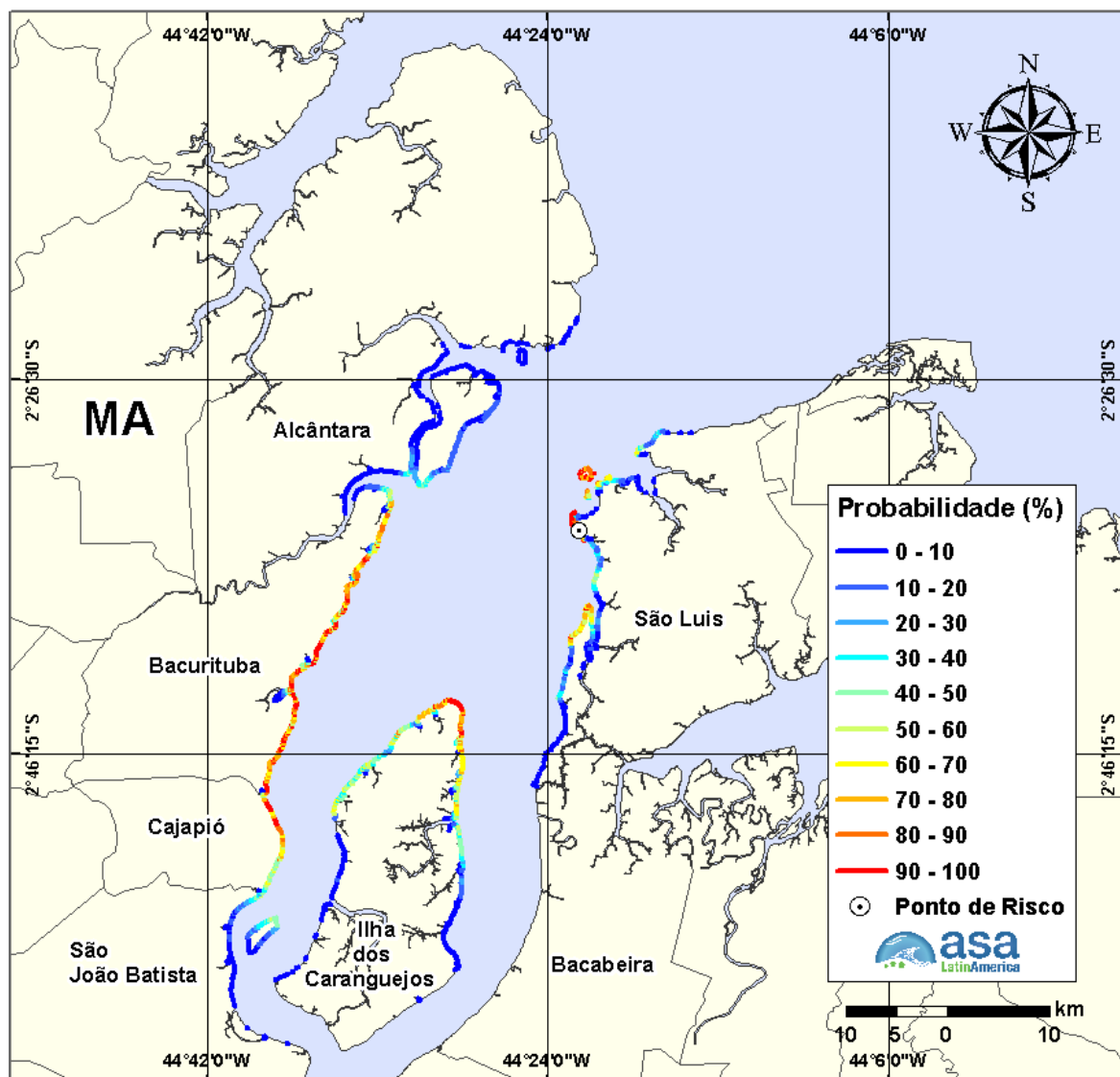


Figura 31 - Cenário P1_MF-380_PC_SECA_72H: Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo MF-380 ocorrendo durante o período de seca no ponto P1, Berço 105 do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

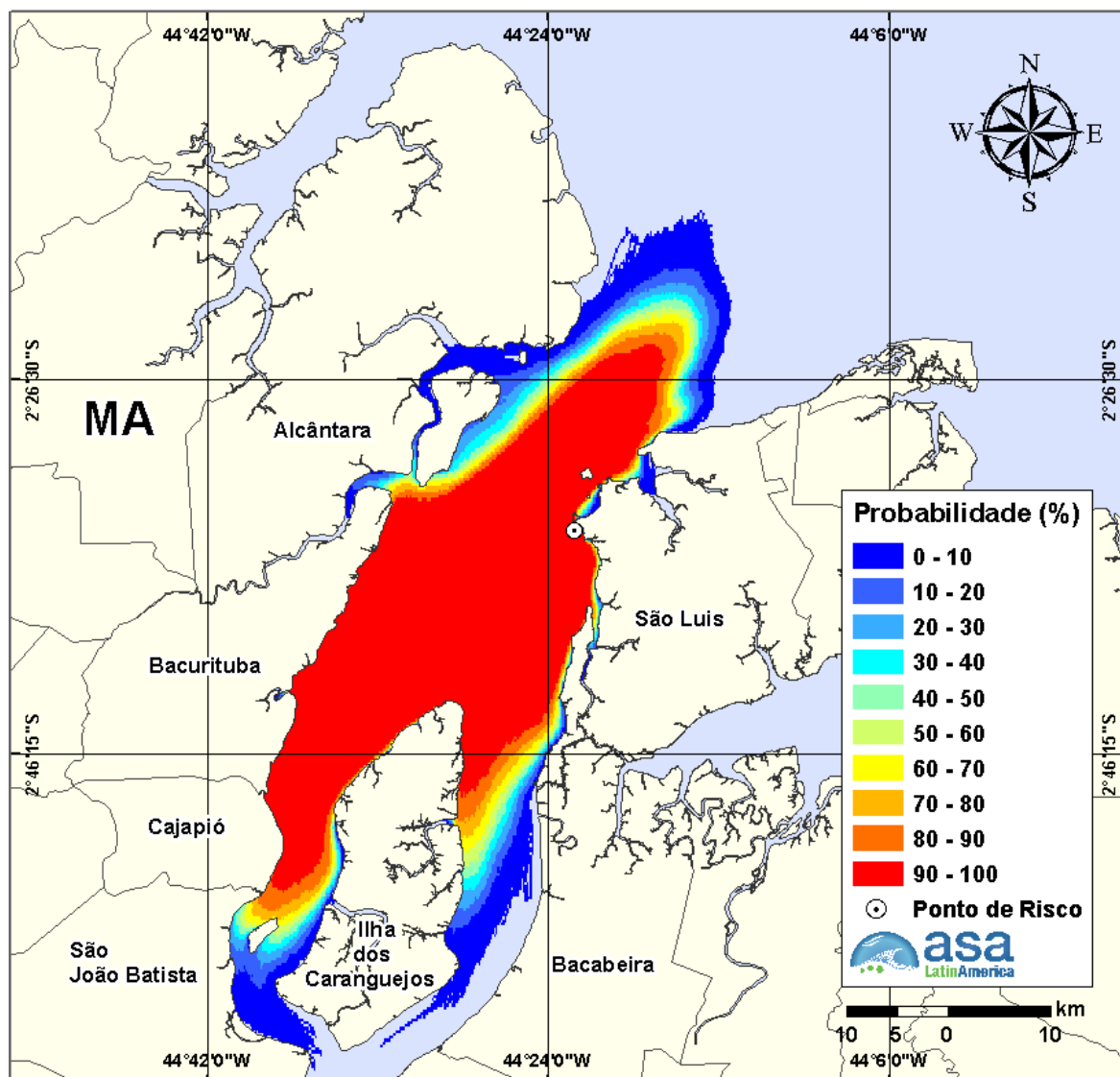


Figura 32 - Cenário P2_MF-380_PC_SECA_72H: Contornos de probabilidade de óleo MF-380 na água para um acidente ocorrendo durante o período de seca no ponto P2, Bacia de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

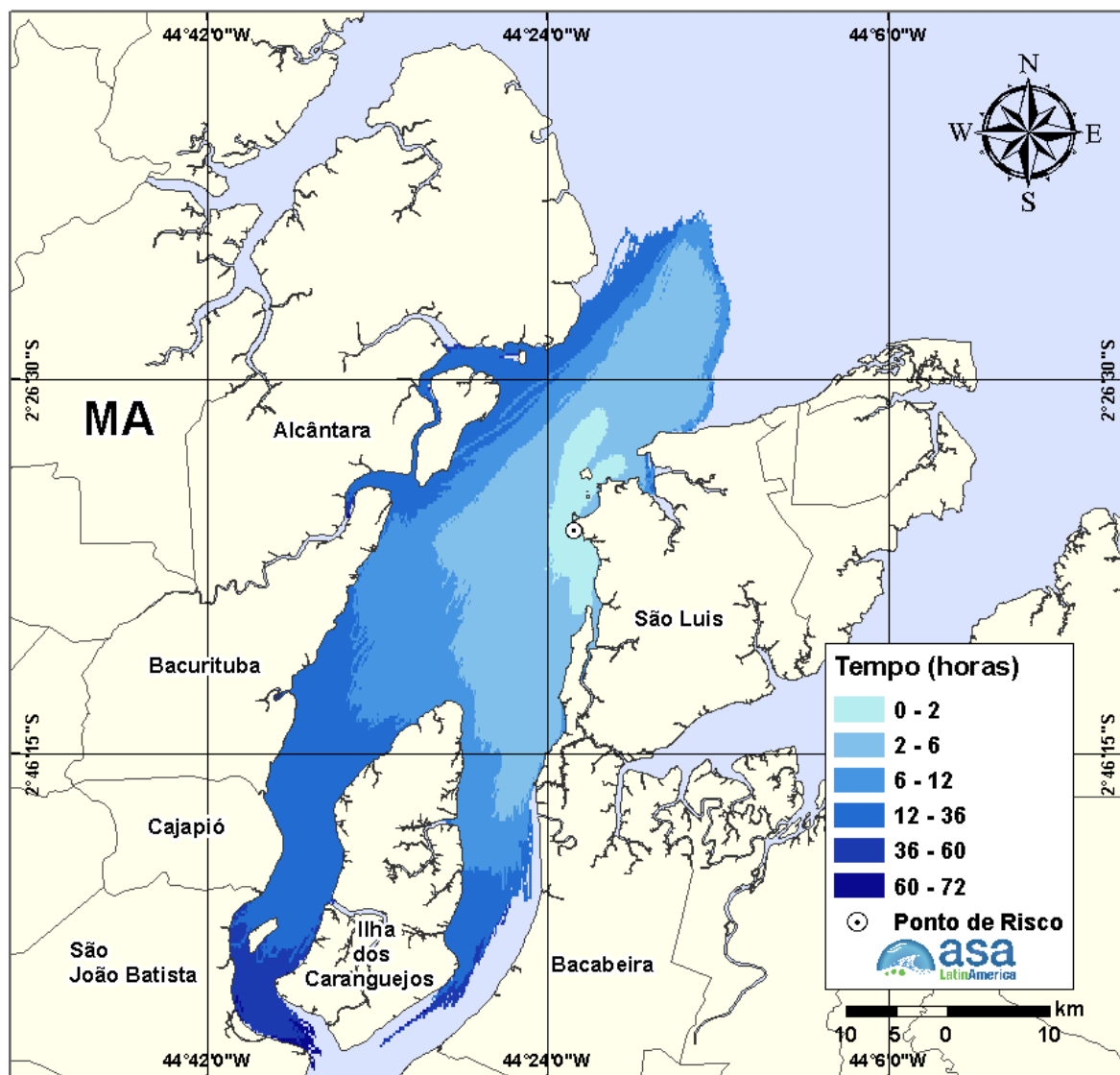


Figura 33 - Cenário P2_MF-380_PC_SECA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo MF-380 na água para um acidente durante o período de seca no ponto P2, Baía de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

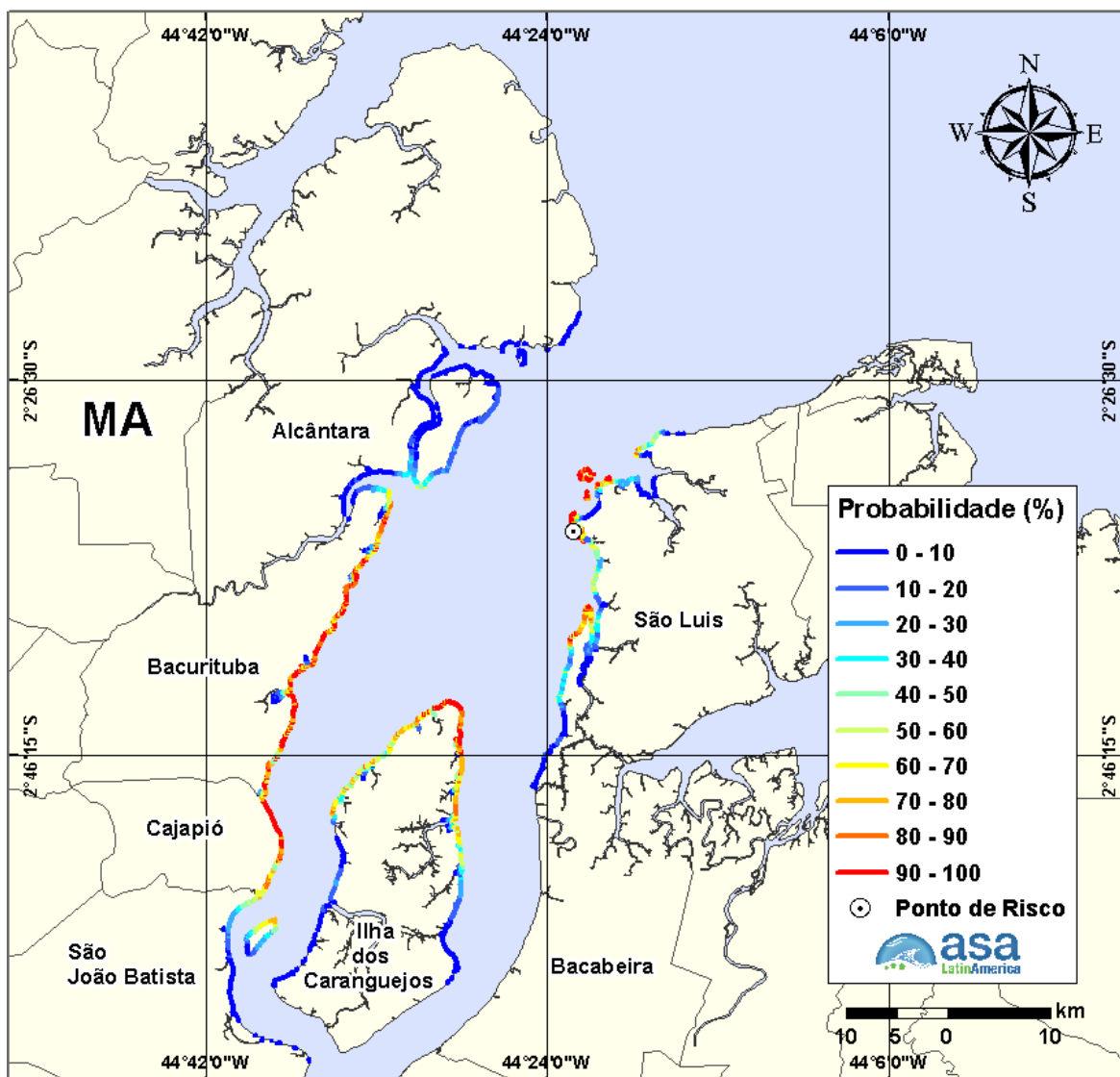


Figura 34 - Cenário P2_MF-380_PC_SECA_72H: Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo MF-380 ocorrendo durante o período de seca no ponto P2, Bacia de Evolução do Porto do Itaqui, com derrame de 10.000 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

V.1.2 Porto Grande

Da Figura 35 a Figura 40 são apresentados os resultados da simulação probabilística de cheia e seca para o Porto Grande, ponto P3. Observa-se que as maiores probabilidade de óleo na água e na costa encontram-se localizadas próximo ao ponto de risco, e que o óleo pode alcançar a Baía de São Marcos em tempo inferior duas horas após o início do derrame.

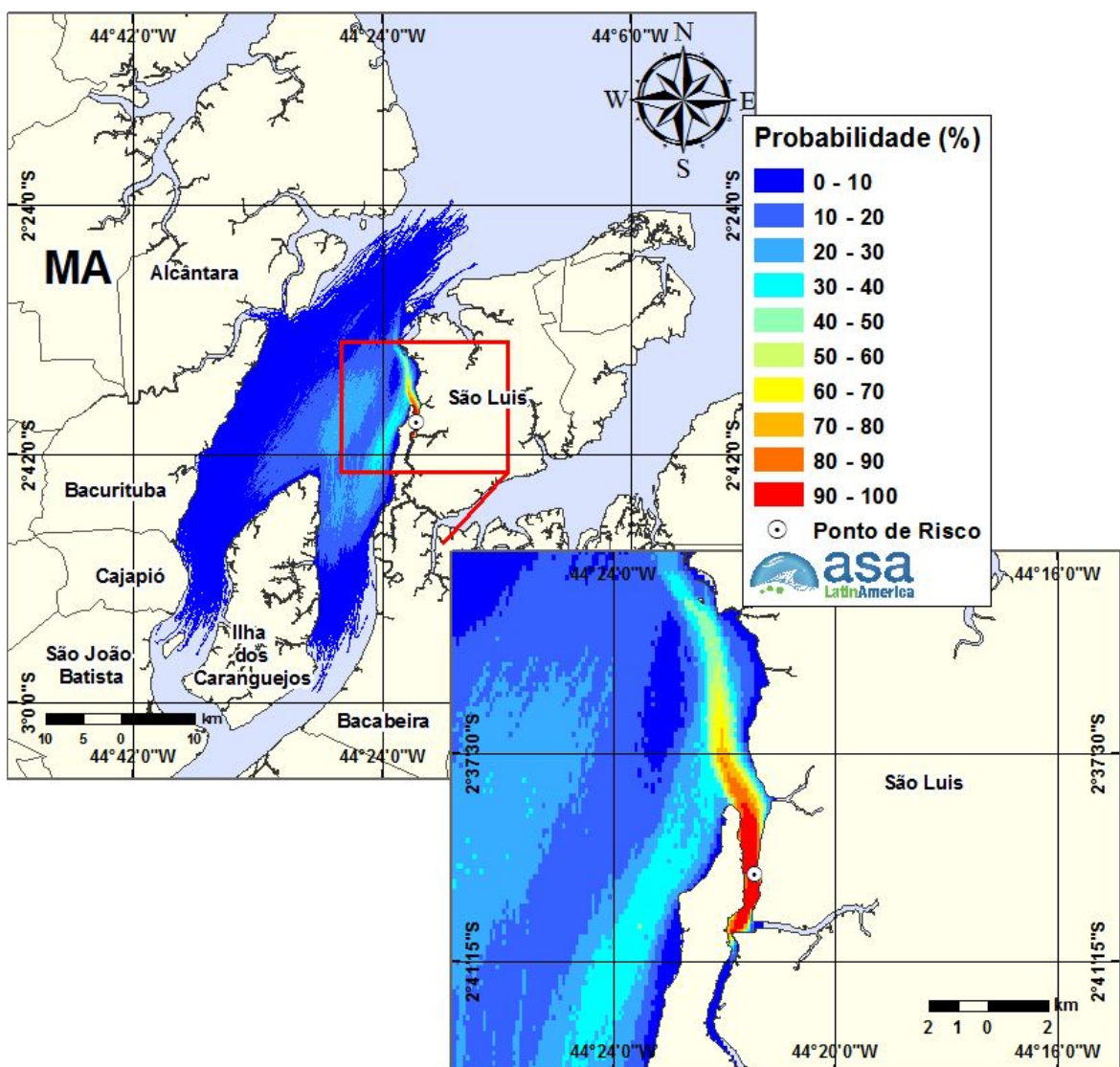


Figura 35 - Cenário P3_DIESEL_PC_CHEIA_72H: Contornos de probabilidade de óleo Diesel na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

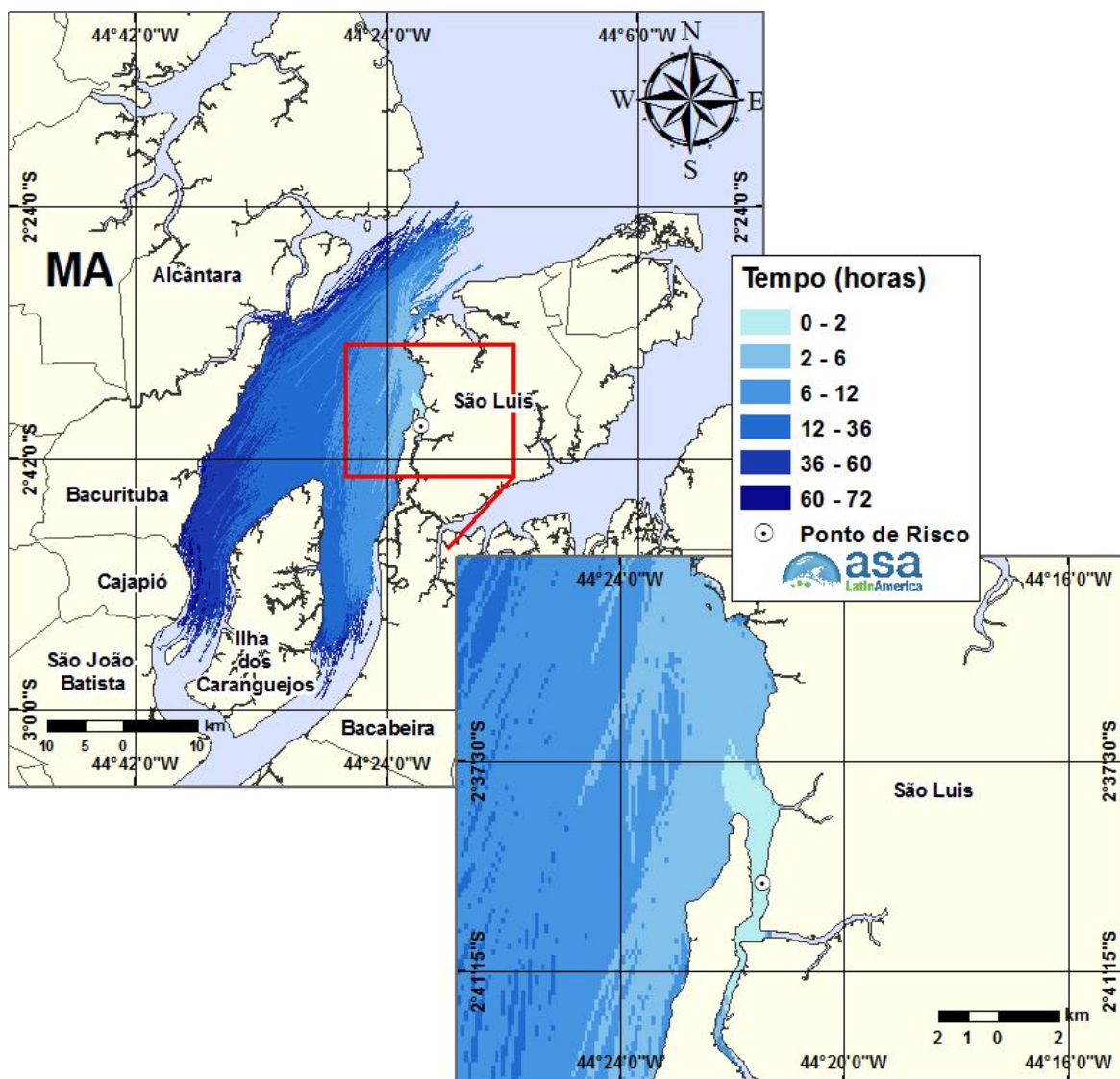


Figura 36 - Cenário P3_DIESEL_PC_CHEIA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo Diesel na água para um acidente ocorrendo durante o período de cheia no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

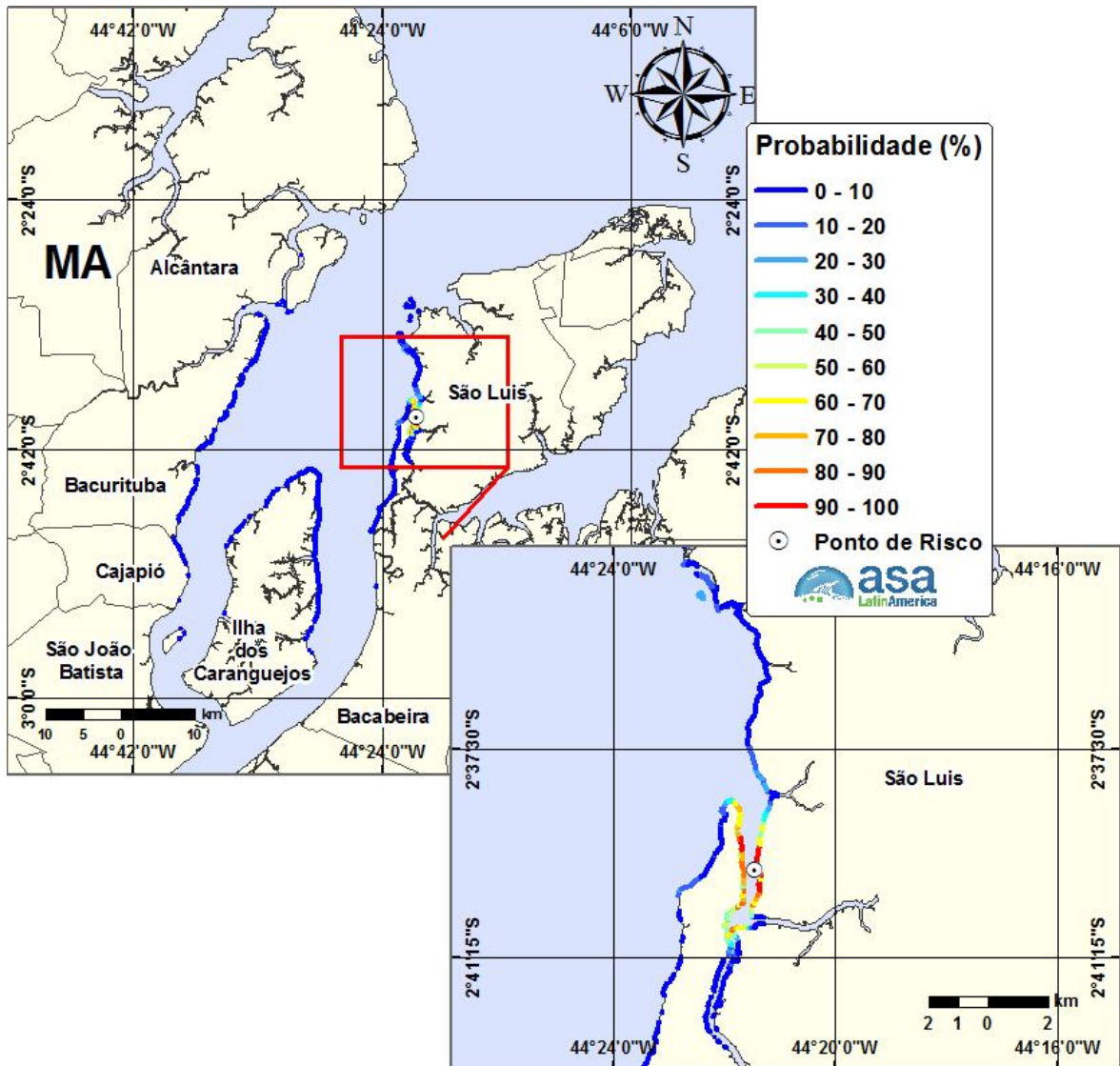


Figura 37 - Cenário P3_DIESEL_PC_CHEIA_72H Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo Diesel ocorrendo durante o período de cheia no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

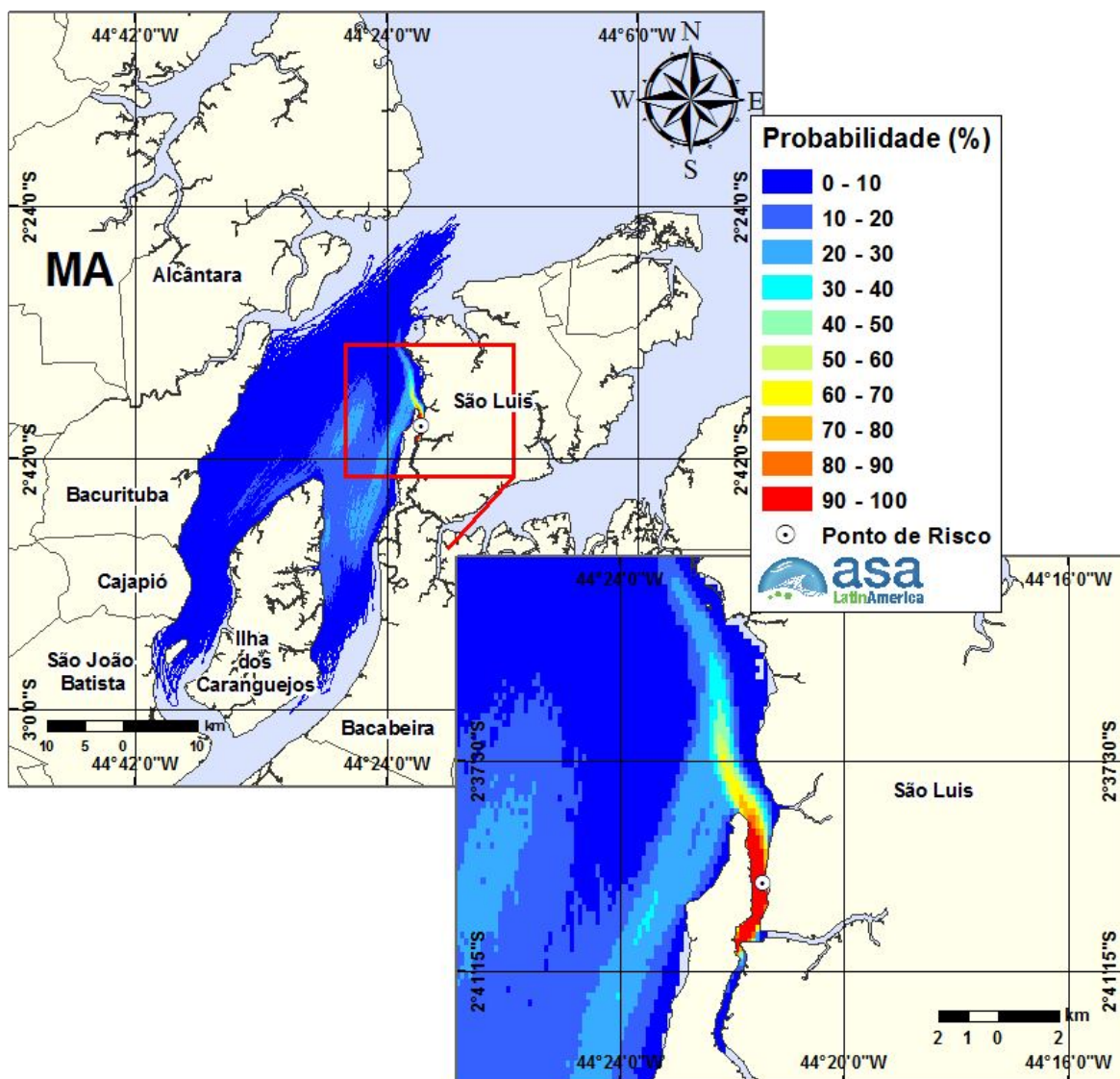


Figura 38 - Cenário P3_DIESEL_PC_SECA_72H: Contornos de probabilidade de óleo Diesel na água para um acidente ocorrendo durante o período de seca no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

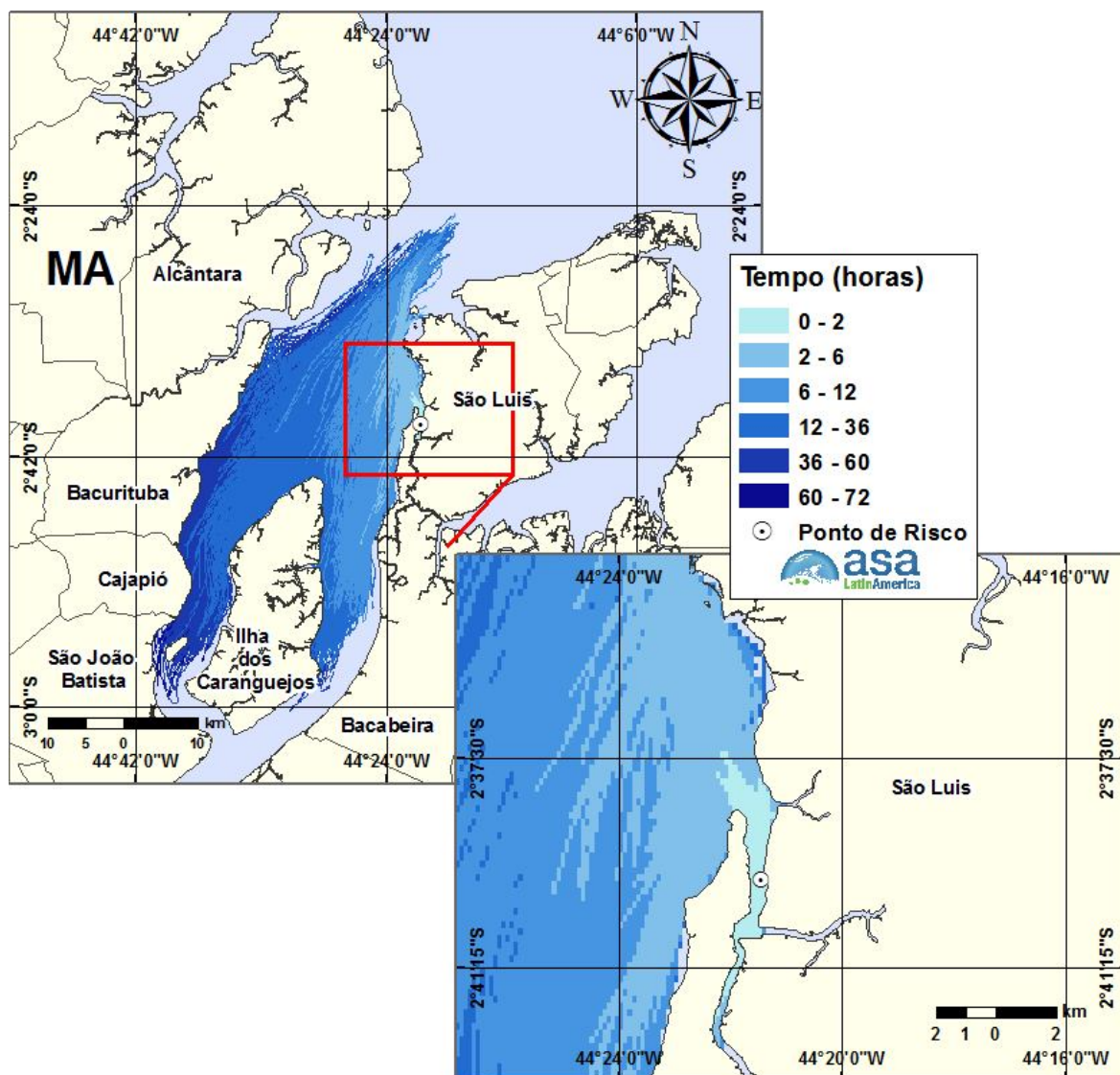


Figura 39 - Cenário P3_DIESEL_PC_SECA_72H: Contornos de tempo de deslocamento de óleo Diesel na água para um acidente durante o período de seca no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

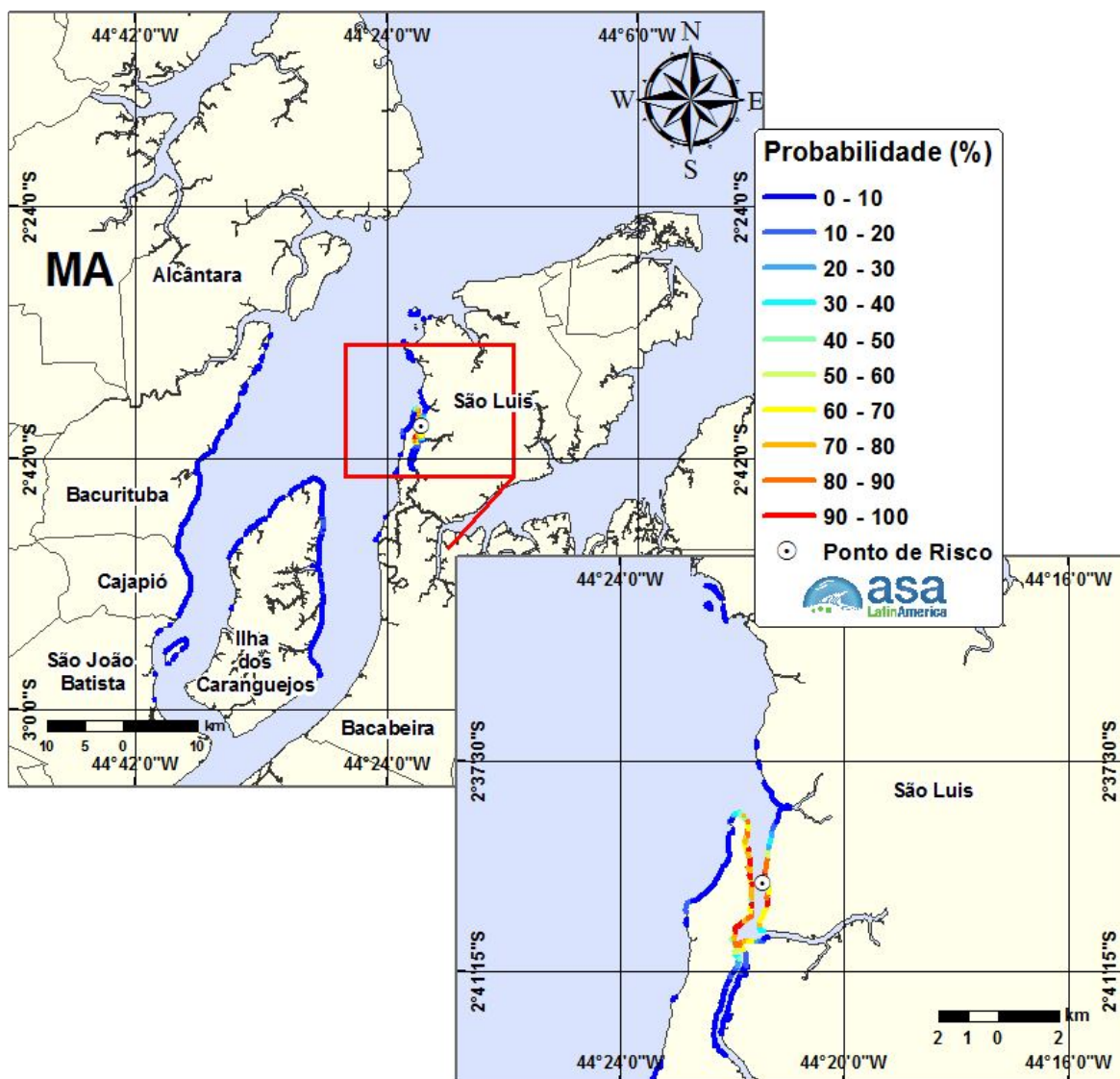


Figura 40 - Cenário P3_DIESEL_PC_SECA_72H: Probabilidades de toque de óleo na costa para um acidente com óleo Diesel ocorrendo durante o período de seca no ponto P3, Porto Grande, com derrame de 200 m³ (ao longo de 12 horas), após 72 horas de simulação.

V.2 SIMULAÇÕES DETERMINÍSTICAS

A análise dos resultados da modelagem hidrodinâmica permitiu identificar os períodos de maré de sizígia e quadratura e os regimes de enchente e vazante. Com o intuito de apresentar a dinâmica da região nas distintas condições de maré, foram simulados cenários determinísticos de derrame de Óleo Combustível Marítimo MF-380 e de Diesel para os três pontos de risco (P1 e P2 com MF-380 e P3 com Diesel) e dois períodos (cheia e seca), cujo início do derrame contemplasse condições de maré de sizígia e quadratura, enchente e vazante.

A Tabela 12 apresenta a data de início dos cenários determinísticos críticos simulados e suas respectivas extensões de toque na costa e volume máximo de óleo na costa ao final da simulação. Observa-se que a maior extensão de toque foi, de aproximadamente 280,9 km, referente ao cenário do ponto P2, período de seca, maré de sizígia em regime de enchente.

A seguir, são apresentados os resultados das simulações determinísticas em figuras, separados para ambos os portos (Porto do Itaqui e Porto Grande). Nestas observam-se a evolução temporal das manchas de óleo dos cenários acidentais para os períodos de 2, 6, 12, 36, 60 e 72 horas após o início do derrame. Ainda, nessas figuras, encontra-se indicada uma linha (em vermelho) que representa o toque do óleo na costa. Associados a cada cenário determinístico apresentam-se gráficos com o balanço de massa (óleo na superfície, na coluna d'água, na linha de costa e evaporado).

Salienta-se que as ilustrações de contorno de tempo se referem ao cenário crítico (maior extensão de toque na costa) e, portanto, não apresentam o menor tempo de deslocamento do óleo, e sim o tempo necessário para a ocorrência da maior extensão de óleo na costa.

Tabela 12 - Resumo dos cenários determinísticos críticos simulados.

CENARIOS	DATA DE INÍCIO DA SIMULAÇÃO	EXTENSÃO DE TOQUE NA COSTA (km)	VOLUME FINAL DE ÓLEO NA COSTA (m ³)
DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H	29/03/2002 - 05:00 h	232,8	8.448,0
DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H	29/03/2002 - 11:00 h	242,6	8.151,0
DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H	08/10/2002 - 05:00 h	259,6	9.363,0
DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H	07/10/2002 - 21:00 h	262,1	9.071,0
DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H	06/04/2002 - 11:00 h	131,7	8.221,0
DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H	06/04/2002 - 17:00 h	134,8	9.423,0
DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H	15/10/2002 - 10:00 h	199,9	8.902,0
DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H	14/10/2002 - 16:00 h	194,3	8.945,0
DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H	29/03/2002 - 05:00 h	262,7	8.552,0
DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H	29/03/2002 - 11:00 h	267,1	7.206,0
DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H	08/10/2002 - 05:00 h	280,9	9.053,0
DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H	07/10/2002 - 21:00 h	269,4	8.926,0
DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H	06/04/2002 - 11:00 h	137,7	5.495,0
DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H	06/04/2002 - 17:00 h	142,8	7.611,0
DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H	15/10/2002 - 10:00 h	189,0	8.387,0
DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H	14/10/2002 - 16:00 h	209,6	8.597,0
DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_EN_72H	29/03/2002 - 05:00 h	72,4	99,0
DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H	29/03/2002 - 11:00 h	72,9	107,0
DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_EN_72H	08/10/2002 - 05:00 h	44,1	71,0
DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_VZ_72H	07/10/2002 - 21:00 h	58,8	98,0
DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_EN_72H	05/04/2002 - 22:00 h	29,0	111,0
DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_VZ_72H	06/04/2002 - 17:00 h	18,0	87,0
DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_EN_72H	15/10/2002 - 10:00 h	9,1	66,0
DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_VZ_72H	14/10/2002 - 16:00 h	9,8	96,0

Através da análise dos resultados das simulações determinísticas é possível observar novamente a influência da localização dos pontos de risco e da sazonalidade no transporte do óleo. Adicionalmente estes resultados também demonstram a influência da maré sobre a dinâmica dos derrames. Durante as marés de sizígia, as áreas referentes ao deslocamento do óleo são superiores as de maré de quadratura, isto é devido a maior circulação hidrodinâmica proporcionado pela oscilação de maré durante o período de sizígia.

Observa-se nos gráficos de balanço de massa que o processo de evaporação é mais intenso nas simulações com Diesel. Isto ocorre porque a composição do Diesel apresenta um maior volume de elementos voláteis do que a que é verificada no Óleo Combustível Marítimo MF-380.

V.2.1 Porto do Itaqui

Da Figura 41 a Figura 56 são apresentados os resultados das simulações determinísticas de cheia para o Porto do Itaqui, pontos P1 e P2. A maior extensão de toque na costa para estas simulações de cheia foi encontrada para o cenário do ponto P2, maré de sizígia, regime de vazante, de aproximadamente 267,1 km ao longo da Baía de São Marcos.

Os gráficos de balanço de massa demonstram que em ambos os pontos de risco simulados, o principal processo que atua na redução da massa de óleo na água é a interação com a linha de costa, e que ao final das simulações ainda existe óleo na superfície da água.

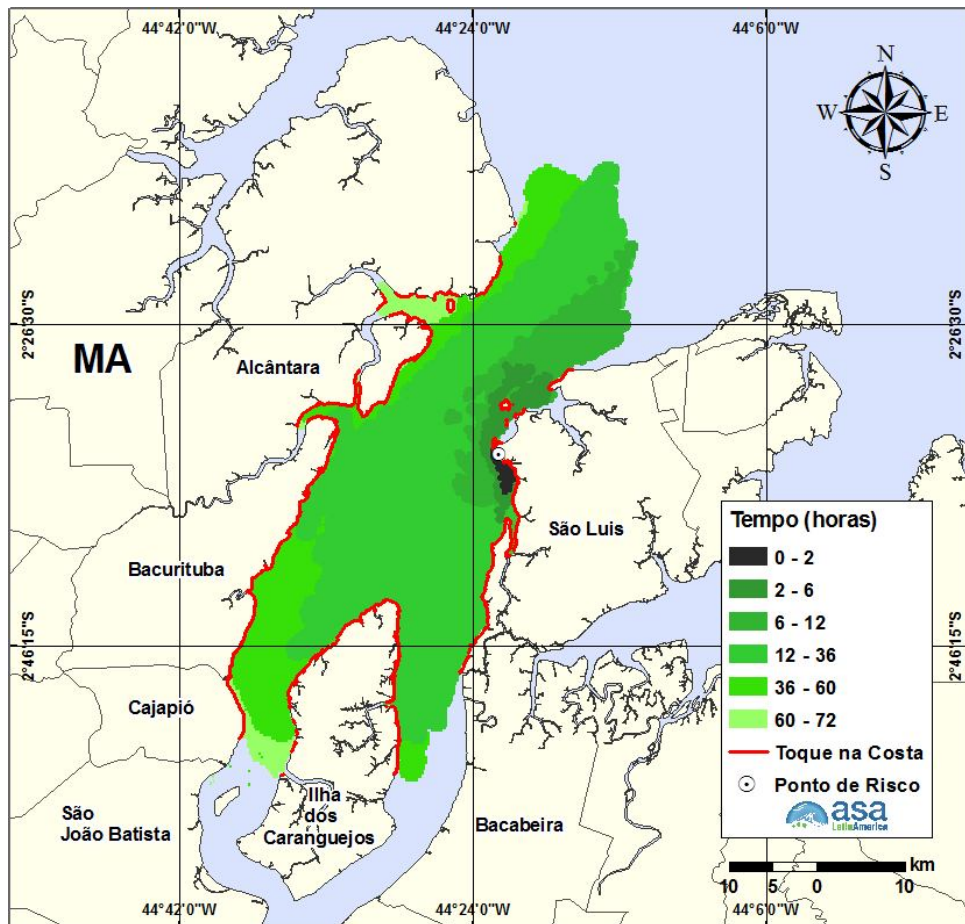


Figura 41 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

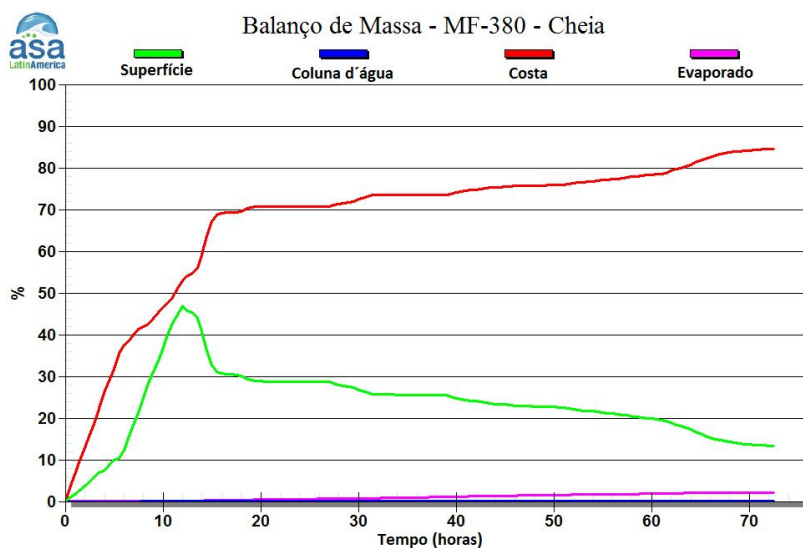


Figura 42 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H.

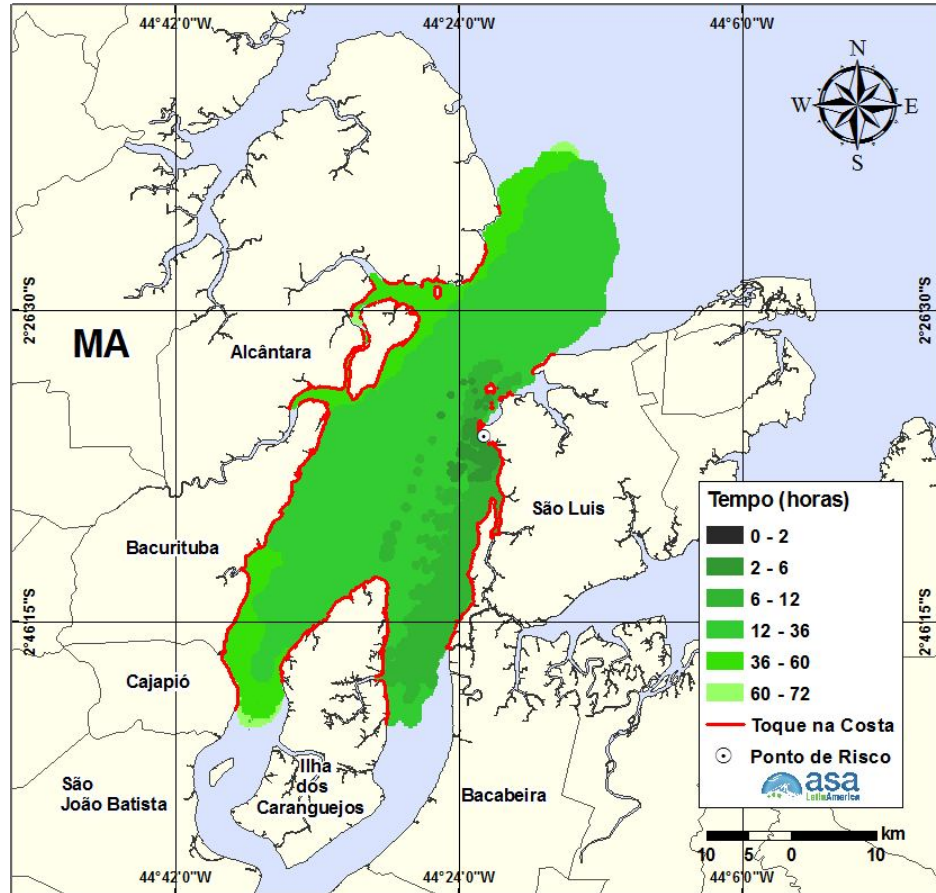


Figura 43 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

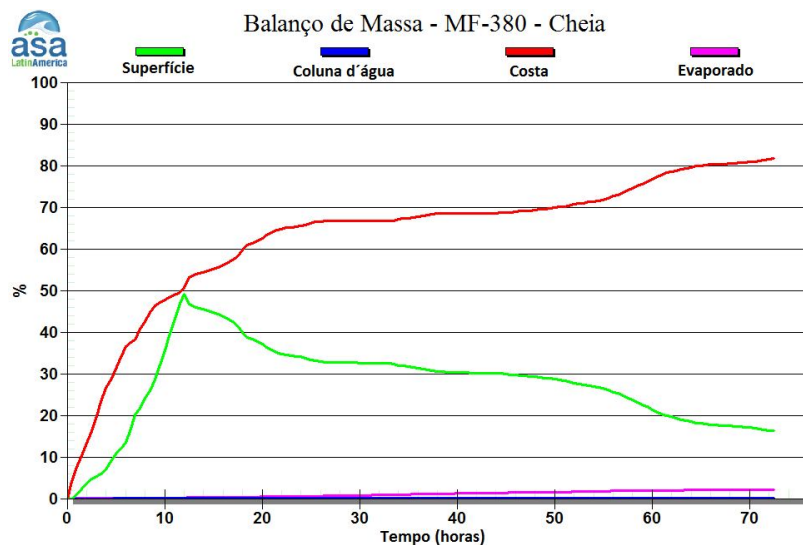


Figura 44 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H.

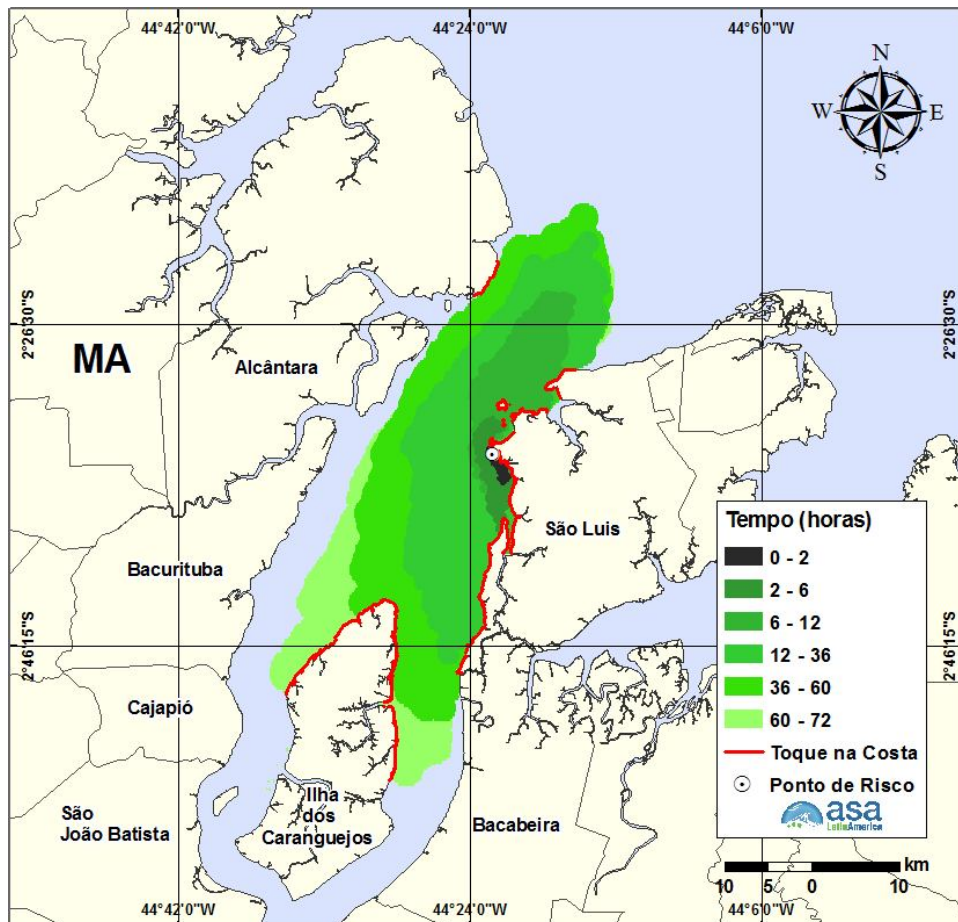


Figura 45 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

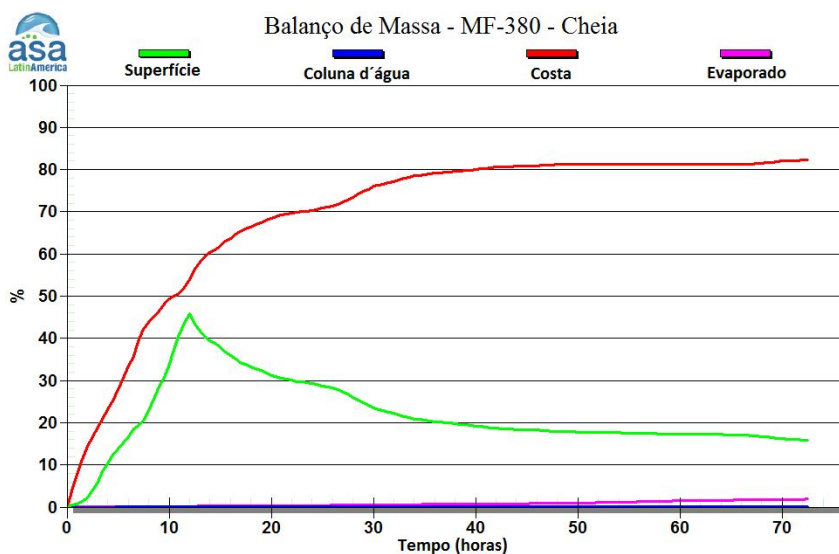


Figura 46 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H.

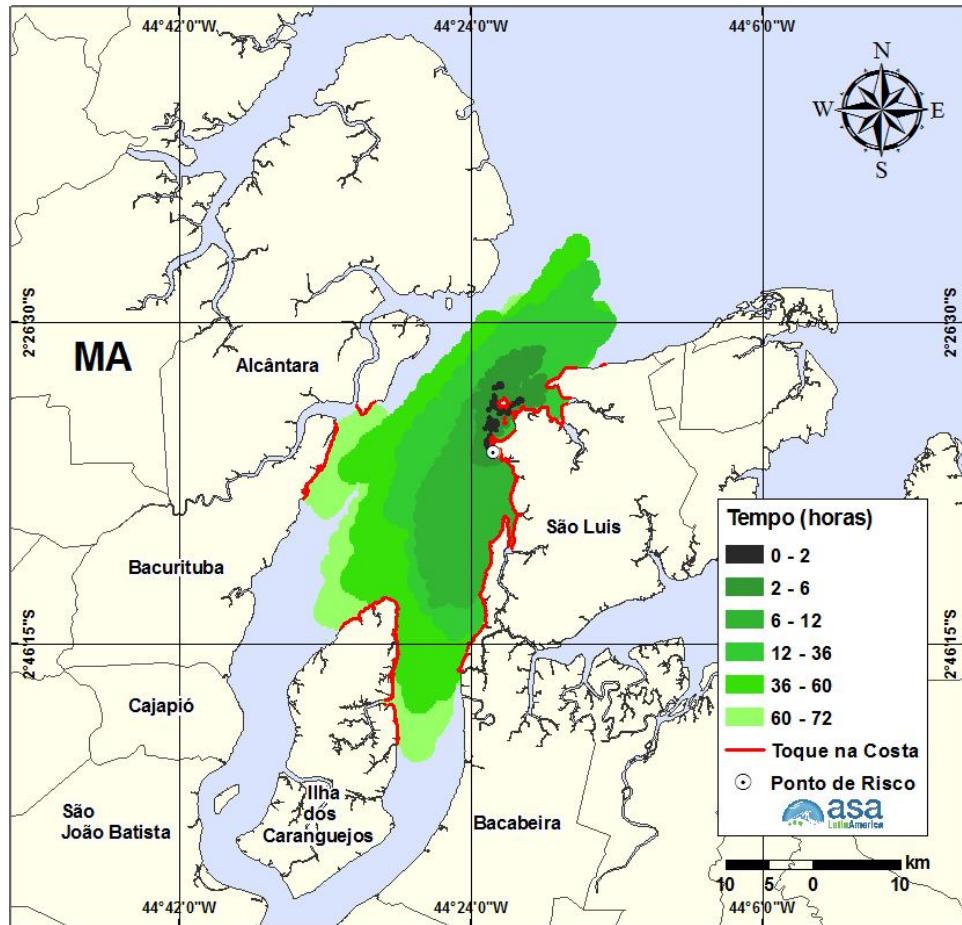


Figura 47 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

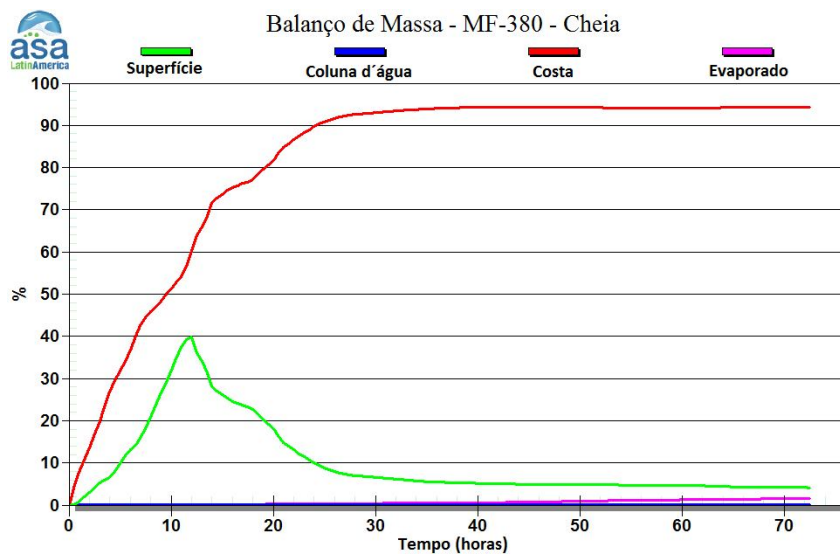


Figura 48 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H.

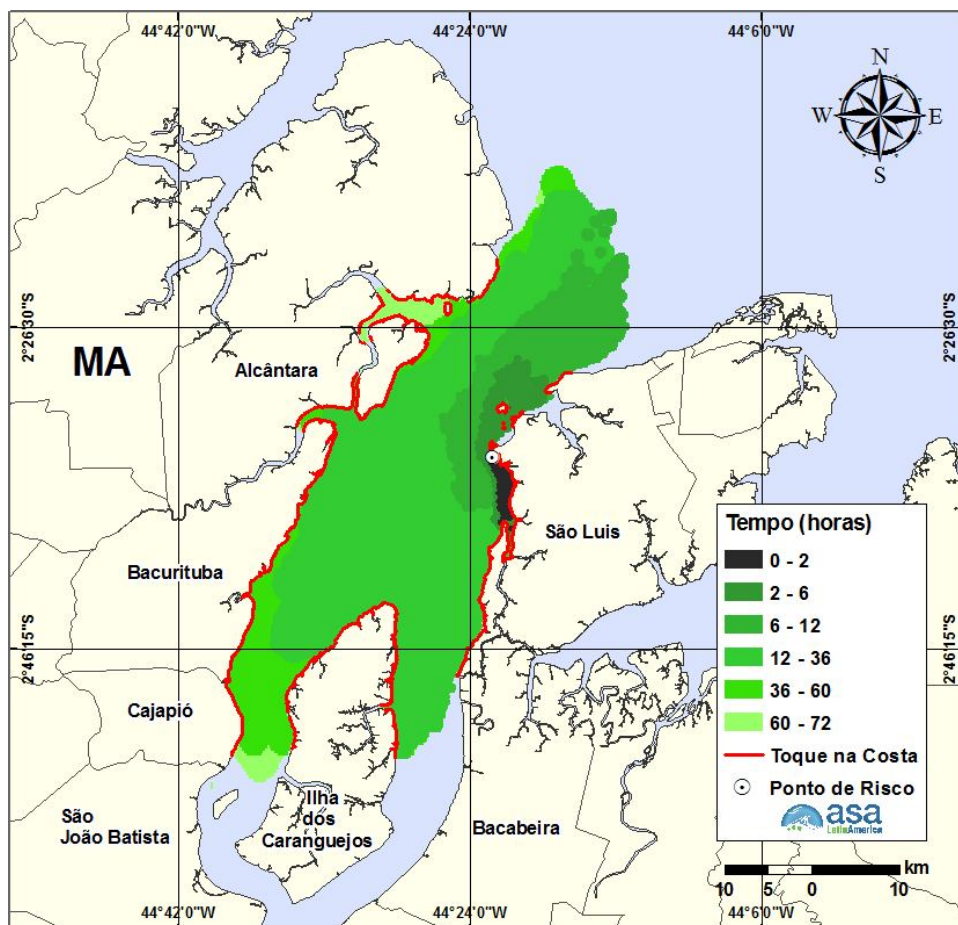


Figura 49 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

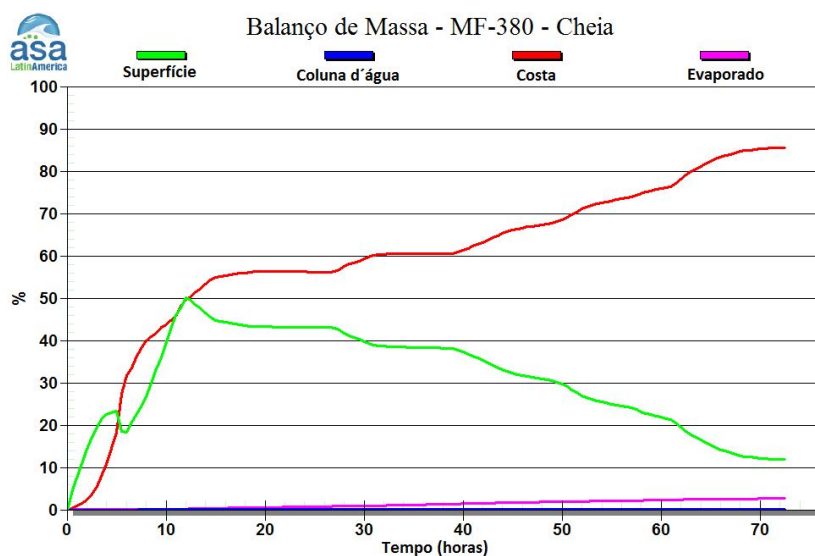


Figura 50 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_EN_72H.

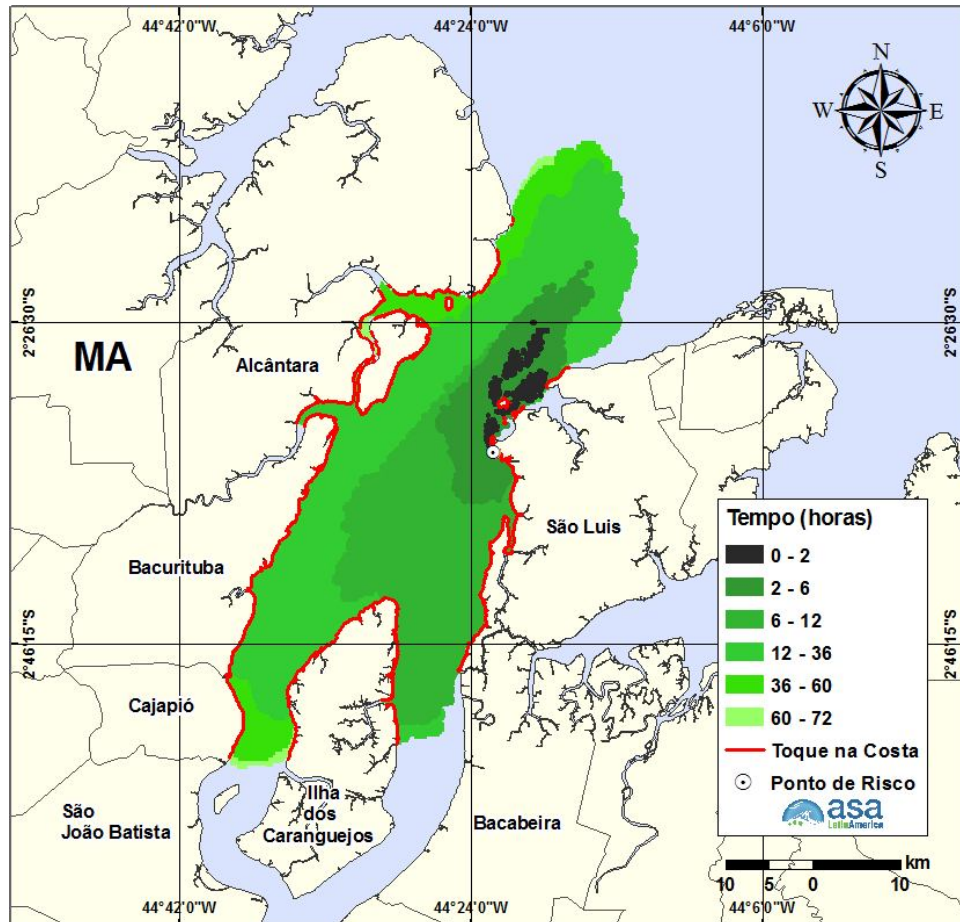


Figura 51 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

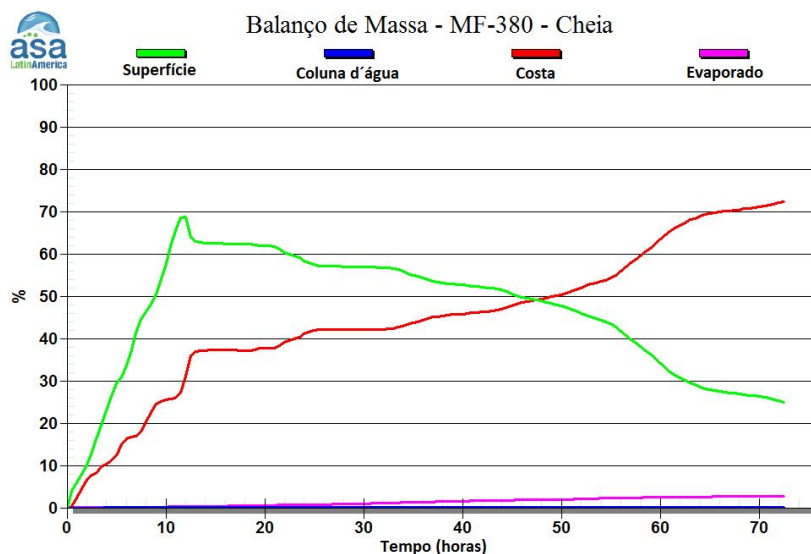


Figura 52 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H.

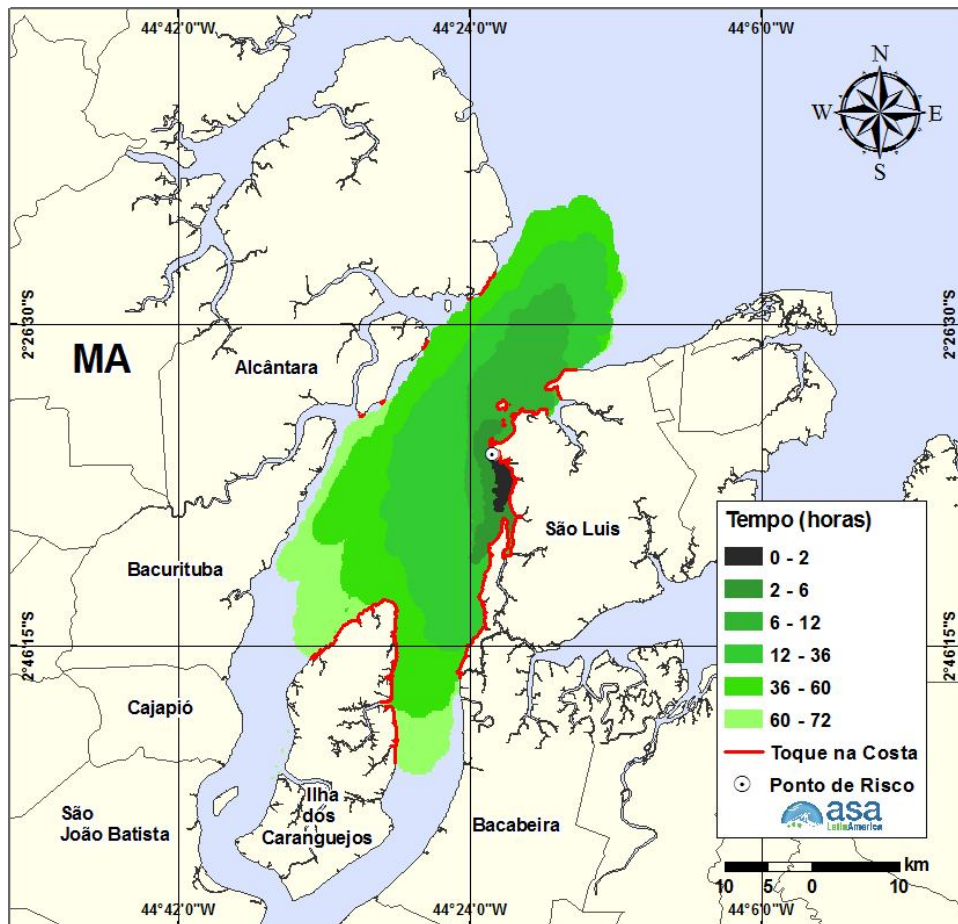


Figura 53 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

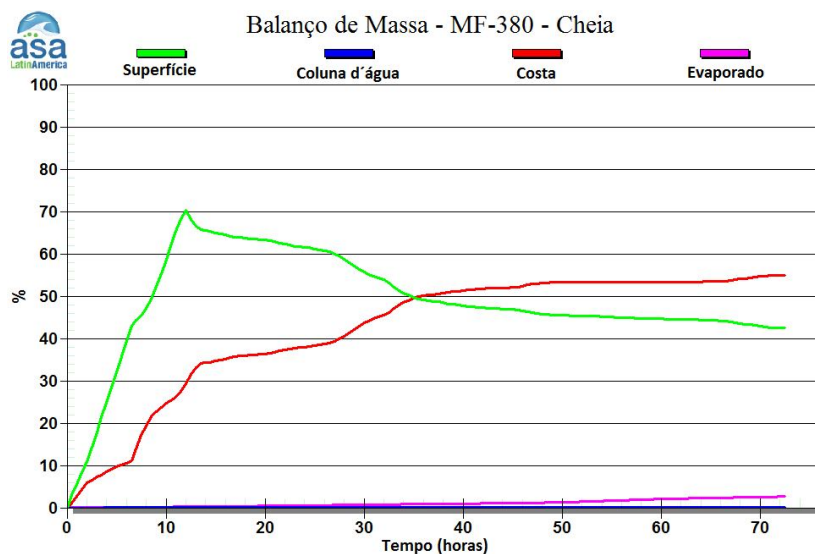


Figura 54 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_EN_72H.

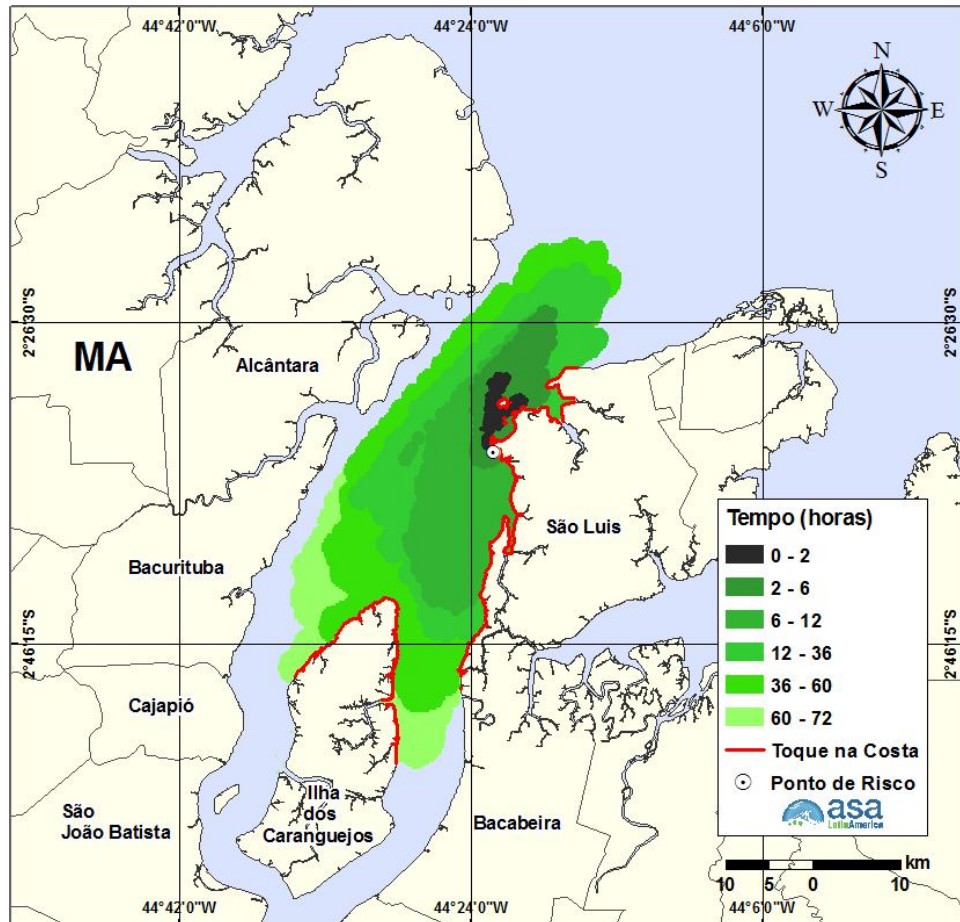


Figura 55 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

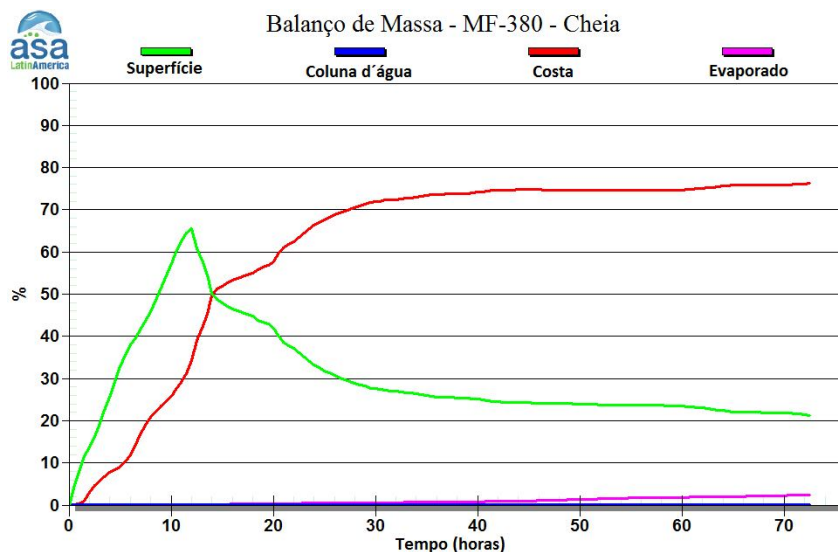


Figura 56 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_CHEIA_QD_VZ_72H.

Da Figura 57 a Figura 72 são apresentados os resultados das simulações determinísticas de seca para o Porto do Itaqui, pontos P1 e P2. A maior extensão de toque na costa para estas simulações de seca foi encontrada para o cenário do ponto P2, maré de sizígia, regime de enchente, de aproximadamente 280,9 km.

Os gráficos de balanço de massa demonstram que em ambos os pontos de risco simulados, o principal processo que atua na redução da massa de óleo na água é a interação com a linha de costa, e que ao final das simulações ainda existe óleo na superfície da água.

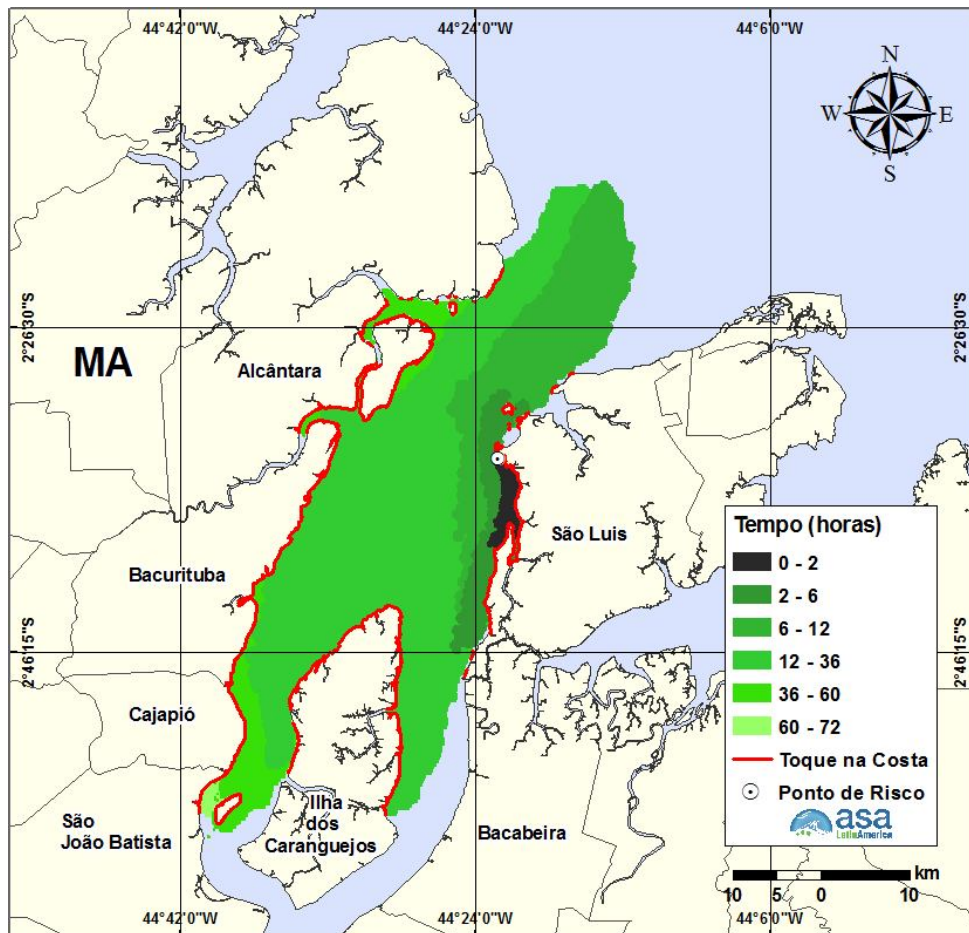


Figura 57 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

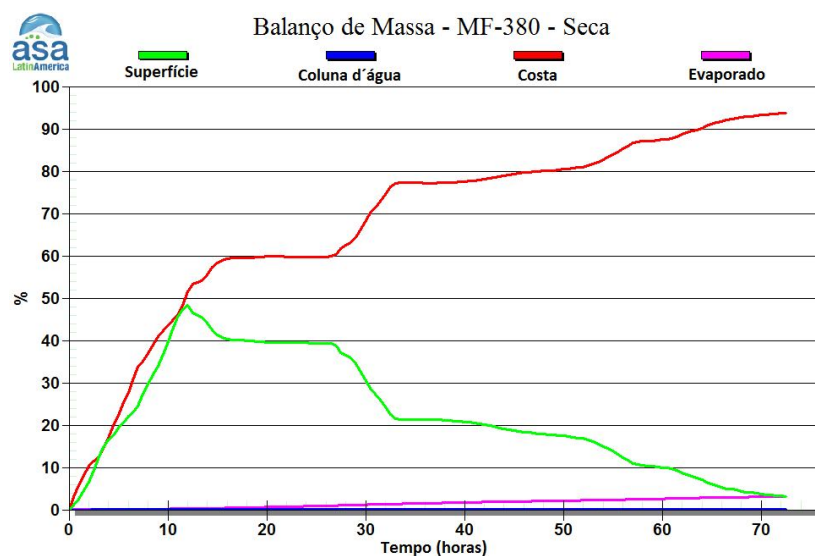


Figura 58 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H.

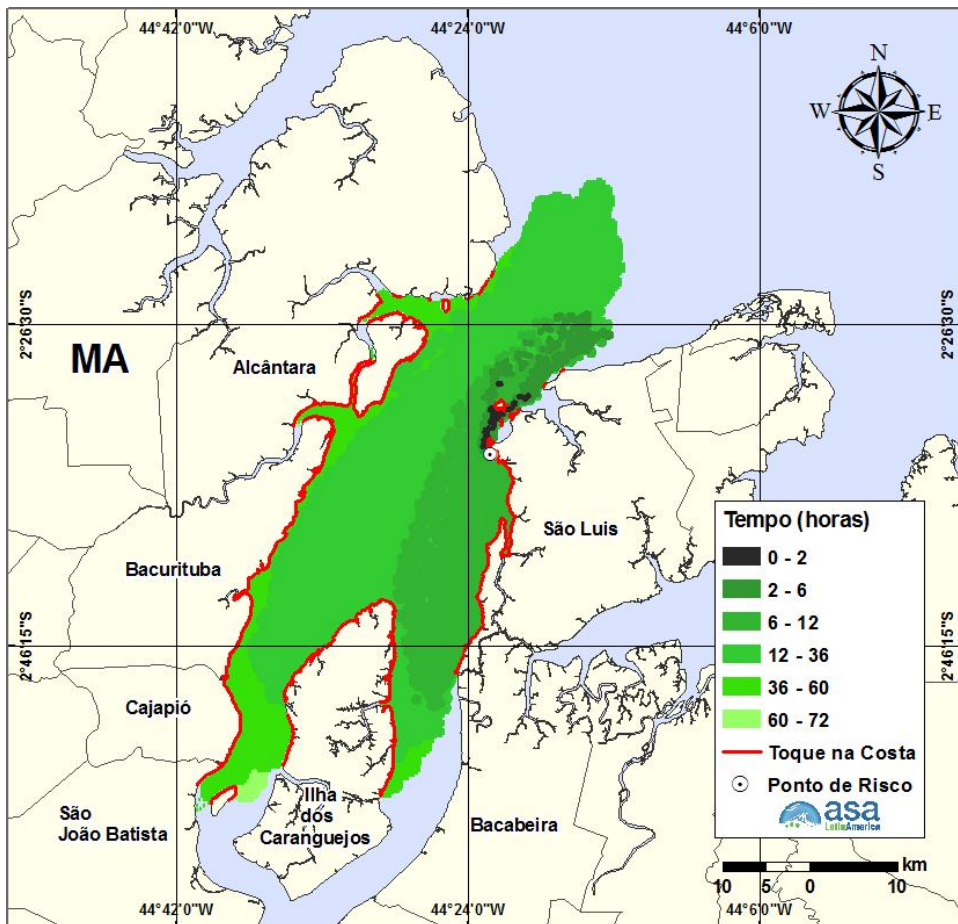


Figura 59 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

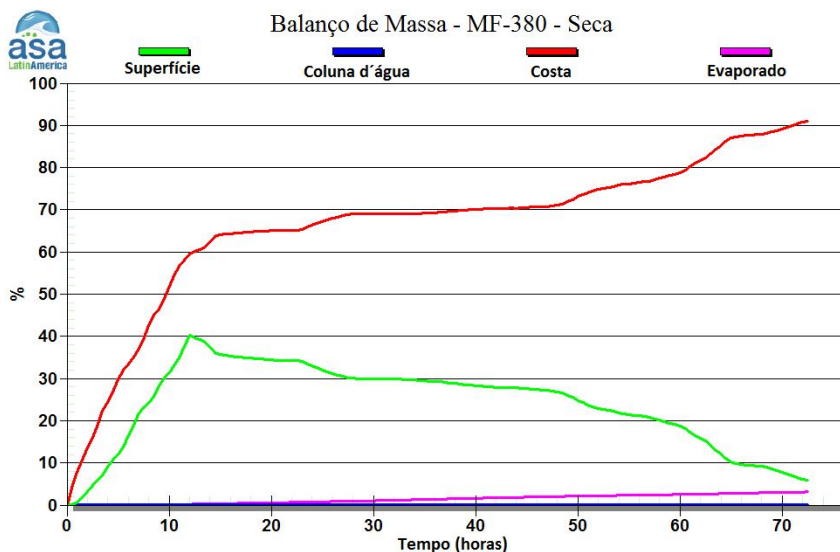


Figura 60 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H.

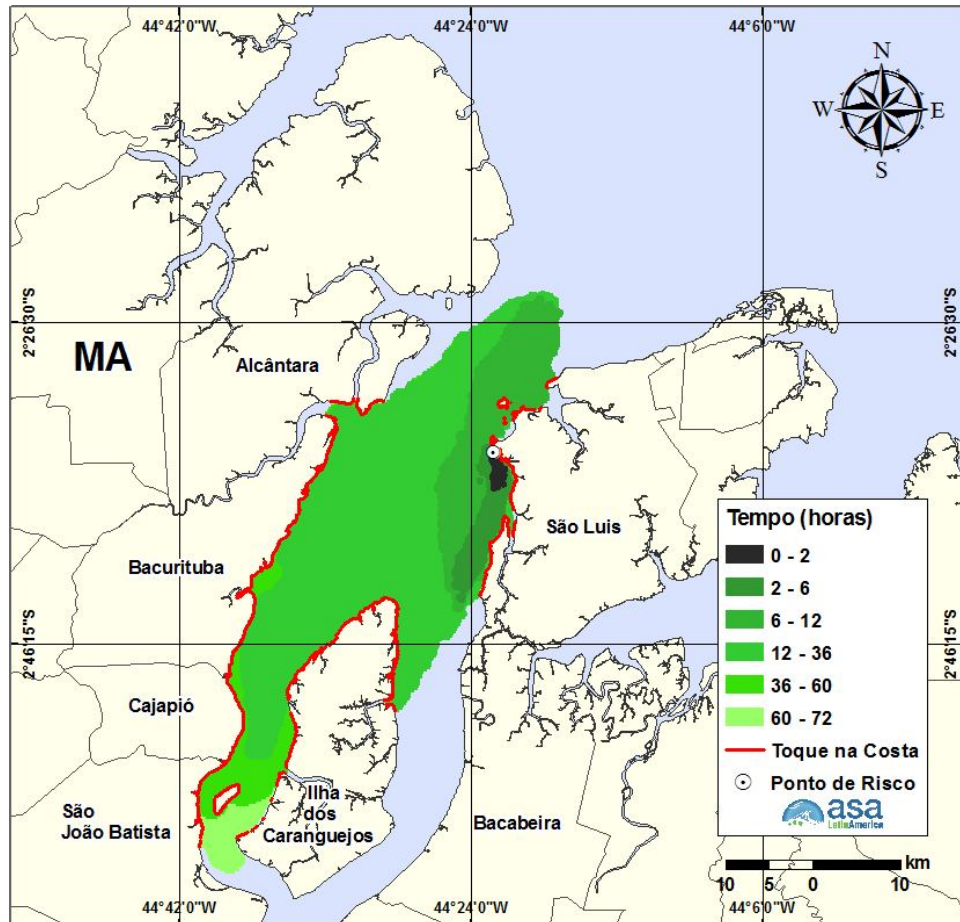


Figura 61 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

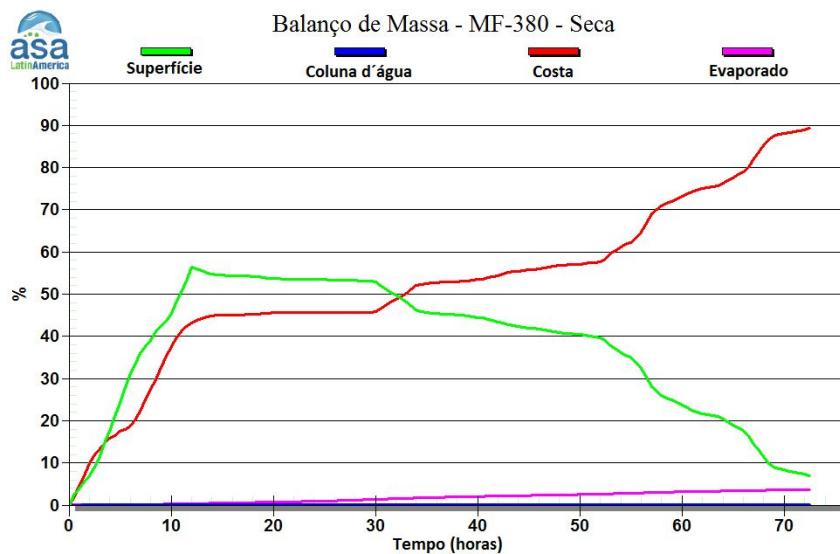


Figura 62 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H.

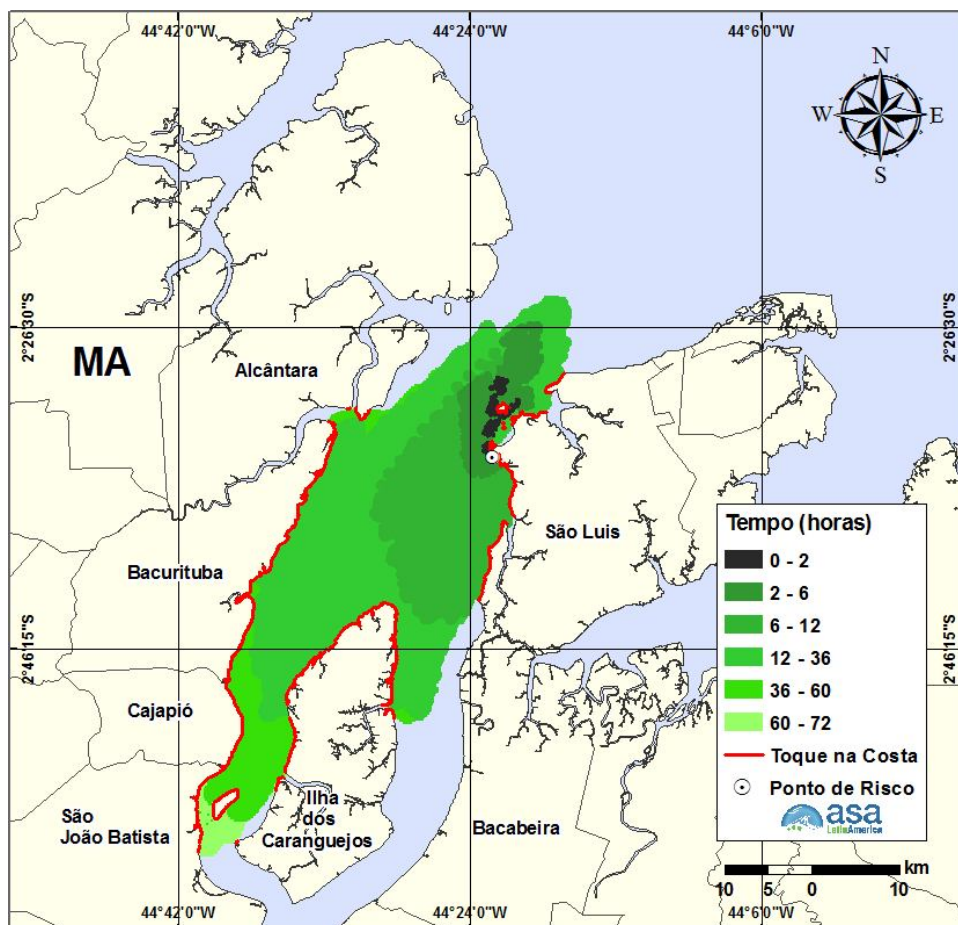


Figura 63 - Cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P1 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

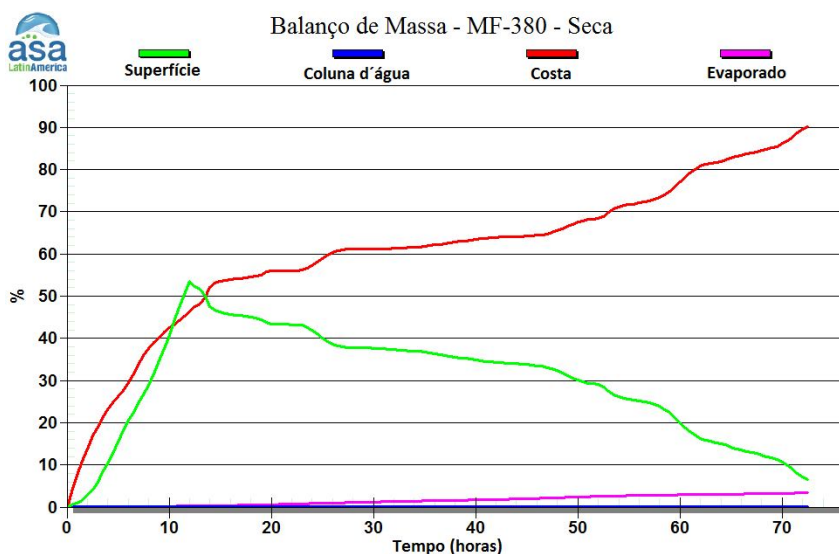


Figura 64 - Balanço de massa do cenário DET_P1_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H.

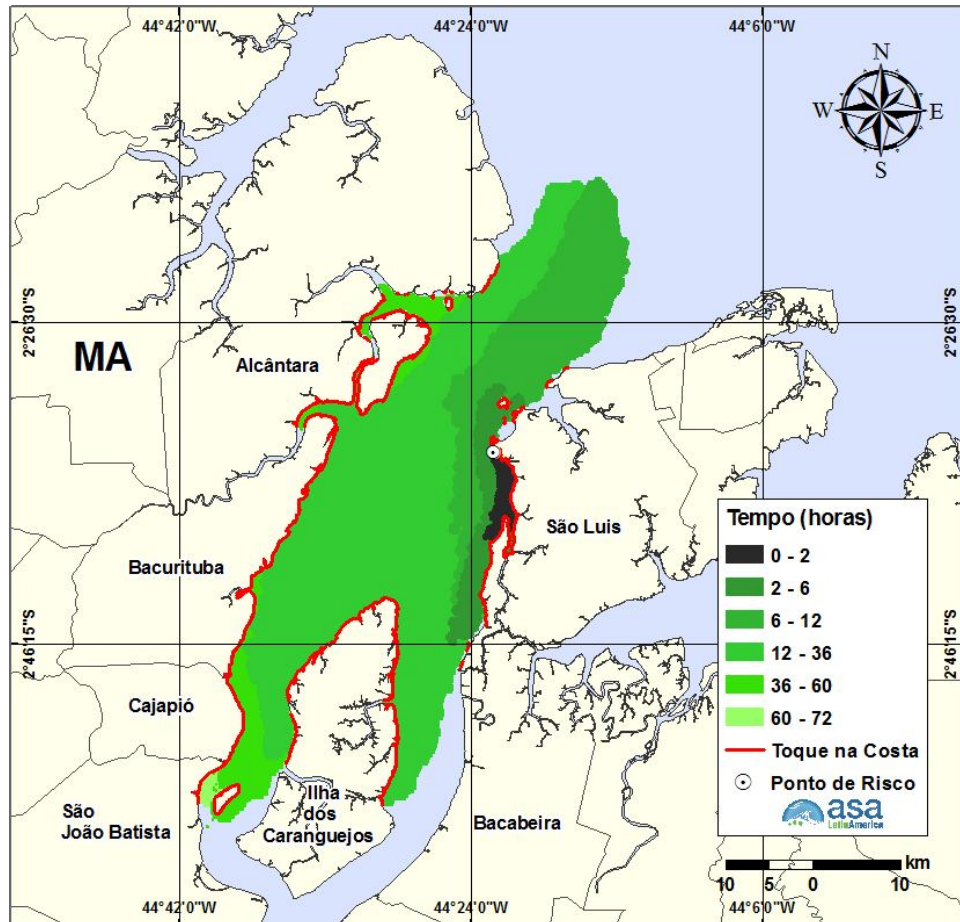


Figura 65 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

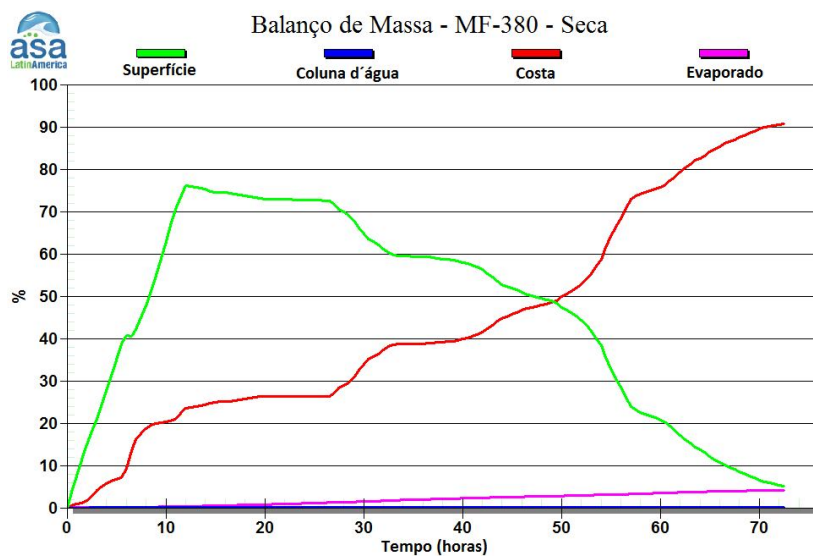


Figura 66 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_EN_72H.

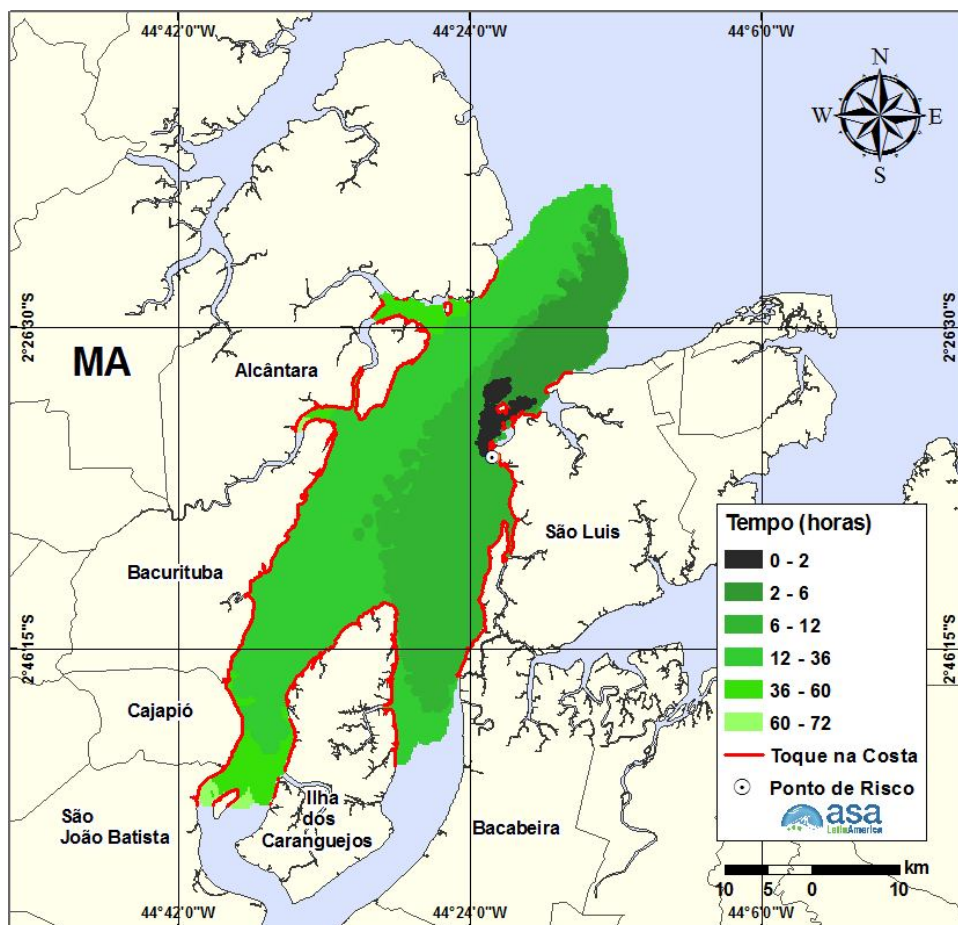


Figura 67 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

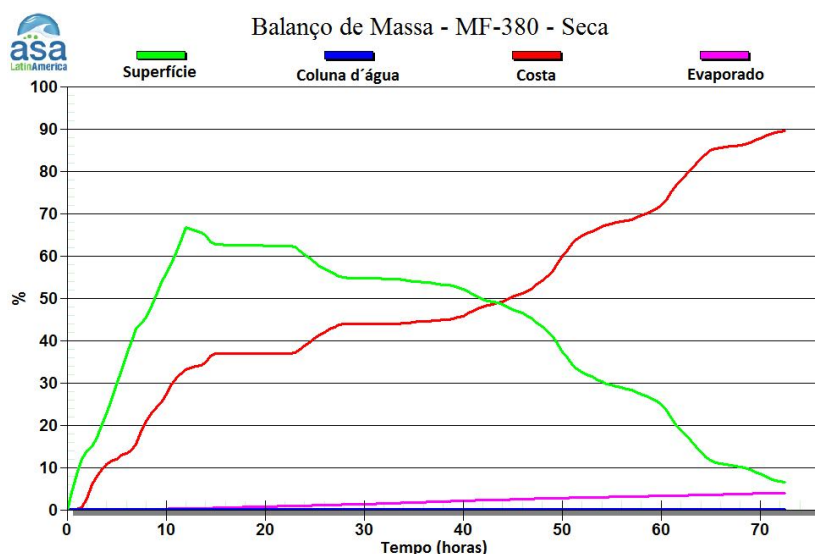


Figura 68 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_SZ_VZ_72H.

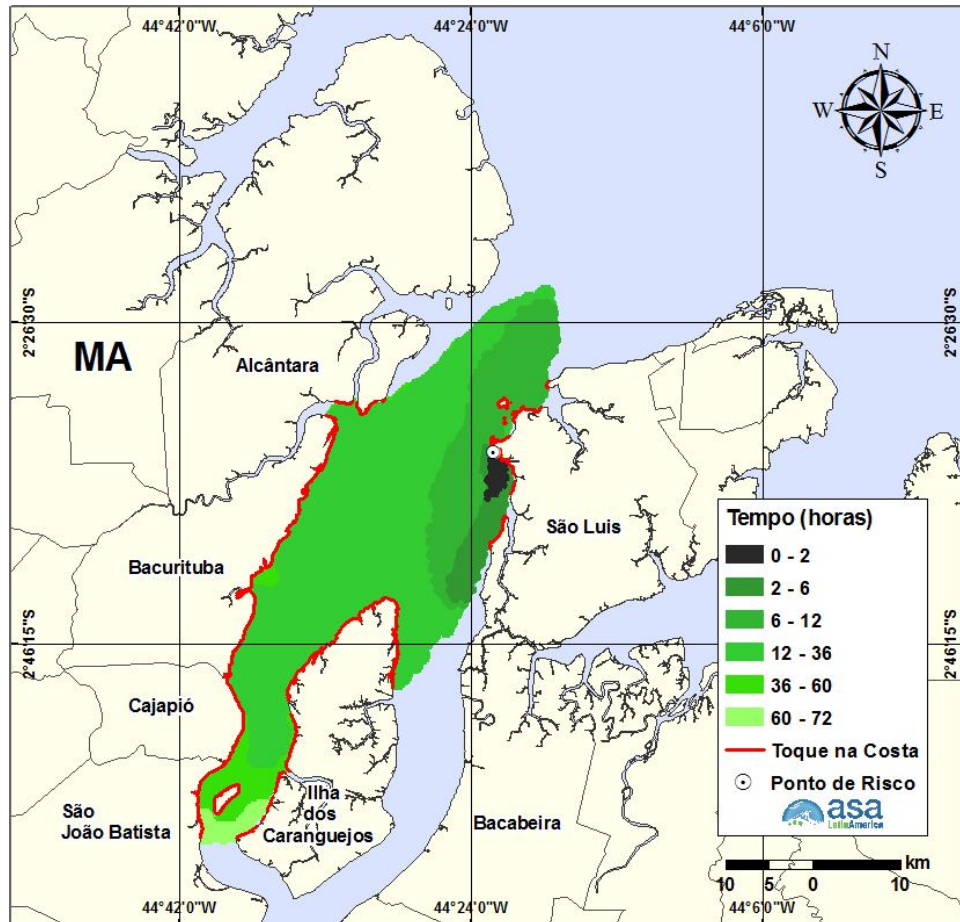


Figura 69 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

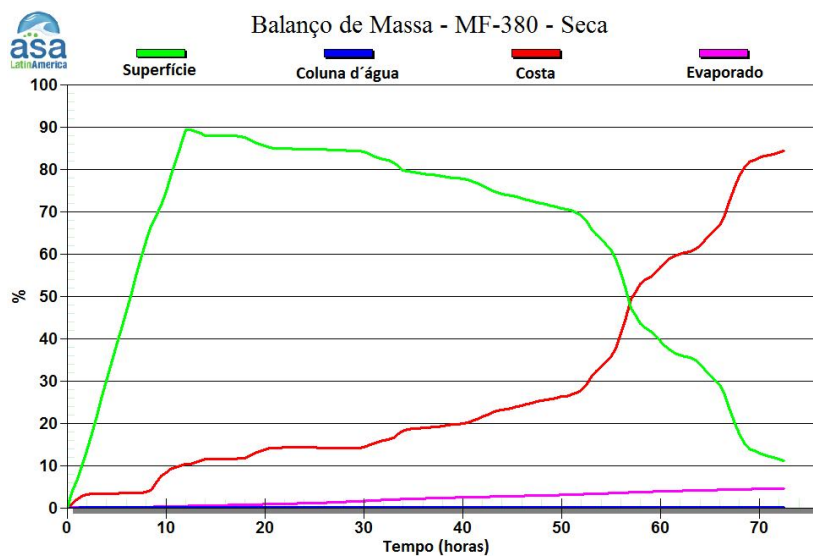


Figura 70 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_EN_72H.

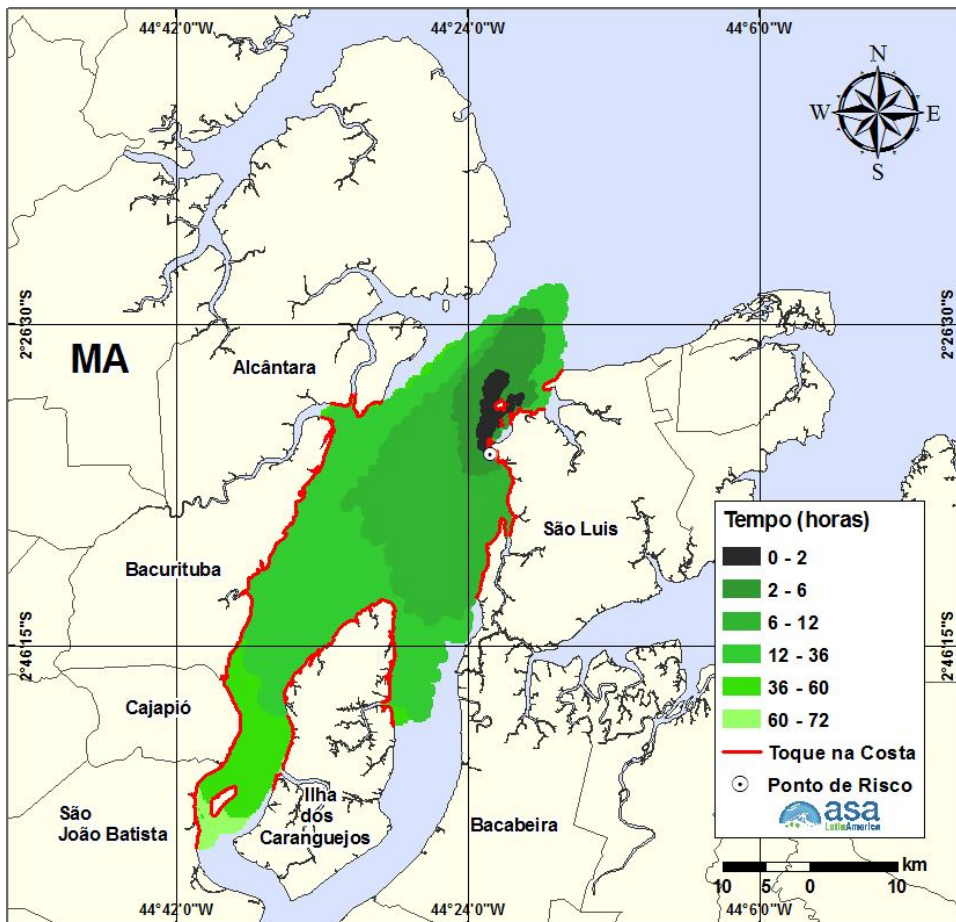


Figura 71 - Cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo MF-380 na água para um derrame no P2 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

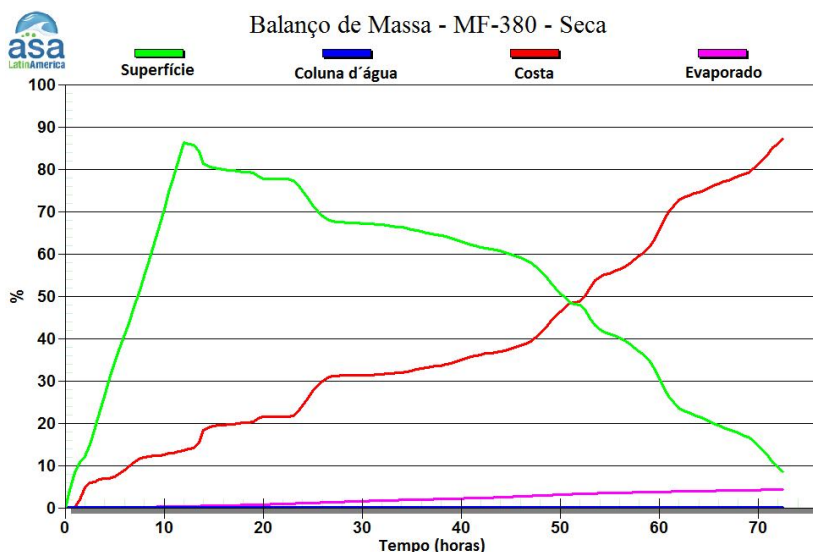


Figura 72 - Balanço de massa do cenário DET_P2_MF-380_PC_SECA_QD_VZ_72H.

V.2.2 Porto Grande

Da Figura 73 a Figura 80 são apresentados os resultados das simulações determinísticas de cheia para o Porto Grande, ponto P3. A maior extensão de toque na costa para estas simulações de cheia foi encontrada para o cenário de maré de sizígia, regime de vazante, de aproximadamente 72,9 km.

Os gráficos de balanço de massa demonstram que os principais processos que atuam na redução da massa de óleo na água é a evaporação e a interação com a linha de costa, e que ao final das simulações de maré de sizígia, ainda existe uma pequena quantidade de óleo na superfície da água.

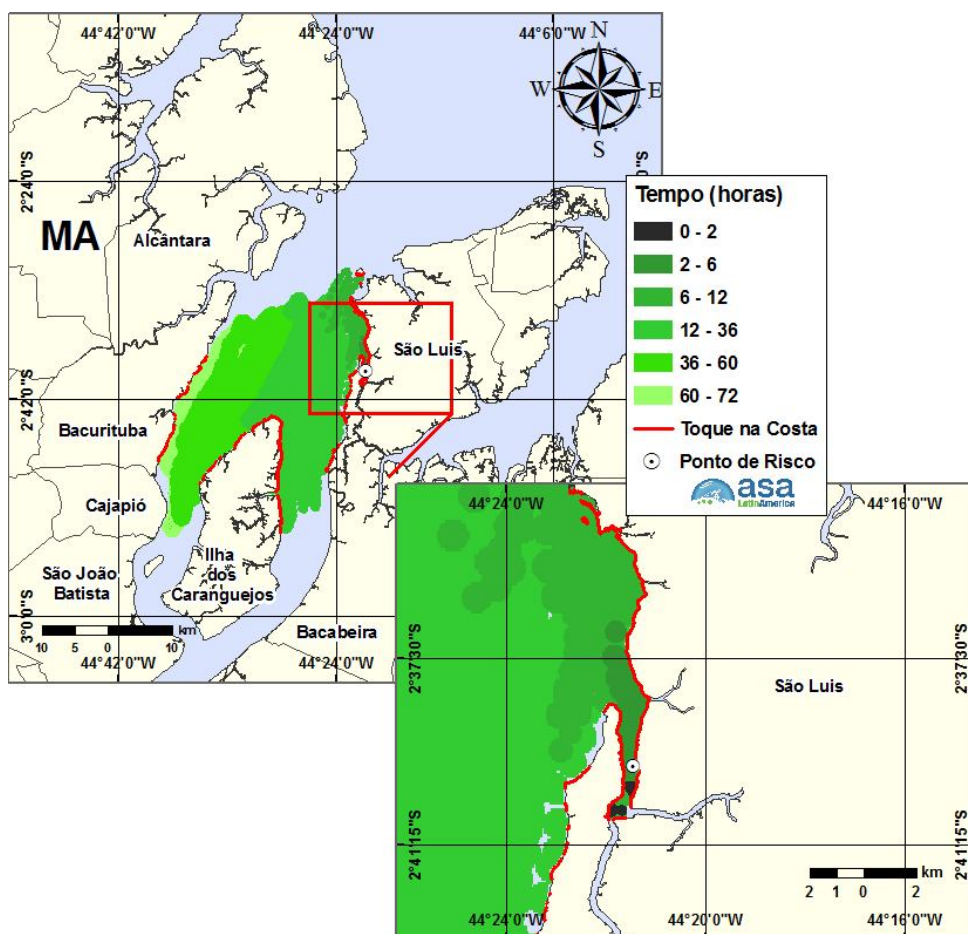


Figura 73 - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

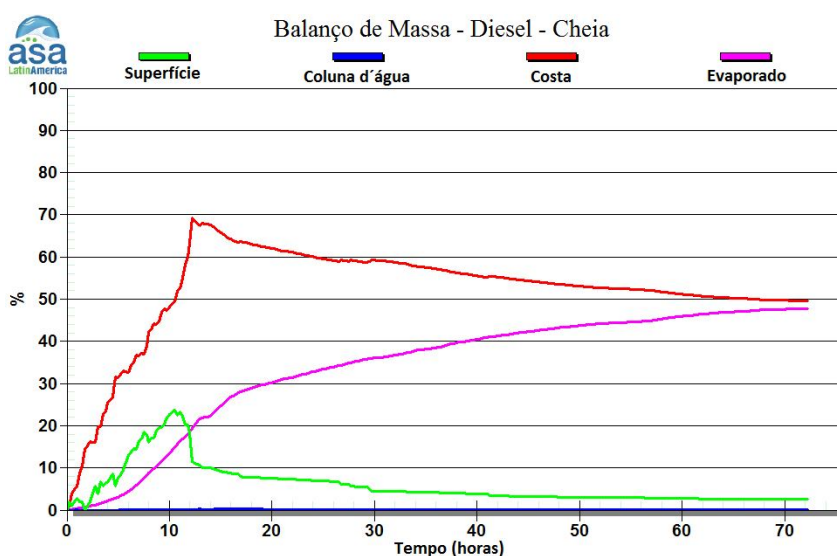


Figura 74 - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_EN_72H.

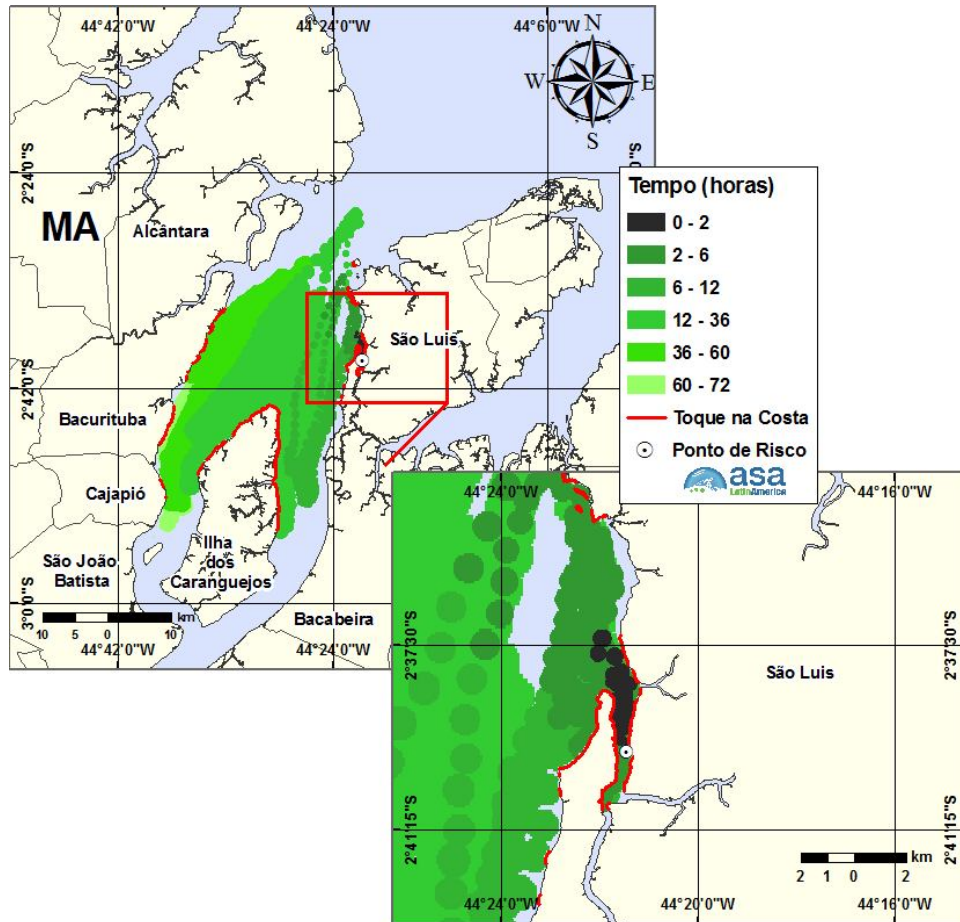


Figura 75 - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

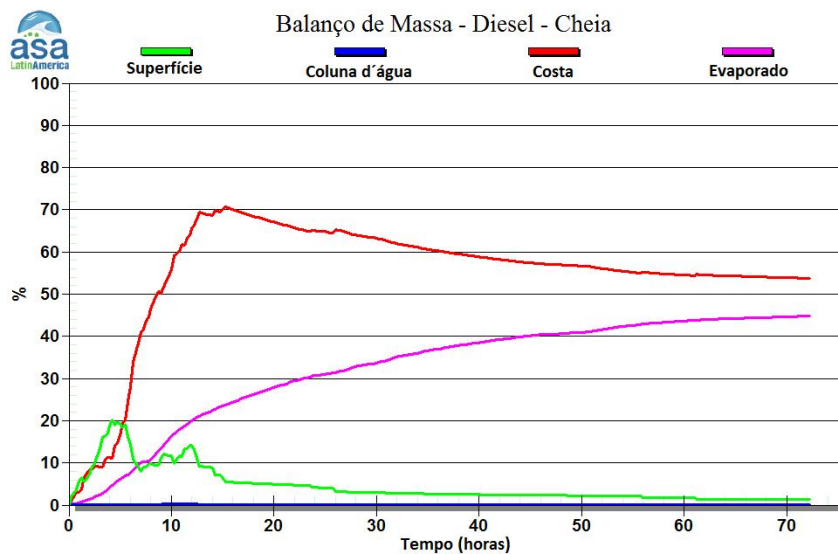


Figura 76 - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_SZ_VZ_72H.

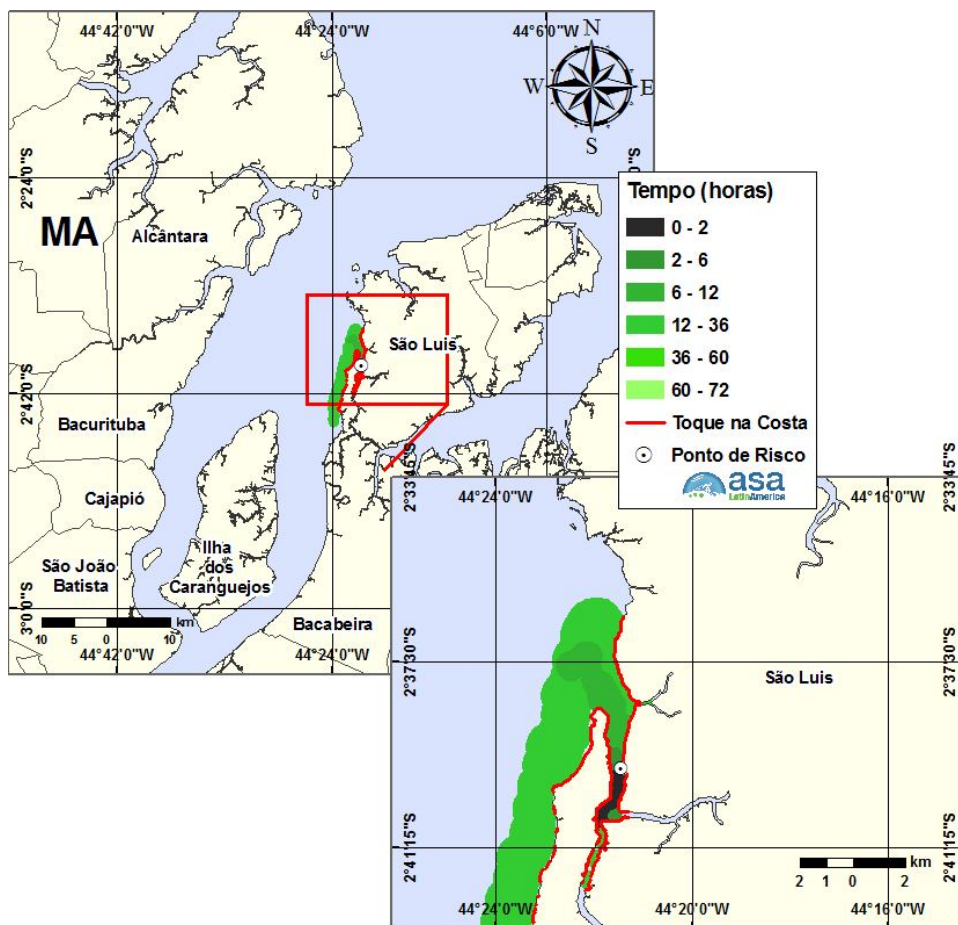


Figura 77 - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

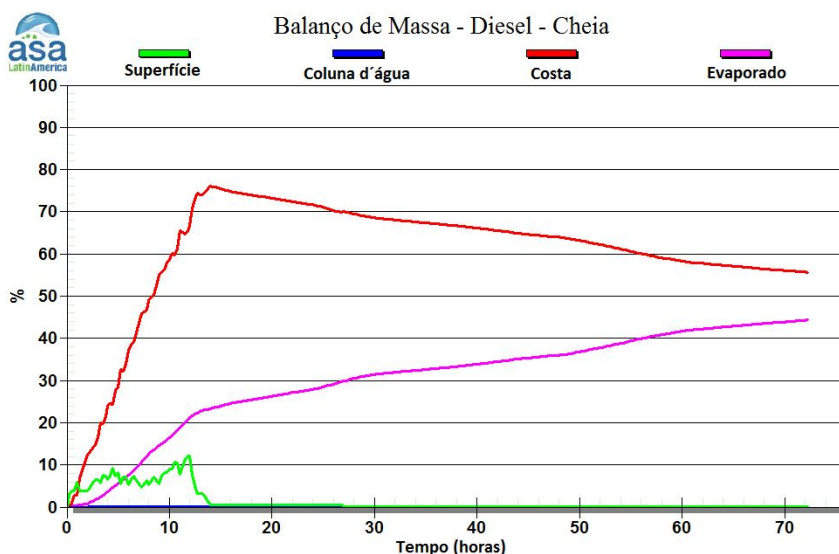


Figura 78 - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_EN_72H.

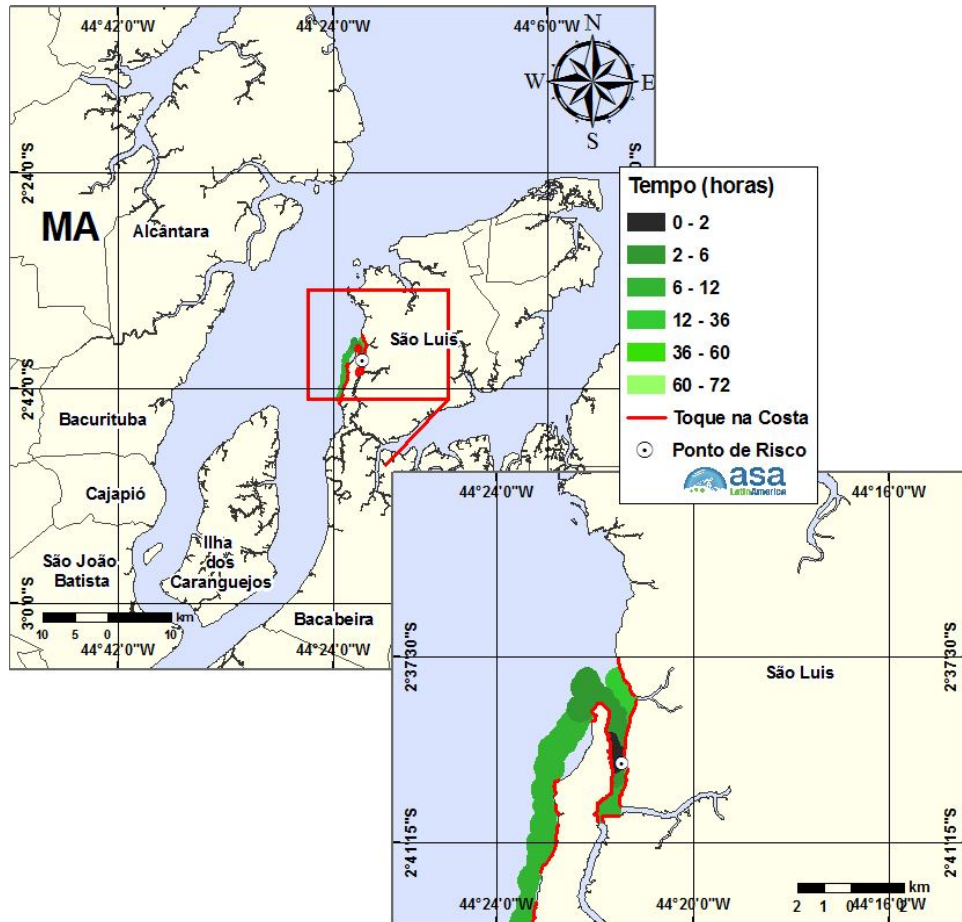


Figura 79 - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de cheia, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

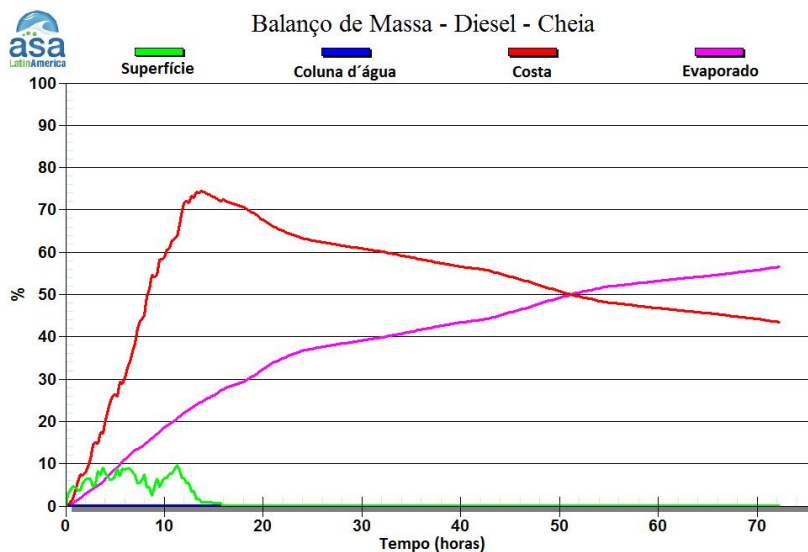


Figura 80 - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_CHEIA_QD_VZ_72H.

Da Figura 81 a Figura 88 são apresentados os resultados das simulações determinísticas de seca para o Porto Grande, ponto P3. A maior extensão de toque na costa para estas simulações de seca foi encontrada para o cenário de maré de sizígia, regime de vazante, de aproximadamente 58,8 km.

Os gráficos de balanço de massa demonstram que os principais processos que atuam na redução da massa de óleo na água é a evaporação e a interação com a linha de costa, e que ao final das simulações praticamente não existe óleo na superfície da água.

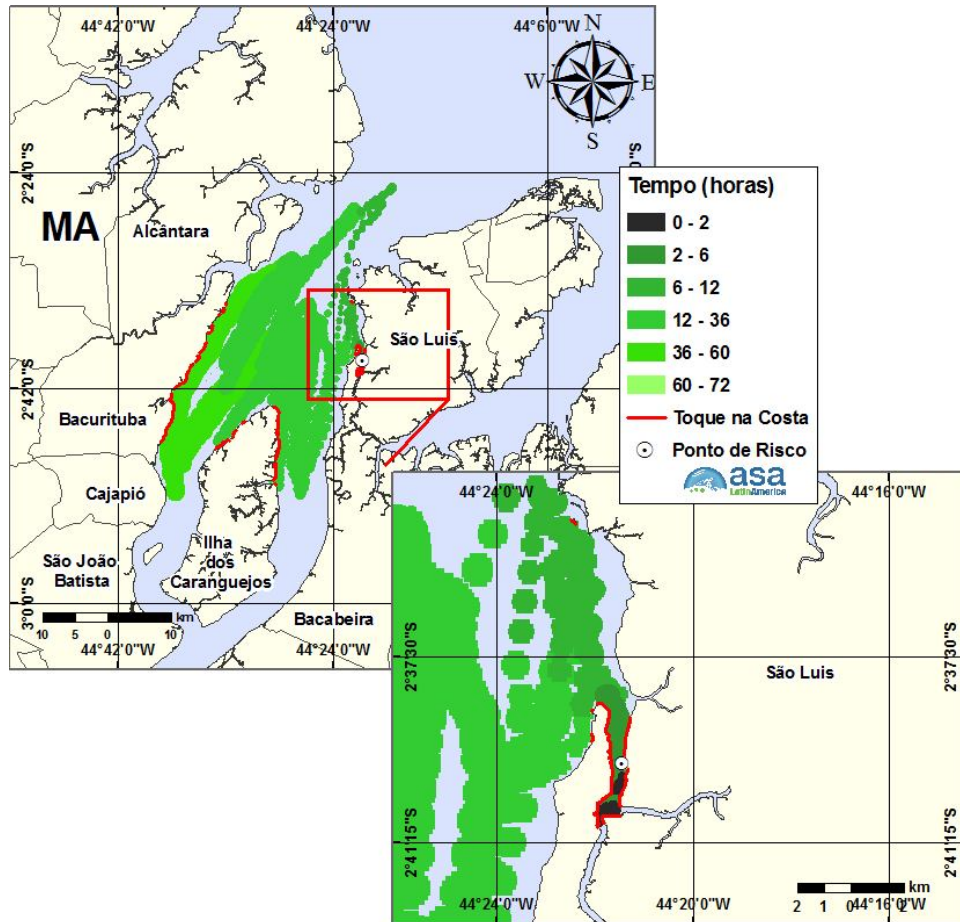


Figura 81 - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

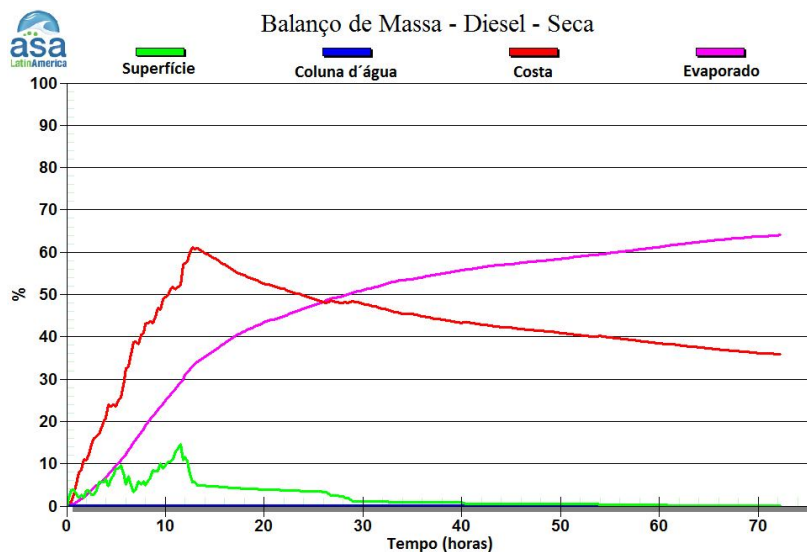


Figura 82 - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_EN_72H.

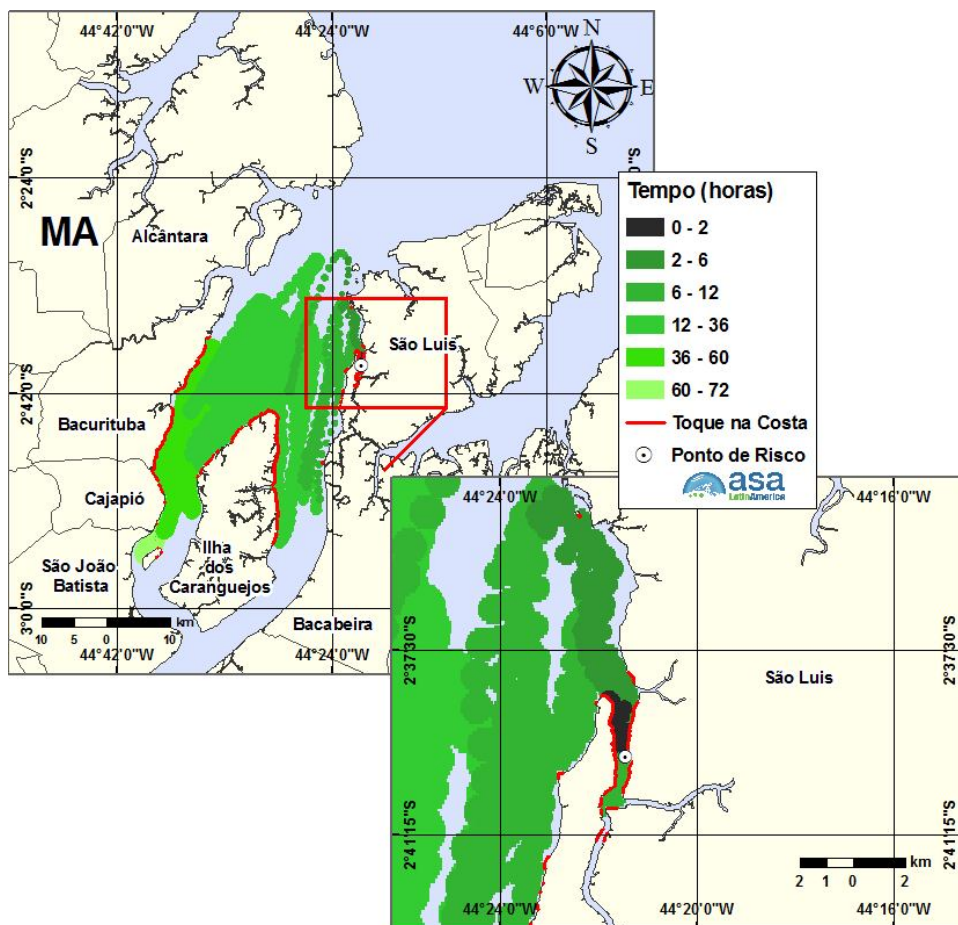


Figura 83 - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de sizígia, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

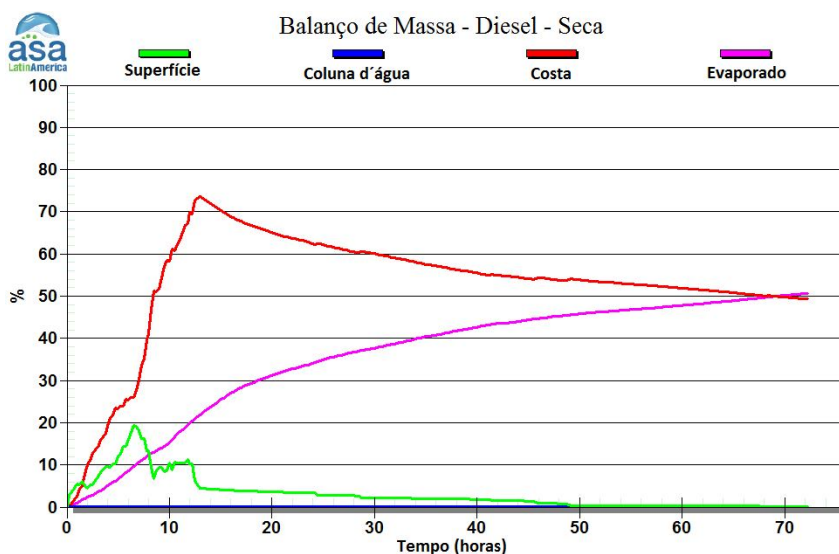


Figura 84 - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_SZ_VZ_72H.

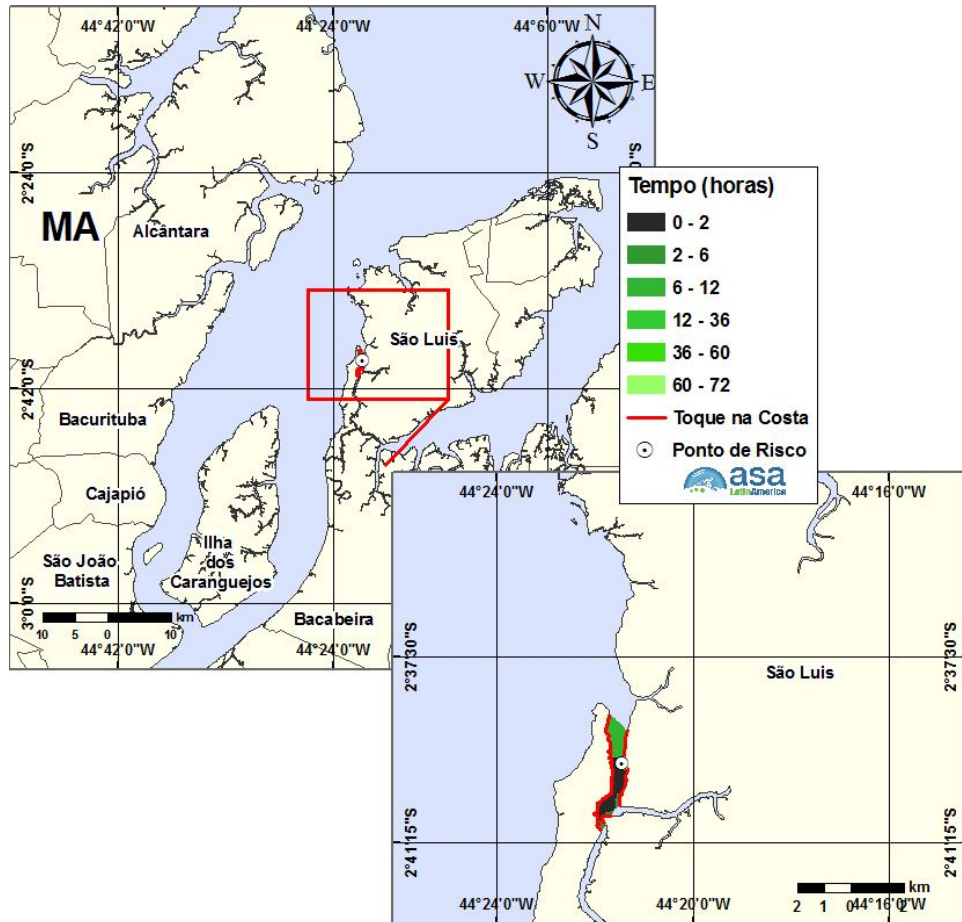


Figura 85 - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_EN_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de enchente, até 72 horas após o início da simulação.

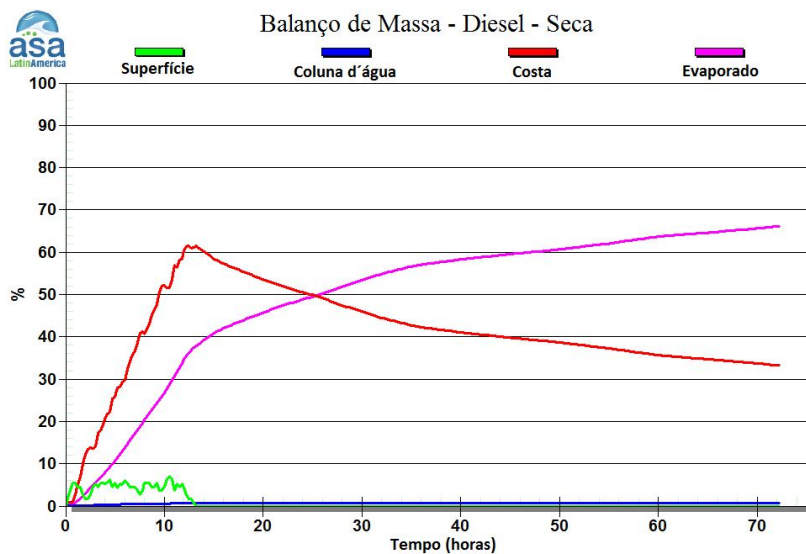


Figura 86 - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_EN_72H.

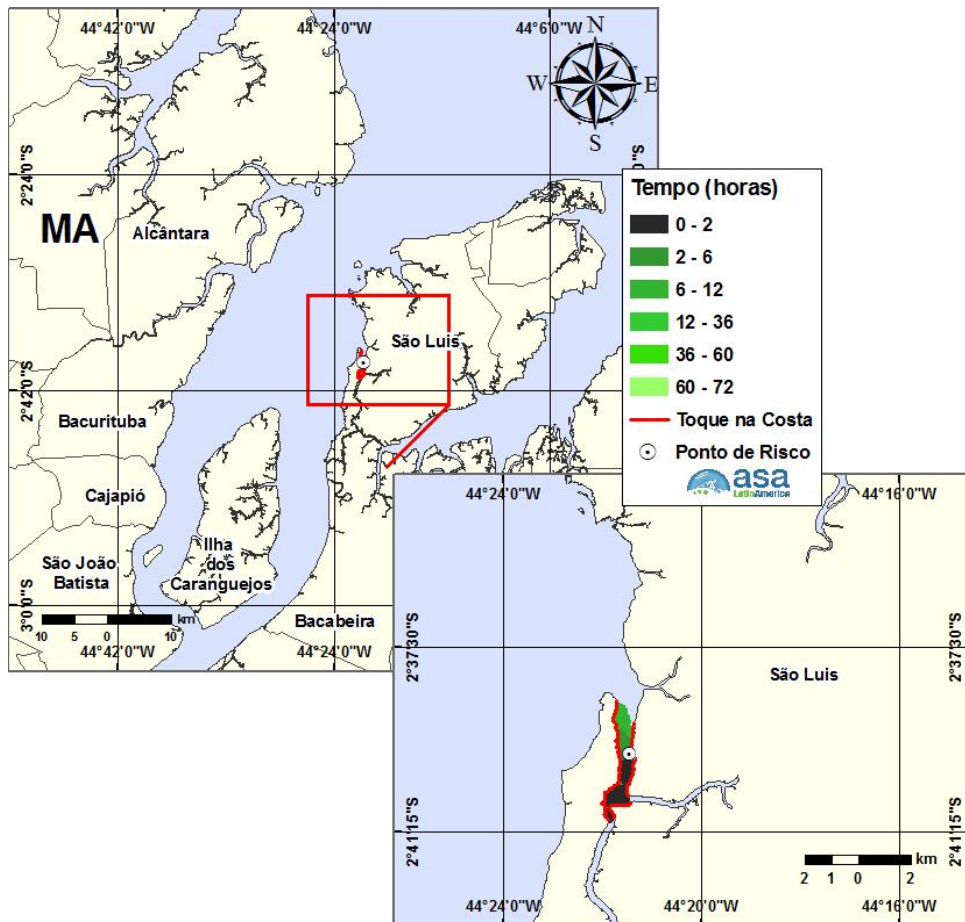


Figura 87 - Cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_VZ_72H: Contornos da evolução temporal da mancha de óleo Diesel na água para um derrame no P3 (ao longo de 12 horas) durante o período de seca, maré de quadratura, regime de vazante, até 72 horas após o início da simulação.

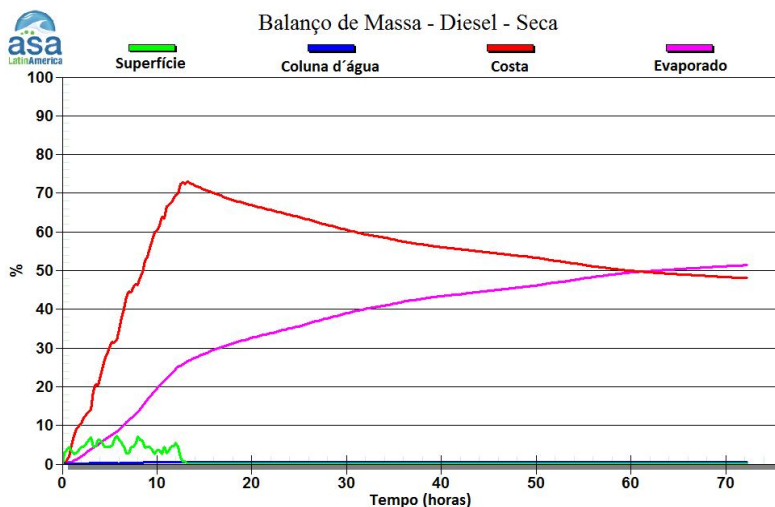


Figura 88 - Balanço de massa do cenário DET_P3_DIESEL_PC_SECA_QD_VZ_72H.

VI CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este relatório apresenta os resultados das simulações numéricas do transporte e dispersão de Óleo Combustível Marítimo tipo MF-380 e de óleo Diesel decorrentes de potenciais liberações acidentais na Baía de São Marcos, no Estado do Maranhão, com intuito de dar suporte a Hidroclean Proteção Ambiental na elaboração do Plano de Emergência Individual (PEI) do Porto do Itaqui e do Porto Grande.

Para determinar os contornos de probabilidade de ocorrência do óleo derramado na região de estudo, foram conduzidas simulações probabilísticas considerando duas condições hidrológicas (cheia e seca), três pontos de risco (P1 e P2 no Porto do Itaqui e P3 no Porto Grande), derrames de pior caso de dois produtos (óleo MF-380 para os pontos P1 e P2, e de Diesel para o ponto P3). A tabela abaixo apresenta uma descrição dos pontos de risco e da hipótese acidental considerada.

Tabela 13 - Descrição dos pontos de risco e da hipótese acidental simulada (Sistema de Coordenadas geográficas - WGS 84).

PONTO DE RISCO	LOCALIZAÇÃO (latitude / longitude)	TIPO DE ÓLEO	VOLUME (m ³)
P1	Berço 105 do Porto do Itaqui (02°34'27,29"S / 44°22'18,62"W)	Óleo MF-380	10.000,0
P2	Bacia de evolução do Porto do Itaqui (02°34'28,41"S / 44°22'35,51"W)	Óleo MF-380	10.000,0
P3	Porto Grande (02°39'39,63"S / 44°21'25,90"W)	Diesel	200,0

Também foram realizadas simulações determinísticas que contemplassem os períodos de maré de sizígia e quadratura e os regimes de enchente e vazante, para todas as hipóteses acidentais simuladas. Como critério de parada utilizado foi o tempo de 72 horas para o acompanhamento das manchas de óleo, 12 horas além do tempo máximo estabelecido na Resolução do CONAMA nº 398/08 (BRASIL, 2008), para a disponibilização de recursos de contenção/limpeza no local da ocorrência da descarga.

A caracterização dos padrões de circulação foi obtida a partir dos resultados do sistema de modelos numéricos Delft3D implementado pela **ASA LatinAmerica** na região de estudo. O campo de vento utilizado para os processamentos do modelo hidrodinâmico e de deriva de óleo foi determinado a partir dos dados fornecidos pela INFRAERO,⁶ para o Aeroporto Internacional de São Luís (MA). A análise da modelagem hidrodinâmica demonstrou que o modelo implementado conseguiu reproduzir os regimes de cheia e seca da região de interesse.

Os resultados das simulações probabilísticas demonstraram que a variação sazonal não proporciona diferenças superiores a 15% para os resultados de extensão de costa com probabilidade de ser atingida pelo óleo e área superficial do óleo na superfície da água. A maior área com probabilidade de ocorrência de óleo na água (aproximadamente 1.668 km²) e a maior extensão de probabilidades de toque na costa (com aproximadamente 342,9 km) foram obtidas para a simulação do ponto P2, período de cheia.

Através da análise dos resultados probabilísticos identificou-se que a dinâmica do transporte do óleo na região apresentou um padrão no qual, no período de cheia ocorrem áreas maiores com probabilidade de óleo na superfície da água, associadas à maior vazão deste período. No período de seca, a baixa vazão favorece a permanência do óleo no interior da Baía de São Marcos, diminuindo a área superficial dos contornos de probabilidade e ocasionando, na maioria dos cenários, maiores extensões de toque do óleo na costa. Na Tabela 14 é apresentado o resumo dos resultados das simulações probabilísticas.

⁶ Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária.

Tabela 14 - Resultados das simulações probabilísticas (extensão da costa com probabilidade de toque e área com probabilidade de ocorrência de óleo na água).

CENÁRIO	EXTENSÃO DE TOQUE NA COSTA (km)	ÁREA TOTAL NA ÁGUA (km ²)
P1_MF-380_PC_CHEIA_72H	286,9	1.564,0
P1_MF-380_PC_SECA_72H	313,0	1.417,0
P2_MF-380_PC_CHEIA_72H	342,9	1.668,0
P2_MF-380_PC_SECA_72H	336,7	1.439,0
P3_DIESEL_PC_CHEIA_72H	101,4	968,0
P3_DIESEL_PC_SECA_72H	106,4	942,0

Os resultados das simulações determinísticas demonstram a influência da maré sobre a dinâmica dos derrames, visto que durante as marés de sizígia as áreas referentes ao deslocamento do óleo são superiores as de maré de quadratura.

Através dos balanços de massa (óleo na superfície, na coluna d'água, na linha de costa e evaporado), que o principal processo que atua na redução da massa de óleo na água, para o Porto do Itaqui (pontos P1 e P2) é a interação com a linha de costa, e para o Porto Grande (P3) é a evaporação do óleo. A maior extensão de costa efetiva atingida pelo óleo foi de, aproximadamente 280,9 km, referente ao cenário do ponto P2, período de seca, maré de sizígia em regime de enchente.

Cabe ressaltar que os resultados das simulações apresentadas neste estudo não consideraram quaisquer medidas de contenção ou remoção do óleo derramado.

VII BIBLIOGRAFIA

- ALCÂNTARA, E.H. & SANTOS, M.C.F.V., 2005.** Mapeamento de Áreas de Sensibilidade Ambiental ao Derrame de Óleo na Região Portuária do Itaqui, São Luís, MA-Brasil. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3605-3617.
- BRASIL, 2008.** Resolução CONAMA nº 398, de 11 de junho de 2008. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 12 jun. 2008.
- DELTARES, 2011.** User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 644pp.
- EPA (Environmental Protection Agency), 2000.** Hydrodynamic and Water Quality Model of Christina River Basin. Region III, Philadelphia, PA. Final Report. December 5, 2000.
- FURTADO, J.G.C., 2007.** Estudo de impactos ambientais causados por metais pesados em água do mar na Baía de São Marcos: Correlações e níveis background. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Exatas de Natureza, Universidade Federal da Paraíba, 77 p.
- GARCIA, P.D., 2007.** Caracterização Hidrossedimentológica das Correntes de Maré e do Transporte de Sedimentos Associado à Área Portuária do Maranhão. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 257 p.
- HESS, K.W. & BOSLEY, K.T., 1992.** Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p. 83-94.

- KOUSKY, V.E., 1980.** Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. *Mon. Weather Rev.*, 108: 488-498.
- LOPES, I.A., 2006.** Transporte de material particulado em suspensão pelos rios Grajaú, Pindaré e Mearim para o sistema estuarino da Baía de São Marcos – MA. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal do Maranhão, 93 p.
- PEREIRA, J.E.R. & HARARI, J., 1995.** Modelo numérico tri-dimensional na plataforma continental do Estado do Maranhão. *Bolm. do Inst. Oceanogr. Da USP*, vol 43, número 1, p 11:26.
- RIEHL, H., 1965.** Meteorologia Tropical. Ao Livro Técnico S.A.
- SILVA, G.; FERREIRA, F.G.S; FERREIRA, L.C.; SOUZA, U.D. & FEITOSA, A.C., 2006.** Aspectos Geomorfológicos da Ilha do Medo, São Luís-MA. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia – Goiânia, Brasil 2006.
- SCHUREMANN, P., 1941.** Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. Washington, D.C., U.S. *Coast & Geodetic Surv.*, S.P. n. 98, 317p.
- WALSTRA. L.C.; VAN RIJN, L.C.; BLOGG, H. & VAN ORMONDT, M., 2001.** Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at Teignmouth 1999. *Report TR121 - EC MAST Project nº. MAS3- 0197-0086.* HR Wallingford, UK.
- WILLMOTT, C.J., 1982.** Some comments on the evaluation of model performance. *American Meteorological Society Bulletin*, 1309-1313.

ANEXO A DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS DELFT3D

O sistema de modelos Delft3D (Deltares, 2011) é capaz de simular a hidrodinâmica como resposta a forçantes baroclínicas e barotrópicas, assim como a transferência de quantidade de movimento ao sistema hidrodinâmico decorrente do sistema de ventos. Além disso, este sistema atualiza, a cada passo de tempo, as cotas batimétricas decorrentes de alterações geomorfológicas de fundo (erosão e deposição de sedimentos), além do transporte de sedimentos (de fundo e em suspensão na coluna d'água). A seguir, são descritas as principais características do módulo hidrodinâmico.

A.1 DESCRIÇÃO DO MODELO DELFT3D-FLOW

Para resolver o problema de hidrodinâmica em escala espacial e temporal adequada para as aplicações finais (determinação do campo de correntes e elevação de nível da superfície d'água) e, simultaneamente, manter os custos computacionais em níveis razoáveis, optou-se pela utilização do modelo Delft3D.

A acomodação da grade numérica à linha de costa permite uma apurada representação do corpo d'água em estudo. Para a solução do problema dinâmico são consideradas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento em coordenadas esféricas. Também são utilizadas as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq.

Para este estudo foram considerados os termos não-lineares de aceleração convectiva, Coriolis e viscosidade horizontal turbulenta. As aproximações para utilização de coordenadas curvilíneas ortogonais são consideradas na solução numérica da formulação descrita. Estas aproximações para grades numéricas utilizam-se de funções de transformações entre os espaços físico e numérico. Tais funções de transformações são obtidas por meio da solução de um conjunto acoplado de equações diferenciais parciais elípticas e quase-lineares.

A solução do esquema numérico é iniciada pelo mapeamento da geometria do domínio no espaço matemático, a partir da discretização da área no espaço físico. No espaço matemático (regular) são resolvidas as equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento. A estrutura vertical, quando ativada na formulação, é determinada por procedimentos explícitos com a especificação dos termos de difusão horizontal.

A grade implementada representa um compromisso entre os objetivos do projeto e a descrição dos processos dinâmicos na região de interesse, bem como entre os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário.

A.1.1 Processos Físicos

A implementação do modelo hidrodinâmico foi baseada em um sistema de equações de águas rasas tridimensionais. O sistema de equações consiste nas equações horizontais de movimento (quantidade de movimento), na equação de continuidade e nas equações de transporte para constituintes conservativos. Tal conjunto de equações é derivado das equações tridimensionais de Navier-Stokes para um fluido incompressível. A seguir, são descritas as considerações e aproximações do modelo:

- É adotado o sistema de coordenadas σ (sigma) no eixo vertical. A profundidade é assumida como sendo muito menor do que a escala horizontal. Então, devido à reduzida razão de aspecto, as aproximações para o sistema de águas rasas torna-se válida e, por conseguinte, a equação vertical do movimento reduz-se à equação hidrostática;
- O efeito da densidade é considerado somente através de seu efeito na pressão (aproximação de Boussinesq);
- O efeito da curvatura da Terra não é considerado. Além disso, o parâmetro de Coriolis é assumido uniforme;
- Uma formulação de segunda ordem é aplicada ao cisalhamento no fundo;

- Um decaimento logarítmico (na vertical) para a velocidade horizontal é aplicado;
- Fechamento turbulento baseado nas tensões de Reynolds;
- Fechamento da energia cinética proporcional às ordens de grandezas das velocidades e das escalas horizontais;
- Em concordância com a relação de aspecto para consideração da formulação de águas rasas, a geração de turbulência é baseada no gradiente vertical do fluxo horizontal;
- A velocidade em um ponto de grade assume magnitude zero quando a altura da coluna d'água atinge cotas inferiores à metade daquela definida pelo usuário. A velocidade pode retornar a magnitudes diferentes de zero quando a altura da coluna d'água atingir valores acima da metade do valor de corte;
- Um ponto de grade é considerado "seco" quando suas células vizinhas (quatro) atingem valores negativos (ou sejam definidas como tais - "terra");
- O fluxo de massa através dos contornos laterais e de fundo é nulo;
- Ao se não especificar o campo de temperatura, a troca de calor com a atmosfera é anulada. A troca de calor através do fundo é nula.

No próximo subitem, as equações básicas que governam o modelo implementado são apresentadas.

A.1.2 Equações Básicas

O modelo resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, sob a aproximação de águas rasas e Boussinesq. A aceleração vertical é desprezada na equação da quantidade de movimento vertical, resultando na aproximação hidrostática. Desse modo, a velocidade vertical é calculada através da equação da continuidade.

O Sistema de Coordenadas σ

O sistema de coordenadas σ foi introduzido em modelos atmosféricos (Phillips, 1957). O eixo vertical consiste em camadas limitadas por planos sigma (σ), os quais não são exatamente horizontais, no entanto, seguem a batimetria e o nível d'água. Através dessa representação para o eixo vertical, obtém-se uma feição suavizada para a batimetria (Figura A1).

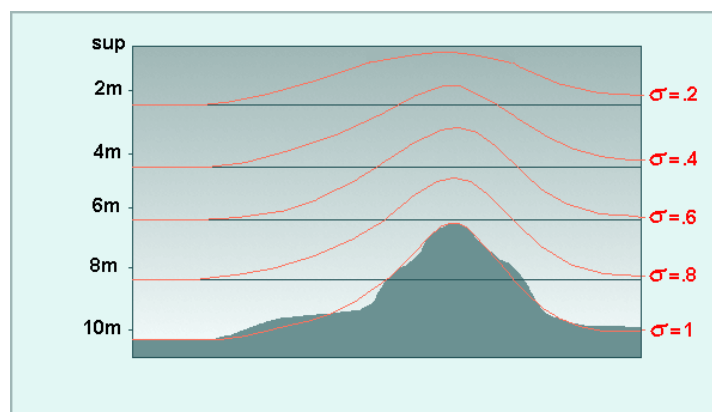


Figura A1 - Exemplo de uma aplicação de coordenadas sigma (σ).

O número de camadas é constante em todo o domínio, independentemente da profundidade local. A distribuição da espessura relativa de cada camada σ é usualmente não uniforme. Esta propriedade associada ao sistema de coordenadas σ permite resolver regiões do domínio vertical (por exemplo, o transporte de sedimentos próximo ao fundo).

O sistema de coordenadas σ é definido como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (\text{A.1.2-1})$$

onde,

z = a coordenada vertical no espaço físico;

ζ = a elevação do nível d'água, acima do plano de referência ($z = 0$);

d = profundidade abaixo do plano de referência, e

H = profundidade local total ($H = d + \zeta$).

No sistema de coordenadas σ , a coordenada vertical no fundo é definida como $\sigma = 1$, e na superfície como $\sigma = 0$ (cf. Figura A1). As derivadas parciais no sistema de coordenadas cartesianas são expressas em coordenadas σ após modificações (“regra da cadeia”) e termos adicionais (Stelling & Van Kester, 1994).

O domínio de modelagem tridimensional para o fluxo consiste em um plano horizontal (composto pelo corpo d’água e contornos terrestres) e vertical (número de camadas). Para cada camada vertical, um sistema de equações conservativas é resolvido.

Equação da Continuidade

A equação da continuidade (homogênea verticalmente) é dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (\text{A.1.2-2})$$

onde,

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ = coeficiente usado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares para ;

$\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = coeficiente usado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

ξ, η = coordenadas no sistema cartesiano;

U = velocidade média (na vertical) na direção ξ , e

Q = contribuições para o fluxo (fonte ou sumidouro) por unidade de área.

Equações da Quantidade de Movimento na Direção Horizontal

As equações da quantidade de movimento, nas direções ξ e η , são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_{\xi+} \\ + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_{mol} + máx(\nu_{3D}, \nu_V^{amb}) \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (A.1.2-3)$$

e,

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + fu = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\eta + F_{\eta+} \\ + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_{mol} + máx(\nu_{3D}, \nu_V^{amb}) \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (A.1.2-4)$$

onde,

- u = componente vetorial da velocidade na direção x ou ξ ;
- v = componente vetorial da velocidade na direção y ou η ;
- f = parâmetro de Coriolis;
- t = tempo;
- ν_{mol} = coeficiente de viscosidade cinemática (molecular);
- ν_{3D} = parte da viscosidade devido a turbulência 3D;
- ν_V^{amb} = componente vertical da viscosidade do meio (ambiente).

As variações de densidade são negligenciadas, exceto nos termos que expressam os gradientes de pressões baroclínicas (P_ξ e P_η). As forças F_ξ e F_η nas equações acima representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds. M_ξ e M_η representam as contribuições externas (fontes ou sumidouros) – forças

externas devido a estruturas hidráulicas externas, descarga ou fonte de água, cisalhamento devido a ondas, etc.

Velocidades Verticais

A velocidade vertical (ω) é calculada através de uma adaptação da equação da continuidade no sistema de coordenadas σ . A velocidade vertical ω é definida nas superfícies σ e, portanto, relativa ao movimento dessas superfícies. As velocidades verticais w no sistema de coordenadas cartesianas não estão consideradas no sistema de equações do modelo. A velocidade vertical w é expressa como função das velocidades horizontais (u e v), profundidade da coluna d'água (H), elevação do nível d'água (ζ) e velocidade vertical (ω), de acordo com:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (\text{A.1.2-5})$$

Pressão hidrostática

Ao se aproximar o sistema em estudo pelas equações de águas rasas, a equação vertical para a quantidade de movimento é reduzida à equação de pressão hidrostática. As acelerações verticais devido aos efeitos de flutuabilidade, assim como aquelas devidas às rápidas variações da topografia de fundo (batimetria) não são consideradas. Portanto:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g H \quad (\text{A.1.2-6})$$

Após a integração da Equação A.1.2-6, a pressão hidrostática é dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma, t) d\sigma \quad (\text{A.1.2-7})$$

Ao adotar a densidade da água como sendo constante e, considerando-se a pressão atmosférica, para o gradiente de pressão (gradiente de pressão barotrópico) têm-se:

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad (\text{A.1.2-8})$$

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad (\text{A.1.2-9})$$

Parâmetro de Coriolis

O parâmetro de Coriolis (f) depende da latitude geográfica (ϕ) e da velocidade angular de rotação da Terra, Ω : $f = 2\Omega \sin(\phi)$.

Tensões de Reynolds

As forças F_{ξ} e F_{η} nas equações da quantidade de movimento representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds. As tensões de Reynolds são determinadas usando o conceito de viscosidade turbulenta. Dentro deste conceito, as componentes (em cada direção) das tensões de Reynolds são o produto entre o fluxo dependente do coeficiente de viscosidade turbulenta e sua correspondente componente média devido ao tensor raio de deformação.

Neste estudo, o tensor de Reynolds é anisotrópico. O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta (ν_H) é muito maior de que sua contra parte vertical (ν_V). O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta é assumido como sendo a superposição de três partes: uma parte devido a “turbulência bi-dimensional (2D)”,

uma parte devido a “turbulência tri-dimensional (3D)”, e uma parte devido a viscosidade “ambiente” ou viscosidade molecular. A turbulência 2D (ν_{2D}) é associada as contribuições do movimento e forças horizontais que não são resolvidas na grade horizontal (mais especificamente na sub-grade da escala de turbulência). Por outro lado, a turbulência 3D refere-se a turbulência tri-dimensional e é resolvida pelo modelo através de sub-modelos de fechamento turbulento. Por fim, a viscosidade molecular é representada por (ν_H^{amb}). Enfim, o coeficiente de viscosidade turbulenta é expresso por:

$$\nu_H = \nu_{2D} + \nu_V = \nu_{2D} + \nu_{3D} + \nu_H^{amb} \quad (\text{A.1.2-10})$$

Os sub-modelos de fechamento turbulento avaliam somente os efeitos resultantes do cisalhamento.

O coeficiente vertical de viscosidade turbulenta (ν_V) é definido por:

$$\nu_V = \nu_{mol} + \text{máx}(\nu_V^{amb}, \nu_{3D}) \quad (\text{A.1.2-11})$$

O sistema de coordenadas σ rotaciona o tensor de cisalhamento em relação ao sistema de coordenadas cartesiano, o que implica no acréscimo de termos adicionais (Stelling & Van Kester, op. cit.). Além disso, o tensor de cisalhamento é redefinido assumindo-se que a escala horizontal é muito maior do que a profundidade (Blumberg & Mellor, 1985). Então, as forças F_ξ e F_η são utilizadas na forma:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} \quad (\text{A.1.2-12})$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} \quad (\text{A.1.2-13})$$

Equação de Estado

A densidade da água (ρ) é uma função da salinidade (s) e da temperatura (t). O modelo Delft utiliza uma relação empírica (Eckart, 1958):

$$\rho = \frac{1000P_o}{\lambda + \alpha_o P_o} \quad (\text{A.1.2-14})$$

onde,

$$\lambda = 1779.5 + 11.25t - 0.0745t^2 - (3.80 + 0.01t)s ;$$

$$\alpha_o = 0.6980, \text{ e}$$

$$P_o = 5890 + 38t - 0.375t^2 + 3s.$$

com a salinidade s em ppt e a temperatura da água t em °C.

A.3 BIBLIOGRAFIA

- BLUMBERG, A.F. & G.L. MELLOR, 1985.** Modelling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review*, Vol. 113, No. 8.
- DELTARES, 2011.** User Manual Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic and Transport Phenomena, Including Sediments. Deltares, Delft, The Netherlands. 690 pp.
- ECKART, C., 1958.** Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. *American Journal of Science*, 256, 225-240.
- PHILLIPS, N.A., 1957.** A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *J. of Meteorology*, vol. 14.
- STELLING, G.S. & J.A.TH.M. VAN KESTER, 1994.** On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol. 18, 915-955.

ANEXO B DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MODELOS OILMAP

O modelo OILMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.**, é uma ferramenta utilizada para o acompanhamento e previsão do deslocamento e intemperismo de qualquer tipo de óleo derramado em acidentes com petróleo.

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

O OILMAP foi projetado em uma configuração modular de forma que diferentes tipos de modelos, bem como um conjunto de ferramentas sofisticadas de dados ambientais, podem ser acoplados dependendo do problema e da situação em estudo. Através de sua interface gráfica, o OILMAP permite ao usuário a especificação dos cenários; animação das trajetórias, correntes e vento; importar e exportar dados ambientais; a definição da grade computacional para qualquer área dentro do domínio; gerar correntes médias ou de maré; incluir ou editar as características dos óleos registrados no banco de dados; apresentar dados contidos em objetos georreferenciados (SIG); e determinar o impacto ambiental em recursos naturais. As funções do SIG permitem ao usuário a entrada, manipulação e exibição de objetos na tela através de pontos, linhas, e polígonos georreferenciados ao domínio definido pelo cenário. A cada objeto podem ser atribuídos dados em formato de texto, valores numéricos ou arquivos a partir de *links* externos.

O sistema OILMAP inclui os seguintes modelos: um modelo de deriva e intemperismo para óleo de superfície e subsuperfície, um modelo de resposta a derramamento de óleo, modelo probabilístico, e um modelo receptor que através

do método reverso localiza a origem do derramamento a partir de informações da posição da mancha.

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

O modelo de deriva de óleo prevê o transporte e intemperismo do óleo a partir de derrames instantâneos e contínuos. As estimativas demonstram a localização e massa do óleo na superfície *versus* o tempo. O modelo estima a variação temporal da cobertura de área, espessura da mancha e viscosidade do óleo. O modelo também estima o balanço da massa de óleo ou a quantidade de óleo sobre a superfície do mar, na coluna de água, evaporado, na costa, e fora da área de estudo *versus* o tempo. Os processos de transformações biogeoquímicas no modelo incluem dispersão, evaporação, entranhamento, dispersão natural ou por suspensão e emulsificação. O OILMAP pode também calcular as interações do óleo com a camada de sedimentos e, no balanço de massa, a sedimentação associada a este processo.

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

(1980a, 1982), utilizando-se a abordagem de mancha espessa dos mesmos autores.

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

Os processos de entranhamento são modelados utilizando-se a formulação de Delvigne & Sweeney (1988) que, explicitamente, representa índices de injeção de óleo para dentro da coluna d'água por gotículas de óleo. O coeficiente de entranhamento, como uma função da viscosidade do óleo, baseia-se em Delvigne & Hulsen (1994).

O processo de emulsificação do óleo, em função de perdas de evaporação e alterações na porcentagem de água na mistura, baseia-se em Mackay *et al.* (1980a, 1982) e depende da composição do óleo e do estado do mar. O método de emulsificação de Mackay *et al.* (1982) é implementado através dos valores dos parâmetros de entrada do coeficiente de viscosidade do *mousse* e uma taxa de emulsificação que podem ser usados para diminuir a taxa em que a emulsificação está prevista para ocorrer.

A interação do óleo com o litoral e a linha de costa é modelada com base em uma versão simplificada de Reed *et al.* (1989), que formula o problema em termos de uma capacidade de retenção dependendo do tipo da costa e de um índice de remoção exponencial.

Utilizando-se o OILMAP em modo probabilístico, é possível considerar a variabilidade das forçantes ambientais. As simulações de derrame são realizadas através da variação aleatória do início do mesmo dentro do período para o qual se dispõe de dados meteorológicos e oceanográficos. Tanto os ventos quanto as correntes, ou ambos, podem variar estocasticamente. As múltiplas trajetórias são, então, utilizadas para a produção de curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da grade computacional (área de estudo). As probabilidades de presença de óleo e tempo de deslocamento da

mancha podem ser correlacionadas a recursos naturais armazenados no banco de dados (SIG), de forma a auxiliar na avaliação de impactos ambientais em termos da probabilidade da presença de óleo em recursos importantes.

B.1 FORMULAÇÃO

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

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

$$\vec{X}_t = \vec{X}_{t-\Delta t} + \Delta t \vec{U}_{oil} \quad (1)$$

onde

Δt = passo de tempo (s);

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

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

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

$$\vec{U}_{oil} = \vec{U}_w + \vec{U}_t + \vec{U}_r + \alpha \vec{U}_e + \beta \vec{U}_p \quad (2)$$

onde

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

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

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

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

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

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

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

A componente da velocidade advectiva devida às correntes de maré, \vec{U}_t , e ao fluxo residual, \vec{U}_r , são provenientes do modelo hidrodinâmico. A velocidade de deriva devida ao vento, u_{wc} e v_{wc} (m/s), componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, são:

$$u_{wc} = C_1 u_w \quad (3)$$

$$v_{wc} = C_1 v_w \quad (4)$$

onde

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

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

C_1 = fator de deriva (%).

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

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

$$u_{wd} = u_{wc} \cos \theta + v_{wc} \sin \theta \quad (5)$$

$$v_{wd} = u_{wc} \sin \theta + v_{wc} \cos \theta \quad (6)$$

onde

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

- v_{wd} = componente Norte-Sul da velocidade devida à deriva do vento (m/s);
 θ = ângulo de deriva ($^{\circ}$) constante ($\theta = C_c$). O valor *default* é zero.

Utilizando a formulação *random walk* para a dispersão horizontal, é possível simular os processos dispersivos que ocorrem numa escala de movimento inferior à escala de resolução do campo de corrente fornecido pelos dados e ou modelo hidrodinâmico (Okubo, 1971; Okubo & Ozmidov, 1970). As componentes da velocidade de dispersão da mancha, u_{dd} e v_{dd} , (m/s), são definidas (Bear & Verruijt, 1987) por:

$$u_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{6D_x}{\Delta t}} \quad (7)$$

$$v_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{6D_y}{\Delta t}} \quad (8)$$

onde

- D_x = coeficiente de dispersão horizontal na direção Leste-Oeste (m^2/s);
 D_y = coeficiente de dispersão horizontal na direção Norte-Sul (m^2/s);
 Δt = passo de tempo (s);
 γ = número aleatório entre (-1) e (1).

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

O processo de espalhamento da mancha é representado pela formulação espesso-fino de Mackay *et al.* (1980a,b, 1982), utilizando-se a abordagem de mancha espessa. O OILMAP modela apenas a mancha espessa que contém mais de 90% da massa associada à mancha. A taxa de mudança da área superficial para o espalhamento da mancha espessa (Mackay *et al.*, 1980a), \bar{A}_{tk} (m^2/s), é definida por:

$$\tilde{A}_{tk} = \frac{dA_{tk}}{dt} = K_1 A_{tk}^{1/3} \left(\frac{V_m}{A_{tk}} \right)^{4/3} \quad (9)$$

onde

- A_{tk} = área superficial da mancha (m²);
 K_1 = taxa de espalhamento constante (s⁻¹);
 V_m = volume da superfície da mancha (m³);
 t = tempo (s).

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

A taxa de mudança da área superficial de uma única partícula (m²/s) é dada por:

$$\tilde{A}_{tk} = \frac{dA_{tk}}{dt} = K_1 A_{tk}^{1/3} \left(\frac{V_m}{A_{tk}} \right)^{4/3} \left(\frac{R_s}{R_e} \right)^{4/3} \quad (10)$$

onde

- A_{tk} = área superficial de uma partícula (m²);
 K_1 = taxa de espalhamento constante (s⁻¹);
 V_m = volume de óleo de uma partícula (m³);
 R_s = raio de uma partícula (m);
 R_e = raio efetivo da superfície da mancha (m).

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

$$R_e \left[\left(\frac{1}{\pi} \right) \sum_{n=1}^N A_{tk} \right]^{1/2} \quad (11)$$

onde

- A_{tk} = área superficial de uma partícula (m²);
 N = número de partículas usadas para representar a superfície da mancha.

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

O modelo de Exposição à Evaporação (Stiver & Mackay, 1984) é uma aproximação analítica para a previsão do volume evaporado. O modelo utiliza informações da curva de destilação do óleo (curva PEV) para estimar os parâmetros necessários a esta equação analítica. A fração evaporada, F_v , é definida por:

$$F_v = \frac{\ln[1 + B(T_G/T)\theta \exp(A - BT_0/T)]}{[T / BT_G]} \quad (12)$$

onde

T_0 = ponto de ebulição inicial (K);

T_G = gradiente da curva de destilação modificada;

T = temperatura do ambiente (K);

A, B = constantes adimensionais;

θ = exposição à evaporação.

A exposição à evaporação, θ , é definida por:

$$\theta = \left(\frac{K_m A t}{V_0} \right) \quad (13)$$

onde

K_m = coeficiente de transferência de massa (m/s);

A = área da mancha (m²);

t = tempo (s);

V_0 = volume do derrame de óleo (m³).

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

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

$$T_B = T_0 + T_G F_v \quad (14)$$

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

$$H = PV / RT \quad (15)$$

onde

P = pressão do vapor do óleo (atm);

V = volume do óleo (m³);

R = constante universal dos gases;

T = temperatura ambiente (K).

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

$$\ln H = A - B \left(\frac{T_B}{T} \right) \quad (16)$$

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

Os processos de entranhamento são modelados utilizando-se a formulação de Delvigne & Sweeney (1988) que, explicitamente, representa índices de injeção de óleo para dentro da coluna de água por gotículas de óleo. O coeficiente de entranhamento, como uma função da viscosidade do óleo, baseia-se em Delvigne & Hulsen (1994).

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

$$Q_d = C * D_d^{0,57} S F d^{0,7} \Delta d \quad (17)$$

onde

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

D_d = energia dissipada da arrebentação da onda por unidade de área superficial (J/m²);

S = fração da superfície do mar coberta pelo óleo;

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

d = diâmetro da partícula de óleo (m);

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

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

$$C^* = \exp(a \ln(\mu / \rho) + b) \quad (18)$$

onde

μ = viscosidade do óleo (cP);

ρ = densidade do óleo (g/cm³);

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

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

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

$$d_{50} = 1818(E)^{-0,5} \left(\frac{\mu}{\rho_0} \right)^{0,34} \quad (19)$$

onde

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

μ = viscosidade do óleo (cP);

ρ = densidade do óleo (g/cm^3).

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

$$d_{\min} = 0,1d_{50} \quad (20)$$

$$d_{\max} = 2,0d_{50} \quad (21)$$

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

$$D_d = 3,4 \times 10^{-3} \rho_w g H^2 \quad (22)$$

onde

ρ_w = densidade da água (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

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

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

$$F = 0,032(U_w - U_t)/T_w \quad (23)$$

onde

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

U_t = valor limite do vento para a quebra da onda (~ 5 m/s);

T_w = período de onda significativo (s).

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

$$M_e = A dt \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} Q_d dd \quad (24)$$

onde

A = área superficial da mancha (m²);

dt = passo de tempo (s);

Q_d = taxa de entranhamento (kg m⁻² s⁻¹).

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

$$z_m = 1,5H_b \quad (25)$$

onde

H_b = altura da quebra da onda (m).

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

$$W_i = d_i^2 g (1 - \rho_0 / \rho_w) / 18\nu_w \quad (26)$$

onde

d_i = diâmetro da gotícula (m);

g = constante gravitacional (m/s²);

ρ_0 = densidade do óleo (kg/m³);

ρ_w = densidade da água (kg/m³);

ν_w = viscosidade da água (m²/s).

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

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

$$Z_i = \max\left(\frac{D_v}{W_i}, Z_m\right) \quad (27)$$

onde

D_v = coeficiente de dispersão vertical (m²/s).

O coeficiente de dispersão vertical, D_v (m²/s), é definido como:

$$D_v = 0,0015W_{10} \quad (28)$$

onde

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

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

$$R_i = \frac{W_i dt}{Z_i} \quad (29)$$

onde

dt = passo de tempo (s).

O processo de emulsificação do óleo, em função de perdas de evaporação e alterações na porcentagem de água na mistura, baseia-se em Mackay *et al.* (1980a, 1982) e depende da composição do óleo e do estado do mar.

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

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

$$\tilde{F}_{wc} = \frac{dF_{wc}}{dt} = C_1 U_w^2 \left(1 - \frac{F_{wc}}{C_2} \right) \quad (30)$$

onde

U_w = velocidade do vento (m/s);

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

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

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

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

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{2,5F_{wc}}{1 - C_0 F_{wc}}\right) \quad (31)$$

onde

μ_0 = viscosidade inicial do óleo (cP);

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

C_0 = constante de emulsificação ($\sim 0,65$).

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

$$\mu = \mu_0 \exp(C_4 F_v) \quad (32)$$

onde

μ_0 = viscosidade inicial do óleo (cP);

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

F_v = fração evaporada da superfície da mancha.

A interação do óleo com o litoral e linha de costa é modelada com base em uma versão simplificada de Reed *et al.* (1989), que formula o problema em termos de uma capacidade de retenção dependendo do tipo da costa e de um índice de remoção exponencial. Estes processos foram parametrizados no OILMAP da seguinte forma:

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

$$F_{sh} = \frac{A_{lg}}{A_s} \quad (33)$$

onde

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

A_s = área de uma partícula na superfície.

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

$$M_{h,i} = \rho_0 t_i W_i L_{gi} \quad (34)$$

onde

i = parâmetro do tipo de costa;

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

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

W_i = largura do elemento de grade atingido pelo óleo;

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

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

$$M_R = M_0 (1 - \exp[-t/T]) \quad (35)$$

onde

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

t = tempo (dias);

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

B.2 BIBLIOGRAFIA

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

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

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

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

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

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

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

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

DELVIGNE G.A.L. & C.E. SWEENEY, 1988. Natural dispersion of oil. *Oil & Chemical Pollution*, 4 (1988): p. 281-310.

- DELVIGNE G.A.L. & L.J.M. HULSEN, 1994.** Simplified laboratory measurement of oil dispersion coefficient – Application in computations of natural oil dispersion. Proceedings of the Seventeenth Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar, June 8-10, 1994, Vancouver, BC Canada, pp.173-187.
- JAYKO K. & E. HOWLETT, 1992.** OILMAP an interactive oil spill model. In: OCEANS 92, October 22-26, 1992, Newport, RI.
- KOLLURU, V.S., 1992.** Influence of Number of Spilllets on Spill Model Predictions. Applied Science Associates Internal Report, 1992.
- LANGE, P. & H. HÜHNERFUSS, 1978.** Drift response of mono-molecular slicks to wave and wind action. *Journal of Physical Oceanography*, v. 8, p. 142-150.
- LIMA J.A., A. SARTORI, E.A. YASSUDA, J.E. PEREIRA & E. ANDERSON, 2003.** Development of oil spill scenarios for contingency planning along the Brazilian coast. In: International Oil Spill Conference, 2003, Vancouver, BC, Canada.
- MACKAY, D., S. PATERSON. & K. TRUDEL, 1980a.** A mathematical model of oil spill behavior, Department of Chemical Engineering, University of Toronto, Canada, 39pp.
- MACKAY D., S. PATERSON & K. TRUDEL, 1980b.** Oil spill processes and models Report EE-8, Environmental Protection Service, Canada.
- MACKAY D., W. SHUI, K. HOUSSAIN, W. STIVER, D. McCURDY & S. PATERSON, 1982.** Development and calibration of an oil spill behavior model, Report No. CG-D027-83, US Coast Guard Research and Development Center, Groton, CT.
- OKUBO A. & R.V. OZMIDOV, 1970.** Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion on the ocean in the scale of the phenomenon in question. *Atmospheric and Ocean Physics*, 6(5): p. 534-536.

- OKUBO, A., 1971.** Oceanic diffusion diagrams. *Deep Sea Research*, v. 8, p. 789-802.
- PEREIRA J.E.; YASSUDA, E.A. & CAMPOS, E. 2005.** Development of an operational metocean modelling system, with applications in South America. In: 9th International Conference on Estuarine and Coastal Modelling, 2005. Charleston, SC, USA.
- REED M., E. GUNDLACH, & T. KANA, 1989.** A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies, *Oil and Chemical Pollution*, Vol. 5, p. 411-449.
- SPAULDING, M. L., HOWLETT, E., ANDERSON, E. & JAYKO, K., 1992a.** OILMAP a global approach to spill modeling. 15th Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar, June 9-11, 1992, Edmonton, Alberta, Canada, p. 15-21.
- SPAULDING M.L., E. HOWLETT, E. ANDERSON & K. JAYKO, 1992b.** Oil spill software with a shell approach. *Sea Technology*, April 1992, p. 33-40.
- STIVER W. & D. MACKAY, 1984.** Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. *Environmental Science and Technology*, 18:834-840.
- WHITICAR S., M. BOBRA, M. FINGAS, P. JOKUTY, P. LIUZZO, S. CALLAGHAN, S. ACKERMAN & J. CAO, 1992.** A catalogue of crude oil and oil product properties 1992 (edition), Report #EE-144, Environment Canada, Ottawa, Canada.