

Capítulo 8

Modelagem de Dispersão de Óleo

Autores do Capítulo

Prooceano

Me. André Luis Santi Coimbra de Oliveira

Me. Gabriel Vieira de Carvalho

Me. Henery Ferreira Garção

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini

Dr. Marcelo Montenegro Cabral

Coordenação Adjunta

Me. Gabriel Vieira de Carvalho – PROOCEANO

Dr. Marcelo Montenegro Cabral – PROOCEANO

Coordenação Científica do Projeto Costa Norte

Profa. Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz –
ESPAÇO/UFRJ

Prof. Dr. Filipe de Oliveira Chaves -
NEGEMC/UERJ

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini –
PROOCEANO

Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad –
LAMCE/UFRJ

Prof. Dr. Marcelo Rollnic – LAPMAR/UFGA

Prof. Dr. Mário Luiz Gomes Soares -
NEGEMC/UERJ

Coordenação Geral do Projeto

Ma. Maria Eduarda Pessoa- ENAUTA

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini -
PROOCEANO

Bela. Anne Goni Guedes - ENAUTA

Bela. Dyellen Soares Queiroz – ENAUTA

Coordenação de Comunicação do Projeto

Frederico Luna Rinaldi - PROOCEANO

Rebeca Kiperman – ENAUTA

Citação Sugerida

OLIVEIRA, A.L.S.C., CARVALHO, G.V., GARÇÃO, H.F., PELLEGRINI, J.A.C., CABRAL, M.M. “Modelagem de Dispersão de Óleo”, Capítulo 8. Em: Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira. v.2. Rio de Janeiro (BR), 2020.

Sumário

| | | |
|--------|---|-----|
| 8. | MODELAGEM DE DISPERSÃO DE ÓLEO | 774 |
| 8.1. | Objetivos..... | 775 |
| 8.2. | Sistema de modelagem de dispersão de óleo com ações de resposta | 776 |
| 8.2.1. | Metodologia..... | 776 |
| 8.3. | Dispersão de óleo estocástica com múltiplas fontes de vazamento | 815 |
| 8.3.1. | Desenvolvimento da Metodologia | 816 |
| 8.3.2. | Resultados..... | 867 |
| 8.4. | Referências | 898 |

Índice de Figuras

| | |
|--|-----|
| Figura 8-1: Exemplo de resultado de espessuras do óleo. Conjunto de todas as partículas lançadas junto ao mapa de espessura (esquerda) e a mesma imagem, porém apenas com o mapa de espessura (direita). A escala de cor representa a espessura em μm | 780 |
| Figura 8-2: Representação da mancha de óleo em duas partes distintas: porção espessa (<i>thick portion</i>) a porção fina (<i>sheen</i> ou <i>thin film</i>). Adaptado de Lehr & Simecek-Beatty (2000)..... | 781 |
| Figura 8-3: Exemplo de funcionamento da metodologia de linha de costa. Os pontos com o número 0 serão compreendidos como terra pelo modelo, enquanto os pontos de número 1, como mar..... | 787 |
| Figura 8-4: Formações em J (parte superior) e U (parte inferior). Exemplo de tipo de barreira de contenção. Fonte: Mas & Kitts (2014)..... | 790 |
| Figura 8-5: Exemplo de tipo de barreira de contenção. Fonte: Muttin (2015)..... | 791 |
| Figura 8-6: Exemplos de tipos de recolhedores de óleo (<i>skimmers</i>). Tipo vertedouro à direita e tipo oleofílico à esquerda. Fonte: Siqueira (2015). | 793 |
| Figura 8-7: Espessuras limite do óleo em função de diferentes estratégias de resposta. Fonte: API/NOAA/USCG/EPA, 2013, adaptado de Allen & Dale, 1996. | 793 |
| Figura 8-8: Variações de eficiência de recolhimento em função das condições meteoceanográficas. Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011). | 795 |
| Figura 8-9: Variações de eficiência de recolhimento em função do tipo/condição do óleo. Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011)..... | 796 |
| Figura 8-10: Como os dispersantes funcionam: 1) Óleo e água não se misturam; 2) Dispersantes são aplicados na superfície da camada de óleo e os surfactantes se localizam na interface óleo/água, onde eles atuam; 3) A tensão interfacial é reduzida e o óleo é disperso em pequenas gotículas. Fonte: Modificado de LESSARD; DEMARCO, 2000. | 797 |
| Figura 8-11: Esquema do modelo conceitual dos sub-processos envolvidos na dispersão do óleo na superfície do mar. Adaptado de Helfrich <i>et al.</i> (2015). | 800 |
| Figura 8-12: Segmento de reta delimitado pelos pontos P e Q..... | 805 |
| Figura 8-13: Exemplo do algoritmo de cruzamento de barreiras. O segmento vermelho representa a barreira de contenção, os segmentos pretos correspondem aos trechos onde o algoritmo não identificou cruzamento e, por fim, o segmento azul corresponde a um trecho onde o algoritmo detectou que houve o cruzamento de uma barreira. | 806 |
| Figura 8-14: Representação numérica da barreira de contenção utilizando 3 retas. Adaptado de Siqueira (2015)..... | 807 |
| Figura 8-15: Representação numérica da barreira de contenção com a área de coleta do <i>skimmer</i> . Adaptado de Siqueira (2015)..... | 807 |
| Figura 8-16: Eficiência de Recolhimento em função do estado do mar (ventos/ondas). Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011)..... | 809 |
| Figura 8-17: Eficiência de Recolhimento em função da viscosidade cinemática (cSt). Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011)..... | 810 |

| | |
|---|-----|
| Figura 8-18: Eficiência do Dispersante em função do estado do mar (ventos/ondas). Adaptado de Genwest Systems (2011)..... | 813 |
| Figura 8-19: Eficiência do Dispersante em função da viscosidade cinemática (cSt). Adaptado de Genwest Systems (2011)..... | 814 |
| Figura 8-20: Exemplificação do conceito de “área varrida”. Os três quadros acima demonstram as posições das partículas de uma simulação determinística após 1h, 12h e 24h de simulação. O quadro de baixo indica a “área varrida” pelas partículas após o término de 24 horas. | 818 |
| Figura 8-21: Mapa com todos os blocos de interesse nas bacias da Foz do Amazonas e Pará-Maranhão (polígonos laranja e verde) e os pontos de simulação para rodada de múltiplos pontos usando uma resolução de 1/10° (pontos pretos)..... | 820 |
| Figura 8-22: Exemplos de resultados finais de área varrida para as simulações de 200 (esquerda) e de 4000 partículas (direita). | 821 |
| Figura 8-23: Análise de sensibilidade ao número de partículas. Área varrida (eixo esquerdo – km ²) e tempo de rodada (eixo direito – s) para 1 simulação determinística de 30 dias..... | 822 |
| Figura 8-24: Tempo necessário para a realização de 810.300 simulações de 30 dias para o estudo da análise de vulnerabilidade em função do número de partículas. | 823 |
| Figura 8-25: Pontos de vazamento utilizados na metodologia de análise de vulnerabilidade desenvolvida no projeto Costa Norte..... | 829 |
| Figura 8-26: Pontos de vazamento utilizados na metodologia de dispersão de óleo com múltiplas fontes desenvolvida no projeto Costa Norte. Em vermelho são destacados os 4 pontos selecionados para os estudos comparativos que serão realizados com o modelo OSCAR. | 830 |
| Figura 8-27: Probabilidade de presença de óleo para o vazamento do Ponto 01 – Superfície – 20.000 m ³ realizado no OSCAR (esquerda) e o resultado de probabilidade de presença de óleo do mesmo ponto da rodada com o modelo de múltiplas fontes do PCN (direita). | 831 |
| Figura 8-28: Tempo mínimo de toque de óleo para o vazamento do Ponto 01 – Superfície – 20.000 m ³ realizado no OSCAR (esquerda) e o resultado de tempo mínimo do mesmo ponto da rodada com o modelo de múltiplas fontes do PCN (direita). | 831 |
| Figura 8-29: Probabilidade de presença de óleo para o vazamento do Ponto 01 – Superfície – 20.000 m ³ realizado no OSCAR sem limiar de espessura (esquerda) e o resultado de probabilidade de presença de óleo do mesmo ponto da rodada com o modelo de múltiplas fontes do PCN (direita)..... | 832 |
| Figura 8-30: Fluxograma de simulações realizadas com o modelo OSCAR para avaliação da escolha de pontos de vazamento em um mapa de probabilidade de presença de óleo. | 833 |
| Figura 8-31: Probabilidade de presença de óleo integrada para os 04 pontos modelados com o OSCAR. Cenário de Superfície/200 m ³ (painel superior) e Superfície/20.000 m ³ (painel inferior). | 835 |
| Figura 8-32: Probabilidade de presença de óleo integrada para os 04 pontos modelados com o OSCAR. Cenário de Fundo/200 m ³ (painel superior) e Fundo/20.000 m ³ (painel inferior)..... | 836 |
| Figura 8-33: Tempo mínimo de chegada de óleo integrado para os 04 pontos modelados com o OSCAR. Cenário de Superfície/200 m ³ (painel superior) e Superfície/20.000 m ³ (painel inferior). | 837 |

| | |
|--|-----|
| Figura 8-34: Tempo mínimo de chegada de óleo integrado para os 04 pontos modelados com o OSCAR. Cenário de Fundo/200 m ³ (painel superior) e Fundo/20.000 m ³ (painel inferior)..... | 838 |
| Figura 8-35: Probabilidade integrada (acima) e tempo mínimo de chegada óleo (abaixo) obtidos com o sistema de dispersão de óleo a partir de múltiplas fontes para o ano de 2016. O mapa apresenta a integração de todos os pontos de vazamento modelados distribuídos nos blocos da Bacia Pará-Maranhão. | 839 |
| Figura 8-36: Esquema dos aninhamentos dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes utilizado para obtenção dos resultados de suscetibilidade em escala regional e nos quatro estuários foco do Projeto Costa Norte. As setas indicam os aninhamentos..... | 842 |
| Figura 8-37: Pontos de vazamento considerados na modelagem estuarina. | 843 |
| Figura 8-38: Probabilidade integrada entre os 30 pontos de vazamento simulados para o experimento com vazamento instantâneo (esquerda) e de 24 horas (direita). | 844 |
| Figura 8-39: Tempo mínimo de chegada de óleo considerado os 30 pontos de vazamento simulados para o experimento com vazamento instantâneo (esquerda) e de 24 horas (direita). | 845 |
| Figura 8-40: Probabilidade máxima de chegada de óleo considerando os 30 pontos de vazamento simulados para o experimento com vazamento instantâneo (esquerda) e de 24 horas (direita)..... | 845 |
| Figura 8-41: Mapa de probabilidade (acima) e tempo mínimo de chegada (abaixo) considerando o ponto de vazamento no 15 para o cenário de vazamento instantâneo (esquerda) e com duração de 24 horas (direita)..... | 846 |
| Figura 8-42: Tempo de exposição máximo em cada ponto de grade dos resultados da rodada <i>offshore</i> | 847 |
| Figura 8-43: Histograma dos tempos de exposição (horas) retirados para o ponto 15 do modelo de dispersão de óleo estuarino do Rio Pará. | 848 |
| Figura 8-44: Probabilidade integrada em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala estuarina usando durações de vazamento variáveis. | 849 |
| Figura 8-45: Probabilidade máxima em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala estuarina usando durações de vazamento variáveis. | 849 |
| Figura 8-46: Tempo mínimo de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala estuarina usando durações de vazamento variáveis. | 850 |
| Figura 8-47: Tempo de exposição máximo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala estuarina usando durações de vazamento variáveis. | 850 |
| Figura 8-48: Exemplo de integração de probabilidades máximas entre os resultados <i>offshore</i> e estuarino, considerando o ponto 09 estuarino. | 852 |
| Figura 8-49: Integração de probabilidades máximas entre os resultados <i>offshore</i> e estuarino, considerando os 31 pontos de vazamento estuarinos. | 853 |
| Figura 8-50: Figura esquemática dos aninhamentos dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes até chegar no modelo de São Caetano de Odivelas. O quadro superior representa os pontos de vazamento distribuídos nas bacias da MEB do modelo de escala <i>offshore</i> . O quadro inferior esquerdo indica os pontos de vazamento do modelo aninhado Rio | |

| | |
|--|-----|
| Pará e o quadro inferior direito indica as fontes de vazamento do modelo de São Caetano de Odivelas..... | 854 |
| Figura 8-51: Acima, série de maré sintética na boca da baía de Marajó reconstituída a partir das constantes M2 e S2. A linha azul representa a média das alturas de preamar e os instantes com preamar acima do nível médio foram considerados momentos de sizígia e abaixo, de quadratura. Abaixo, instantes de início das simulações de óleo na escala estuarina separados em sizígia (pontos vermelhos) e quadratura (pontos azuis), sobre a série de maré original, obtida do modelo hidrodinâmico estuarino desenvolvido no Projeto Costa Norte. | 856 |
| Figura 8-52: Pontos de vazamento para a modelagem de dispersão de óleo de múltiplas fontes nas bacias da Margem Equatorial Brasileira. Os polígonos laranja representam as bacias efetivas..... | 859 |
| Figura 8-53: Limites da grade lagrangiana para a modelagem de dispersão de óleo de múltiplas fontes nas bacias da Margem Equatorial Brasileira. Os polígonos azuis representam as bacias sedimentares da MEB. | 859 |
| Figura 8-54: Fontes de vazamento (pontos amarelos), limites do modelo hidrodinâmico utilizado (área azul), regiões de manguezal (áreas verdes) e regiões fora do domínio de advecção das partículas (áreas laranjas). A esquerda, modelo de São Caetano de Odivelas e a direita, de Turiaçu. | 861 |
| Figura 8-55: Fontes de vazamento (pontos amarelos), limites do modelo hidrodinâmico utilizado (área azul), regiões de manguezal (áreas verdes) e regiões fora do domínio de advecção das partículas (áreas laranjas). A esquerda, modelo de Sucuriçu e a direita, de Soure..... | 861 |
| Figura 8-56: Fontes de vazamento (pontos amarelos), limites do modelo hidrodinâmico utilizado (área azul), regiões de manguezal (áreas verdes) e regiões fora do domínio de advecção das partículas (áreas laranjas). Modelo Rio Pará, de escala estuarina e intermediário para São Caetano de Odivelas. | 862 |
| Figura 8-57: Probabilidade máxima de presença de óleo considerando um subset de 4 fontes de vazamento localizadas <i>offshore</i> na bacia Pará-Maranhão. A integração dos resultados estuarinos são obtidos a partir da metodologia de integração entre as escalas descrito nesse capítulo... | 863 |
| Figura 8-58: Zoom em região de floresta de mangue em São Caetano de Odivelas exemplificando os pontos iniciais das simulações de tempo de residência (pontos azuis). | 865 |
| Figura 8-59: Fontes de vazamento consideradas na simulação (122 pontos pretos), distribuídos com espaçamento de 10 km nos blocos de exploração de óleo e gás (polígonos verdes e laranjas) na Bacia Pará-Maranhão..... | 867 |
| Figura 8-60: Probabilidade integrada em cada ponto de grade dos resultados da rodada <i>offshore</i> usando a base hidrodinâmica com assimilação de dados. | 868 |
| Figura 8-61: Probabilidade máxima em cada ponto de grade dos resultados da rodada <i>offshore</i> usando a base hidrodinâmica com assimilação de dados. | 869 |
| Figura 8-62: Tempo mínimo de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada <i>offshore</i> usando a base hidrodinâmica com assimilação de dados. | 869 |
| Figura 8-63: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva de Potiguar. | 870 |

| | |
|--|-----|
| Figura 8-64: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva do Ceará. | 870 |
| Figura 8-65: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva de Barreirinhas. | 871 |
| Figura 8-66: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva de Pará-Maranhão..... | 871 |
| Figura 8-67: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva da Foz do Amazonas. | 872 |
| Figura 8-68: Probabilidade máxima de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala <i>offshore</i> . Período Chuvoso (painel superior) e Período Seco (painel inferior). | 873 |
| Figura 8-69: Tempo mínimo de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala <i>offshore</i> . Período Chuvoso (painel superior) e Período Seco (painel inferior). | 874 |
| Figura 8-70: Probabilidade máxima de toque em São Caetano de Odivelas considerando todo o período estudado (ano de 2016). As áreas em cinza representam regiões de terra e as linhas verdes representam as regiões de florestas de mangue..... | 876 |
| Figura 8-71: Probabilidade máxima de toque em São Caetano de Odivelas considerando o período Seco em Quadratura (esquerda) e Sízígia (direita). As áreas cinzas representam a terra e as linhas verdes representam as florestas de mangue..... | 877 |
| Figura 8-72: Probabilidade máxima de toque em São Caetano de Odivelas considerando o período Chuvoso em Quadratura (esquerda) e Sízígia (direita). As áreas cinzas representam a terra e as linhas verdes representam as florestas de mangue. | 877 |
| Figura 8-73: Probabilidade máxima de toque em Turiaçu (MA) considerando todo o período estudado (ano de 2016). As áreas em cinza representam regiões de terra e as linhas verdes representam as regiões de florestas de mangue. | 878 |
| Figura 8-74: Probabilidade máxima de toque em Turiaçu considerando o período Seco em Quadratura (acima) e Sízígia (abaixo). As áreas cinzas representam a terra e as linhas verdes representam as florestas de mangue..... | 879 |
| Figura 8-75: Probabilidade máxima de toque em Turiaçu considerando o período Chuvoso em Quadratura (esquerda) e Sízígia (direita). As áreas em cinza representam regiões de terra e as linhas verdes representam as regiões de florestas de mangue. | 880 |
| Figura 8-76: Probabilidade máxima de toque em Sucuriju (AP) considerando todo o período estudado (ano de 2016). As áreas em verde representam regiões florestas de mangue. | 881 |
| Figura 8-77: Probabilidade máxima de toque em Sucuriju considerando o período Seco em Quadratura (acima) e Sízígia (abaixo). As áreas em verde representam regiões florestas de mangue. | 882 |
| Figura 8-78: Probabilidade máxima de toque em Sucuriju considerando o período Chuvoso em Quadratura (acima) e Sízígia (abaixo). As áreas em verde representam regiões florestas de mangue. | 883 |

| | |
|---|-----|
| Figura 8-79: Probabilidade máxima de toque em Soure (AP) considerando todo o período estudado (ano de 2016). As áreas em cinza representam áreas de terra e as linhas verdes representam regiões de florestas de mangue..... | 884 |
| Figura 8-80: Probabilidade máxima de toque em Soure considerando o período Seco em Quadratura (acima) e Sízígia (abaixo). As áreas em cinza representam áreas de terra e as linhas verdes representam regiões de florestas de mangue. | 885 |
| Figura 8-81: Probabilidade máxima de toque em Soure (PA) considerando o período Chuvoso em Quadratura (acima) e Sízígia (abaixo). As áreas em cinza representam áreas de terra e as linhas verdes representam regiões de florestas de mangue..... | 886 |
| Figura 8-82: Taxa de afastamento nas florestas de manguezal em Turiaçu (MA). O polígono tracejado em vermelho representa as áreas com aquisição de dados de altimetria LiDAR. | 889 |
| Figura 8-83: Taxa de afastamento nas florestas de manguezal em São Caetano de Odivelas (PA). O polígono tracejado em vermelho representa as áreas com aquisição de dados de altimetria LiDAR..... | 890 |
| Figura 8-84: Taxa de afastamento nas florestas de manguezal em Soure (PA). O polígono tracejado em vermelho representa as áreas com aquisição de dados de altimetria LiDAR. | 891 |
| Figura 8-85: Taxa de afastamento nas florestas de manguezal em Sucuriju (AM). O polígono tracejado em vermelho representa as áreas com aquisição de dados de altimetria LiDAR. | 892 |
| Figura 8-86: Exemplificação da Análise Inversa. Acima a esquerda, fontes de vazamento que apresentam risco (pontos vermelhos) e que não apresentam risco (pontos cinzas) para o local selecionado (ponto laranja, Turiaçu). Acima a direita, a probabilidade e abaixo, o tempo mínimo de chegada, associados aos pontos que apresentam risco para Turiaçu. | 893 |
| Figura 8-87: Mapa de desvio padrão de probabilidades relativo aos mapas anuais de probabilidade de presença de óleo entre os anos de 2008 e 2016, obtidos a partir da simulação de múltiplos pontos de vazamento dentro dos blocos da Baca Pará-Maranhão. | 894 |
| Figura 8-88: Distribuição acumulada dos desvios absolutos de probabilidade anual (2008 a 2016) em relação às médias de 10 anos. A linha tracejada preta se refere ao ano (2016) que apresenta o maior valor de desvio ao alcançar 99% de distribuição acumulada. | 895 |
| Figura 8-89: Desvio dos mapas anuais de probabilidade de presença de óleo de 2008 a 2013 em relação à média do período de 10 anos. Resultados anuais obtidos pela integração de todos os pontos de vazamento selecionados dentro dos blocos de produção e exploração da Bacia Pará-Maranhão..... | 896 |
| Figura 8-90: Desvio dos mapas anuais de probabilidade de presença de óleo de 2014 a 2016 em relação à média do período de 10 anos. Resultados anuais obtidos pela integração de todos os pontos de vazamento selecionados dentro dos blocos de produção e exploração da Bacia Pará-Maranhão..... | 897 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 8-1: Intervalos geralmente aceitos do efeito da viscosidade do óleo sobre a eficácia do dispersante. | 803 |
| Tabela 8-2: Detalhamento do número de simulações realizadas no primeiro teste do sistema de simulação de dispersão de óleo com múltiplas fontes..... | 820 |
| Tabela 8-3: Números de CPUs e memória RAM total das instâncias otimizadas para processamento utilizadas nos testes de paralelismo na Amazon. | 825 |
| Tabela 8-4: Números de CPUs e memória RAM total das instâncias otimizadas para memória utilizadas nos testes de paralelismo na Amazon. | 826 |
| Tabela 8-5: Comparação final das instâncias da Amazon selecionadas como candidatas a serem utilizadas para as rodadas em paralelo. | 826 |
| Tabela 8-6: Volumes de <i>blowout</i> e API dos estudos públicos da Bacia Pará-Maranhão..... | 828 |
| Tabela 8-7: Tabela 13: Coordenadas e profundidade dos 4 pontos selecionados para os estudos comparativos que serão realizados com o modelo OSCAR. | 830 |
| Tabela 8-8: Resumo das configurações dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes utilizados na metodologia de Suscetibilidade do Projeto Costa Norte..... | 858 |
| Tabela 8-9: Parâmetros básicos do experimento..... | 866 |

Lista de Abreviações e Siglas

| | |
|--------|--|
| AIS | Identificação Automática de Embarcações |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| OSCAR | <i>Oil Spill Contingency and Response</i> |
| PEI | Plano de Emergência Individual |
| PCN | Projeto Costa Norte |
| MEB | Margem Equatorial Brasileira |
| CNB | Corrente Norte do Brasil |
| FZA | Foz do Amazonas |
| PAMA | Pará-Maranhão |

8. MODELAGEM DE DISPERSÃO DE ÓLEO

O Projeto Costa Norte (PCN) tem como objetivo geral o desenvolvimento de metodologias para avaliação da Vulnerabilidade das Florestas de Mangue nas bacias Foz do Amazonas (FZA) e Pará-Maranhão (PAMA) a vazamentos de óleo ocorridos na Margem Equatorial Brasileira (MEB). No arcabouço conceitual do PCN, a Vulnerabilidade é composta por 3 componentes, Sensibilidade, Resiliência e Suscetibilidade, sendo a última o grau de exposição ao tensor, ou seja, o risco de determinada floresta de mangue ser atingida por óleo (ver Volume 1).

Neste contexto, a modelagem de dispersão de óleo é um dos conhecimentos específicos integrados no PCN com o objetivo geral de representar o transporte do poluente desde suas fontes potenciais até as regiões costeiras e estuarinas. Particularmente, o projeto tem foco em quatro sistemas costeiros e estuarinos – Baía de Turiaçu (MA), estuário de São Caetano de Odivelas (PA), sistema costeiro de Soure (PA) e sistema costeiro de Sucuriçu (AP) – com vasta cobertura de florestas de mangue.

Desde a concepção, o principal desafio que se apresenta para a modelagem de dispersão de óleo é a forma de lidar com tamanha variação de escalas. Este desafio – comum à modelagem hidrodinâmica – vem do balanço entre abrangência e detalhamento espacial. As fontes de vazamento consideradas são em regiões oceânicas *offshore*, com escalas de movimento de centenas de quilômetros enquanto as áreas focais são no interior de estuários com pequenos canais entrecortando extensas planícies alagáveis com florestas de mangue. Outro fator desafiador é a representação da dispersão de óleo no interior do manguezal – qual o alcance do óleo no interior das florestas? Como representar as correntes nessas regiões? São perguntas que se colocam nos limites metodológicos desta área de conhecimento.

Para além dos desafios inerentes à modelagem de dispersão de óleo, o próprio desenvolvimento da metodologia de avaliação de Vulnerabilidade do PCN aporta desafios particulares e interessantes. Pela perspectiva dos ambientes estudados, a avaliação da Suscetibilidade deve considerar todas as possíveis fontes do poluente. Portanto, foi necessário lidar com a possibilidade de vazamentos originados em extensas regiões oceânicas – um desafio visto que em grande parte estudos de dispersão de óleo são relativos a uma fonte específica (item 8.3.1.1) – e com a necessidade de representar a dispersão desde as fontes *offshore* até as florestas de mangue (item 8.3.1.2). Em outro desenvolvimento metodológico geral do PCN, a representação do conceito ecológico de Resiliência orientou - e foi moldado por - desenvolvimentos específicos do módulo de dispersão de óleo (item 8.3.1.3). Neste processo de construção metodológico, por vezes surgem potencialidades inesperadas, diversas às relacionadas com a intenção inicial. Desta forma foi a análise de variabilidade interanual (item 8.3.1.5) e a análise inversa – onde a partir de um local, determinam-se as possíveis fontes (item 8.3.1.4).

As análises e metodologias apresentadas neste capítulo não seriam possíveis sem primeiro haver o desenvolvimento completo dos códigos de um modelo de dispersão e intemperismo de óleo no mar com ações de resposta (item 8.2). O sistema desenvolvido, integrado com a

plataforma Web, é em si um importante resultado ao possibilitar treinamentos de situações de vazamento ou mesmo o atendimento de casos reais (para um guia de utilização deste sistema, o leitor deve se referir ao Capítulo 12 deste Volume).

Dessa forma, este capítulo se encontra dividido em dois grandes blocos de desenvolvimento. O primeiro se refere ao sistema de modelagem de dispersão de óleo com ações de resposta, que forneceu as bases para o segundo, referente à metodologia de modelagem de dispersão de óleo com múltiplas fontes de vazamento e suas análises derivadas (Análise de Suscetibilidade, Taxa de Afastamento, Análise Inversa e Variabilidade Interanual).

8.1. Objetivos

O objetivo geral deste módulo do PCN se divide em:

- **Desenvolver um modelo de dispersão de óleo com intemperismo e ações de resposta.** Este primeiro objetivo compreende o desenvolvimento de um conjunto de códigos que constituem o núcleo de um modelo de dispersão de óleo e, dentre os objetivos específicos estão o desenvolvimento de:
 - Modelo lagrangiano de partículas.
 - Processos físico-químicos ou intemperismo do óleo, e variações das propriedades do óleo – densidade e viscosidade.
 - Efeito de ações de contingência – barreiras de contenção, *skimmers* e dispersantes líquido.
- **Desenvolver uma metodologia para simulação de dispersão de óleo a partir de múltiplas fontes.** Este objetivo dialoga com o objetivo geral do Projeto Costa Norte e dentre os objetivos e aplicações específicos estão o desenvolvimento de:
 - Sistema para modelagem de dispersão de óleo a partir de múltiplas fontes.
 - Metodologia para análise de Suscetibilidade, com a integração dos resultados probabilísticos entre múltiplas escalas – desde a bacia oceânica até as florestas de mangue.
 - Metodologia para análise de Taxa de Afastamento nas regiões de floresta de mangue: *proxy* para a remoção física do óleo na definição de Resiliência.
 - Metodologia para realizar análise inversa, ou seja, a detecção de potenciais áreas fonte de vazamento de óleo a partir de locais na costa específicos.
 - Estudo do efeito da variabilidade interanual nos resultados probabilísticos de dispersão de óleo na região de estudo.

8.2. Sistema de modelagem de dispersão de óleo com ações de resposta

Este item apresenta os fundamentos teóricos do desenvolvimento do sistema de simulação de deriva de óleo desenvolvida no contexto do Projeto Costa Norte. O sistema foi desenvolvido buscando-se incorporar a dinâmica básica do óleo derivando no oceano sob a influência de ventos e correntes, os principais fenômenos de intemperismo ao qual está sujeito e diversas ferramentas usadas como ação de contingência no caso de derrames. Neste item apresenta-se a referência técnica completa do modelo, descrevendo a física de todos os processos resolvidos pelo sistema. O leitor encontra um manual completo da operação exemplificando todas as etapas de funcionamento do sistema *on-line* no capítulo 12 – Plataforma WEB.

8.2.1. Metodologia

Como é de conhecimento, os modelos computacionais de transporte de poluente podem ser do tipo euleriano (com base no referencial de Euler) e do tipo lagrangiano (com base no referencial de Lagrange). Na abordagem euleriana, as variáveis do meio hidrodinâmico são analisadas simultaneamente em pontos fixos no espaço. Em contrapartida, a técnica lagrangiana identifica e acompanha uma parcela do fluido que se move com a velocidade do escoamento.

A estrutura básica de um modelo de dispersão de óleo nos dias atuais é a formulação lagrangiana para os processos de advecção e dispersão e os algoritmos específicos para os processos de intemperismo. Isso é o que aponta Spaulding (2017) em seu trabalho de revisão do estado da arte em modelagem de dispersão de óleo e que traz os conceitos básicos dos modelos atuais mais amplamente utilizados. Os modelos de dispersão de óleo são normalmente estruturados com uma série de algoritmos integrados descrevendo os processos de intemperismo e transporte individualmente.

A abordagem lagrangiana é baseada na representação do fluido por partículas discretas, sendo chamados de métodos de partículas, onde são medidas suas variáveis de estado ao longo de sua trajetória. Pereira (2004) menciona que, dentre as vantagens na utilização da abordagem lagrangiana, pode-se citar a simplicidade computacional e de se necessitar somente das propriedades estatísticas do meio. Em contrapartida, modelos lagrangianos também podem apresentar problemas, como interpolações errôneas de variáveis do escoamento, além de esforço computacional elevado quando se considera um alto número de partículas.

Outra forma de classificação de modelos computacionais é com relação às equações que os governam. Quando as variáveis de estado ou suas mudanças são bem definidas, as relações entre as funções governantes e as variáveis de estado são fixadas e as saídas são únicas, então o modelo desse sistema é chamado de determinístico (FRAGOSO *et al.*, 2009). Porém, se alguma aleatoriedade ou probabilidade é associada com, no mínimo, uma das variáveis de saída do modelo, então o modelo é chamado de estocástico, o qual inclui características estatísticas (FRAGOSO *et al.*, 2009). De acordo com Spaulding (2017), modelos de óleo precisam incorporar

a quantificação da incerteza nos algoritmos e coeficientes associados usados no modelo, com previsões não somente representando o valor médio, mas também a incerteza.

De acordo com Spaulding (2017), os processos de intemperismo do óleo são calculados nos modelos a partir da transferência de massa entre os compartimentos ambientais (superfície, atmosfera, coluna d'água, fundo oceânico e linha de costa), ou na mudança das propriedades ou composição do óleo (densidade, viscosidade, etc.). No estado da arte atual, os modelos matemáticos que buscam reproduzir os processos que o óleo sofre são aproximações feitas com base em estudos empíricos e experiência do comportamento do óleo (CERKIRGE & PALMER, 2001). Desta forma, há uma inerente limitação a metodologia devido à falta de disponibilidade deste tipo de informação para o uso mais amplo em diferentes situações de vazamento (SPAULDING, 2017).

8.2.1.1. Modelo lagrangiano de partículas

A ferramenta utiliza um modelo de partículas lagrangianas. A trajetória das partículas é calculada a cada passo de tempo considerando o vetor de deriva eólica e o vetor de correntes oceânicas superficiais da seguinte maneira:

$$\vec{x}(T) - \vec{x}_0 = \int_0^T [\vec{u}_c(t) + \vec{u}_v(t)] dt \quad (8.1)$$

Onde \vec{x}_0 é o vetor posição inicial do objeto, $\vec{x}(T)$ é a posição da partícula no tempo T , $\vec{u}_c(t)$ é o vetor de velocidade superficial no local da partícula e $\vec{u}_v(t)$ é o vetor de deriva eólica. A deriva eólica deve ser entendida como o movimento que o óleo lançado ao mar sofre devido à ação do vento sobre a sua área superficial.

A advecção consiste em um processo de transporte da mancha de óleo por correntes, ondas e vento. Trata-se de um processo físico relacionado à deriva da mancha de óleo na superfície e abaixo dela. É o principal mecanismo que determina o deslocamento do óleo ao longo do tempo, correspondendo à soma vetorial dos componentes de transporte decorrentes da ação de correntes e de ventos sobre a mancha (CEKIRGE & PALMER, 2001).

Os modelos de derramamento de óleo utilizam constantes ou parâmetros variáveis para relacionar velocidade da corrente e do vento à velocidade superficial da mancha de óleo, conhecido como fator de deriva. Na maior parte dos modelos de transporte de óleo, o fator de deriva devido a correntes superficiais assume o valor de 1 (um). Já o fator de deriva do vento, em muitos estudos (WANG *et al.*, 2005; JANEIRO *et al.*, 2008; GUO & WANG, 2009; GUO *et al.*, 2009) consideram que 3% da velocidade do vento é transmitida a velocidade da mancha de óleo. Segundo Chen *et al.* (2007), o fator de deriva do vento pode variar entre 2,8 e 4,2% com base em experimentos de laboratório, enquanto observações de campo esse fator varia entre 3,5% e 5,2%. No estudo conduzido por Reed *et al.* (1994), o valor de 3,5% do fator de deriva para ventos inferiores a 6 m/s gera bons resultados de simulação de derrames de óleo.

A componente difusiva do transporte do óleo é representada na grande maioria dos modelos pela técnica chamada de passo aleatório (em inglês, *random walk method*). Difusão é um processo sub-grade que representa o transporte turbulento não resolvido pelo modelo

hidrodinâmico e que deve ser incorporado ao modelo lagrangiano através de uma perturbação ao campo médio. Essa componente pode utilizar coeficientes de dispersão advindos do modelo hidrodinâmico utilizado para o transporte do óleo ou pode ser configurado diretamente pelo o usuário (SPAULDING, 2017), ficando a critério do usuário conhecer/atribuir o caráter dispersivo da região de estudo.

Na ferramenta desenvolvida, os dados ambientais (correntes superficiais e ventos) são interpolados na posição de cada partícula através de uma interpolação bilinear no espaço e linear no tempo, a partir das malhas de modelos operacionais de previsão. O vetor de correntes superficiais é composto da seguinte forma:

$$\vec{u}_c(t) = \vec{u}_{adv} + \vec{u}_{dif} \quad (8.2)$$

Onde \vec{u}_{adv} é a componente advectiva da velocidade da corrente obtida a partir de interpolação dos dados do modelo hidrodinâmico e \vec{u}_{dif} é a componente difusiva da velocidade da corrente calculada seguindo o modelo clássico de passo aleatório (FISCHER, 1979), conforme apresentado em Sayol *et al.* (2014).

$$\vec{u}_{dif} = R_J \sqrt{\frac{6D}{\Delta t}}, J = 1, 2, \dots \quad (8.3)$$

onde R_J é um número aleatório entre -1 e 1 obtido de uma distribuição Gaussiana e especificado a cada passo de tempo Δt . D é a difusividade horizontal determinada através de um modelo de fechamento turbulento, descrito abaixo.

Foram utilizadas as formulações propostas por Smagorinsky (1963). Inicialmente, calcula-se o campo de deformação (D_e) para cada passo de tempo do modelo hidrodinâmico, dado por:

$$D_e = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right)^2} \quad (8.4)$$

Então, a difusividade horizontal é dada por;

$$D = (0.28\Delta x)^2 D_e \quad (8.5)$$

onde Δx é o espaçamento horizontal da malha do modelo hidrodinâmico.

O vetor de deriva eólica $\vec{L}(t)$ é calculado a cada passo de tempo e é dependente da velocidade do vento. Tradicionalmente, o percentual de influência do vento utilizado é de 3,5%.

8.2.1.2. Processos físicos-químicos (intemperismo)

O transporte e intemperismo do óleo derramado no mar são governados por processos físico-químicos e biológicos complexos que dependem das propriedades do óleo, condições hidrodinâmicas e ambientais (REED *et al.*, 1999; WANG *et al.*, 2005; JANEIRO *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2008; SPAULDING, 2017). Imediatamente após a introdução do óleo no oceano, a advecção e espalhamento fazem com que haja um rápido aumento na área exposta do óleo, que posteriormente passará por processos de intemperismo incluindo a evaporação, dispersão,

emulsificação e óleo na costa. Em cada um destes processos estão envolvidos os fatores químicos, determinados pela composição específica do petróleo derramado.

8.2.1.2.1. Cálculo da espessura de óleo

Na modelagem numérica computacional, o óleo é representado por partículas que derivam ao serem forçadas por correntes e ventos. A cada passo de tempo do modelo, faz-se necessário traduzir o posicionamento das partículas em espessura de óleo presente na superfície do oceano. Cada partícula deve, portanto, ser capaz de representar um determinado volume de óleo que possa ser convertido em espessura.

O volume de óleo do vazamento é fornecido como entrada para o modelo pelo usuário. Esse volume é, então, dividido pelo número total de partículas que serão utilizadas na modelagem e o resultado passa a ser o valor de volume representado por cada partícula, seguindo a equação:

$$v_{part} = \frac{v_{total}}{N} \quad (8.6)$$

onde v_{part} corresponde ao volume representado por cada partícula, v_{total} o volume total do vazamento modelado e N ao número total de partículas lançadas no modelo lagrangiano.

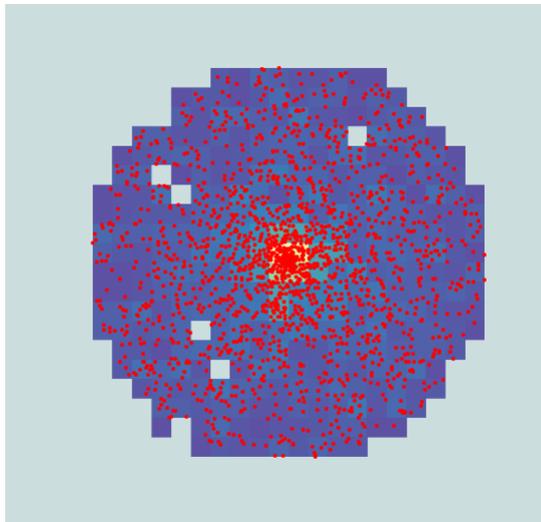
As partículas são então distribuídas em uma grade com número de elementos fixo, no caso, 20x20 pontos. Esse tipo de grade, conhecida como malha adaptativa, usa as coordenadas mínimas e máximas do conjunto de todas as partículas, e cria uma grade uniforme. Logo, a cada passo de tempo é possível que a resolução da grade varie, de acordo com o espalhamento das partículas.

Por último, são verificadas quais partículas estão presentes em cada elemento de grade. Para a obtenção da espessura, o volume total calculado em cada ponto é dividido pela área do elemento, conforme:

$$esp = \frac{v_{ele}}{A_{ele}} \quad (8.7)$$

onde esp equivale a espessura daquele elemento da grade, v_{ele} corresponde ao volume total presente no elemento e A_{ele} representa a área do elemento de grade. A Figura 8-1 apresenta um exemplo da imagem gerada a partir da metodologia que foi descrita. O painel da esquerda apresenta o mapa de espessuras conjuntamente com todas as partículas que foram lançadas no modelo lagrangiano, enquanto o painel direito exhibe apenas o mapa para melhor visualização.

Espessuras + Partículas



Apenas espessura

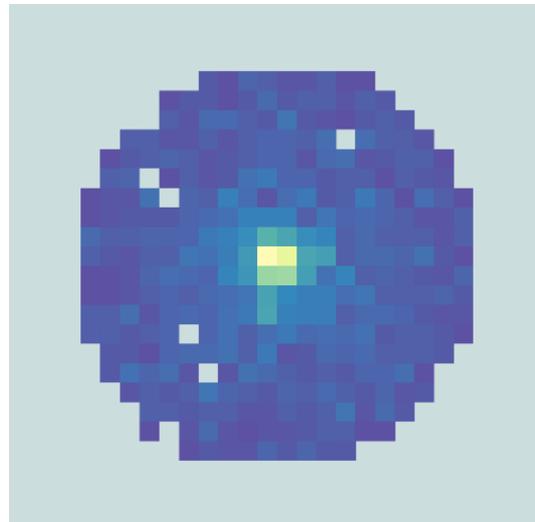


Figura 8-1: Exemplo de resultado de espessuras do óleo. Conjunto de todas as partículas lançadas junto ao mapa de espessura (esquerda) e a mesma imagem, porém apenas com o mapa de espessura (direita). A escala de cor representa a espessura em μm .

8.2.1.2.2. Espalhamento

O espalhamento, também conhecido por espalhamento mecânico, trata-se do movimento da mancha sobre si mesma, horizontalmente, devido às forças inerciais, gravitacionais e viscosas, aumentando a área da mancha.

De acordo com Lehr & Simecek-Beatty (2000), o óleo inicia o espalhamento imediatamente quando ele é derramado e que este espalhamento não ocorre uniformemente. Segundo estes autores, qualquer tensão sobre a superfície causa um alongamento na mancha, sendo que na maior parte dos derramamentos esta mancha de óleo rapidamente adquire uma forma de cometa onde a pequena região escura é seguida por uma grande porção brilhosa (Figura 8-2). Estes autores ainda acrescentam que esta região mais escura possui o maior volume do óleo derramado, enquanto a porção fina brilhosa não possui mais que 10% do volume.

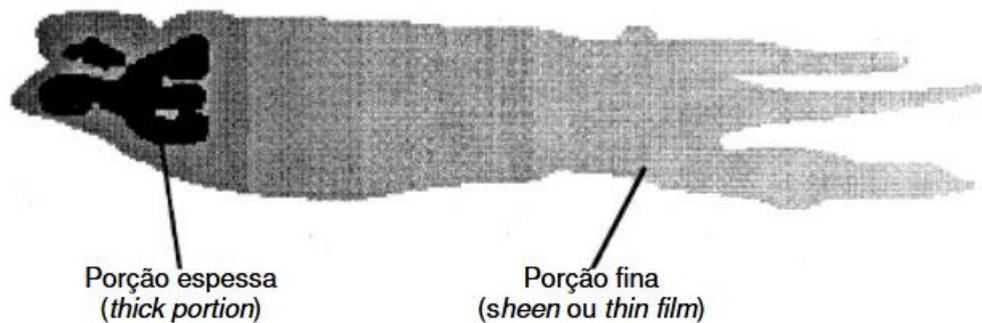


Figura 8-2: Representação da mancha de óleo em duas partes distintas: porção espessa (*thick portion*) a porção fina (*sheen* ou *thin film*). Adaptado de Lehr & Simecek-Beatty (2000).

O estudo desenvolvido por Fay (1969) forma a base do entendimento deste processo. Fay (1971) dividiu o espalhamento do óleo em 3 etapas de acordo com as principais forças atuando no fenômeno. A primeira fase (gravidade-inercial) é influenciada pela gravidade, que causa o espalhamento lateral da mancha (LEHR, 2001). A segunda, denominada fase gravidade-viscosidade, é relativa ao momento quando a viscosidade da água começa a atuar e atenuar o efeito da gravidade. Finalmente, a terceira etapa (tensão superficial-viscosidade) se inicia quando a mancha já está bem fina e a força principal torna-se a tensão interfacial entre o óleo e a água (LYNCH *et al.*, 2015). A primeira etapa termina muito rapidamente, e ocorre numa escala de tempo muito mais rápida que outros processos (LYNCH *et al.*, 2015). Dessa forma o instante final dessa fase, em sua transição para a segunda, é usado comumente como ponto de partida para modelos lagrangianos. O cálculo da área da fase 1 é dado por:

$$A = \pi K_i^2 (\beta g V)^{1/2} t \quad (8.8)$$

onde K_i é o coeficiente de proporcionalidade da fase 1, V é o volume do vazamento (m^3) e $\beta = (\rho_a - \rho_o)/\rho_a$. O instante de término da fase 1 (t_{iv}) é dado por:

$$t_{iv} = \left(\frac{K_v}{K_i} \right)^4 \left(\frac{V}{\beta g v_a} \right)^{1/3} \quad (8.8)$$

com K_v sendo o coeficiente de proporcionalidade da fase 2 e v_a é a viscosidade cinemática da água (m^2/s). Substituindo o tempo na equação da área, tem-se:

$$A = \pi \frac{K_v^4}{K_i^2} \left(\frac{\beta g V^5}{v_a^{1/2}} \right)^{1/6} \quad (8.9)$$

Com $K_i = 1,14$ e $K_v = 1,45$, segundo Fay (1971).

8.2.1.2.3. Evaporação

Dentre os processos de intemperismo ocorrentes em derrames de óleo, a evaporação é o mais importante em termos de balanço de massa. Dentro de alguns dias, por exemplo, óleos leves e óleos médios podem perder até 75% e 40% do seu volume inicial, respectivamente. Já para óleos mais pesados, essa perda pode não ultrapassar 10% do seu volume (ASCE, 1996).

No trabalho de revisão de processos que ocorrem no óleo realizado por Reed *et al.* (1999), afirmam que existem basicamente dois métodos de cálculo da evaporação:

- Método da exposição evaporativa, desenvolvido por Stiver e Mackay (1984).
- Método de pseudo-componentes, desenvolvido por Payne *et al.* (1987);

O método da exposição evaporativa é baseado na hipótese simplista da relação linear entre o ponto de ebulição da fase líquida e a fração perdida. Esta abordagem trata o óleo como um composto único com taxas empiricamente derivadas.

O método dos pseudo-componentes considera os óleos crus e seus derivados como uma mistura independente de diversos componentes (pseudo-componentes), onde cada um é tratado como uma mistura singular associada a uma pressão de vapor. Os chamados pseudo-componentes são evaporados de acordo com o algoritmo de exposição evaporativa, onde o fluxo para atmosfera é específico para o volume molar, pressão de vapor e peso molecular do componente (SPAULDING, 2017).

O modelo utilizado na ferramenta é o da representação do óleo através de pseudo-componentes. O volume representado por cada partícula é então dividido entre cada pseudo-componente do óleo. O método foi implementado seguindo a descrição de Jones (1997). A evaporação de cada pseudo-componente é dada por:

$$\frac{dV_i}{dt} = - \frac{K_i \cdot A \cdot P_i \cdot V_i}{R \cdot T \cdot \sum_{j=1}^{nc} \frac{V_j}{\bar{V}_j}} \quad (8.10)$$

onde V_i é o volume do i -ésimo pseudo-componente, K_i é a taxa de transferência de massa, A é a área da mancha, P_i é a pressão de vapor do componente, R é a constante dos gases ideais, T é a temperatura da água, \bar{V}_j é o volume molar do componente e nc o número total de componentes.

O volume molar de um componente é dado pela aproximação:

$$\bar{V}_i = 7.000 \cdot 10^{-5} - (2.102 \cdot 10^{-7} \cdot BP_i) + (1.000 \cdot 10^{-9} \cdot (BP_i)^2) \quad (8.11)$$

com BP_i sendo o ponto de ebulição do i -ésimo componente.

A pressão de vapor é dada pela equação de Antoine:

$$\ln \frac{P_i}{P^o} = \frac{\Delta S_i (BP_i - C)^2}{R \cdot BP_i} \left[\frac{1}{BP_i - C} - \frac{1}{T - C} \right] \quad (8.12)$$

onde, $C = (0.19 \cdot BP_i) - 18$ e $\Delta S_i = 8.75 + 1.987 \log BP_i$.

P^o corresponde a pressão atmosférica.

A taxa de transferência de massa é obtida pela equação:

$$K_i = 0.0048 \cdot U^{7/9} \cdot Z^{-1/9} \cdot S_c^{-2/3} \quad (8.13)$$

onde U é a velocidade do vento, Z é o comprimento da mancha na direção do vento e Sc é o número de Schmidt, obtido através de:

$$Sc = \frac{\nu_{ar}}{D_i} \quad (8.14)$$

com ν_{ar} sendo a viscosidade cinemática do ar e D_i a difusividade molecular do i -ésimo componente, dada por:

$$D_i = D_{\acute{a}gua} \sqrt{\frac{MW_{\acute{a}gua}}{MW_i}} \quad (8.15)$$

onde, $MW_i = 0.04132 - (1.985 \cdot 10^{-4} \cdot BP_i) + (9.494 \cdot 10^{-7} \cdot (BP_i)^2)$ é a massa molecular do i -ésimo componente.

O equacionamento apresentado revela que a única dependência para o cálculo da taxa de evaporação de cada componente é o conhecimento dos pontos de ebulição e a fração volumétrica de cada pseudo-componente. O usuário deverá, portanto, fornecer informações sobre as características do óleo a ser modelado. Essas informações podem ser fornecidas de duas maneiras diferentes, descritas abaixo:

- 1) **Curva de destilação:** O usuário pode passar diretamente os valores de fração volumétrica e pontos de ebulição de cada componente separado ao longo da caracterização da curva de destilação do óleo.
- 2) **Grau API:** Se o usuário não possuir a curva de destilação do óleo, a segunda possibilidade é uma aproximação dos pseudo-componentes a partir do grau API do óleo. Essa metodologia é utilizada no modelo ADIOS, desenvolvido pela NOAA, sendo bem representativa apenas para óleos crus. O número de pseudo-componentes é estimado como 10 e o volume total de óleo é dividido igualmente entre todos os pseudo-componentes. Os pontos de ebulição são dados por:

$$BP_i = T_0 + dT \cdot \left(\frac{i-0.5}{nc} \right) \quad (8.16)$$

onde, $T_0 = 457.16 - 3.3447 \cdot API$ e $dT = 1356.7 - 247.36 \log API$.

8.2.1.2.4. Dispersão

A dispersão, também denominada somente dispersão vertical, é um processo físico em que as gotículas de óleo são transportadas a partir da superfície do mar para a coluna de água. Essas gotículas podem ter dimensões variáveis, estando sujeitas à ação de turbulência natural da água.

Os primeiros modelos de dispersão simplesmente assumiam uma taxa de dispersão constante como porcentagem da mancha de óleo por dia, baseado no estado do mar. Estas taxas tendiam a ser muito grande, entre 10 a 60% por dia.

Mackay *et al.* (1980), de acordo com Reed *et al.* (1999) e Lehr (2001), construíram uma fórmula baseada na estimativa da fração da superfície do mar sujeita a dispersão por unidade de tempo, complementada por uma estimativa da fração de óleo entranhado com o tamanho suficiente para permanecer dispersa na coluna d'água.

O modelo de dispersão baseado no trabalho experimental de Delvigne e Sweeney (1988 apud REED *et al.*, 1999) é o mais comum nos modelos de derrames de óleo. Estes autores desenvolveram uma série de estudos laboratoriais acerca da dispersão natural do óleo, resultando em uma relação empírica para a taxa de dispersão do óleo para a coluna de água devida à rebentação das ondas:

$$Q_d = C^* \cdot D_d^{0,57} \cdot S \cdot F \cdot d^{0,7} \cdot \Delta d \quad (8.17)$$

onde Q_d é a taxa de dispersão ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) para um diâmetro de gotícula d (m). C^* é uma constante de dispersão empírica que depende do tipo de óleo e estado do intemperismo, D_d é a energia dissipada devido a quebra de ondas por unidade de área (J/m^2), S é a fração da superfície coberta por óleo, F é a fração da superfície atingida por ondas quebrantes e é o intervalo de diâmetro das gotículas de óleo (m).

Para obtenção da constante de dispersão, os dados empíricos obtidos por Delvigne e Hulsen (1984) foram ajustados por French-McCay (2004) para as equações:

$$C^* = \exp[-0,1023 \ln(\nu) + 7,572] \quad \text{se } \nu < 132 \text{ cSt} \quad (8.18)$$

$$C^* = \exp[-1,8927 \ln(\nu) + 16,313] \quad \text{se } \nu \geq 132 \text{ cSt} \quad (8.19)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do óleo (cSt). D_d é dado por:

$$D_d = 0,0034 \cdot \rho_a \cdot g \cdot H_b^2 \quad (8.20)$$

Onde ρ_a é a densidade da água e H_b é a altura das ondas quebrantes. Em Liungman e Mattsson (2011) é apresentada a relação de H_b com H_{sig} (altura significativa de onda):

$$H_b = 1,5H_{sig} \quad (8.21)$$

CERC (1984) desenvolve o cálculo da altura significativa:

$$H_{sig} = \frac{0,243U_*^2}{g} \quad (8.22)$$

$$U_*^2 = 0,71U^{1,23} \quad (8.24)$$

Onde U é a velocidade do vento (m/s). A fração da superfície coberta por óleo (S) é utilizada como 1 visto que o cálculo de área da mancha será feito em relação à presença de partículas no modelo, ou seja, o cálculo da dispersão é realizado sempre em uma área totalmente coberta por óleo. A fração de superfície atingida por ondas quebrantes foi parametrizado em função de um valor de vento limite (U_{LIM}) com o qual se inicia a formação da quebra de ondas (utilizado como 5 m/s):

$$F = 3,0 \times 10^{-6} \left(\frac{U^{3,5}}{T_w} \right) \quad \text{se } U \leq U_{LIM} \quad (8.25)$$

$$F = 3,0 \times 10^{-2} \left(\frac{U - U_{LIM}}{T_w} \right) \quad \text{se } U > U_{LIM} \quad (8.26)$$

com T_w sendo o período de onda significativa, obtido de CERC (1984):

$$T_w = 8,13 \left(\frac{U}{g} \right) \quad (8.27)$$

As classes de diâmetro de gotícula (d) foram incorporadas segundo Reed *et al.* (1994), que definiram o tamanho mínimo e máximo com base em valores observados (de 1 a 1600 μm). A distribuição de diâmetros discutida em Delvigne e Sweeney (1988) se dá por:

$$d = C_0 \cdot E^{-0,5} \nu^{0,34} \quad (8.28)$$

onde E é a taxa de dissipação de energia ($\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$) e ν a viscosidade cinemática do óleo. As classes de menor e maior tamanho foram então estimadas com um valor de C_0 500 e 3400, respectivamente. O intervalo de diâmetros (Δd) é obtido de:

$$\Delta d = \frac{d_{MAX} - d_{MIN}}{n_{classes}} \quad (8.29)$$

utilizando $n_{classes}$ como 10, segundo Berry (2012).

8.2.1.2.5. Emulsificação

Em muitos modelos, de acordo com Spaulding (2017), a emulsificação é calculada com base nas formulações propostas por Mackay *et al.* (1980), no qual consiste em um algoritmo mais simples, que pode ser expresso em forma diferencial. O algoritmo apoia-se em dois parâmetros: a taxa de assimilação de água e o teor máximo de água do óleo. Segundo Spaulding (2017), ambos os parâmetros podem ser derivados de experiências de laboratório, porém o parâmetro taxa de assimilação de água deve ser ponderado para diferentes condições de campo e de estados do mar.

As formulações propostas por Mackay *et al.* (1980) para o fenômeno de emulsificação de óleo em água consistem numa lei de primeira ordem dada por:

$$\frac{dY}{dt} = k_{em} U^2 \left(1 - \frac{Y}{Y_{max}} \right) \quad (8.30)$$

onde Y e Y_{max} são a fração de água e a fração máxima de água no óleo, k_{em} é o parâmetro de emulsificação (da ordem de 1 a 2 $\mu\text{s}/\text{m}^2$) e U é a velocidade do vento. Como discutido em Lehr (2001) e Lehr *et al.* (2002), não somente a fração de água, mas também o tamanho da gotícula de água na emulsão é relevante na viscosidade do óleo. Com o passar do tempo e com a agitação, o tamanho das gotículas diminui enquanto a fração de água se mantém constante (LEHR *et al.*, 2002). Com isso, a área interfacial aumenta, conduzindo a um óleo de maior viscosidade. Dessa forma, a lei descrita por Eley *et al.* (1988) foi escolhida para a incorporação do processo de emulsificação de água em óleo na ferramenta de modelagem de óleo. Essa lei é dada por:

$$\frac{dS}{dt} = k_s \left(1 - \frac{S}{S_{max}} \right) \quad (8.31)$$

onde S e S_{max} são a área interfacial e a área interfacial máxima de água-óleo, respectivamente, e k_s é o parâmetro de emulsificação relativo a área interfacial. A fração de água é relacionada com a área interfacial pela equação:

$$Y = \frac{S \cdot d_w(t)}{6 + S \cdot d_w(t)} \quad (8.32)$$

com $d_w(t)$ sendo o diâmetro médio das gotículas de água variando ao longo do tempo.

Para a utilização do modelo com o processo de emulsificação incorporada, o usuário deverá fornecer novos parâmetros do óleo a ser modelado. Abaixo é feita uma listagem desses parâmetros:

- 1) **Fração de água máxima (Y_{max}):** O usuário pode passar diretamente o valor da fração de água máxima que pode ser atingida na simulação, com base em resultados de ensaios de emulsificação. Na falta dessa informação, é possível deixar o campo em branco, e o modelo irá assumir um valor aproximado, seguindo a formulação utilizada no OilWx (GALT, 2009), modelo de intemperismo incorporado dentro do modelo ROC (GENWEST SYSTEMS, 2011):

- a) Se a viscosidade dinâmica (μ) for inferior a 0,05 Pa.s:

$$Y_{max} = 0.9 - 0.0952 \ln \frac{\mu}{0.05}$$

- b) Se a viscosidade dinâmica (μ) for superior ou igual a 0,05 Pa.s:

$$Y_{max} = 0.9$$

- 2) **Início da emulsificação:** O usuário pode informar de duas maneiras diferentes o momento em que se dá início ao processo de emulsificação do óleo. A primeira possibilidade é informar o tempo de vida do óleo para que o processo ocorra. A segunda é relativa à fração de óleo que deve ser evaporada para que o processo ocorra. Na falta dessas informações, é possível deixar o campo em branco e o modelo irá estimar automaticamente a fração evaporada necessária para dar início ao processo.

Ao início da simulação, a fração de água no óleo é zero, conseqüentemente, o mesmo vale para área interfacial. A partir do valor de Y_{max} , o modelo calcula S_{max} e, ao chegar ao instante ou fração evaporada necessária ao início do processo de emulsificação, o modelo começa o cálculo, segundo a equação:

$$S(t + 1) = S_{max} - (S_{max} - S(t)) \cdot \exp \left[\frac{-k_s \cdot dt}{S_{max}} \right] \quad (8.32)$$

$$k_s = \frac{6 \cdot k_{em} U^2}{d_{Max}} \quad (8.33)$$

$$k_{em} = 2.042 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2 \quad (8.34)$$

onde d_{max} foi avaliado em 10 μm (MACKAY *et al.*, 1981).

8.2.1.2.6. Óleo na Costa

O modelo foi desenvolvido para usar uma malha com zeros (0) e uns (1) para representar, respectivamente, pontos (ou células) de terra e de mar. Essa metodologia de linha de costa necessita de um desenvolvimento prévio do arquivo com a malha, que pode ter qualquer resolução espacial conforme à necessidade da região onde será utilizada. A Figura 8-3 apresenta um exemplo do funcionamento dessa metodologia, com zeros (0) representando os pontos considerados como terra pelo modelo, e uns (1) representando a terra. É importante ressaltar que a imagem se trata apenas de um esquema exemplificativo, mas que para o uso do sistema podem ser usadas malhas de costa com altíssimas resoluções.

Uma vez estabelecido a malha, em cada passo de tempo durante a execução do modelo, as partículas são advectadas suas coordenadas finais são obtidas, assim como a respectiva representação de terra/mar. Caso seja identificado um ponto de terra, aquela partícula não se moverá mais durante a simulação e permanecerá “presa” à costa.

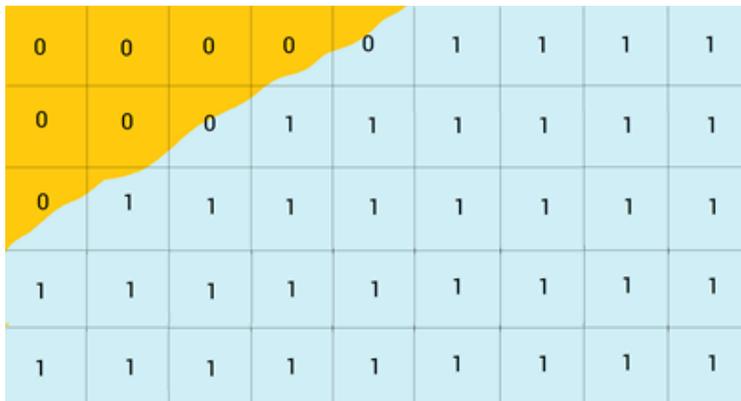


Figura 8-3: Exemplo de funcionamento da metodologia de linha de costa. Os pontos com o número 0 serão compreendidos como terra pelo modelo, enquanto os pontos de número 1, como mar.

Conforme as partículas atingem os pontos definidos como terra na grade de costa do modelo, as partículas encerram suas derivas e todo o óleo presente nelas é considerado como “Óleo na Costa”. Nesse momento, todos os processos de intemperismo e de contingência são interrompidos para essas partículas, com exceção do fenômeno de evaporação. Com isso, a única forma de remoção de óleo da costa implementada é o próprio fenômeno de evaporação, que é amplamente atenuado pela redução da área da mancha ao atingir a costa.

8.2.1.2.7. Variação das Propriedades do Óleo

Outro aspecto importante relativo ao processo de intemperismo são as variações causadas por esses processos nas propriedades do óleo. Como o óleo não é um constituinte químico puro, mas sim uma mistura de diversos compostos orgânicos, suas características vão evoluir ao longo do tempo. Dentre elas, duas se destacam devido à sua importância e impacto nos próprios fenômenos de intemperismo, assim como nas estratégias de contingência: a densidade e a viscosidade. Estas duas propriedades são dependentes tanto da temperatura,

quanto dos processos de evaporação (perda dos componentes leves) e emulsificação (gotículas de água estabilizam no óleo), já implementados na ferramenta de simulação de deriva de óleo. O equacionamento utilizado para cada uma é detalhado nos próximos subitens.

8.2.1.2.7.1. Densidade

Inicialmente, o usuário deve informar a densidade do óleo (ρ_{ref}) a uma determinada temperatura de referência (T_{ref}). Na falta dessas informações, o grau API pode ser utilizado em substituição. Nesses casos, considera-se que a temperatura de referência equivale a 15,6 °C (definição de grau API) e a densidade pode ser obtida a partir de:

$$\rho_{ref} = \frac{141.5}{131.5 + API} \quad (8.35)$$

Em seguida, a densidade do óleo é reajustada em função da temperatura da água (informada pelo usuário). Esse novo valor será considerado como a densidade inicial de todas as partículas lançadas na modelagem. A variação ocorre segundo:

$$\rho_0 = \rho_{ref}(1 - C_t(T_{\acute{a}gua} - T_{ref})) \quad (8.36)$$

onde $T_{\acute{a}gua}$ e T_{ref} são a temperatura da água e a temperatura de referência da densidade do óleo, respectivamente. A constante C_t equivale a 8×10^{-4} (MACKAY *et al.*, 1983).

Ao longo da simulação, a densidade será afetada pelos processos de evaporação e de emulsificação. A abordagem adotada no modelo foi proposta em Mackay *et al.* (1980) com uma modificação para contabilizar a emulsificação (BUCHANAN & HURFORD, 1988).

$$\rho = Y\rho_{\acute{a}gua} + (1 - Y)\rho_0(1 + C_e f_{evap}) \quad (8.37)$$

onde f_{evap} é a fração de óleo evaporada da macha. A constante C_e equivale a 0,18 (MACKAY *et al.*, 1983).

8.2.1.2.7.2. Viscosidade

Inicialmente, o usuário deve informar a viscosidade cinemática do óleo (ν_{ref}) a uma determinada temperatura de referência (T_{ref}). Em seguida, esse valor é reajustado em função da temperatura da água (informada pelo usuário). Esse novo valor será considerado como a viscosidade inicial de todas as partículas lançadas na modelagem. A variação ocorre segundo:

$$\nu_0 = \nu_{ref} \exp \left[C_{vt} \left(\frac{1}{T_{\acute{a}gua}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (8.38)$$

onde $T_{\acute{a}gua}$ e T_{ref} são a temperatura da água e a temperatura de referência da viscosidade do óleo, respectivamente. A constante C_{vt} equivale a 5000 K^{-1} (LEHR, 2001).

Ao longo da simulação, a viscosidade será afetada pelos processos de evaporação e de emulsificação. A variação com a evaporação foi proposta em Mackay *et al.* (1980), enquanto a variação com o processo de emulsificação vem da equação de Mooney (1951).

$$v = v_0 \exp \left(C_{ve} f_{evap} + \frac{C_{vem1} Y}{1 - C_{vem2} Y} \right) \quad (8.39)$$

onde f_{evap} é a fração de óleo evaporada da macha. A constante C_{ve} equivale a 5 (ADIOS), a constante C_{vem1} equivale a 2,5 (LEHR, 2001) e C_{vem2} é dado por:

$$C_{vem2} = \frac{0.65 d_{min}}{d_w} \quad (8.40)$$

onde d_{min} foi avaliado em 1 μm (MACKAY *et al.*, 1981) e d_w é o diâmetro médio das gotículas de água.

8.2.1.2.8. Remoção de partículas sem massa

O modelo faz a remoção de partículas que já estejam sem massa de óleo devido aos processos de intemperismo e/ou recolhimento/dispersão.

O sistema trabalha com um limiar percentual para decidir se a partícula já pode ser considerada como “sem massa de óleo”, do contrário é possível que a partícula nunca alcance de fato o valor zero devido a precisão numérica. Foram estabelecidos dois critérios que devem ser igualmente satisfeitos para a remoção da partícula:

- 1) Seu volume atingiu um valor menor que 1% do seu volume inicial;
- 2) Seu volume representa menos que 0,001 m^3 de óleo.

8.2.1.3. Ações de Contingência

A Lei Federal Nº 9.966 de 2000 traz em seus artigos 5º, 7º e 8º a obrigatoriedade de plano de emergência para portos organizados, instalações portuárias, plataformas e instalações de apoio os quais serão submetidos à aprovação do órgão ambiental competente, além de dispor dos meios adequados para o combate da poluição.

Atualmente, a Resolução CONAMA Nº 398 de 2008, que revogou a Resolução CONAMA Nº 293 de 2001, estabelece o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual (PEI) para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional. Embora esta resolução abranja o uso de diferentes estratégias de resposta, grande ênfase é dada à contenção e recolhimento, para a qual são fornecidas precisas orientações de dimensionamento (SIQUEIRA, 2015).

Assim sendo, a resolução institui que o PEI deve englobar informações relacionadas à identificação da instalação, cenários acidentais, sistema de alerta e comunicação do incidente, equipamentos, como barreiras de contenção, e procedimentos operacionais de resposta, dentre outros (SIQUEIRA, 2015).

Nesse item são discutidos, primeiramente, aspectos práticos sobre o funcionamento de ações de contingência para casos de vazamento de óleo no mar, abordando as barreiras de contenção, *skimmers* e o uso de dispersantes químicos. Em seguida, são apresentados os algoritmos e métodos com os quais essas ações foram implementadas na ferramenta de deriva de óleo.

8.2.1.3.1. Aspectos Fundamentais

8.2.1.3.1.1. Barreiras de Contenção

De acordo com Siqueira (2015), a estratégia de contenção e recolhimento representa aquela mais frequentemente empregada no Brasil para combate a derramamentos de óleo no mar, uma vez que uma das poucas técnicas conhecidas que efetivamente remove o óleo do meio ambiente. A técnica consiste no uso de barreiras de contenção para concentrar o óleo derramado, seguida do emprego de equipamentos recolhedores (*skimmers*) para remover o óleo presente na camada superficial da coluna d'água (SIQUEIRA, 2015). Assim, o arranjo mais comumente empregado em ações de contingência é o uso de duas embarcações, acompanhado de um carretel de barreira de contenção e um *skimmer*.

Nesse arranjo, é estabelecida primeiramente uma formação em “U” a fim de conter a mancha e concentrá-la até que se obtenha espessura de óleo suficiente para um recolhimento eficiente. Em seguida, uma das embarcações avança em relação à posição da outra, de modo a caracterizar uma formação em “J” para que a embarcação mais próxima da mancha de óleo posicione o *skimmer* na região de maior espessura (Figura 8-4).

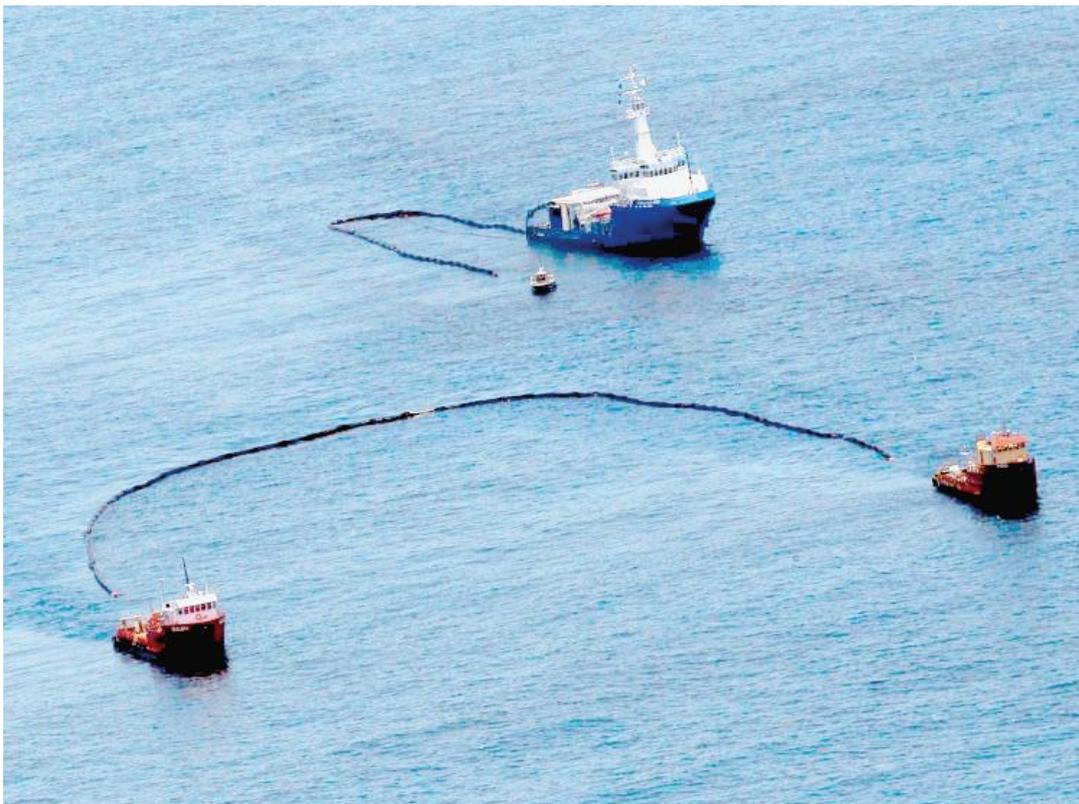


Figura 8-4: Formações em J (parte superior) e U (parte inferior). Exemplo de tipo de barreira de contenção. Fonte: Mas & Kitts (2014).

É válido ressaltar que operações de contenção e recolhimento estão relacionadas às condições ambientais (Figura 8-5). A depender das condições de corrente e vento, há perda de eficiência da estratégia de resposta, além dos riscos operacionais (SIQUEIRA, 2015).

De acordo com Siqueira (2015), as diferenças entre os diversos tipos de barreiras de contenção ocorrem através de variações dos parâmetros borda livre, calado, flutuabilidade e tensão limite. Quando os valores desses parâmetros são baixos, as barreiras são indicadas para região costeira, enquanto valores mais elevados indicam barreiras para região oceânica.



Figura 8-5: Exemplo de tipo de barreira de contenção. Fonte: Muttin (2015).

A geometria e posicionamento das formações de contenção e recolhimento representam aspectos importantes no sucesso das operações. Em situações reais de resposta, tais aspectos são determinados em função da localização da mancha e do seu estado de espalhamento (SIQUEIRA, 2015). Normalmente as barreiras são dispostas nas regiões de maior volume do óleo determinado pela observação visual.

Dentre as diferentes características da geometria estabelecida (J ou U), destaca-se a abertura da formação (*swath* em inglês) em função da sua relação com a quantidade de óleo que é interceptada pelas barreiras (SIQUEIRA, 2015). Este parâmetro é determinado em função do comprimento de barreira sendo utilizada e da distância estabelecida entre as embarcações envolvidas no reboque da mesma.

8.2.1.3.1.2. Skimmers

Segundo Siqueira (2015), dentre os diferentes tipos de recolhedores (*skimmers*), a composição básica desse equipamento é uma cabeça recolhedora e um sistema de transferência de fluido recolhido. Os principais modelos existentes no mercado são do tipo vertedouro e oleofílico.

O funcionamento dos recolhedores do tipo vertedouro (Figura 8-6 – à esquerda) se dá através do uso da gravidade para drenar o óleo da camada superficial da água. Desse modo, o equipamento é posicionado em meio à mancha, sendo a borda do vertedouro mantida na altura da linha d'água através de flutuadores, permitindo o escoamento do óleo para o interior do recolhedor (SIQUEIRA, 2015). As vantagens desse tipo de *skimmer* é trabalhar em um amplo espectro de viscosidades de óleo, opera com altas taxas de recolhimento e serem produzidos em diferentes tamanhos.

Já os recolhedores oleofílicos (Figura 8-6 – à direita) funcionam através da utilização de materiais específicos que possuem maior afinidade por óleo do que por água, disponibilizados na forma de esfregões, cordas, escovas, discos e tambores. Uma vez aderido ao material oleofílico pelo contato direto com a mancha, o óleo é raspado/retirado e enviado ao sistema de transferência (SIQUEIRA, 2015). As principais vantagens desses equipamentos consistem na alta eficiência de recolhimento obtida, porém com baixas vazões de recolhimento e a pequena abrangência de viscosidade de óleo.



Figura 8-6: Exemplos de tipos de recolhedores de óleo (*skimmers*). Tipo vertedouro à direita e tipo oleofílico à esquerda. Fonte: Siqueira (2015).

Para que ações de recolhimento sejam implementadas, é preciso que a espessura de óleo seja tal que permita eficiência na operação. Na Figura 8-7, é observado o limite mínimo para que sejam possíveis as operações de recolhimento (*mechanical cleanup*), além de outras práticas, como dispersante químico e queima *in-situ*.

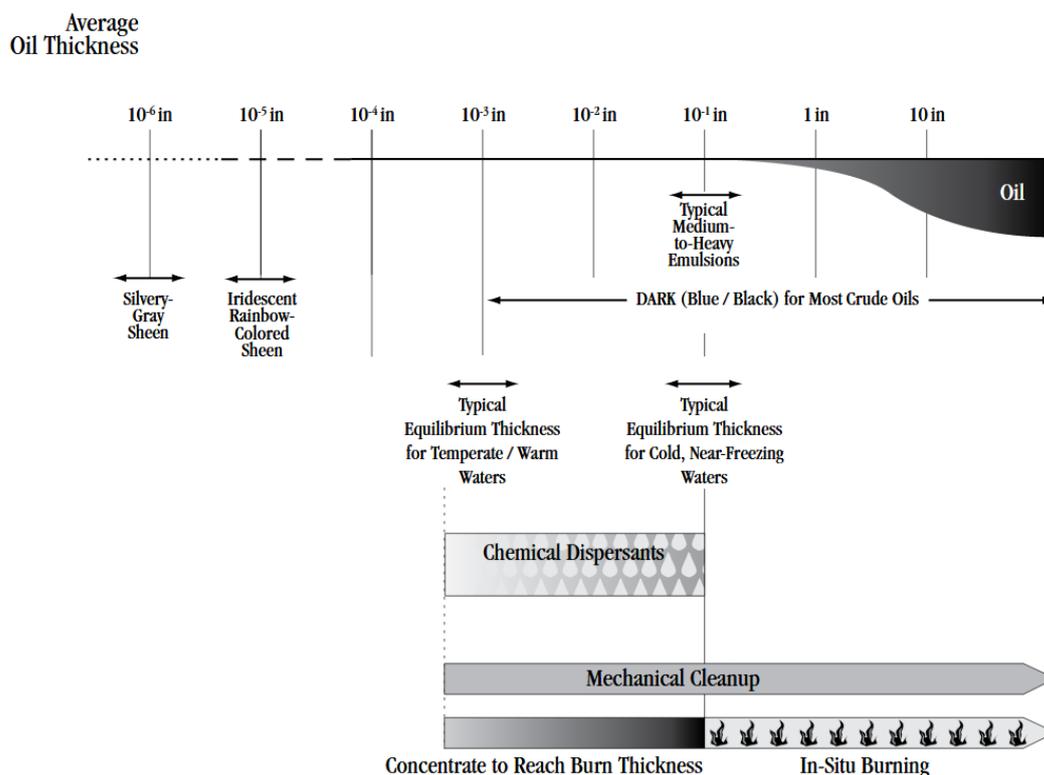


Figura 8-7: Espessuras limite do óleo em função de diferentes estratégias de resposta. Fonte: API/NOAA/USCG/EPA, 2013, adaptado de Allen & Dale, 1996.

A vazão e a eficiência de recolhimento representam parâmetros de extrema significância em operações de recolhimento, estando ambos diretamente associados ao funcionamento do *skimmer* e conseqüentemente com a capacidade de remoção de óleo promovida pelo mesmo (SIQUEIRA, 2015). A vazão de recolhimento reflete a taxa com a qual o efluente oleoso é bombeado pelo recolhedor do meio aquático para as estruturas de armazenamento, enquanto a eficiência de recolhimento representa a razão entre o óleo e a totalidade dos efluentes recolhidos.

A seguir (Figura 8-8 e Figura 8-9) são apresentadas, de forma resumida, as variações de eficiência de recolhimento para diferentes tipos de recolhedores, em função das condições meteoceanográficas e do tipo/estado do óleo. Observa-se que a eficiência de recolhimento pode sofrer grandes variações diante destas variáveis, assumindo valores entre 20% a 95% dependendo do tipo de recolhedor.

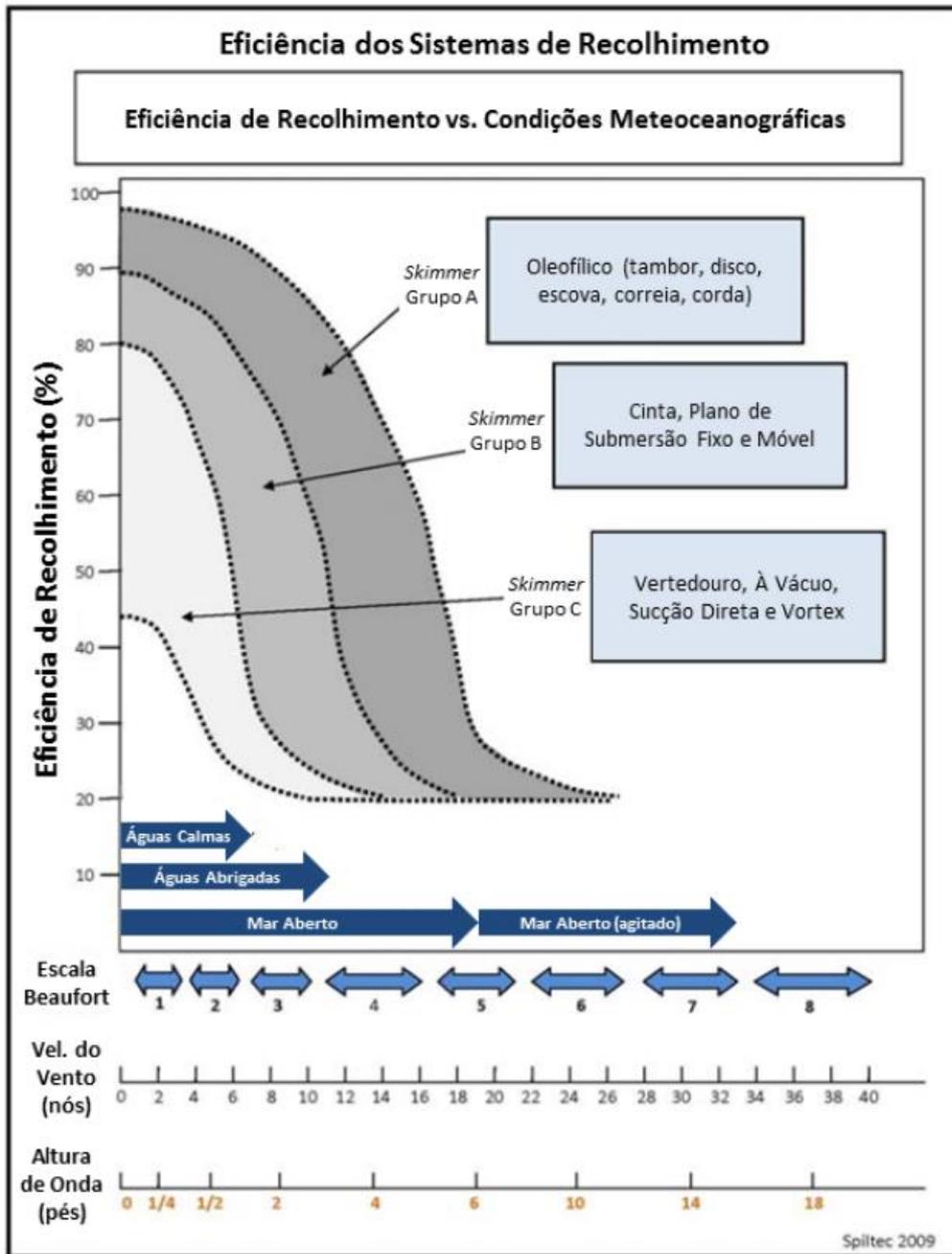


Figura 8-8: Variações de eficiência de recolhimento em função das condições meteoceanográficas. Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011).

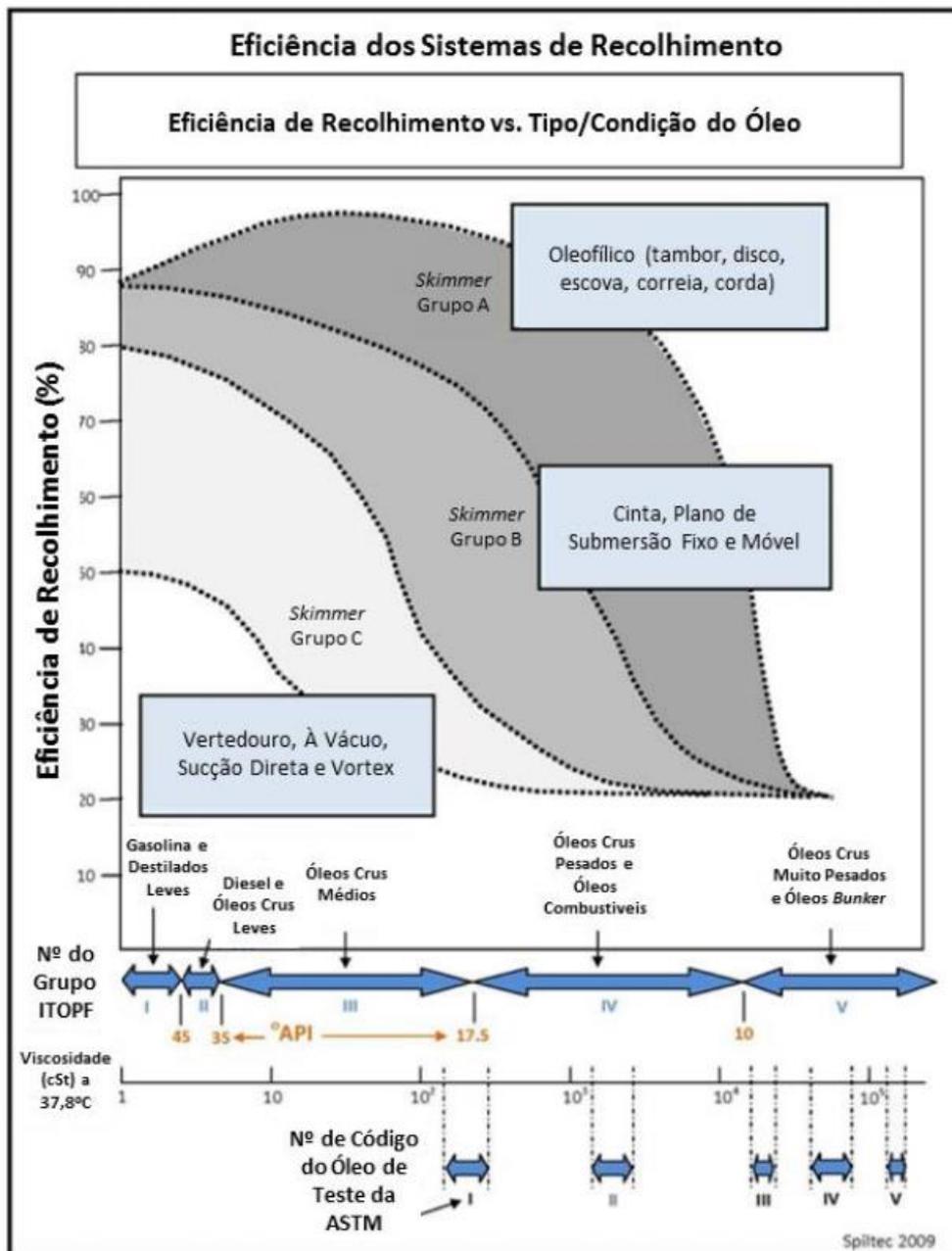


Figura 8-9: Variações de eficiência de recolhimento em função do tipo/condição do óleo. Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011).

ITOPF (2012 apud Siqueira, 2015) destaca outro fator relevante que deve ser levado em consideração a fim de caracterizar a real eficiência obtida por um sistema de recolhimento. Este parâmetro consiste na taxa de encontro (*encounter rate*), que é definido por ASTM F1780-97 (2002) como simplesmente a taxa (m³/h) em que o sistema encontra a mancha de óleo. Essa taxa é determinada em função da velocidade de avanço da configuração, sua abertura e a espessura local da mancha de óleo. A equação que descreve a taxa de encontro é dada por (IPIECA, 2012 apud SIQUEIRA, 2015):

$$EnR = v \times swath \times \mu \quad (8.41)$$

Sendo EnR a taxa de encontro, v a velocidade de avanço da configuração, $swath$ a abertura da formação de barreira e μ a espessura local da mancha de óleo.

8.2.1.3.1.3. Dispersantes Químicos

Uma das técnicas possíveis de serem utilizadas é o uso de dispersantes químicos, tanto em vazamentos de superfície quanto em vazamentos de sub-superfície. Como mostraremos, o principal efeito do uso de dispersantes químicos em vazamentos de óleo no mar é a intensificação do processo de dispersão natural do óleo na coluna d'água.

Os dispersantes são compostos de substâncias surfactantes dissolvidas em um ou mais solventes. As moléculas dos surfactantes possuem uma parte lipofílica (com afinidade pelo óleo) e outra parte hidrofílica (com afinidade pela água). Dessa forma, a parte hidrofílica do surfactante se liga às moléculas de água e a parte lipofílica se liga às moléculas de óleo, o que diminui a tensão interfacial água-óleo e permite a formação de pequenas gotículas de óleo que se dispersam na coluna d'água (LESSARD; DEMARCO, 2000) (Figura 8-10).

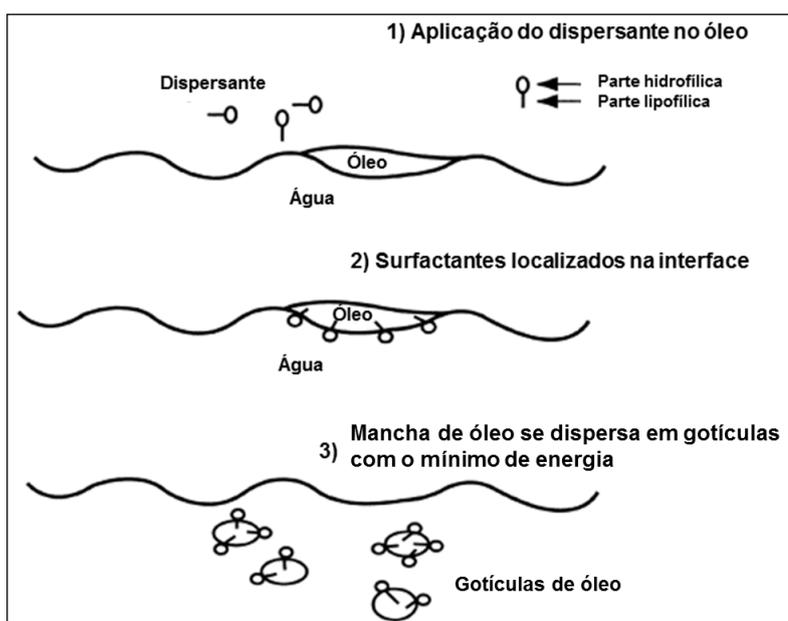


Figura 8-10: Como os dispersantes funcionam: 1) Óleo e água não se misturam; 2) Dispersantes são aplicados na superfície da camada de óleo e os surfactantes se localizam na interface óleo/água, onde eles atuam; 3) A tensão interfacial é reduzida e o óleo é disperso em pequenas gotículas. Fonte: Modificado de LESSARD; DEMARCO, 2000.

Alguns dos efeitos dos dispersantes químicos são (IPIECA, 2015a):

- Este processo aumenta a biodisponibilidade do óleo para as bactérias que degradam os hidrocarbonetos, aumentando assim a assimilação do óleo no ambiente;

- O seu uso minimiza danos em longo prazo, perturbações aos animais selvagens sensíveis, habitats costeiros, e recursos socioeconômicos que podem ocorrer se o dispersante não for usado e o óleo ou permanecer na superfície ou alcançar águas costeiras e a costa;
- A necessidade de uma potencial operação de limpeza de larga escala e prolongada na costa é reduzida;
- E evita a criação de grandes volumes de materiais de lixo comumente associados com operações de limpeza de linha de costa. Estes lixos geram grandes desafios ambientais durante manipulação, armazenamento e eliminação.

A dispersão do óleo na água do mar é resultado de múltiplos processos simultâneos e esses processos podem agir em conjunto ou contra o efeito um do outro.

O entranhamento inicial do óleo é uma etapa importante, sem o qual nenhuma dispersão pode ocorrer. É o processo no qual o óleo fica suspenso na coluna d'água pelo efeito das ondas que empurram localmente porções da mancha de óleo para baixo da superfície da água. Esse processo determina a quantidade de óleo disponível para outros processos como a dissolução dos componentes mais hidrofílicos. O entranhamento de óleos muito viscosos ou emulsificações resultam em formação de grandes placas, que ficam submersas temporariamente. Já óleos menos viscosos e, portanto, menos resistentes a deformação, são quebrados em gotículas menores pela turbulência e pelo cisalhamento do movimento das ondas (HELFRICH *et al* 2015).

No caso da aplicação dos dispersantes na mancha superficial, as gotículas formadas são misturadas ou distribuídas na camada de mistura, na qual um balanço existe entre a quebra e a coalescência das gotículas, que é a tendência do encontro entre gotículas e formação de gotículas maiores. A quebra e a coalescência das gotículas são o balanço entre as forças hidrodinâmicas externas deformando as gotículas e as forças internas em oposição, a primeira é determinada pela energia de mistura e a outra depende das características do óleo. A taxa de ocorrência desses dois processos determina a distribuição de tamanho das gotículas do óleo dispersado, e o tamanho influencia na sua flutuabilidade, como nos processos de dissolução e biodegradação (HELFRICH *et al* 2015). Em geral, dispersantes químicos diminuem as tensões interfaciais, o que permite e aumenta a quebra do óleo em gotículas menores, mas não impede a coalescência (STERLING *et al.*, 2004).

Quando suspensas as gotículas são transportadas pela turbulência, correntes locais e pela tendência a subir. A maioria dos tipos de óleo são menos densos do que a água do mar e, portanto, gotículas maiores tendem a subir para a superfície e as menores permanecem mais tempo em suspensão. Algumas gotículas são tão pequenas que são semi-estáveis e a turbulência local as mantém em suspensão.

O benefício da dispersão é baseado na mudança do transporte do óleo e na dissolução resultante. Aumentando o transporte vertical também altera o transporte do óleo na horizontal. O transporte vertical determina o tempo de residência das gotículas na coluna

d'água, por consequência o seu movimento horizontal diferencial da mancha em superfície. As correntes locais influenciam tanto as gotículas em suspensão quanto a mancha de óleo em superfície, o arrasto do vento que é a principal diferença no movimento entre esses dois. Portanto, a diferença do destino do óleo em suspensão para o óleo em superfície vai depender de quanto tempo a parcela de óleo em suspensão permanecer na coluna d'água, antes de ressuspender (HELFRICH *et al* 2015).

As gotículas que permanecem submersas por um período mais longo podem ressuspender fora da mancha de óleo que se moveu com o vento, formando um fino rastro da mancha. Além disso, elas podem ressuspender próximo à mancha e coalescer com ela, como também podem ressuspender por debaixo da mancha em superfície podendo aumentar a emulsificação, o que pode dificultar uma futura dispersão em função do aumento da viscosidade das emulsificações de óleo e água em comparação com apenas o óleo (HELFRICH *et al* 2015).

Quando as gotículas estão em suspensão na água outros processos acontecem, como a dissolução de componentes de óleo mais solúveis, interação das gotículas de óleo com o material particulado e biodegradação. Isso pode alterar as propriedades das gotículas de óleo, que podem afundar até o fundo marinho.

A dispersão química altera as propriedades do óleo afetando o comportamento deste em processos distintos. O efeito do dispersante depende da logística de resposta e do quanto de óleo é tratado, incorporação de dispersante na interface óleo-água e o efeito do dispersante nas propriedades do óleo.

A Figura 8-11 mostra um esquema de um modelo conceitual dos sub-processos envolvidos na dispersão do óleo na superfície do mar.

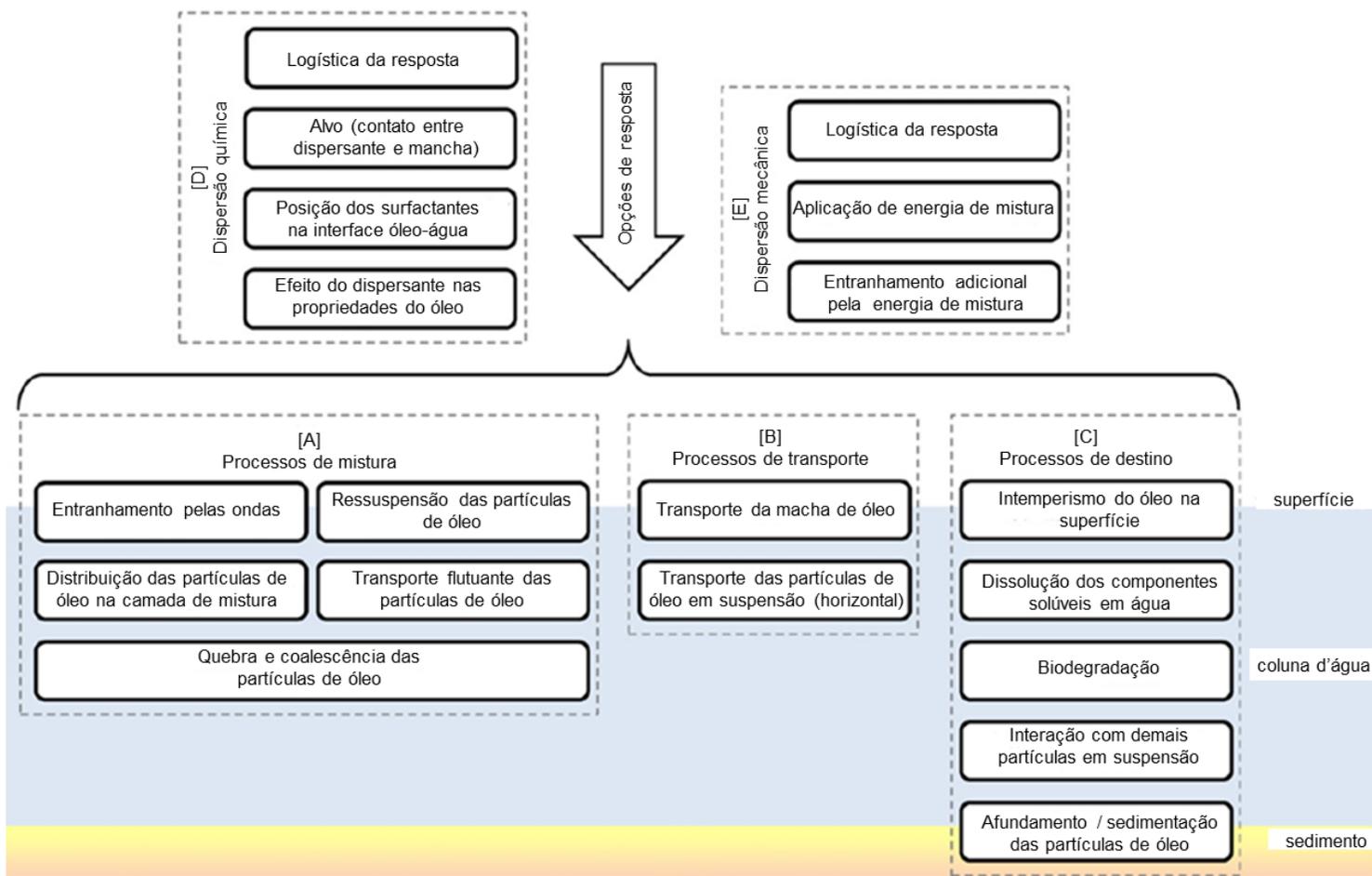


Figura 8-11: Esquema do modelo conceitual dos sub-processos envolvidos na dispersão do óleo na superfície do mar. Adaptado de Helfrich *et al.* (2015).

Contudo, transferir óleo da superfície para a coluna d'água em forma de pequenas gotículas de óleo pelo uso de dispersantes faz com que o óleo esteja biologicamente mais disponível para os organismos marinhos e seja eventualmente biodegradado pelos microrganismos que já estão presentes no mar. Alguns componentes do óleo são solúveis em água e potencialmente tóxicos aos organismos marinhos.

A magnitude de qualquer toxicidade observada vai depender da exposição (concentração e duração) dos organismos marinhos ao óleo disperso e aos componentes do óleo solúveis em água e pode variar de efeitos sub-letais (narcose temporária, alterações na reprodução ou alimentação) que normalmente são reversíveis, até letais para alguns indivíduos da população afetada. No entanto alguns desses componentes serão transferidos para a coluna d'água, com ou sem o uso de dispersantes (IPIECA, 2015a).

A situação mais favorável para a biodegradação é quando o óleo é disperso offshore. O processo de biodegradação para gotículas de óleo geralmente começa entre o 1 e 2 dias e é completado em poucas semanas (IPIECA, 2015a).

Alguns estudos (e.g. ALMEDA et al., 2014) demonstram que dispersantes químicos são tóxicos para organismos marinhos planctônicos e que o óleo dispersado quimicamente é mais tóxico do que o óleo cru. Portanto, a utilização dos dispersantes deve passar por avaliação comparativa entre os danos ambientais causados pela utilização dos dispersantes e os danos causados sem a utilização de dispersantes. Este tipo de estudo comparativo é amplamente utilizado em nível internacional utilizando o conceito de NEBA (*Net Environmental Benefit Analysis*, ver: BACA et al., 2005). NEBA é uma avaliação que permite que os envolvidos numa ação de resposta a derrames de óleo avaliem qual a ação de resposta resultará no menor impacto ambiental, admitindo que, uma vez que o óleo é derramado no mar, impactos negativos serão esperados, não importa qual ação se resposta seja empregada.

8.2.1.3.1.3.1. Uso de dispersantes em superfície

O uso de dispersantes na superfície do mar pode ser aplicado a partir de embarcações, helicópteros e aeronaves de asa fixa, e comparando com outras estratégias de resposta pode ser uma técnica mais rápida e eficiente para a remoção do óleo flutuante devido a diversos fatores (IPIECA, 2015a):

- A aplicação de dispersantes a partir de aeronave permite a dispersão do óleo flutuante presente em amplas áreas no mar em um tempo relativamente curto.
- A capacidade de aplicação aérea pode ser uma resposta relativamente rápida em localidades remotas.
- Dispersantes podem ser usados em condições de mar mais severas, quando é incompatível o uso efetivo de estratégias de contenção e recolhimento no mar.
- Proporciona uma exposição e risco de segurança reduzido para a equipe de resposta, uma vez que pode reduzir os vapores potencialmente nocivos nas proximidades de um vazamento, com benefício em especial para a equipe de resposta em atividades baseadas

em embarcações nas áreas próximas, assim como minimiza a exposição da equipe e da comunidade local ao óleo de maneira geral.

No entanto, existe um risco potencial do óleo dispersado deixar os organismos que habitam a camada mais superficial da coluna d'água expostos brevemente a uma nuvem difusa de gotículas de óleo dispersado, com componentes do óleo solúveis em água, em uma maior extensão do que se dispersantes não fossem usados. Essa exposição ao óleo disperso pode ter efeitos potencialmente tóxicos nos organismos marinhos.

E assim como para qualquer outra ação de resposta, existem capacidades e limitações do uso de dispersantes em superfície, e estas abrangem diversos aspectos (IPIECA, 2015a):

Profundidade do local: O uso de dispersante deve ocorrer em águas mais profundas que 10 ou 20 metros uma vez que o potencial de benefícios é maior e o potencial de dano é menor, devido à rápida diluição do óleo dispersado em um grande volume de água. Quando o vazamento de óleo ocorre em águas menores que 10 ou 20 metros de profundidade, deve-se examinar a adequação do uso de dispersante de forma mais aprofundada.

Taxa de encontro: A taxa de encontro, que é a taxa em que o óleo pode ser tratado por uma técnica de resposta, do uso de dispersantes é de longe a maior de todas as técnicas de resposta. Aplicações a partir de aeronaves de asas fixas podem dar altas taxas de encontro, assim como a resposta e o tempo de deslocamento são geralmente mais rápidos que os de embarcações. No entanto em alguns cenários, embarcações podem permanecer no local por mais tempo e ter um carregamento maior de dispersante.

Estado ambiental (condições de vento e mar): Uma rápida dispersão do óleo tratado com dispersante começa com uma velocidade de vento de aproximadamente 7 nós (3 m/s) com ondas de altura de 0,2 a 0,3 metros. No entanto, dispersantes podem ser aplicados em óleo flutuante em condições de calmaria, e a dispersão irá começar quando as condições de mar e vento necessárias, citadas anteriormente, ocorrerem. Intensidade de ventos acima de 35 nós (18 m/s) e altura de ondas de 5 metros são geralmente os limites máximos para aplicação de dispersantes a partir de aeronaves. Em condições de muito vento, acertar a aplicação do dispersante no alvo se torna um desafio, e o óleo flutuante pode ser encoberto e submerso em situações de mar grosso. Por essas mesmas razões, as condições limitantes para a aplicação de dispersantes a partir de embarcações serão menores em condições de muito vento. Condição de mar grosso pode ser um limitante para qualquer ação de resposta de interface ar/mar. No entanto, essas condições podem causar uma extensa dispersão natural para óleos leves.

Salinidade: A maioria dos dispersantes disponíveis comercialmente é formulada para serem mais efetivos em águas com salinidade entre 30 e 35 psu. A eficiência diminui em água salobra (salinidades entre 5 a 10 psu) e pode ser bem baixa em água doce. Apesar de dispersantes para águas doces serem disponíveis, a dispersão do óleo nessas águas não é recomendada na maioria das circunstâncias porque há volume de água insuficiente em rios e em lagos que permita a diluição do óleo dispersado em baixas concentrações.

Ponto de fluidez do óleo: Essa informação é importante para métodos de recuperação mecânica e para métodos de limpeza de costa, mas também indica se provavelmente o uso de dispersante terá sucesso, uma vez que ele não pode penetrar em um óleo semi-sólido e será lavado para fora da mancha.

Viscosidade do óleo: A viscosidade do óleo muda com o tempo e com o intemperismo através da evaporação e emulsificação, influenciando na eficiência do dispersante. À medida que a viscosidade aumenta, a provável eficiência do uso de dispersante diminui pela redução da habilidade de penetrar no óleo para chegar à interface óleo-água, que é onde o dispersante trabalha para quebrar o óleo em pequenas gotículas. Isso é geralmente conhecido como janela de oportunidade para o uso de dispersantes, que é dependente da temperatura. Na Tabela 8-1 são apresentadas as faixas de viscosidade comparadas com a eficiência dos dispersantes (IPIECA, 2014).

Tabela 8-1: Intervalos geralmente aceitos do efeito da viscosidade do óleo sobre a eficácia do dispersante.

| Tipo de óleo | Eficácia do Dispersante |
|--|---|
| Combustíveis destilados (gasolina, querosene, óleo diesel) | O uso de dispersante não é aconselhável. Esses óleos vão evaporar e dispersar naturalmente e se espalhar rapidamente em camadas finas na maioria das condições. |
| Óleos com viscosidade até 5.000 cSt | O uso de dispersantes provavelmente será eficaz. |
| Óleos com viscosidade entre 5.000 e 10.000 cSt | O uso de dispersantes pode ser eficaz. |
| Óleos com viscosidade acima de 10.000 cSt | O uso de dispersantes é provavelmente ineficaz. |

Em relação à aplicação dos dispersantes, aspectos como tamanho das gotículas de dispersantes, taxa de aplicação e velocidade dos meios de transportes devem ser considerados (IPIECA, 2015a):

Tamanho das gotículas: o sistema de aplicação deve depositar gotículas de dispersante com de diâmetro de 0,4 a 0,7 mm, semelhante à chuva leve. Gotículas de dispersantes menores são suscetíveis a serem sopradas para fora da mancha de óleo pelo vento e gotículas maiores que 1 mm de diâmetro podem passar por camadas de óleo finas e serem perdidas na água.

Taxa de aplicação: a recomendação para dispersante em superfície é usualmente 1 parte de dispersante para 20 ou 25 partes de óleo, mas pode ser difícil de ser alcançada na prática, uma vez que não é possível ter precisamente a espessura do óleo flutuante. Uma espessura média para a camada de óleo geralmente assumida é de 0,1 mm, no entanto esta pode variar muito (de menos de 0,0001 mm até mais que 1 mm) em pequenas distâncias. A aplicação de doses superestimadas e subestimadas em algumas regiões é inevitável.

Velocidade dos meios de transportes: esta terá um impacto direto na concentração do dispersante aplicado no óleo. A velocidade ótima para uma embarcação vai depender de uma série de fatores, mas geralmente fica no intervalo entre 1 e 10 nós, e uma taxa típica de aplicação é de 5-20m³/km². Já a

aplicação de dispersante a partir de aeronaves de asas fixas, deve acontecer em baixas altitudes para assegurar a aplicação na mancha de óleo. No entanto, a velocidade deve ser baixa condizente com a segurança de voo.

8.2.1.3.1.3.2. Legislação brasileira para o uso de dispersantes

As diretrizes brasileiras para o uso de dispersantes químicos em incidentes de poluição por óleo no mar estão expostas na Resolução CONAMA Nº 472/2015, de 27 de novembro de 2015.

De acordo com essa resolução, a aplicação de dispersantes químicos em ações de resposta a incidentes de poluição por óleo no mar deverá ser previamente comunicada ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis - IBAMA e somente poderá ser utilizada quando a não intervenção ou a aplicação de técnicas mecânicas de contenção, recolhimento e dispersão se mostrarem não efetivas, inaplicáveis ou insuficientes, ou então nas seguintes hipóteses:

I - situações nas quais a mancha de óleo estiver se deslocando ou puder se deslocar, conforme indicação meteorológica ou dados pretéritos locais, para áreas designadas como ambientalmente sensíveis;

II - incidentes com vazamento contínuo ou volumes relevantes, quando as demais técnicas de resposta se mostrarem não efetivas ou insuficientes;

III - aplicação subaquática somente para possibilitar os procedimentos necessários para a interrupção de vazamento de um poço de petróleo em descontrolado;

IV - óleo emulsionado, ou intemperizado quando o dispersante químico se mostrar efetivo, com base em testes de campo.

Existem também algumas áreas com restrição ao uso de dispersantes químicos, que são áreas que apresentam distâncias inferiores a 2.000 m da costa, inclusive de ilhas, de unidades de conservação marinhas, de recifes de corais, de bancos de algas ou de baixios expostos pela maré ou áreas com profundidades menores que 20 metros.

Uma requisição também é que a aplicação de dispersantes químicos em superfície deve ser acompanhada de monitoramento aéreo e de monitoramento marítimo, visando maximizar a efetividade de seu emprego e evitar a contaminação de áreas não afetadas pelo óleo. Esse monitoramento deverá, simultaneamente, identificar posição, extensão, largura e aspecto das manchas, registrar os dados de distância da costa, informando sobre as condições meteorológicas e oceanográficas; e verificar a tendência do deslocamento das manchas visando orientar a aplicação dos dispersantes químicos.

8.2.1.3.2. Implementação

8.2.1.3.2.1. Barreiras de Contenção

O algoritmo utilizado para a inserção de barreiras de contenção no modelo tem base em equacionamentos de álgebra linear para identificação do cruzamento de retas, usando as definições abaixo:

Segmento de Reta

Um segmento delimitado pelos pontos P e Q (Figura 8-12), define uma reta a partir de um de seus pontos e do vetor \underline{PQ} .

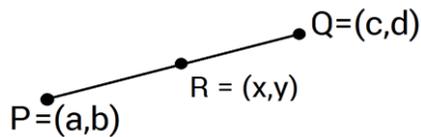


Figura 8-12: Segmento de reta delimitado pelos pontos P e Q.

Qualquer ponto R, cuja direção do vetor \underline{PR} seja a mesma de \underline{PQ} , está contido nessa reta. Logo, a reta pode ser definida a partir de uma equação paramétrica, com t como parâmetro:

$$R = P + t * PQ \quad (8.42)$$

Ou seja, os pontos x e y que definem R, são dados por:

$$x = a + t * (c - a) ; y = b + t * (d - b) \quad (8.43)$$

Ressalta-se que, qualquer ponto dessa reta que esteja dentro do segmento delimitado pelos pontos P e Q, possui um parâmetro t, tal que: $0 \leq t \leq 1$.

Intersecção de Retas

Duas retas (r1 e r2) vão se intersectar se possuírem um ponto em comum. Para isso, fazem-se necessárias as seguintes condições:

$$x1(t) = x2(t) ; y1(t) = y2(t) \quad (8.44)$$

Esse sistema de equações terá:

- a) Nenhuma solução se as retas são paralelas e não coincidentes;
- b) Infinitas soluções se as retas são paralelas e coincidentes.
- c) Solução única se as retas são concorrentes.

Aplicação no Modelo Lagrangiano

Para a aplicação desse equacionamento no modelo lagrangiano, a cada passo de tempo, são calculados os segmentos de reta definidos pela posição anterior e atual de cada partícula ($r1$), com os segmentos definidos pelas barreiras presentes na modelagem ($r2$).

Verifica-se, então, a intersecção entre esses segmentos. Para os casos “a” e “b” citados no item anterior, a hipótese de cruzamento é descartada automaticamente. No caso de um resultado do tipo “c”, verifica-se se o ponto de intersecção entre as duas retas se encontra dentro de ambos os segmentos, o que confirmaria que a partícula passou por dentro da barreira. Para isso, os parâmetros t associados a ambas as retas de estar contido nos respectivos segmentos, ou seja:

$$0 \leq t1 \leq 1 ; 0 \leq t2 \leq 1.$$

A Figura 8-13 apresenta um diagrama exemplificando essa nova metodologia, onde os pontos pretos representam coordenadas fictícias de uma partícula, a linha vermelha uma barreira de contenção, e os segmentos tracejados a trajetória desenvolvida. Os segmentos pretos representam trechos sem cruzamento de barreiras e os segmentos azuis onde foram identificados cruzamentos com o novo algoritmo.

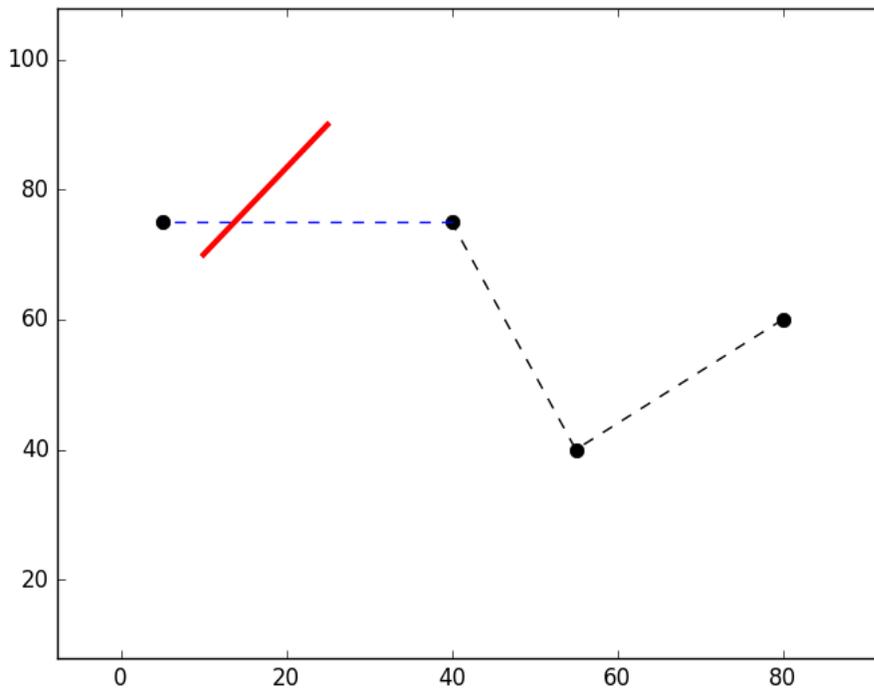


Figura 8-13: Exemplo do algoritmo de cruzamento de barreiras. O segmento vermelho representa a barreira de contenção, os segmentos pretos correspondem aos trechos onde o algoritmo não identificou cruzamento e, por

fim, o segmento azul corresponde a um trecho onde o algoritmo detectou que houve o cruzamento de uma barreira.

O sistema conta com 2 opções de barreiras, a do tipo “Absorvente”, que retêm definitivamente as partículas após o contato, ou do tipo “Não-absorvente”, que apenas rebate a partícula, sem a reter. No modelo, é necessário a introdução de 3 retas (Figura 8-14) para a representação de uma barreira de contenção, seguindo a metodologia discutida em Siqueira (2015). Essa metodologia serve a criar uma representação numérica das formações em “U” ou “J” apresentadas no item 8.2.1.3.1.2.

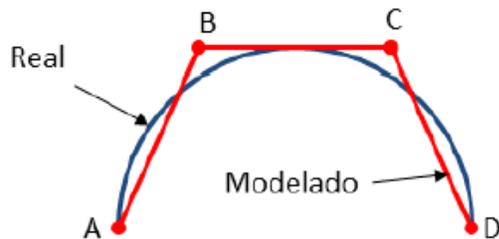


Figura 8-14: Representação numérica da barreira de contenção utilizando 3 retas. Adaptado de Siqueira (2015).

8.2.1.3.2.2. Skimmers

A área de coleta do *skimmer* é vinculada ao posicionamento das barreiras de contenção, como ocorre de fato na prática. Dentro da formação, a quantidade de óleo disponível para retirada pelo *skimmer* corresponde ao volume total de todas as partículas que estejam dentro da área interna à barreira delimitada pela mediana das linhas laterais, conforme Figura 8-15. A distância conectando as medianas dos dois lados da barreira representa a chamada “abertura da formação” (do inglês, *swath*), que será utilizada também nos cálculos do *skimmer*.

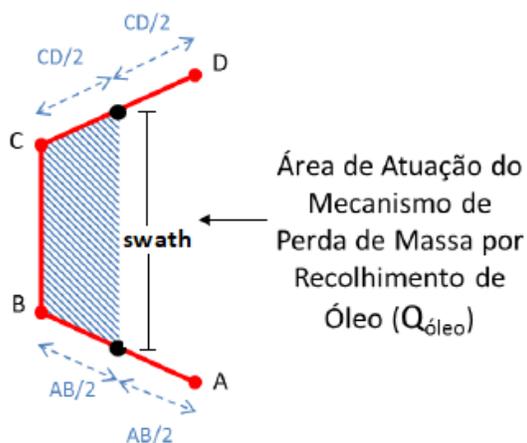


Figura 8-15: Representação numérica da barreira de contenção com a área de coleta do *skimmer*. Adaptado de Siqueira (2015).

É importante ressaltar que o *skimmer* só iniciará sua operação após sua chegada na área da barreira, calculada a partir de sua velocidade de cruzeiro e da distância entre sua coordenada inicial e a barreira.

A taxa de recolhimento de óleo (*TRO*) é dada por:

$$TRO = EnR * TE \quad (8.45)$$

onde *TE* é a eficiência de transferência e *EnR* é a Taxa de Encontro (*Encounter Rate*) de óleo pela configuração dada por:

$$EnR = Th * w * vo \quad (8.46)$$

onde *Th* é a espessura média do óleo que será coletado, *w* a abertura da formação (*swath*) e *vo* a velocidade de avanço da configuração.

A taxa de recolhimento de fluido total (*TRFT*) equivale a:

$$TRFT = TRO * RE \quad (8.47)$$

onde *RE* é a eficiência de recolhimento. Se a *TRFT* for superior a bomba nominal do *skimmer* (*BN*), o *TRO* é recalculado usando a bomba nominal:

$$TRO = BN * RE \quad (8.48)$$

Para verificar se a capacidade de armazenamento já foi atingida, a cada passo de tempo, o volume coletado de fluido total vai sendo armazenado ao longo da simulação. Quando a capacidade for atingida, o equipamento encerra sua operação.

As duas eficiências citadas são definidas por:

a) Eficiência de Transferência (*Throughput Efficiency*): Essa eficiência retrata o volume de óleo que é efetivamente recolhido pela embarcação em relação ao óleo que é encontrado.

b) Eficiência de Recolhimento (*Recovery Efficiency*): Essa eficiência retrata o volume de óleo que é efetivamente recolhido em relação ao volume total de fluido que é recolhido. Esse parâmetro é função tanto do estado do mar (ventos/ondas) quanto da viscosidade do óleo a ser coletado e varia para cada tipo de equipamento. A Figura 8-16 e a Figura 8-17 apresentam essa eficiência em função de cada parâmetro citado. Após verificar o valor da eficiência de recolhimento em cada curva (estado do mar e viscosidade), o menor valor é utilizado para fins de cálculos.

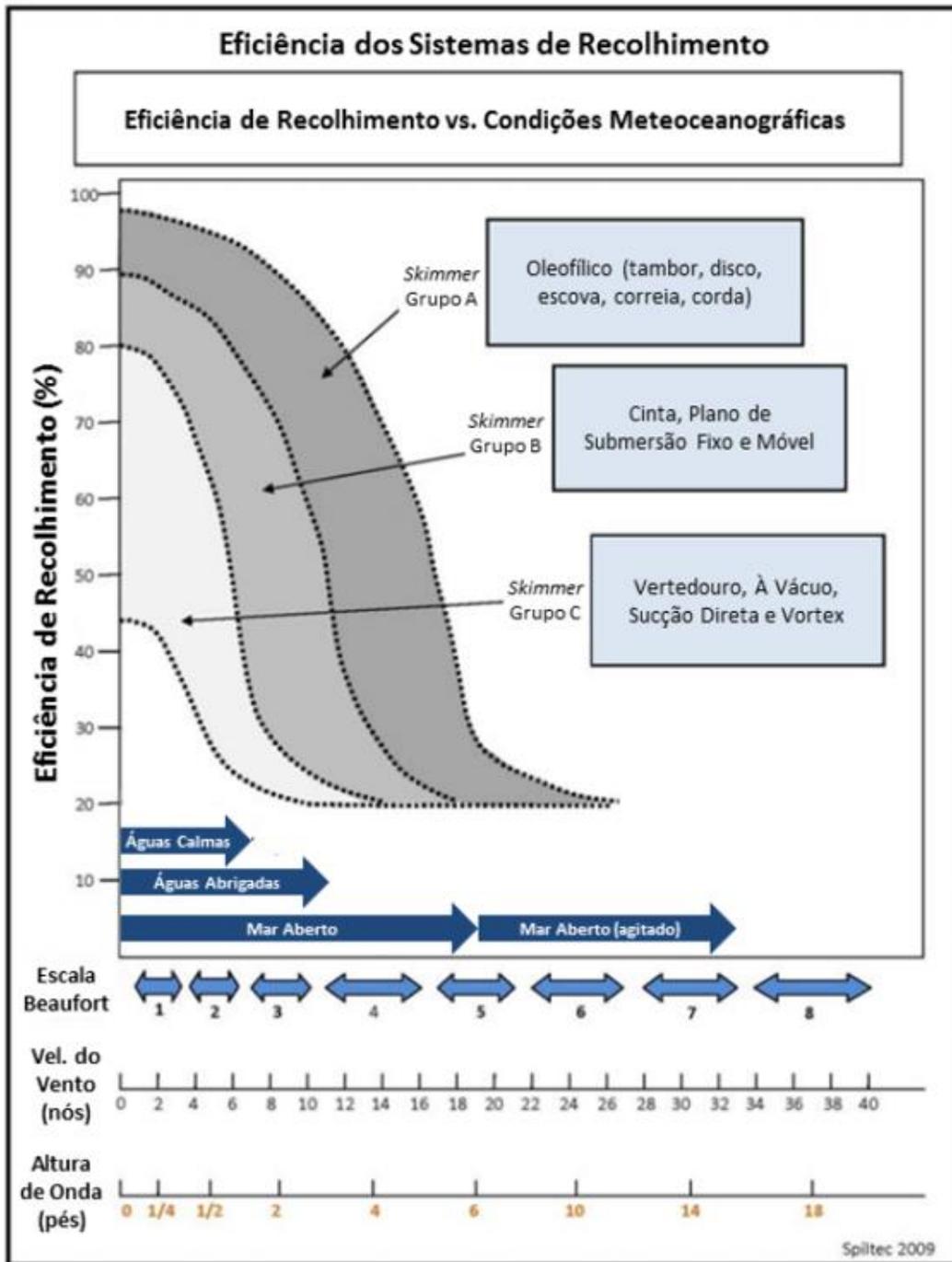


Figura 8-16: Eficiência de Recolhimento em função do estado do mar (ventos/ondas). Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011).

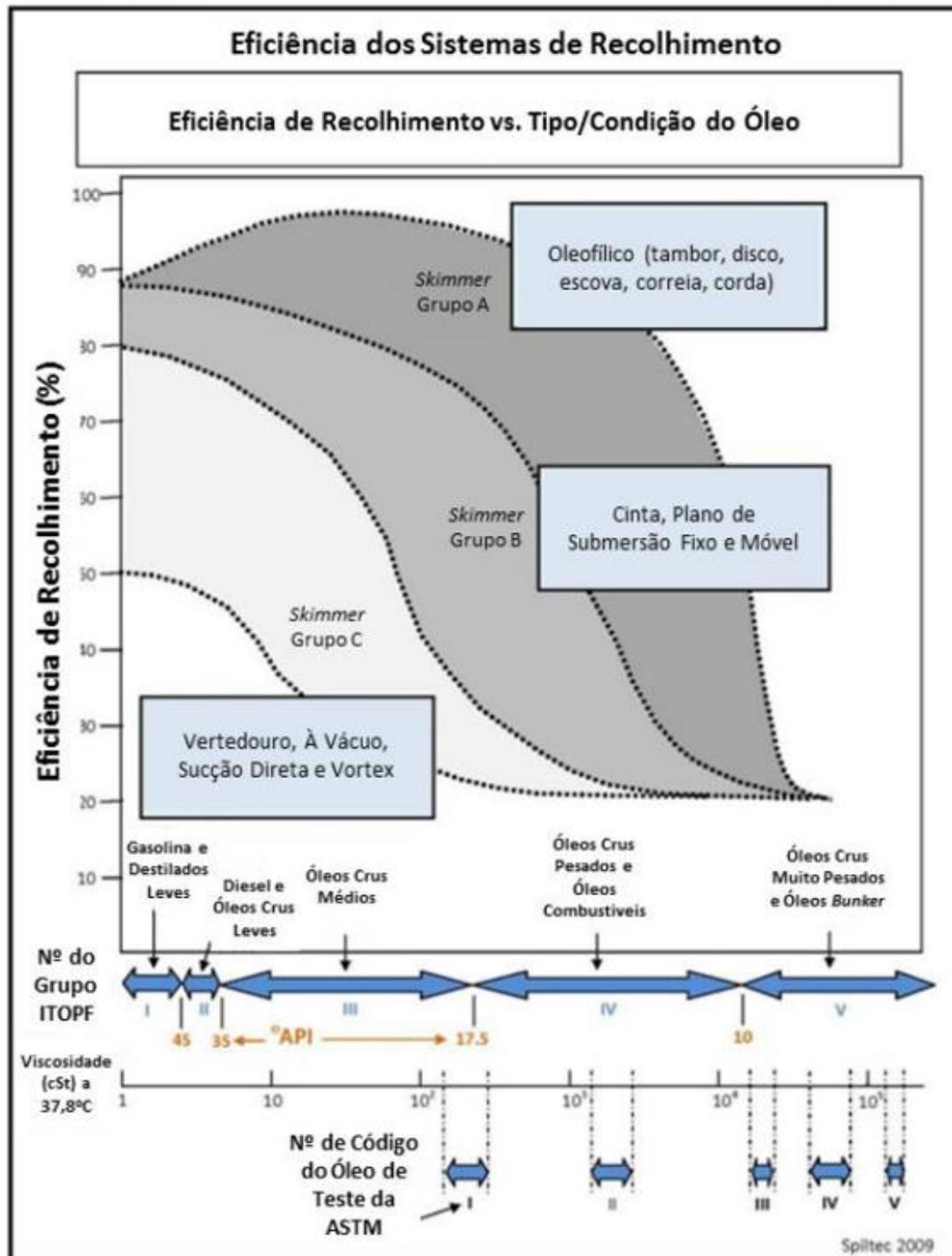


Figura 8-17: Eficiência de Recolhimento em função da viscosidade cinemática (cSt). Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011).

Por fim, foram introduzidas 3 restrições operacionais:

- a) Espessura mínima:** No caso de uma espessura média de óleo inferior a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 0,02 mm, retirado de Allen & Dale (1996).
- b) Velocidade do vento:** No caso de ventos superiores a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 19 nós.
- c) Viscosidade cinemática:** Se a viscosidade cinemática média do óleo a ser recolhido for superior a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 50.000 cSt.

Os valores das duas últimas restrições são referentes aos limites das curvas de eficiência de recolhimento apresentadas anteriormente.

8.2.1.3.2.3. Dispersantes Químicos

Para a aplicação de dispersantes químicos, o modelo define como premissa de que o composto será lançado ao longo de toda a extensão da mancha, com exceção de possíveis partes que tenham chegado à costa.

A unidade de aplicação inicia a operação após sua chegada na região da mancha, calculada a partir de sua velocidade de cruzeiro e da distância entre sua coordenada inicial e a mancha de óleo. O primeiro parâmetro a ser calculado é a Dosagem Requerida (*DR*) para a dispersão do óleo, dado por:

$$DR = 2,717 \times 10^4 \cdot DOR \cdot Th \text{ [gal/acre]} \quad (8.49)$$

onde *Th* é a espessura média da mancha de óleo (polegadas) e *DOR* é a taxa dispersante-óleo. Em seguida, obtêm-se a Taxa de Cobertura de Área (*TCA*):

$$TCA = \frac{v_o \cdot w}{430} \text{ [acres/min]} \quad (8.50)$$

onde *w* é o comprimento de varredura (pés) e *v_o* a velocidade de avanço da configuração (nós).

Com isso é calculada a Taxa de Bombeamento Desejada (*TBS*) para a realização da operação, através de:

$$TBS = DR \cdot TCA \text{ [gal/min]} \quad (8.51)$$

Esse valor é comparado aos limites operacionais mínimo e máximo de forma a tornar a operação praticável pelo equipamento. No caso de uma *TBS* maior que o valor máximo de bombeamento (*BMáx*), a *TBS* é substituída por *BMáx*. O mesmo vale para valores inferiores ao mínimo de bombeamento (*BMín*), onde a *TBS* é substituída por *BMín*.

O modelo então calcula o tempo necessário para a aplicação (*TA*), dado por:

$$TA = \frac{Cd}{TBS} \text{ [min]} \quad (8.52)$$

onde *Cd* é a carga de dispersante disponível (gal).

Por fim, o volume de óleo efetivamente tratado (*VolTra*) por leva de aplicação equivale a:

$$VolTra = \frac{DE \cdot Cd}{DOR} [gal] \quad (8.53)$$

onde *DE* corresponde a eficiência do dispersante, definida por:

Eficiência do Dispersante (*Dispersant Efficiency*): Essa eficiência reflete o volume de óleo que é efetivamente disperso após a aplicação em relação ao volume total de fluido que foi submetido ao dispersante. Esse parâmetro é função tanto do estado do mar (ventos/ondas) quanto da viscosidade do óleo a ser disperso. A Figura 8-18 e Figura 8-19 apresentam essa eficiência em função de cada parâmetro citado. Após verificar o valor da eficiência de recolhimento em cada curva (estado do mar e viscosidade), o menor valor é utilizado para fins de cálculos.

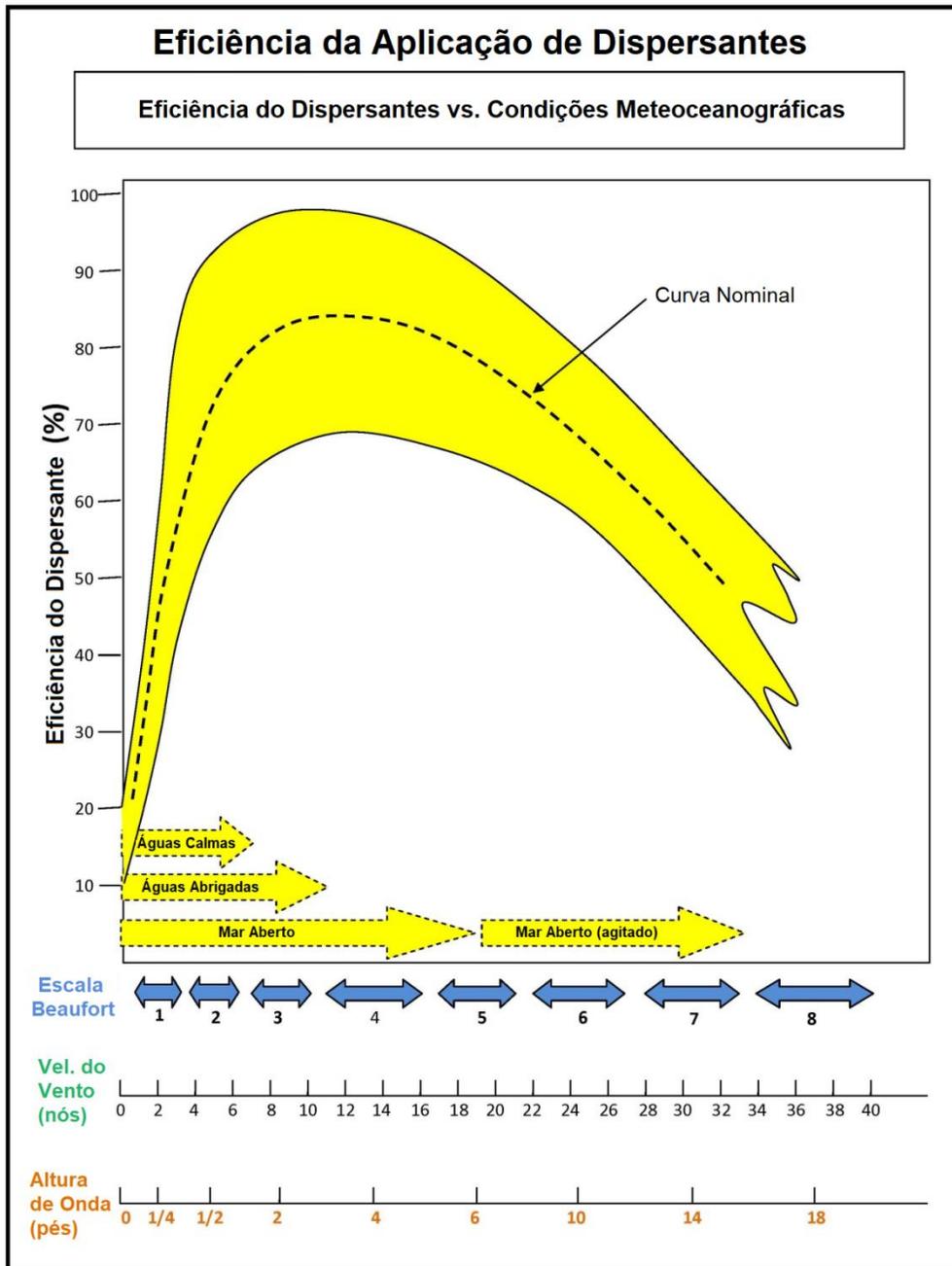


Figura 8-18: Eficiência do Dispersante em função do estado do mar (ventos/ondas). Adaptado de Genwest Systems (2011).

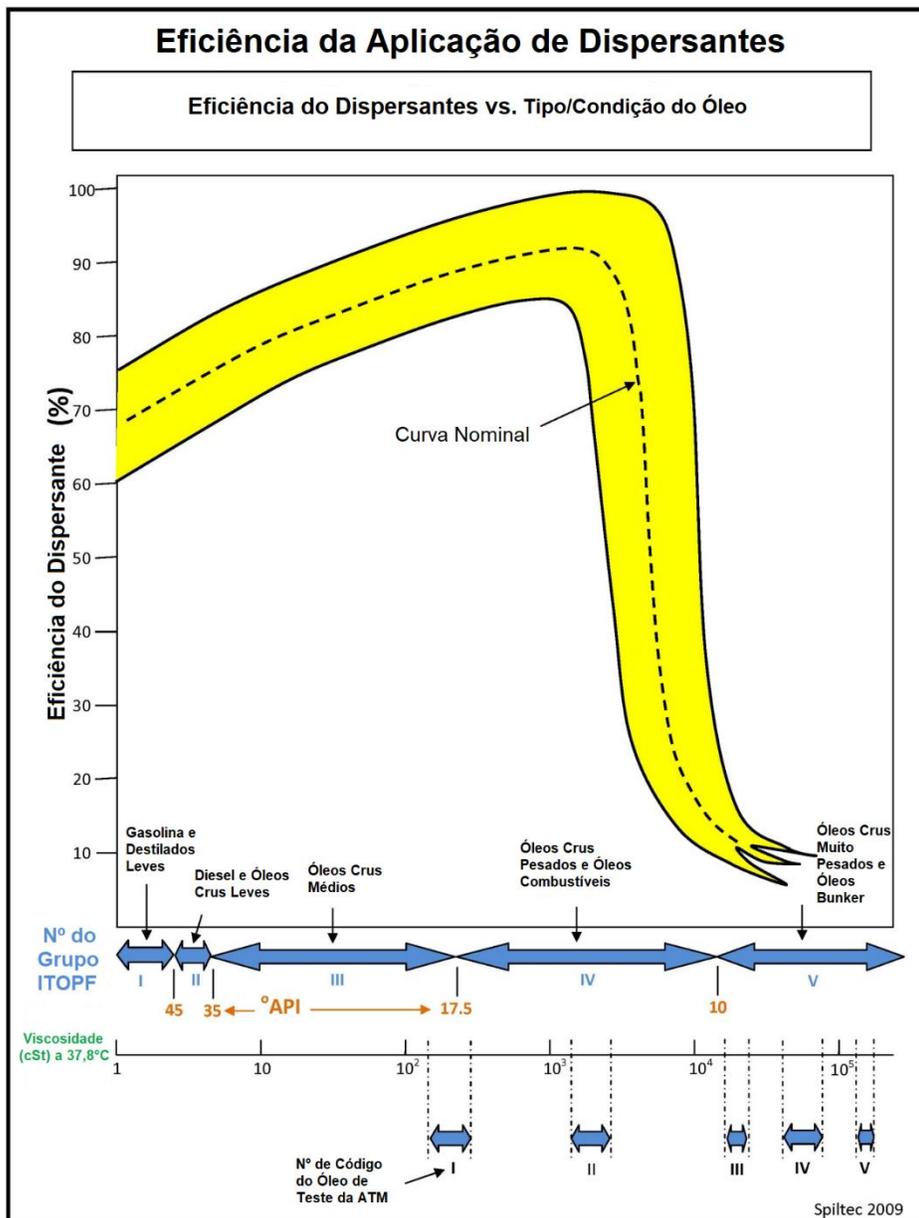


Figura 8-19: Eficiência do Dispersante em função da viscosidade cinemática (cSt). Adaptado de Genwest Systems (2011).

Por fim, foram introduzidas 2 restrições operacionais:

a) Velocidade do vento: No caso de ventos superiores a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 36 nós.

b) Viscosidade cinemática: Se a viscosidade cinemática média do óleo a ser disperso for superior a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 100.000 cSt.

8.3. Dispersão de óleo estocástica com múltiplas fontes de vazamento

No Projeto Costa Norte – cujo principal objetivo é desenvolver metodologias para determinar a vulnerabilidade de florestas de mangue à derramamentos de óleo - o conceito de vulnerabilidade é entendido como composto por três fatores: sensibilidade, resiliência e suscetibilidade¹. Este último é definido como o nível de exposição a derramamentos de óleo e deve considerar todas as fontes possíveis desse poluente. A avaliação da suscetibilidade de ativos ambientais geralmente é orientada para a avaliação de riscos de cenários acidentais originados de fontes específicas, por exemplo, um poço de perfuração. No entanto, no PCN a abordagem não é orientada para fontes específicas de vazamento potencial, mas sim pelo próprio ativo ambiental – florestas de mangue nas bacias da Foz do Amazonas e Pará-Maranhão. Essa inversão de perspectiva coloca desafios às metodologias de modelagem probabilística de dispersão de óleo disponíveis.

Neste contexto, a técnica de modelagem estocástica (probabilística) de dispersão de óleo ² é tradicionalmente utilizada para subsidiar planos de emergência e estudos de avaliação de impacto ambiental potencial nas operações da indústria de óleo e gás associados às etapas de exploração e produção. A crescente sofisticação das ferramentas disponíveis para modelagem de derramamento de óleo na água, com descrições tridimensionais do destino do óleo e processos de intemperismo, permite várias análises específicas diferentes, como a avaliação da exposição dos organismos da coluna de água ao óleo ou a eficiência de dispersantes químicos (como discutido no item 8.2.1). No entanto, o alto custo computacional dessas ferramentas inviabiliza sua aplicação em análises mais abrangentes, como o uso de longas séries de forçantes ambientais (por exemplo, escala de décadas) ou a consideração de várias fontes ao longo de uma região.

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da metodologia de modelagem de dispersão de óleo a partir de múltiplas fontes (item 8.3.1.1) que possibilitou avaliar a Suscetibilidade a derramamentos de óleo que podem ocorrer em qualquer lugar dentro de uma grande área (8.3.1.2). Os resultados de Suscetibilidade contemplam desde a escala regional (bacia oceânica e zona costeira) até a escala local

¹ O processo de construção conceitual e metodológica de vulnerabilidade no PCN pode ser vista no Volume I, Capítulo 3.

² Metodologia para se obter a distribuição espacial de probabilidade de presença de óleo a partir da integração de uma série de simulações determinísticas sob distintos cenários ambientais. Simulações determinísticas de dispersão de óleo descrevem o destino do poluente sob específica condição ambiental (p. ex. correntes e ventos atuantes em um dia determinado).

(planícies alagáveis cobertas por florestas de mangue), graças à metodologia de integração de modelos estocásticos em diferentes escalas, forçados por diferentes modelos hidrodinâmicos.

O desenvolvimento específico desta metodologia de múltiplas fontes - guiado pelos objetivos gerais do PCN - forneceu possibilidades que moldaram as metodologias integradas do projeto. Por exemplo, a partir do sistema de múltiplos pontos, pôde-se desenvolver uma metodologia para obter um parâmetro que se relaciona com o grau de Resiliência das florestas de mangue, assim como a obtenção de uma Análise Inversa – ao invés de identificar quais áreas são potencialmente atingidas a partir de um ponto de vazamento, identifica-se quais fontes de vazamento podem potencialmente levar óleo à um ponto na linha de costa. Este processo de construção de metodologia pode ser visualizado pela analogia a um pêndulo que oscila entre a visão do todo e a específica, carregando informações bidirecionalmente.

Este item será dividido entre o desenvolvimento das metodologias (item 8.3.1) - onde será apresentado o processo de desenvolvimento e não só a metodologia aplicada ao final – e os resultados das aplicações no contexto do Projeto Costa Norte (item 8.3.2).

8.3.1. Desenvolvimento da Metodologia

Como será visto, a metodologia do modelo de dispersão de óleo com múltiplas fontes de vazamento é a base a partir da qual as metodologias para a análise de suscetibilidade, taxa de afastamento, análise inversa e análise da variabilidade interanual foram desenvolvidas, e é dessa forma que este item se encontra dividido.

8.3.1.1. Modelo de múltiplas fontes

Como exposto na introdução, o foco do PCN é a determinação da Vulnerabilidade das florestas de mangue das bacias Foz do Amazonas e Pará Maranhão à vazamentos de óleo ocorridos na área de exploração e produção da Margem Equatorial. Pelo foco ser no próprio ecossistema, um estudo abrangente de dispersão de óleo deve necessariamente considerar diversas fontes de óleo possíveis.

Dessa forma se tornou necessário desenvolver um algoritmo para permitir a realização de simulações estocásticas abrangendo centenas de fontes de derramamento – algo inviável com modelos de dispersão de óleo disponíveis.

A Metodologia desenvolvida teve uma grande fonte de inspiração nos estudos recentes de análise de riscos para exploração de óleo e gás no golfo do México elaborados pelo BOEM³ (*Bureau of Ocean Energy Management*) (Ji et al, 2017). Esse estudo faz uso de dados de um *Hindcast* de 15 anos preparado pela Universidade de Princeton (OEY 2005; 2008). Para viabilizar o tempo computacional, a modelagem de dispersão de óleo é bidimensional, feita apenas com os campos de correntes superficiais e desconsidera os processos de intemperismo e as características físico-químicas do óleo. A grande

³ Instituição governamental ligada ao Departamento do Interior dos Estados Unidos

vantagem da metodologia desenvolvida pelo BOEM é que, por utilizar modelos de dispersão de óleo bastante simplificados, permite que sejam considerados vazamentos em posições distribuídas ao longo de toda a área com possibilidade de exploração de óleo e gás e com possibilidade de ocorrência em diferentes instantes de tempo ao longo de vários anos.

No PCN o modelo de dispersão de óleo desenvolvido (item 8.2) foi adaptado para considerar vazamentos em múltiplas fontes e, apesar de inspirado pelos estudos do BOEM, os desenvolvimentos apresentam diferenças metodológicas significativas – como por exemplo, a utilização de milhares de partículas a cada simulação determinística permitindo a representação dos efeitos difusivos sobre a área varrida da mancha de óleo (o BOEM utiliza 1 partícula por simulação) – assim como desenvolvimentos próprios para alcançar os objetivos do PCN – como por exemplo a metodologia de integração dos resultados probabilísticos entre escalas e a metodologia para determinar a Taxa de Afastamento dentro de florestas de mangue.

8.3.1.1.1. Adaptações nos códigos do modelo de dispersão de óleo

Foram feitas alterações no código do modelo de deriva de óleo para se adaptar aos novos objetivos. No modelo original, os dados de saída armazenados pelo sistema eram as trajetórias de cada partícula e os mapas de espessura de óleo com uma resolução horária. Para viabilizar a análise de dispersão de óleo com múltiplas fontes foram realizadas algumas simplificações, removendo:

- Fenômenos de intemperismo;
- Propriedades do óleo;
- Balanço de massa;
- Contabilização de mapas de espessura;
- Armazenamento das trajetórias de partículas.

E adicionando a gravação dos seguintes parâmetros, necessários para se obter os mapas de probabilidade e tempo mínimo de cada ponto de vazamento:

- Armazenamento da área varrida pelo óleo em uma grade regular com resolução a definir.
- Armazenamento dos tempos mínimos de chegada de óleo em cada ponto na mesma grade utilizada no item acima.

Para computar a área varrida, a cada nova posição de uma partícula, o modelo varre a grade (inicialmente iniciada com zeros em todos seus pontos) e verifica o posicionamento da partícula. Se o valor ainda for zero (0), o modelo altera aquela célula para 1. Ao final da simulação tem-se números 1 em todos os pontos onde pelo menos uma partícula esteve presente (conceito exemplificado na Figura 8-20). A partir dos mapas de área varrida de todas as simulações determinísticas de uma fonte de vazamento, são obtidos os mapas de probabilidade de presença de óleo.

Para computar o tempo mínimo de chegada do óleo em cada ponto de grande, ao se alterar uma célula de área varrida para 1, é armazenado também o instante em que isso ocorreu. Dessa forma, ao final de cada rodada determinística, têm-se o tempo mínimo de chegada de uma partícula para cada célula da grade regular definida.

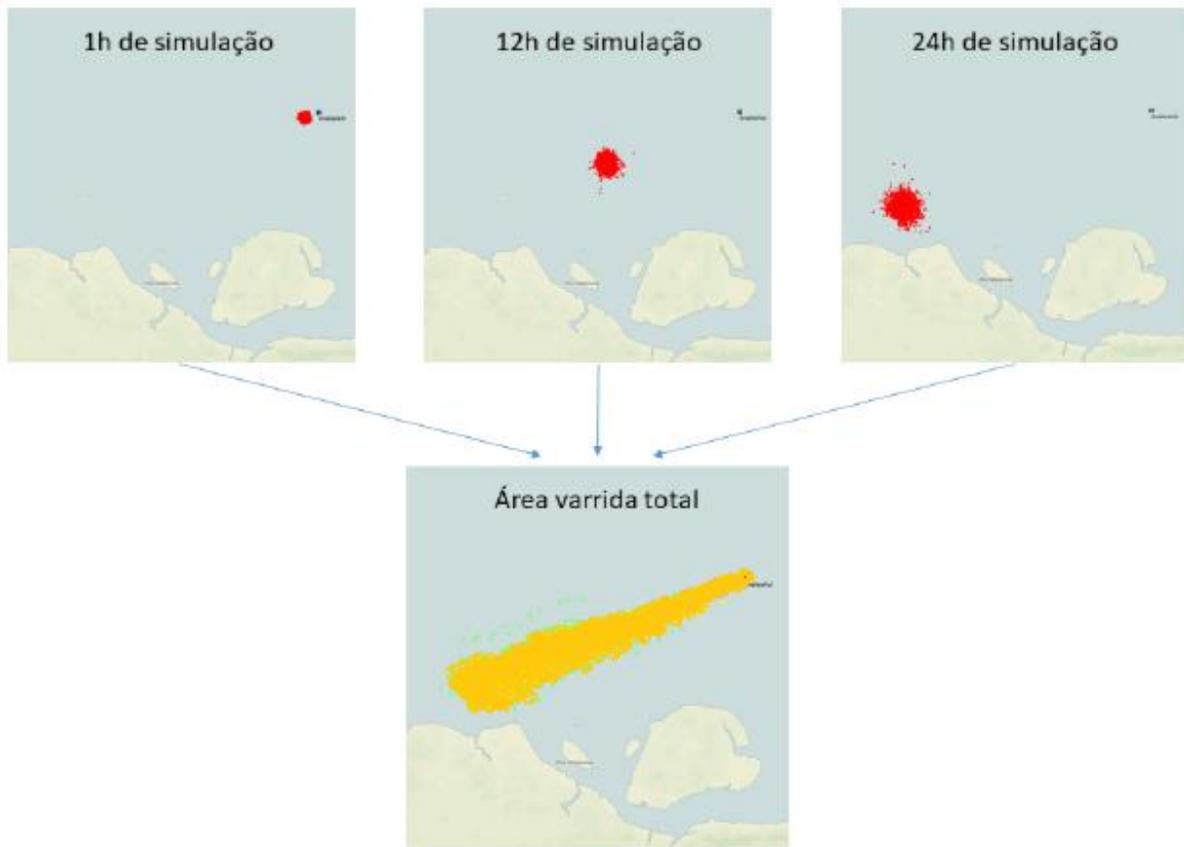


Figura 8-20: Exemplificação do conceito de “área varrida”. Os três quadros acima demonstram as posições das partículas de uma simulação determinística após 1h, 12h e 24h de simulação. O quadro de baixo indica a “área varrida” pelas partículas após o término de 24 horas.

8.3.1.1.2. Simulações Preliminares

Após as adaptações nos códigos do modelo foram realizadas simulações prévias para testar o sistema e continuar seu desenvolvimento a partir dos desafios que certamente se apresentariam. Dessa forma, uma primeira configuração de simulação foi pensada, definida e executada.

Neste item serão descritos tais desafios e os avanços metodológicos que se sucederam, moldaram e avaliaram a metodologia de múltiplos pontos que foi posteriormente aplicada para a análise de Suscetibilidade, análise da Taxa de Afastamento, Análise Inversa e para avaliação da variabilidade interanual.

Inicialmente, foi definida a seguinte abordagem:

- Realização de simulações de deriva de óleo a partir de diversas fontes dentro dos blocos das bacias Pará-Maranhão e Foz do Amazonas. Em cada fonte serão conduzidas diversas simulações determinísticas variando a data de início das forçantes ambientais de forma a se compor uma modelagem probabilística. Ao final, integra-se os resultados probabilísticos de cada ponto para se obter mapas de probabilidade integrados, de probabilidade máxima e tempo mínimo.
- Utilização de correntes superficiais da base hidrodinâmica regional de 10 anos desenvolvida no escopo do PCN (Capítulo 7).
- Utilizar como base de ventos os resultados da Reanálise 2 do NCEP, produzido pela NOAA;
- Definir a duração de cada simulação em 30 dias (Ji *et al.*, 2017);
- Definir o intervalo entre cada nova simulação em 1 dia, possibilitando contabilizar a variabilidade nos fenômenos atmosféricos da região de interesse. Com isso, seriam realizadas aproximadamente 3.650 simulações em cada ponto (10 anos * 365 dias).

A Figura 8-21 apresenta os blocos que foram inicialmente considerados como fontes de vazamento para as análises de suscetibilidade no PCN, assim como a estimativa de fontes utilizadas (222 fontes representadas pelos pontos pretos). Nessa fase preliminar, foram selecionados os blocos em fase de exploração e os blocos em oferta permanente. Ressalta-se que os blocos em oferta permanente nas bacias Foz do Amazonas e Pará-Maranhão foram atualizados após a realização deste estudo preliminar, e podem ser consultados no *site* da ANP (<http://rodadas.anp.gov.br/pt/>). A Tabela 8-2 resume o número total de simulações usando a metodologia proposta.

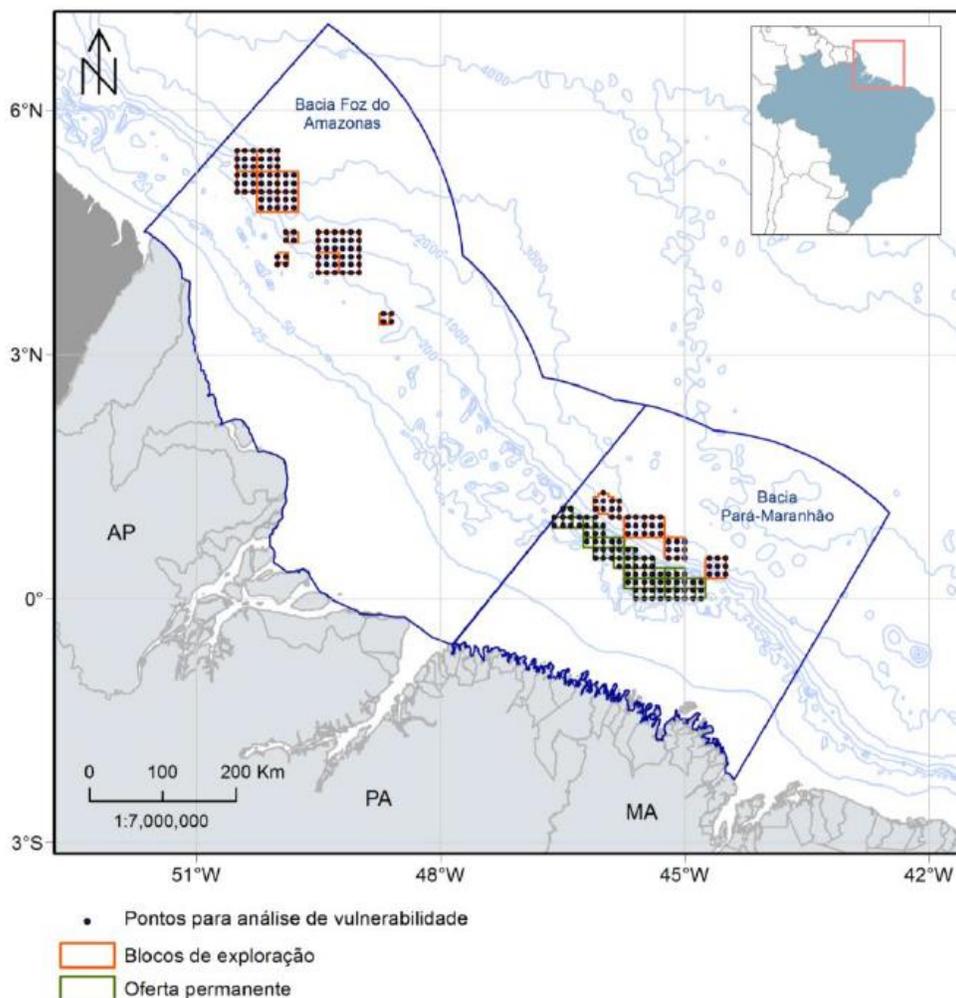


Figura 8-21: Mapa com os blocos em fase de exploração e em oferta permanente nas bacias da Foz do Amazonas e Pará-Maranhão (polígonos laranja e verde) e os pontos de simulação para rodada de múltiplos pontos usando uma resolução de $1/10^\circ$ (pontos pretos).

Tabela 8-2: Detalhamento do número de simulações realizadas no primeiro teste do sistema de simulação de dispersão de óleo com múltiplas fontes.

| Etapa | Quantidade |
|--------------------------|------------------------|
| Pontos | 222 |
| Base hidrodinâmica | 10 anos = 3650 dias |
| Intervalo das simulações | 1 dia |
| Total de Simulações | $222 * 3650 = 810.300$ |

Ou seja, em cada ponto de vazamento são realizadas 3650 simulações determinísticas espaçadas ao longo de 10 anos, sob diferentes condições de correntes e ventos. Em cada simulação determinística, o óleo é representado por um conjunto de partículas lançadas na água, sujeitas ao efeito de advecção e

difusão, forçados pelas correntes e ventos atuantes (item 8.2.1.1). Devido aos efeitos difusivos, o número de partículas lançadas em cada simulação determinística é um parâmetro sensível para a representação da área varrida ao final de cada simulação. Optou-se, então, por realizar uma análise de sensibilidade para otimizar a definição do número de partículas, avaliando-se também o tempo de computação associado.

Essa análise levou em conta a área total varrida pelas partículas em uma simulação determinística de 30 dias iniciada em um ponto dentro da Bacia Pará-Maranhão. Para o cálculo da área varrida, foi utilizada uma grade com resolução de 1 km, que contemplasse toda a área do modelo hidrodinâmico utilizado.

Foram feitas simulações aumentando de 10 em 10 a quantidade de partículas lançadas no domínio, sendo a primeira com 10 partículas e a última com 12.500 partículas. A Figura 8-22 apresenta, como exemplo, o resultado de área varrida para as simulações com 200 (esquerda) e 4.000 (direita) partículas. Já na Figura 8-23, é exibido um gráfico da evolução da área varrida (eixo da esquerda) e do tempo de rodada (eixo da direita) em função do número de partículas.

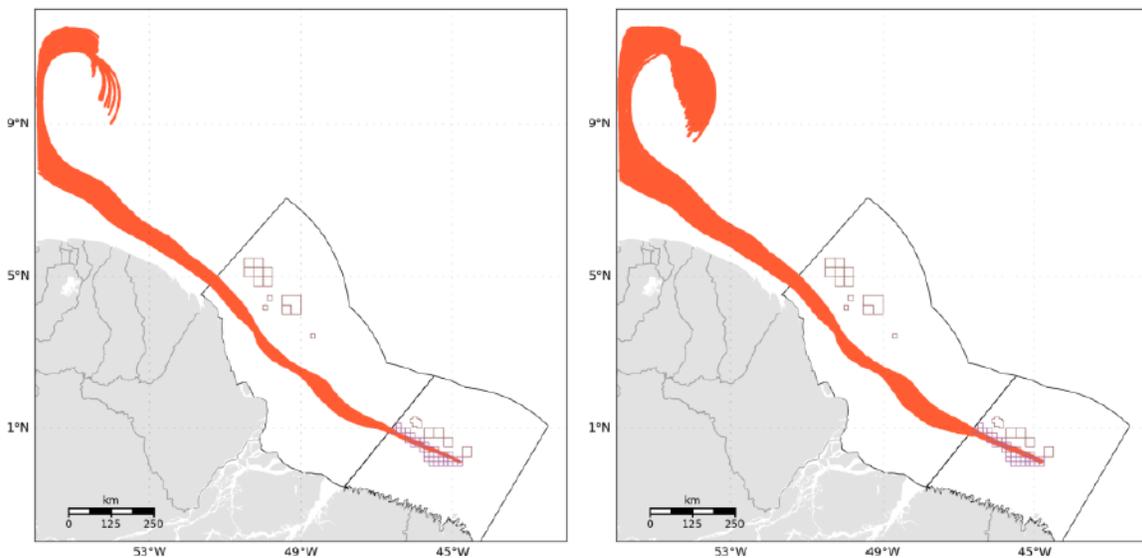


Figura 8-22: Exemplos de resultados finais de área varrida para as simulações de 200 (esquerda) e de 4000 partículas (direita).

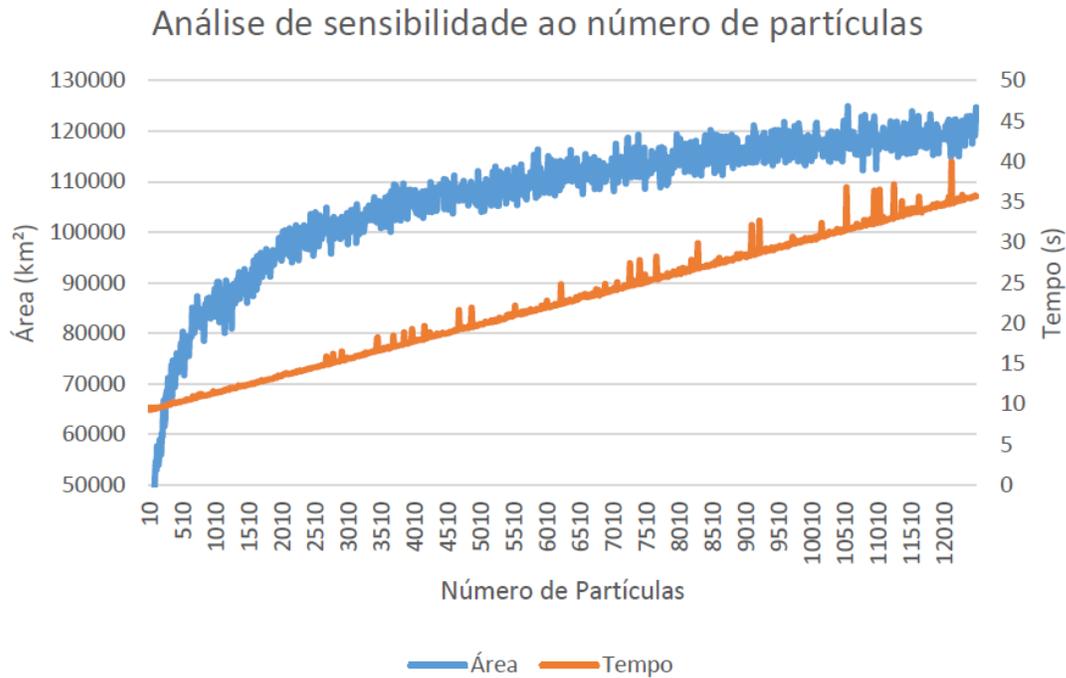


Figura 8-23: Análise de sensibilidade ao número de partículas. Área varrida (eixo esquerdo – km²) e tempo de rodada (eixo direito – s) para 1 simulação determinística de 30 dias.

Observa-se que conforme o número de partículas aumenta, a área varrida converge para o valor aproximado de 120.000 km². Além disso, nota-se um crescimento linear do tempo de rodada com o aumento do número de partículas. Com 5.000 partículas, a área varrida já é de 110.000 km², correspondendo a 93% da área máxima, e com 10.000 partículas a área varrida é de 118.000 km², correspondendo a aproximadamente 98% da área máxima. Na Figura 8-24, o mesmo gráfico de tempo é exibido, porém com os valores multiplicados pelas 810.300 simulações que serão realizadas, para se avaliar o tempo necessário para completar todo o processamento desse estudo.

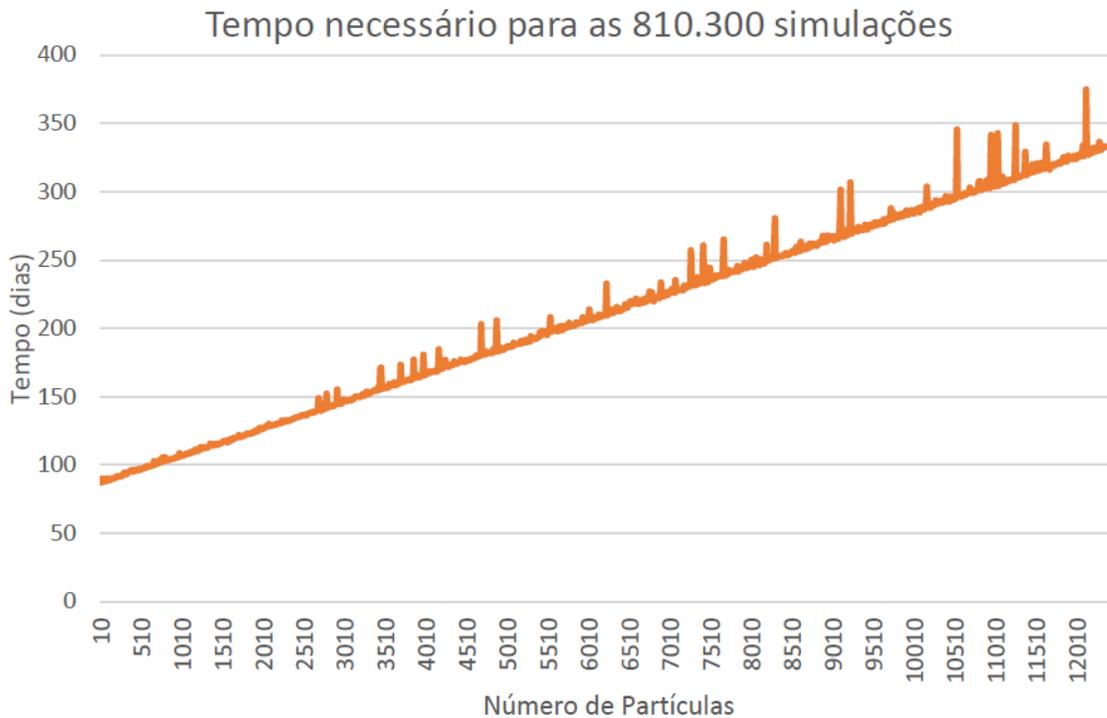


Figura 8-24: Tempo necessário para a realização de 810.300 simulações de 30 dias para o estudo da análise de vulnerabilidade em função do número de partículas.

É importante ressaltar que na metodologia proposta pelo BOEM, apenas 1 partícula é lançada por simulação. Isso é feito porque no modelo lagrangiano que os autores utilizam não há a inclusão de um algoritmo que parametrize a turbulência em escalas não resolvidas pelo hidrodinâmico. No caso do modelo do PCN, é utilizado o método do *random walk*. Ao lançar diversas partículas no domínio, a simulação contabiliza os efeitos de turbulência e permite criar toda uma área por onde o óleo poderia passar, em vez de apenas uma trajetória pontual. Por outro lado, lançar um grande número de partículas, como visto no gráfico, aumenta consideravelmente o tempo de rodada.

Após a otimização dos códigos para viabilizar a metodologia desenvolvida – descrita no item 8.3.1.1.2.1 – e algumas revisões, as configurações finais desta rodada preliminar foram definidas:

- A malha amostral de pontos de vazamento havia sido construída a partir de um código que gerava pontos-fonte no interior dos blocos de exploração/produção das bacias de interesse. Todavia, notou-se que alguns pontos não eram necessários, sendo então removidos. A malha final conta com 210 pontos.
- Pelo caráter preliminar, optou-se por alterar o intervalo entre simulações de um mesmo ponto para 2 dias, ao invés de 1 dia, como havia sido pensado. Com isso seria possível acelerar a obtenção de resultados e avaliar a representatividade.

- Alinhado com os objetivos do PCN de verificar a Vulnerabilidade das florestas de Mangue a grandes vazamentos de óleo, adotou-se vazamentos de 24h - tendo em vista que esta é a duração de vazamento utilizada nos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) de plataformas de produção.
- Com a redução do número de pontos e o novo intervalo entre simulações (2 dias), a quantidade total de simulações foi reduzida para 383.250 (210 pontos * 1.825 simulações). Dessa forma, optou-se por utilizar 10.000 partículas por simulação, viável após as otimizações no código e tornando os resultados mais representativos da área máxima varrida conforme análise apresentada na Figura 8-23.

8.3.1.1.2.1. Otimização para Computação em Paralelo

A partir da análise de sensibilidade descrita, foi verificada a necessidade do lançamento de no mínimo 5000 partículas, que contemplam ~93% da área máxima varrida. Entretanto, esse número de partículas aumentou consideravelmente o tempo de simulação (~200 dias).

Inicialmente o código do modelo foi revisado buscando-se encontrar pontos que pudessem ser otimizados em termos de programação. Essa avaliação trouxe pouco resultado, não chegando a uma otimização considerável. Outra forma de otimizar seria reduzir a quantidade de simulações necessárias, por exemplo, aumentando o tempo entre simulações sucessivas de um mesmo ponto (atualmente em 1 dia). Entretanto, essa alternativa traria uma perda na representatividade de cenários ambientais e portanto foram pesquisadas novas alternativas como por exemplo a computação em paralelo.

A computação paralela é uma forma de processamento em que vários cálculos são realizados ao mesmo tempo (ALMASI & GOTTLIEB, 1989), operando sob o paradigma mecanicista de que grandes problemas podem ser divididos em problemas menores, que então são resolvidos concorrentemente (em paralelo). Sem a opção de utilizar computação paralela, as estimativas de duração haviam sido feitas considerando que cada ponto seria rodado sequencialmente, ou seja, o código começaria do ponto 01, rodaria suas 3650 simulações e, ao terminar, passaria para o ponto 02. Aplicando o conceito de programação paralela, essa opção se traduziria em rodar diversos pontos (dentre os 222 selecionados) ao mesmo tempo, usando vários processadores do computador.

Todo o processamento, tanto do sistema de modelagem de dispersão de óleo (ver item 8.2), quanto das simulações voltadas para o objetivo de análise de Vulnerabilidade no PCN, é feito através de computação em nuvem (do inglês, *cloud computing*) no sistema da Amazon (AMAZON EC2). O serviço de computação da Amazon oferece diversos tipos de máquina de acordo com a necessidade do usuário. Dentre elas, a com maior capacidade de processamento (instância c5.18xLarge) possui 72 processadores (Intel Xeon CPU com 3,5 GHz) e conta com 144 Gb de memória RAM. Em teoria, através dessa metodologia e com essa máquina da Amazon, é possível rodar até 72 pontos ao mesmo tempo. Entretanto, diversas mudanças se tornaram necessárias no código do modelo para o preparo de um sistema de paralelização computacional.

Dessa forma, foram conduzidos esforços para a implementação em paralelo utilizando *Python*, linguagem de programação central do modelo de dispersão de óleo e que possui uma biblioteca para paralelização de códigos, conhecida como *Dask* (<https://dask.pydata.org/en/latest/>). Dessa forma, o código foi alterado para a utilização dessa biblioteca.

Os testes preliminares foram conduzidos em uma máquina de 4 processadores. Optou-se por fazer a análise de 4 pontos, com 10 simulações em cada um, totalizando 40 simulações. Foi feita a comparação entre uma rodada padrão, sem os métodos de paralelização, e uma rodada usando os 4 processadores em paralelo, possibilitando que cada processador conduzisse um ponto ao mesmo tempo que os outros. A simulação padrão precisou de 4.186 segundos até ser concluída, enquanto a simulação em paralelo foi finalizada em 1.125, representando 26% do tempo original. Porém, um número maior de processadores exige também um maior processamento do sistema que gerencia a paralelização e, portanto, não necessariamente irá otimizar o tempo de processamento.

Dessa forma, foram realizados testes de paralelismo em novas máquinas disponíveis no serviço da Amazon. Cada novo teste usou uma instância com um maior número de CPUs de forma a aumentar a capacidade de paralelismo da análise (Tabela 8-3). Essas máquinas são consideradas na Amazon como “instâncias otimizadas para processamento”, por serem equipadas com processadores mais rápidos e modernos, na expectativa de que o código da fosse acelerado ao máximo em cada CPU utilizada em paralelo.

Tabela 8-3: Números de CPUs e memória RAM total das instâncias otimizadas para processamento utilizadas nos testes de paralelismo na Amazon.

| Teste | Instância | # CPUs | Memória (Gb) |
|-------|-------------|--------|--------------|
| 1 | c5.xlarge | 4 | 8 |
| 2 | c5.2xlarge | 8 | 16 |
| 3 | c5.4xlarge | 16 | 32 |
| 4 | c5.9xlarge | 36 | 72 |
| 5 | c5.18xlarge | 72 | 144 |

Dos testes 1 ao 4, o tempo de rodada foi caindo quase que linearmente com o aumento do número de processadores. Entretanto, ao chegar no teste 5, a quantidade de execuções do código em paralelo (72 processos) aumentou consideravelmente a quantidade de memória RAM necessária e o código era interrompido logo no início. Ressalta-se que, além da memória necessária para rodar cada processo individualmente, o serviço que gerencia o paralelismo precisa de mais memória quanto mais processadores estão sendo usados. Dessa forma, tornou-se inviável utilizar todos os processadores da máquina de 72 núcleos. Foram feitos, então, testes sucessivos diminuindo a quantidade de processos simultâneos usados na instância c5.18xlarge, até chegar em um número em que foi possível realizar o processamento. Concluiu-se que o número máximo deveria ser de 45 processos.

Ciente da limitação por memória RAM, buscou-se outros tipos de máquinas no serviço da Amazon. Em seu catálogo estão disponíveis computadores considerados como “instâncias otimizadas para memória”

que, ao invés de terem processadores de última geração, apresentam uma maior quantidade de memória RAM. Foram então realizados testes em mais 2 máquinas, segundo especificações da Tabela 8-4.

Tabela 8-4: Números de CPUs e memória RAM total das instâncias otimizadas para memória utilizadas nos testes de paralelismo na Amazon.

| Teste | Instância | # CPUs | Memória (Gb) |
|-------|-------------|--------|--------------|
| 6 | m5.12xlarge | 48 | 192 |
| 7 | m5.24xlarge | 96 | 384 |

Nessas duas instâncias, devido a maior disponibilidade de memória RAM, foi possível efetuar o processamento em paralelo considerando o maior número de processos simultâneos em cada uma delas, sendo de 48 e 96, respectivamente. A Tabela 7 apresenta a comparação final entre as três máquinas consideradas com melhores resultados durante os testes, apresentando o máximo número de processos que é possível de executar em cada uma e o tempo total estimado para rodar as simulações definidas. Com isso, foi definido que as rodadas serão feitas na instância m5.24xlarge, rodando 96 processos em paralelo.

Tabela 8-5: Comparação final das instâncias da Amazon selecionadas como candidatas a serem utilizadas para as rodadas em paralelo.

| Instância | # CPUs | # Processos Simultâneos | Tempo estimado (dias) |
|-------------|--------|-------------------------|-----------------------|
| c5.18xlarge | 72 | 45 | 26 |
| m5.12xlarge | 48 | 48 | 31 |
| m5.24xlarge | 96 | 96 | 19 |

Além da otimização do código para rodar em paralelo, foi realizado também uma análise quanto ao formato dos arquivos de saída – visto que para o grande número de simulações pretendida, o formato de saída já implementado (ASCII) iria gerar ~5 TB entre os arquivos de área varrida e tempo mínimo. O formato binário foi rapidamente descartado pois, apesar de gerar arquivos menores por natureza, não gera uma compressão nos dados significativa. Por outro lado, o uso de netCDF permitiu reduzir drasticamente o resultado. Para este primeiro experimento, foi estimado que serão necessários aproximadamente 1,1 GB por ponto, totalizando 243 GB de dados, menos de 0,4% do que o formato ASCII. Ficou então definido o uso de netCDFs, versão 4.0 com compressão.

8.3.1.1.2.2. Avaliação da metodologia de múltiplas fontes

Com o objetivo de avaliar as premissas adotadas nas simulações com o modelo de múltiplas fontes desenvolvido no PCN, foram realizadas comparações com um modelo de dispersão de óleo considerado “estado da arte”. Dessa forma, foram realizadas simulações probabilísticas com o modelo de deriva de óleo OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response*) da SINTEF (REED, 2001; REED *et al.* 2004, modelo que tem representação tridimensional, resolvendo o transporte e dispersão das parcelas do óleo em

superfície, em gotículas e dissolvidas na água, e ainda resolve todos os processos de intemperismo do óleo.

O modelo foi aplicado para vazamentos em posições estratégicas, localizados nas áreas de exploração de óleo e gás nas bacias Pará-Maranhão e Foz do Amazonas. Foram considerados tanto vazamentos de fundo (*blowout* de poços), como vazamento de óleo em superfície. A escolha de posições estratégicas de vazamento é um procedimento que vem sendo utilizado para análise de Suscetibilidade ao toque de óleo na costa a partir de vazamentos de óleo que possam ocorrer em grandes áreas oceânicas como no Estudo Ambiental de Área Sedimentar (EAAS) nas bacias de Sergipe e Alagoas e Jacuípe (ANP, 2020). Os resultados gerados com o OSCAR serão confrontados com a metodologia desenvolvida no PCN para simulações de dispersão de óleo a partir de múltiplas fontes.

O OSCAR exige a inserção de parâmetros específicos do vazamento de óleo, como o volume do vazamento e grau API do óleo. Essas informações foram removidas nas simplificações feitas no modelo do PCN para possibilitar as rodadas com múltiplas fontes. Dessa forma, é necessário escolher valores que permitam a comparação o mais próximo possível do que foi efetuado nas simulações preliminares com o modelo do PCN. Inicialmente, as comparações serão feitas em relação aos resultados da Bacia Pará-Maranhão. Os itens abaixo listam as primeiras definições acerca dessas simulações, assim como suas justificativas.

- Pontos de vazamento: Para as simulações com o OSCAR, deve-se escolher os pontos de vazamento que serão utilizados para a obtenção dos resultados probabilísticos. De forma a possibilitar a comparação em regiões com dinâmicas diferentes, optou-se por fazer simulações em 4 pontos dentre os pontos de vazamento da Bacia Pará-Maranhão utilizados na simulação preliminar: ponto mais a leste, ponto mais a oeste, ponto mais raso e ponto mais profundo.
- Volume: Foram realizadas simulações com 2 volumes diferente, 200 m³ e volume de *blowout*, conforme é feito nos estudos de licenciamento ambiental. Para o volume de *blowout*, será considerado o volume médio de todos os estudos públicos referentes a modelagens de dispersão de óleo na Bacia Pará-Maranhão. No estudo do BOEM (Ji *et al.*, 2017), volumes menores que 1.000 bbl (~159 m³) são considerados muito pequenos e com baixa persistência no ambiente para compor análises de Vulnerabilidade.
- Tipo de óleo: Da mesma forma que o volume de *blowout*, o grau API do óleo foi escolhido a partir dos estudos públicos da Bacia Pará-Maranhão. Como a metodologia desenvolvida utilizando o modelo de dispersão de óleo PCN removeu os processos de intemperismo, foi selecionado, dentre a lista, o óleo de API mais baixo, de forma a manter os resultados mais conservadores.
- Profundidade: Foram realizadas simulações com vazamento de superfície e de fundo. Isso permitirá a comparação da metodologia proposta no Projeto com o que é feito nos estudos

de licenciamento, em ocasiões em que já há o conhecimento do ponto de vazamento e, conseqüentemente, da lâmina d'água local.

Para determinar o volume de vazamento, foi feita uma lista dos estudos públicos de modelagem de dispersão de óleo disponíveis na Bacia Pará-Maranhão, de forma a se obter o volume de *blowout* médio e API mínimo da região. A Tabela 8-6 apresenta a lista com a data dos estudos, blocos referentes, volume e API.

Tabela 8-6: Volumes de *blowout* e API dos estudos públicos da Bacia Pará-Maranhão.

| Data | Bloco | Volume de <i>Blowout</i> (m ³) | API (°) |
|---------|----------------------------|--|---------|
| 12/2008 | BM-PAMA-8 | 3960 | 30 |
| 07/2009 | BM-PAMA-17 | 9900 | 42,5 |
| 07/2010 | BM-PAMA-13-14-15 | 9900 | 42,5 |
| 02/2011 | BM-PAMA-17 | 9900 | 34 |
| 08/2011 | BM-PAMA-16 | 9900 | 42,5 |
| 12/2013 | BM-PAMA-10-11-12 | 78750 | 40,5 |
| 12/2013 | BM-PAMA-8 | 13350 | 40,5 |
| 04/2014 | PAMA-M-265 e PAMA-M-337 | 23849 | 27 |

A partir desses valores, definiu-se o volume de 19.940,00 m³ e o API de 27°. Na sequência, foi feita a escolha dos pontos onde serão realizadas as simulações: 4 pontos na Bacia Pará-Maranhão, sendo eles o ponto mais a leste, ponto mais a oeste, ponto mais raso e ponto mais profundo. A Figura 8-25 apresenta os pontos utilizados na simulação preliminar de múltiplos pontos, com um *zoom* apenas na Bacia Pará-Maranhão.

É importante destacar que as simulações de múltiplos pontos realizadas no PCN não estão relacionadas a um volume de óleo específico. Seguindo a ideia de análises semelhantes realizadas pelo BOEM em Ji *et al* (2017), espera-se que as simulações realizadas para compor a metodologia de avaliação da Vulnerabilidade das florestas de mangue sejam capazes de dimensionar as áreas suscetíveis a manchas de óleo para acidentes com vazamentos superiores a 1.000 barris na Margem Equatorial Brasileira. A comparação com as simulações a serem realizadas com o modelo OSCAR para vazamento em superfície e de fundo serão a base da verificação desta premissa.

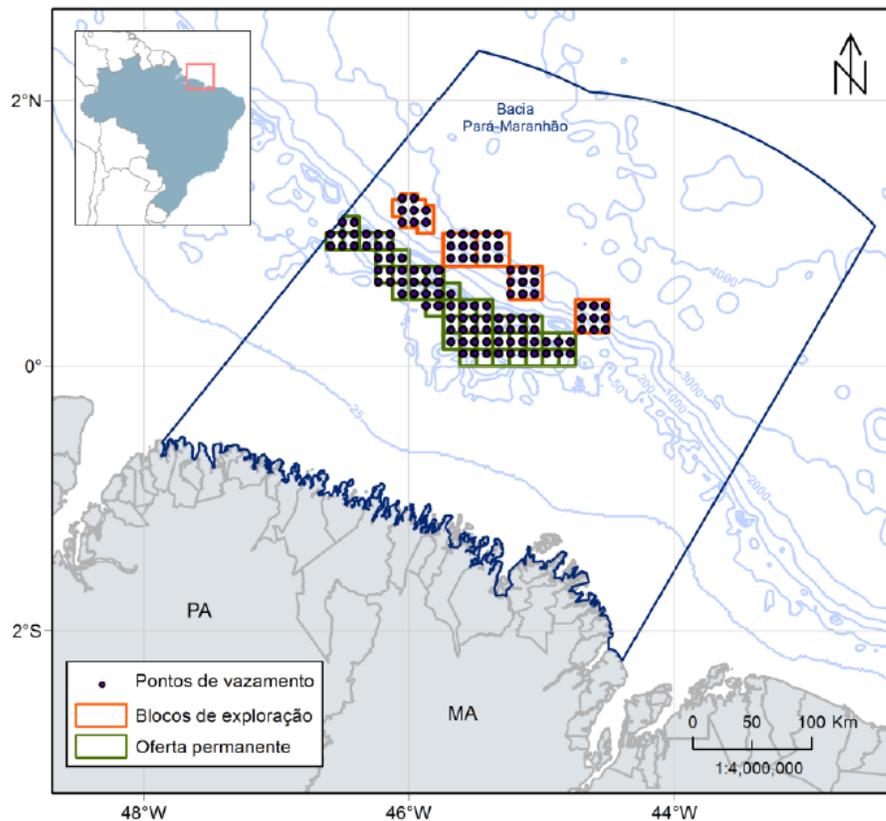


Figura 8-25: Pontos de vazamento utilizados na metodologia de análise de vulnerabilidade desenvolvida no projeto Costa Norte.

Nota-se que para a seleção dos pontos mais a oeste e mais a leste aparecem mais de um candidato possível. Para o estudo, optou-se pelos pontos mais *offshore* dentre os possíveis, o que permitirá diferenças mais relevantes entre as simulações com vazamento de superfície e de fundo.

Já para a escolha do ponto mais raso e do mais profundo, foi obtida a lâmina d'água de cada um dos pontos utilizados na simulação prévia do PCN usando os dados batimétricos do produto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA, com resolução espacial de 15'. Entretanto, notou-se que o ponto mais raso indicado pelos dados se localizava na região central da malha de pontos disponíveis. A proposta de selecionar o ponto mais raso era também que ele estivesse mais próximo à costa. Além disso, na coordenada desse ponto, os dados do SRTM apontam uma profundidade local de apenas 12 m, o que não é corroborado ao verificar as cartas náuticas disponíveis na região, que por serem em uma região *offshore*, apresentam pontos muito esparsos. Dessa forma, optou-se por considerar como critério o ponto mais raso do domínio, mas que também fosse um dos mais próximos a costa ("borda" sudoeste da malha de pontos da análise de vulnerabilidade). O novo ponto apresenta batimetria de 34 m e, nas cartas náuticas da região, existem pontos próximos com valores da mesma ordem de grandeza.

Tabela 8-7: Tabela 13: Coordenadas e profundidade dos 4 pontos selecionados para os estudos comparativos que serão realizados com o modelo OSCAR.

| Ponto | Característica | Coordenadas | Profundidade (m) |
|-------|-----------------------------|------------------------|------------------|
| 1 | Mais profundo | 45°19,8' O / 0°59,4' S | 3407 |
| 2 | Mais a leste | 44°31,2' O / 0°27,0' S | 3247 |
| 3 | Mais raso e próximo à costa | 45°41,4' O / 0°10,8' S | 34 |
| 4 | Mais a oeste | 46°35,4' O / 0°59,4' S | 76 |

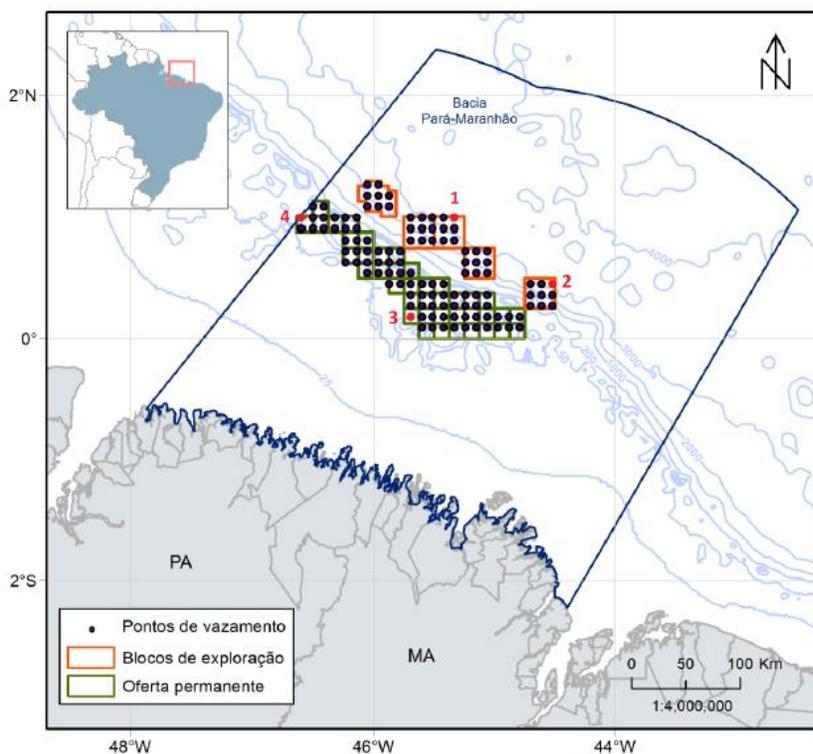


Figura 8-26: Pontos de vazamento utilizados na metodologia de dispersão de óleo com múltiplas fontes desenvolvida no projeto Costa Norte. Em vermelho são destacados os 4 pontos selecionados para os estudos comparativos que serão realizados com o modelo OSCAR.

Iniciou-se, então, a preparação do primeiro cenário probabilístico, que serviu como teste para a definição dos demais parâmetros necessários para a rodada do OSCAR, como por exemplo: resolução da grade, passo de tempo, número de partículas e limiares de corte. De forma geral, foram considerados os valores usados habitualmente para os estudos de impacto ambiental nos processos de licenciamento. Isso foi feito de forma a possibilitar uma comparação da metodologia desenvolvida no âmbito do projeto Costa Norte com o que é feito atualmente em termos de modelagem probabilística de óleo.

Em relação ao período de modelagem, optou-se por utilizar o mesmo período (2016 a 2017) coberto pela 1ª base hidrodinâmica com assimilação de dados na região equatorial brasileira, desenvolvida no

PCN (ver Capítulo 7). O cenário escolhido foi o referente ao Ponto 1 – 20.000 m³ - Superfície. Na Figura 8-27 e na Figura 8-28 são apresentados os mapas de probabilidade e tempo mínimo de chegada de óleo gerados para esse ponto com o OSCAR (painéis à esquerda), assim como os mapas gerados usando o modelo desenvolvido para o PCN (painéis à direita).

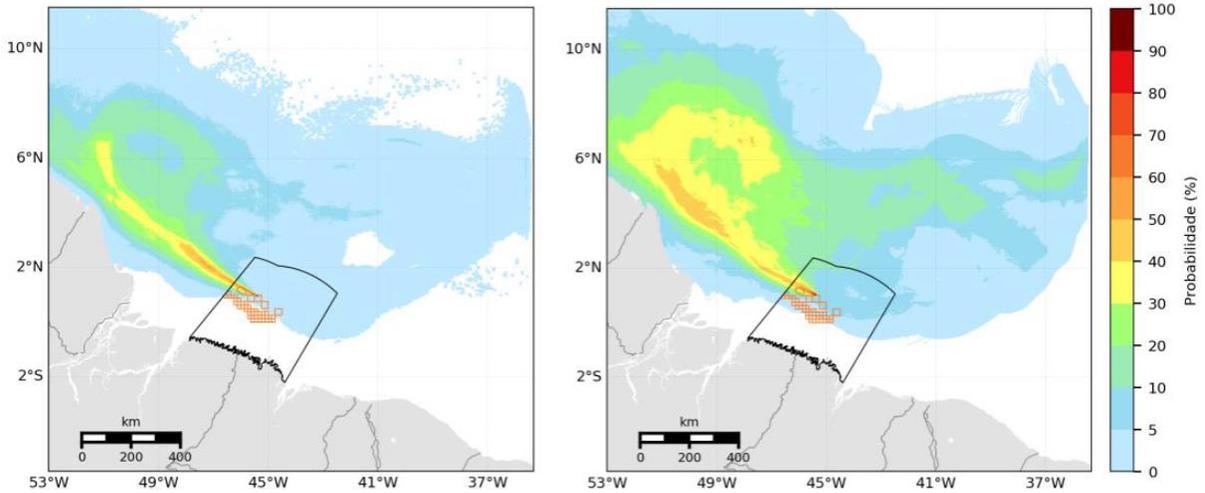


Figura 8-27: Probabilidade de presença de óleo para o vazamento do Ponto 01 – Superfície – 20.000 m³ realizado no OSCAR (esquerda) e o resultado de probabilidade de presença de óleo do mesmo ponto da rodada com o modelo de múltiplas fontes do PCN (direita).

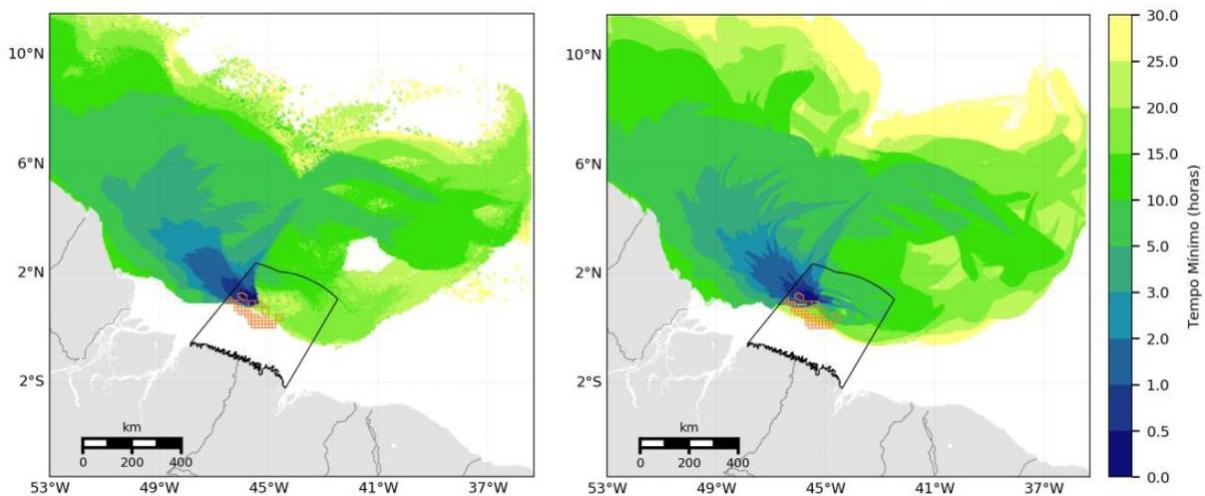


Figura 8-28: Tempo mínimo de toque de óleo para o vazamento do Ponto 01 – Superfície – 20.000 m³ realizado no OSCAR (esquerda) e o resultado de tempo mínimo do mesmo ponto da rodada com o modelo de múltiplas fontes do PCN (direita).

Nota-se, primeiramente, que ambos os resultados apresentaram uma área varrida muito similar, tendo o modelo do PCN coberto uma área ligeiramente maior. No modelo OSCAR foi configurado um limiar de corte de espessura, idêntico ao usado nos estudos de licenciamento. Dessa forma, se alguma região

apresenta valores inferiores a esse limiar, os resultados não entram na composição do mapa de probabilidade sendo, portanto, uma das causas das diferenças observadas.

Outro ponto interessante é a diferença de probabilidades observada, especialmente na região da retroflexão da CNB. O modelo do Costa Norte teve todos os seus processos de intemperismo removidos para viabilizar a quantidade de simulações que foram feitas no contexto do desenvolvimento da metodologia para análise de Vulnerabilidade. Já no OSCAR, não é possível remover esses fenômenos químicos. Dessa forma, um ponto chave que explicaria as maiores probabilidades de presença nas feições desenvolvidas pelo modelo do PCN é o fato das partículas terem persistência até o fim da simulação, enquanto no OSCAR o óleo vai intemperizando, e consequentemente perdendo massa.

De forma geral, apesar das diferenças discutidas e de toda a diferença de concepção dos modelos comparados, o resultado se apresentou bem satisfatório para uma primeira comparação. Mesmo assim, foi feita uma nova simulação teste, removendo o limiar de espessura do OSCAR. Normalmente, nos estudos de licenciamento, o limiar é configurado em 0,0003 mm. Entretanto, como o modelo do Costa Norte foi rodado sem o intemperismo, foi testada essa nova configuração, com o resultado apresentado na Figura 8-29.

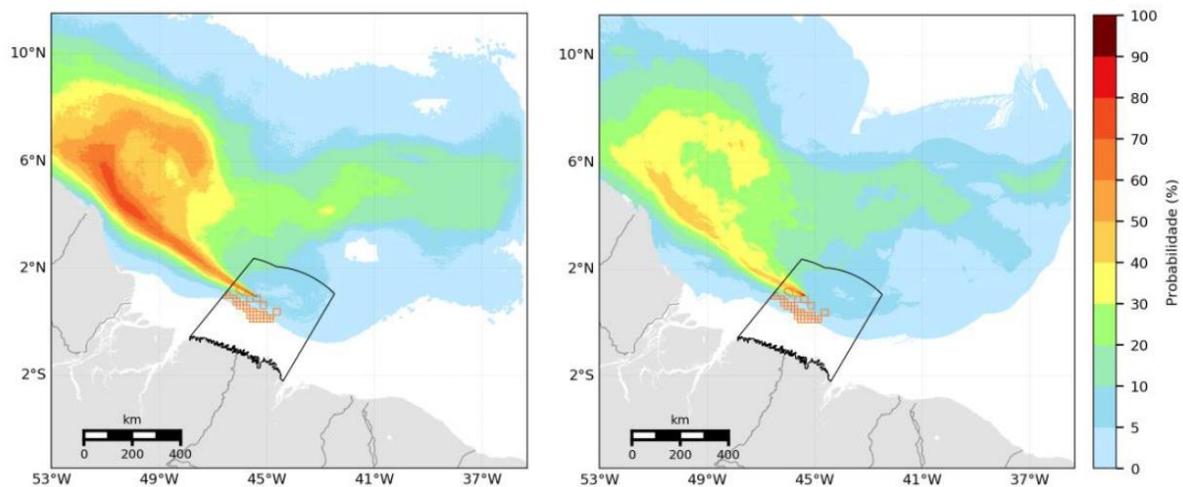


Figura 8-29: Probabilidade de presença de óleo para o vazamento do Ponto 01 – Superfície – 20.000 m³ realizado no OSCAR sem limiar de espessura (esquerda) e o resultado de probabilidade de presença de óleo do mesmo ponto da rodada com o modelo de múltiplas fontes do PCN (direita).

Nota-se que, nesse novo resultado, os valores de probabilidade dentro da região da retroflexão estão mais elevados, sendo mais condizente com o que foi visto com o modelo do Costa Norte. Além disso, a área varrida pela simulação também se aproximou mais entre os dois modelos.

As comparações permitiram confirmar o bom comportamento do sistema de simulação da dispersão do óleo considerando múltiplas fontes de vazamento desenvolvida no PCN em relação aos resultados observados no OSCAR, fato esse comprovado pela similaridade das áreas atingidas pelos vazamentos em

ambas as simulações. Ressalta-se que as simplificações adotadas, como por exemplo a remoção dos processos de intemperismo, tornam a metodologia inapta a responder perguntas específicas como por exemplo o volume e estado de decomposição do óleo que pode chegar na costa. Contudo, a metodologia se mostrou apta para avaliar as áreas suscetíveis ao toque de óleo, independente do ponto de vazamento.

Com isso, foram então iniciadas as 8 simulações de vazamento em superfície e 8 de fundo, sendo realizadas nos 4 pontos propostos, com os volumes de 200 e de 20.000 m³, conforme Figura 8-30. Ressalta-se que, além da avaliação da metodologia do modelo com múltiplas fontes do PCN, estas simulações também tem o objetivo de avaliar a metodologia de escolha de posições estratégicas de vazamento para representar grandes áreas com vazamento potencial – a exemplo da metodologia adotada no EAAS da bacia de Sergipe e Alagoas/Jacuípe para, dentre outras coisas, avaliar a aptidão das bacias para oferta de blocos exploratórios, dividindo-as em áreas aptas, não aptas ou em moratória e tendo como uma das principais análise a avaliação da suscetibilidade da linha de costa - e áreas sensíveis ambientalmente - à vazamentos de óleo (ANP, 2020).

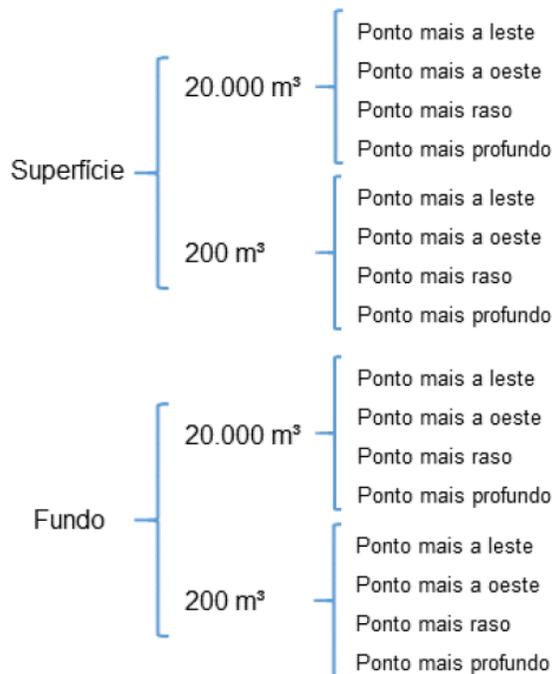


Figura 8-30: Fluxograma de simulações realizadas com o modelo OSCAR para avaliação da escolha de pontos de vazamento em um mapa de probabilidade de presença de óleo.

Após a conclusão das rodadas, foram exportados os resultados de probabilidade e tempo mínimo de chegada de óleo. Em seguida, foi feita uma integração dos 4 pontos de cada cenário, onde a probabilidade foi calculada da mesma forma que havia sido feita para a metodologia de múltiplos

pontos do PCN, ou seja, considerando a probabilidade de passagem de óleo, independentemente do ponto de vazamento. O tempo mínimo global também foi calculado, verificando-se o menor valor em cada célula de grade, em relação aos 4 pontos do cenário em questão. Os mapas de probabilidade são apresentados na Figura 8-31, em relação aos cenários de superfície de 200 m³ (painel superior) e 20.000 m² (painel inferior) e na Figura 8-32, em relação aos cenários de fundo de 200 m³ (painel superior) e 20.000 m² (painel inferior). Na mesma sequência são apresentados os mapas de tempo mínimo de chegada de óleo, na Figura 8-33 e na Figura 8-34. Por último, os mapas de probabilidade e de tempo mínimo com os resultados da metodologia do Costa Norte são reapresentados na Figura 8-35 para servirem como base comparativa.

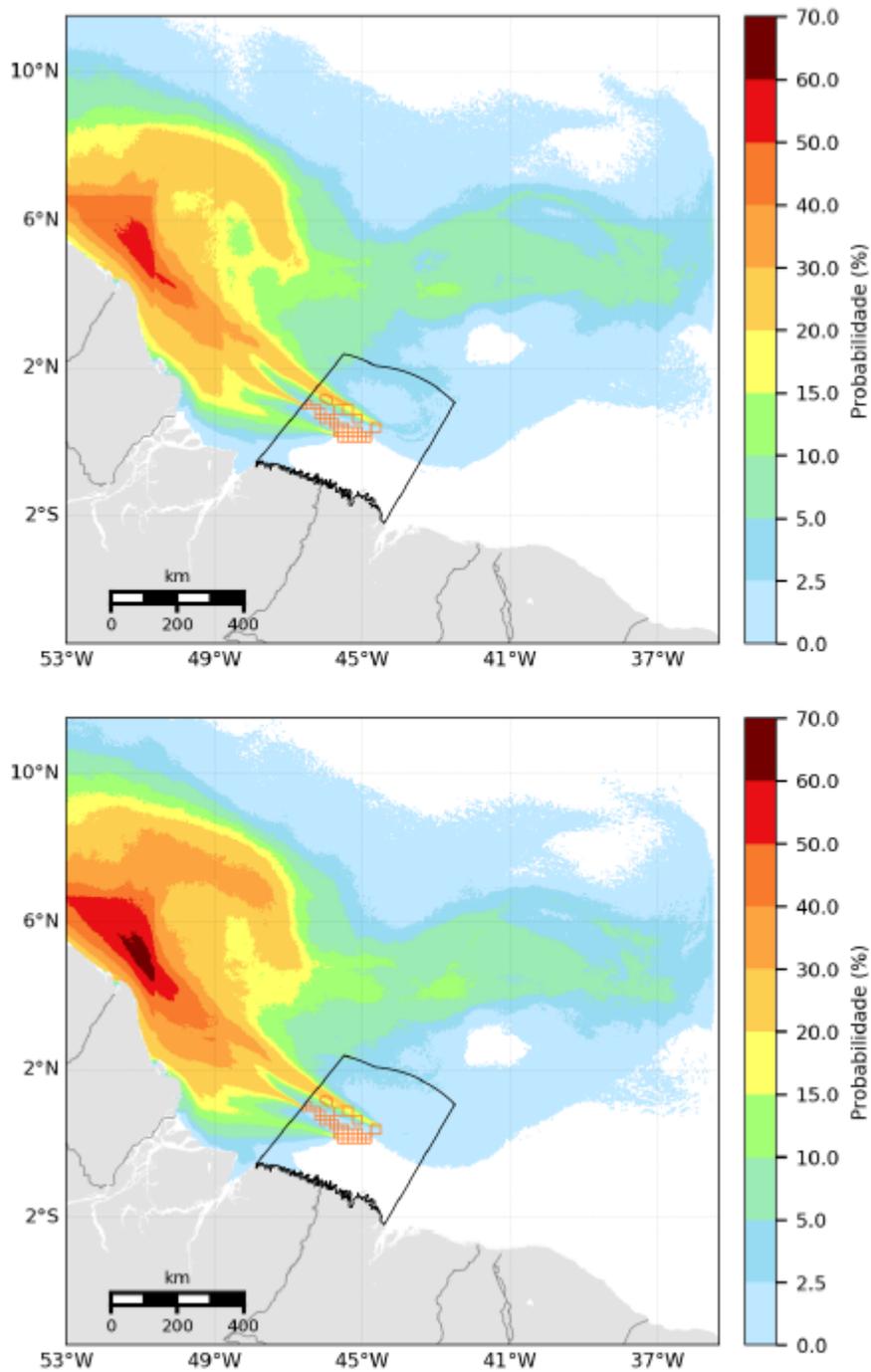


Figura 8-31: Probabilidade de presença de óleo integrada para os 04 pontos modelados com o OSCAR. Cenário de Superfície/200 m³ (painel superior) e Superfície/20.000 m³ (painel inferior).

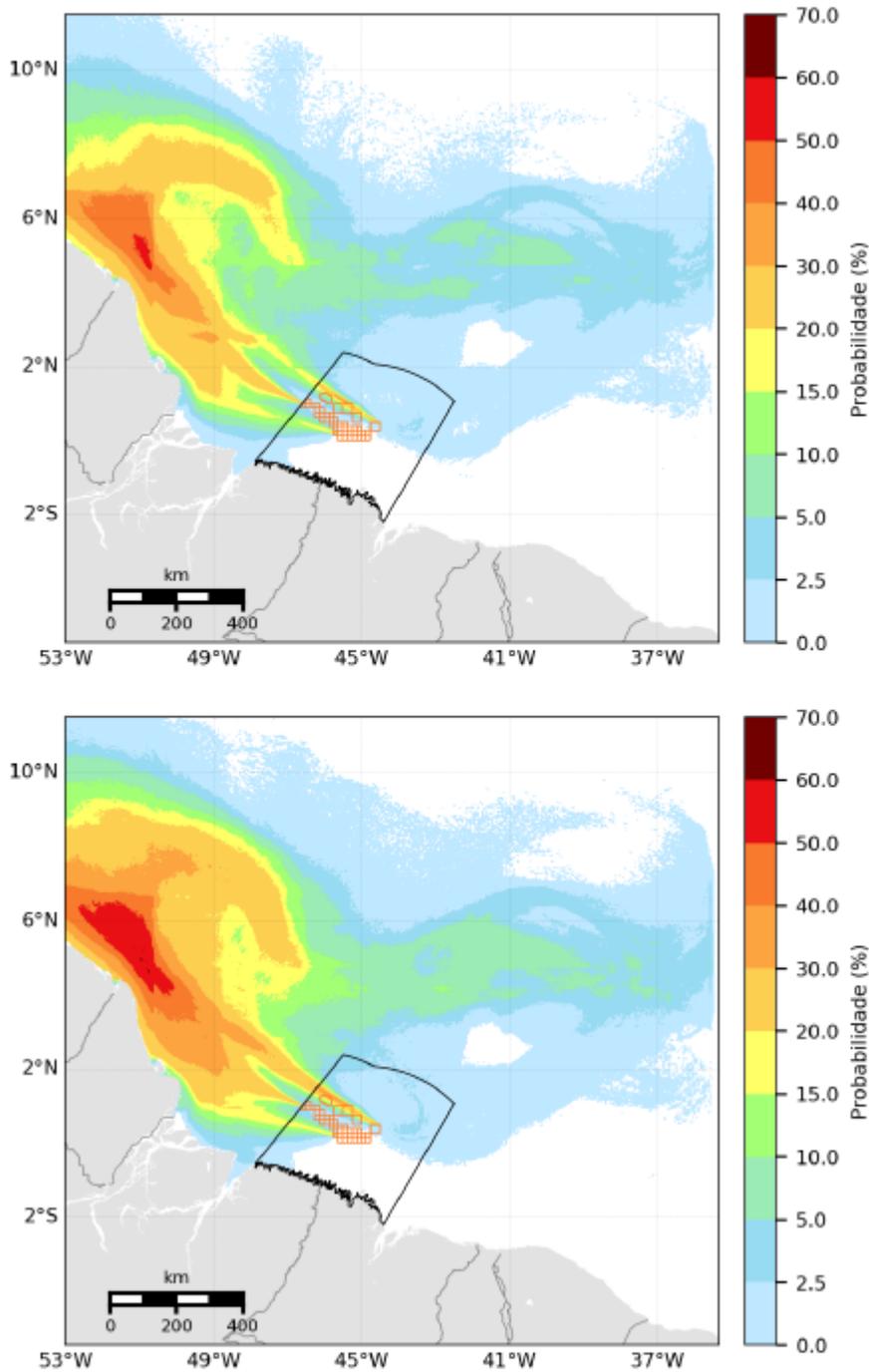


Figura 8-32: Probabilidade de presença de óleo integrada para os 04 pontos modelados com o OSCAR. Cenário de Fundo/200 m³ (painel superior) e Fundo/20.000 m³ (painel inferior).

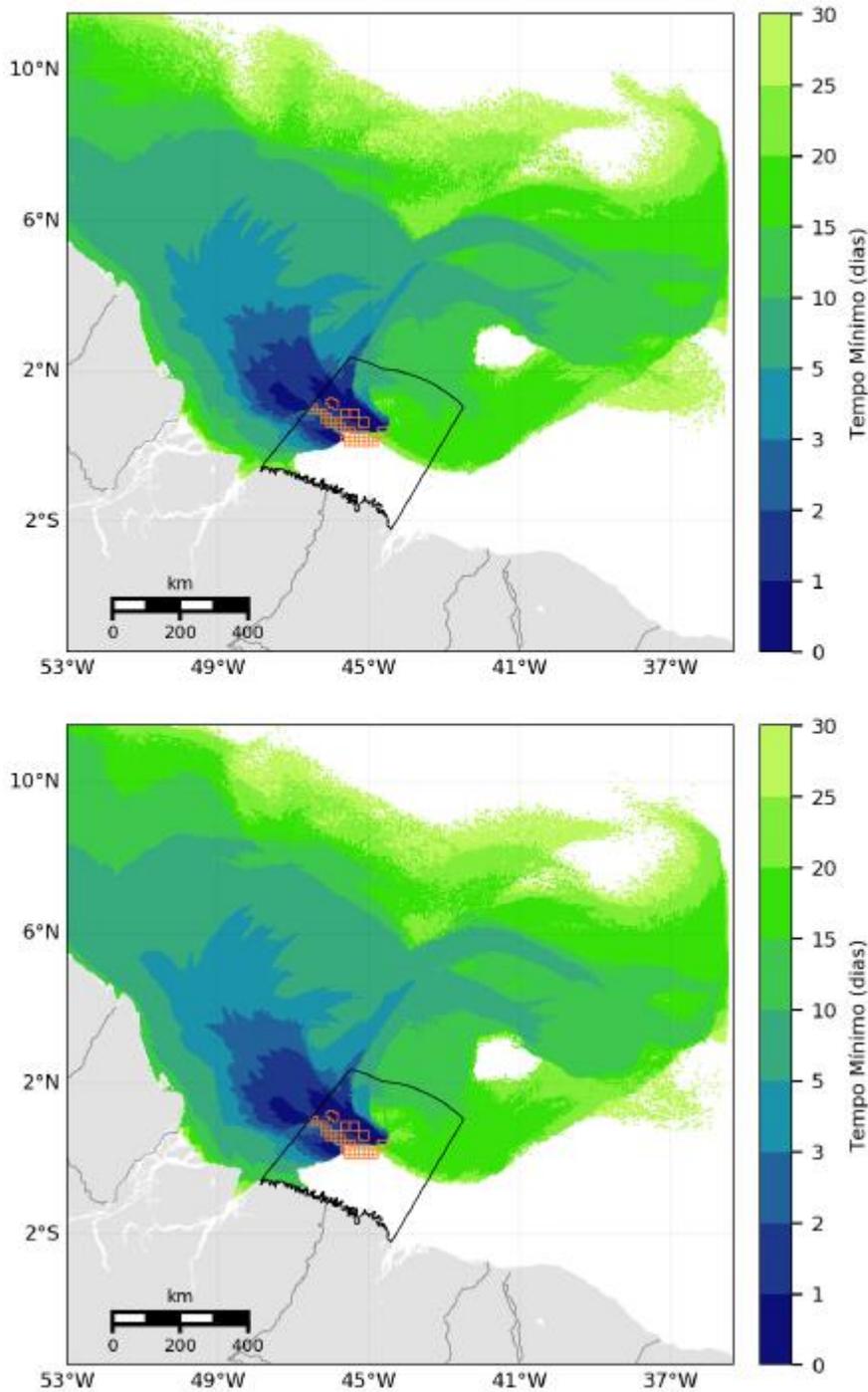


Figura 8-33: Tempo mínimo de chegada de óleo integrado para os 04 pontos modelados com o OSCAR. Cenário de Superfície/200 m³ (painel superior) e Superfície/20.000 m³ (painel inferior).

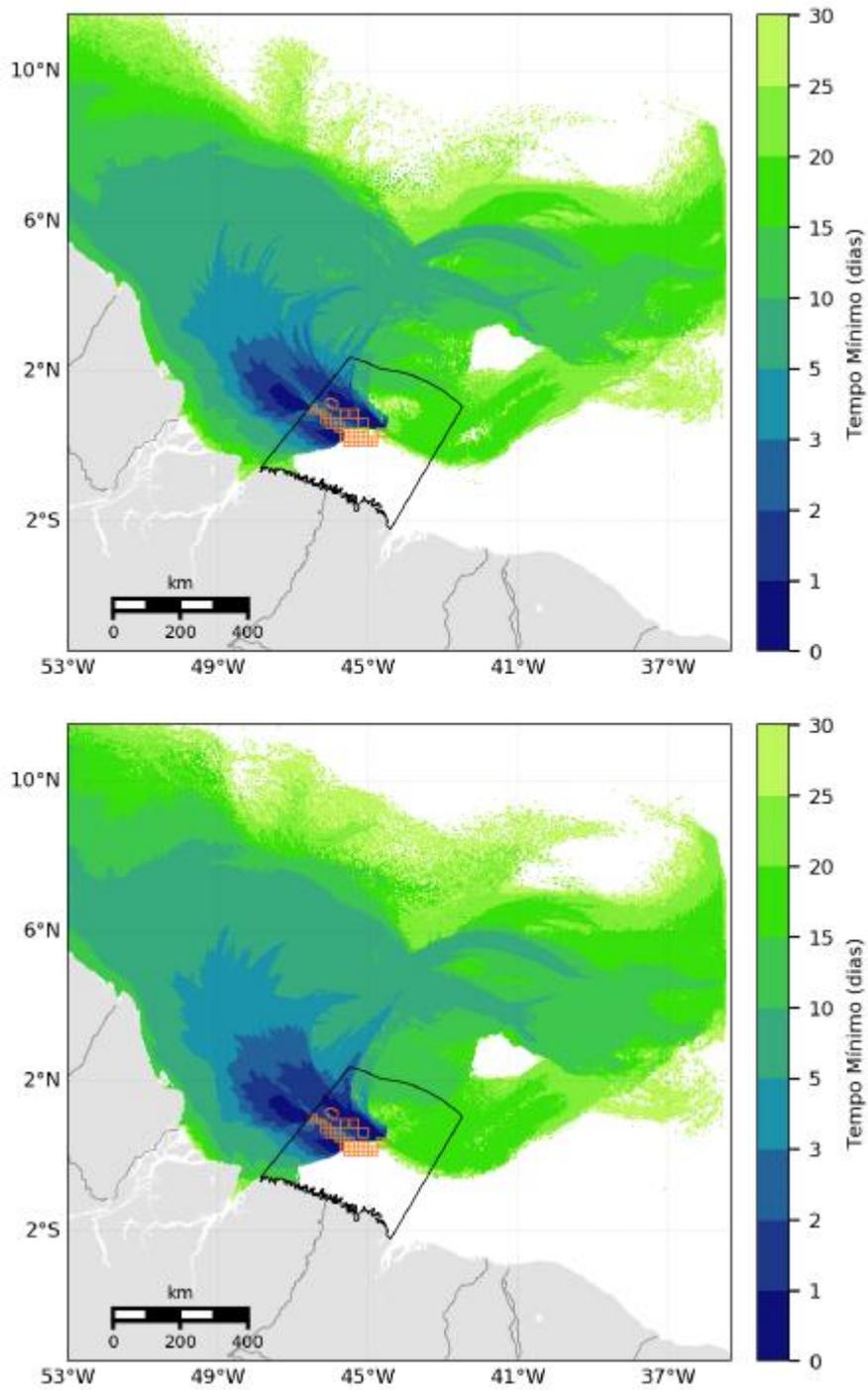


Figura 8-34: Tempo mínimo de chegada de óleo integrado para os 04 pontos modelados com o OSCAR. Cenário de Fundo/200 m³ (painel superior) e Fundo/20.000 m³ (painel inferior).

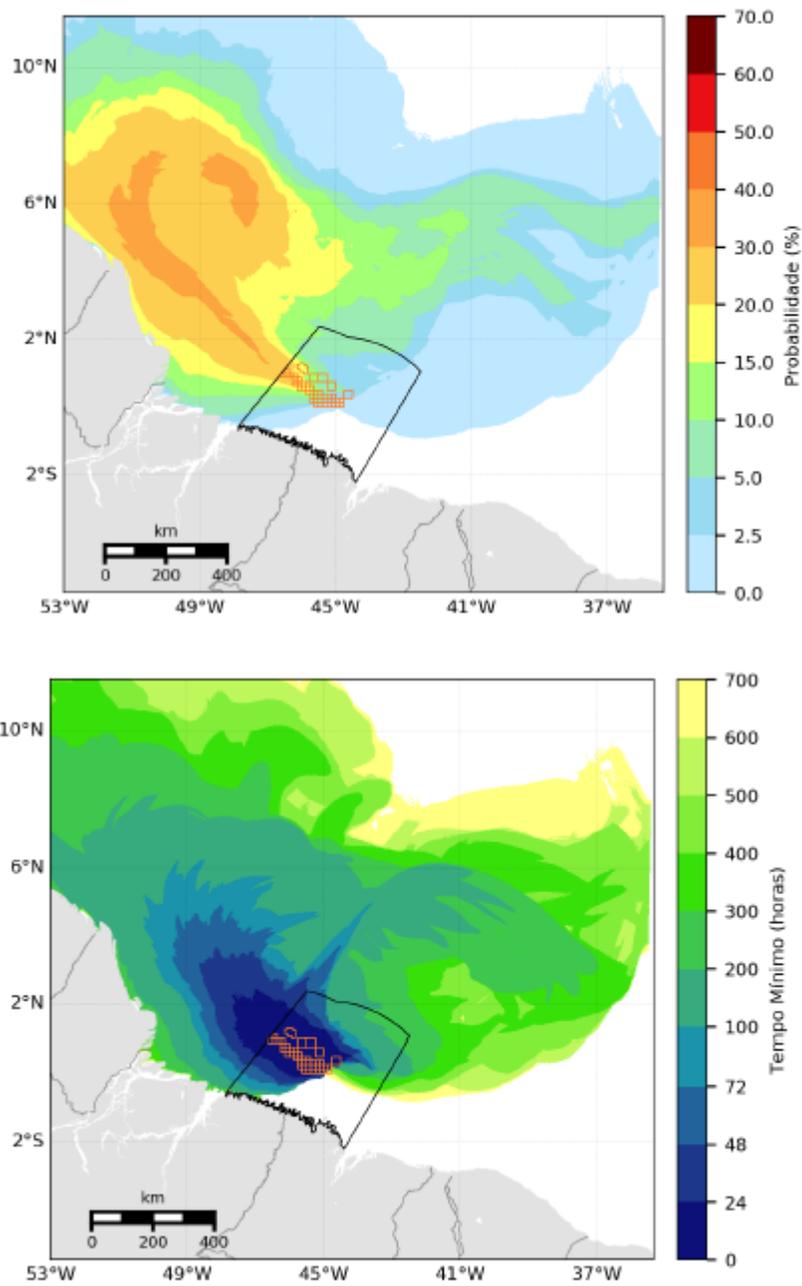


Figura 8-35: Probabilidade integrada (acima) e tempo mínimo de chegada óleo (abaixo) obtidos com o sistema de dispersão de óleo a partir de múltiplas fontes para o ano de 2016. O mapa apresenta a integração de todos os pontos de vazamento modelados distribuídos nos blocos da Bacia Pará-Maranhão.

A comparação entre os resultados obtidos na integração dos 4 pontos simulados com o OSCAR (independentemente do cenário considerado) com os resultados da metodologia do Costa Norte (integrando 118 pontos) traz uma série de pontos chave. É possível observar que, da mesma forma que

as áreas varridas foram similares entre os resultados obtidos com o modelo OSCAR, o resultado do Costa Norte também se aproxima dos outros. Num primeiro ponto de vista, isso mostra que a escolha dos 4 pontos estratégicos (mais a leste, oeste, profundo e raso) foi adequada para a representação da região de interesse.

Nos valores absolutos de probabilidade, verificam-se diferenças significativas, da ordem de até 30% de diferença. Quando foi comparado 1 ponto simulado com o OSCAR com 1 ponto simulado usando o modelo do Costa Norte, observou-se diferenças de probabilidade da ordem de até 20%, o que explica as diferenças na comparação da integração de diversos pontos. Entretanto, mais importante do que os valores absolutos, é o gradiente de probabilidades observados ao longo das regiões costeiras por onde o óleo pode passar. Em especial, na costa dos estados Pará e Amapá, nota-se a intensificação das probabilidades ao longo das latitudes, apresentando um gradiente similar em todos os mapas obtidos.

Outro ponto de extrema relevância são as diferenças obtidas em regiões próximas aos pontos de vazamento. Quando observadas distâncias de até ~400 km, é possível dizer que a quantidade de pontos amostrais influencia na distribuição de probabilidades. Nos mapas obtidos com o OSCAR, é nítida a intermitência nas probabilidades devido às direções preferencias do vazamento de cada ponto, contrariamente aos mapas obtidos com a metodologia de múltiplos pontos do PCN, que apresentam valores muito mais diluídos devido ao grande número de pontos modelados.

Todas as diferenças e similaridades discutidas são relacionadas à ordem de grandeza tanto da área de interesse quanto da distância com a qual se pretender analisar os resultados. Quanto maior a área geográfica a ser modelada, maior a necessidade de uma cobertura com mais pontos. Outra conclusão obtida diretamente dos resultados desse estudo é que quanto mais longe da região das fontes, a distribuição de probabilidades se torna mais similar entre as 2 diferentes metodologias. Entretanto, em regiões próximas (no caso desse estudo específico, de até ~400 km), a quantidade de pontos exerce grande influência nos mapas.

8.3.1.2. Análise de Suscetibilidade

O modelo de dispersão de óleo e a metodologia de múltiplas fontes foram desenvolvimentos específicos, porém integrados com o objetivo global do PCN. Dentre as três componentes da Vulnerabilidade (ver Volume 1, Capítulo 3), o desenvolvimento das metodologias descritas neste item possibilitou a aplicação destes sistemas para a determinação da Suscetibilidade das florestas de mangue das bacias Foz do Amazonas e Pará-Maranhão a grandes vazamentos de óleo ocorridos em qualquer lugar ao longo das bacias da Margem Equatorial Brasileira (MEB) (Carvalho *et al.* 2020).

8.3.1.2.1. Integração entre as escalas

A metodologia de múltiplas fontes desenvolvida no âmbito do PCN trouxe como inovação a possibilidade de rodar simultaneamente diversos pontos de vazamento e, com isso, estudar as probabilidades de chegada de óleo em uma determinada região a partir de diversas origens.

Graças ao abrangente conjunto de modelos hidrodinâmicos desenvolvidos no projeto (ver Volume 2, Capítulo 7), essa metodologia poderia ser aplicada para simular vazamentos desde as extensas regiões *offshore* da MEB (utilizando os resultados do modelo hidrodinâmico regional) até o interior das florestas de mangue das áreas foco do PCN (utilizando os resultados dos modelos hidrodinâmicos estuarinos).

Porém, como obter um resultado probabilístico integrado entre estas escalas? Por exemplo, como saber a probabilidade de presença de óleo no interior das florestas de mangue de Sucuriju a partir de potenciais vazamentos na bacia de Barreirinhas?

Tendo em vista a inviabilidade de realizar estas simulações (hidrodinâmicas e de dispersão de óleo) com a resolução necessária para a escala de florestas de mangue e a abrangência necessária para a escala regional, foi necessário desenvolver uma forma de acoplar os resultados entre as escalas para compor os resultados integrados de Suscetibilidade. A metodologia proposta e discutida a seguir pode ser vista como um aninhamento de resultados probabilísticos de dispersão de óleo, tornando possível utilizar modelos hidrodinâmicos de resoluções e abrangências distintas para obter resultados probabilísticos integrados.

Foram utilizados 5 modelos hidrodinâmicos distintos para forçar os modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes, a saber:

- ROMS G1 – Modelo com grade estruturada com 1/12° de resolução espacial e que abrange toda a MEB. Este modelo foi utilizado como forçante da rodada de dispersão de óleo de escala *offshore*, onde são distribuídas as fontes de vazamento por todas as bacias da MEB.
- Pará-Amazonas – Modelo com grade não-estruturada e resolução espacial variável, abrange da costa do Amapá até a costa do Maranhão, incluindo os principais estuários. Este modelo é tanto utilizado como forçante do modelo de dispersão em escala estuarina no Rio Pará – uma escala intermediária entre o *offshore* e São Caetano de Odivelas - quanto como forçante para o modelo de dispersão de Soure (SOU).
- Turiaçu (TUR) - Modelo de grade não-estruturada e resolução espacial variável cobrindo o estuário de Turiaçu. Este modelo é utilizado como forçante para a rodada de dispersão de óleo em TUR.
- São Caetano de Odivelas (SCO) - Modelo de grade não-estruturada e resolução espacial variável cobrindo o estuário de São Caetano de Odivelas. Este modelo é utilizado como forçante para a rodada de dispersão de óleo em SCO.
- Sucuriju (SUC) - Modelo de grade não-estruturada e resolução espacial variável cobrindo o estuário de Sucuriju. Este modelo é utilizado como forçante para a rodada de dispersão de óleo em SUC.

O modelo de maior abrangência espacial contempla as fontes de vazamento e é denominada de modelo de escala *offshore*, a partir do qual os demais serão aninhados e terão seus resultados probabilísticos integrados aos dele. Dessa forma estende-se o alcance da área de probabilidade de toque das manchas originadas nas fontes de vazamento da escala *offshore* às regiões contempladas pelos modelos de escala estuarina e de florestas de mangue – sem precisar de um modelo hidrodinâmico e de dispersão de óleo único que represente todas as escalas.

Um desenho esquemático indicando o aninhamento dos modelos de dispersão de óleo e os modelos hidrodinâmicos utilizados como forçantes é apresentado na Figura 8-36.

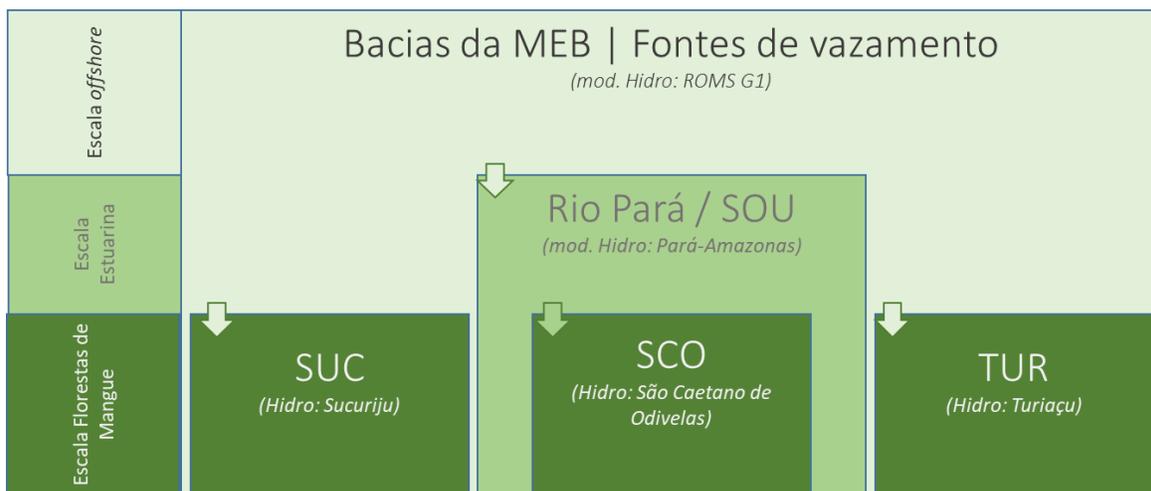


Figura 8-36: Esquema dos aninhamentos dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes utilizado para obtenção dos resultados de suscetibilidade em escala regional e nos quatro estuários foco do Projeto Costa Norte. As setas indicam os aninhamentos.

A ideia base que permeou a elaboração desta metodologia é o fenômeno a ser representado, ou seja, a dispersão de óleo oriundo de vazamentos ocorridos em áreas *offshore* até as regiões estuarinas e de florestas de mangue. Para descrever a elaboração desta metodologia, será utilizado como exemplo a integração dos resultados probabilísticos da escala *offshore* (onde se encontram as fontes de vazamento) com os resultados para o estuário do Rio Pará, escala estuarina.

A primeira etapa foi a criação das coordenadas dos pontos de vazamento a serem utilizados no modelo de dispersão de óleo na escala do Rio Pará, que utilizou como forçante hidrodinâmica os resultados do modelo Pará-Amazonas. Foram distribuídos pontos ao longo de um limite externo na foz do rio Pará, conforme a Figura 8-37. A ideia é que estes pontos sejam a interface entre os resultados probabilísticos do modelo *offshore* e os do modelo do Rio Pará.

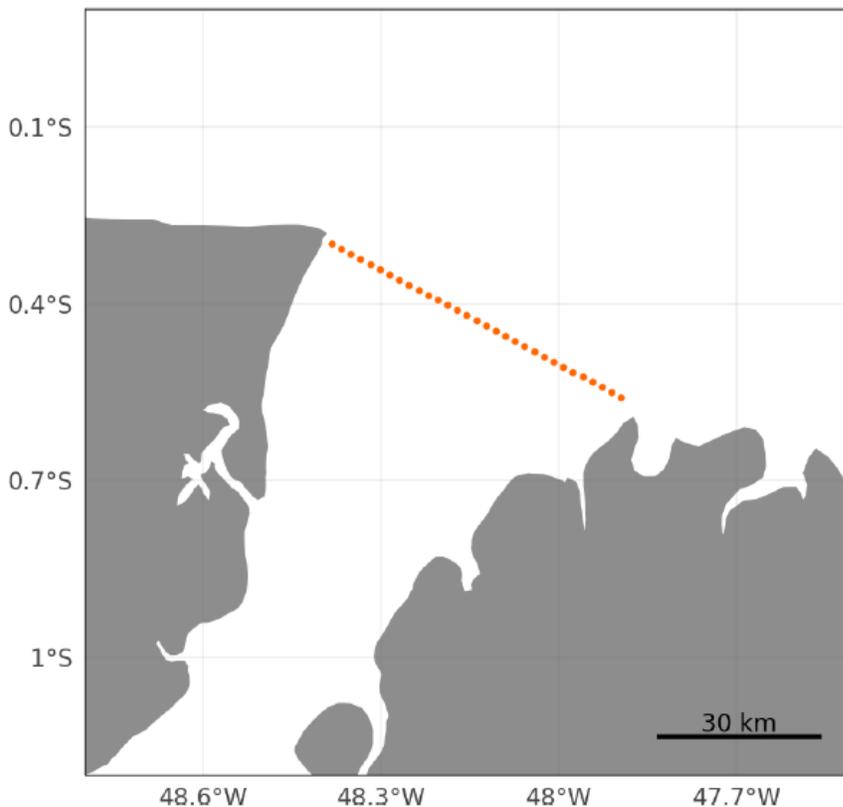


Figura 8-37: Pontos de vazamento considerados na modelagem estuarina.

Como a interface entre a modelagem *offshore* e a modelagem estuarina se dará nesses pontos, eles foram criados com um espaçamento de 2 km. Considerando que a grade da modelagem lagrangiana *offshore* possui 1 km de resolução, cada 2 células de grade teriam um novo ponto de simulação onde fazer a conexão entre as escalas.

Para estar alinhada com a ideia base desta metodologia, a configuração da rodada de múltiplas fontes no nível estuarino passou pela reflexão de um ponto importante: a duração dos vazamentos nas escalas aninhadas. Nas rodadas *offshore* ou rodadas usuais de modelagem de óleo, a duração de emissão de partículas nas fontes de vazamento é relacionada com o cenário acidental. Porém, na lógica da integração de escalas para obter a suscetibilidade de florestas de mangue a um vazamento de óleo *offshore*, o processo físico a ser representado é a chegada de uma mancha de óleo oriunda do vazamento de algum ponto *offshore*. Portanto, a mancha de óleo pode vir a atingir a linha de interseção entre as escalas com diferentes formatos – levando a durações de “vazamento” distintas na configuração do modelo de óleo estuarino. Esse tempo pode ser bastante variado.

O tempo de passagem da mancha pela interface das escalas (representado no modelo como a duração do lançamento de partículas) influencia fortemente o mapa de probabilidades – um vazamento 24 horas

de duração varre uma área maior do que um de 2 horas e, portanto, no cálculo do mapa probabilístico, existirão probabilidades maiores.

Esse efeito poderia ser evitado se a grade do lagrangiano marcasse o número de partículas que passaram por cada célula, ao invés de marcar apenas a presença ou não, durante cada simulação, porém isso seria inviável do ponto de vista de custo computacional.

Portanto, como no fenômeno a ser modelado a duração da passagem do óleo não é fixa, primeiramente foram feitos testes associando uma duração instantânea e um intervalo de vazamento curto o suficiente para contemplar a variabilidade dinâmica do local ao longo das n simulações determinísticas que irão compor os resultados probabilísticos. Dessa forma, foi utilizado o intervalo entre simulações de 3 em 3 horas.

Para testar se as probabilidades integradas seriam muito reduzidas com esta metodologia de vazamentos instantâneos, foram realizados dois testes, um utilizando vazamentos instantâneos e o outro utilizando vazamentos com 24 horas de duração. Abaixo podem ser visualizados os resultados de probabilidade integrada (Figura 8-38), tempo mínimo (Figura 8-39) e probabilidade máxima obtidos nestes testes (Figura 8-40). Nota-se que as probabilidades (tanto integrada quanto máxima) são bastante afetadas nos seus valores absolutos ao se alterar a duração do vazamento, com valores mais altos no experimento com duração de 24 horas. O tempo mínimo de chegada se mantém muito parecido, o que era esperado. Porém, o contorno externo da área com probabilidade de toque se manteve igual nos dois experimentos, indicando que a discretização de 3 horas entre simulações é adequada para representar as possibilidades de deriva devido à dinâmica local.

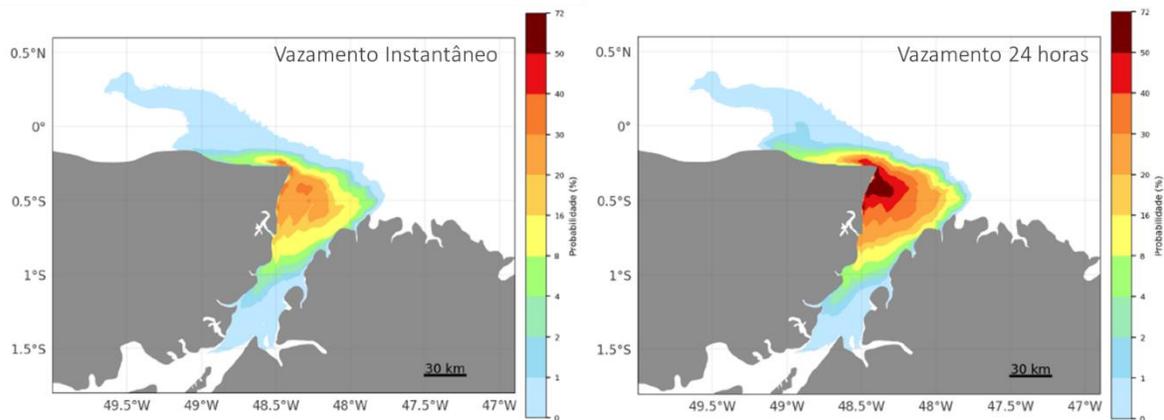


Figura 8-38: Probabilidade integrada entre os 30 pontos de vazamento simulados para o experimento com vazamento instantâneo (esquerda) e de 24 horas (direita).

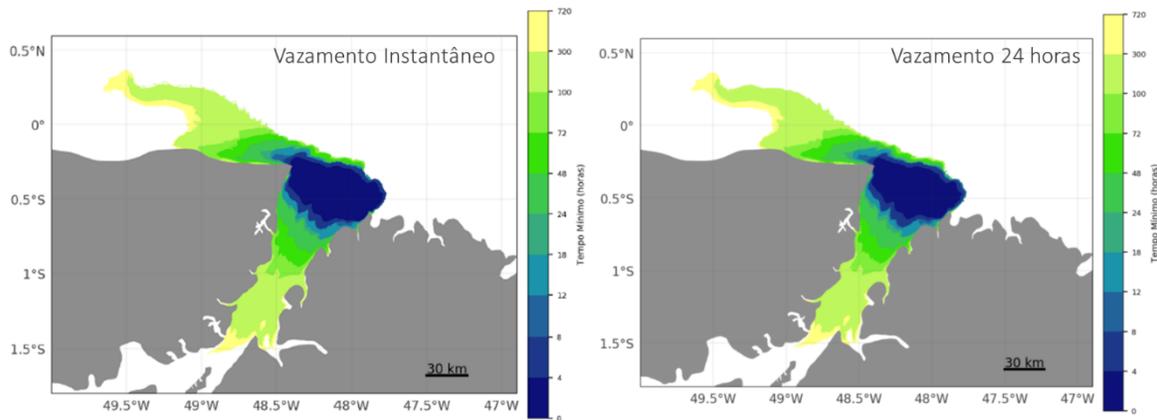


Figura 8-39: Tempo mínimo de chegada de óleo considerado os 30 pontos de vazamento simulados para o experimento com vazamento instantâneo (esquerda) e de 24 horas (direita).

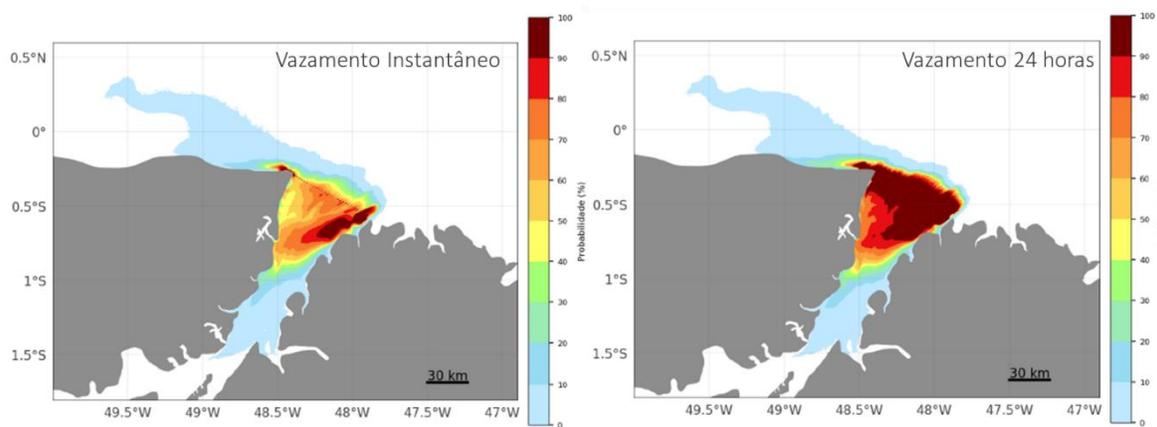


Figura 8-40: Probabilidade máxima de chegada de óleo considerando os 30 pontos de vazamento simulados para o experimento com vazamento instantâneo (esquerda) e de 24 horas (direita).

Abaixo, apresenta-se o mapa de probabilidade e tempo mínimo para o ponto 15, no centro da entrada da baía de Marajó, para os dois cenários de vazamento testados (Figura 8-41). Nota-se mais uma vez que a região com probabilidade de toque é praticamente a mesma, porém com valores absolutos de probabilidade bem distintos, principalmente na região de maiores probabilidades. Como cada ponto de simulação contém aproximadamente 2600 simulações de vazamento (uma a cada 3 horas) o tempo mínimo dos dois cenários de vazamento foram bastante próximos, indicando que considerar este intervalo de 3 horas entre vazamentos é suficiente para representar a dinâmica.

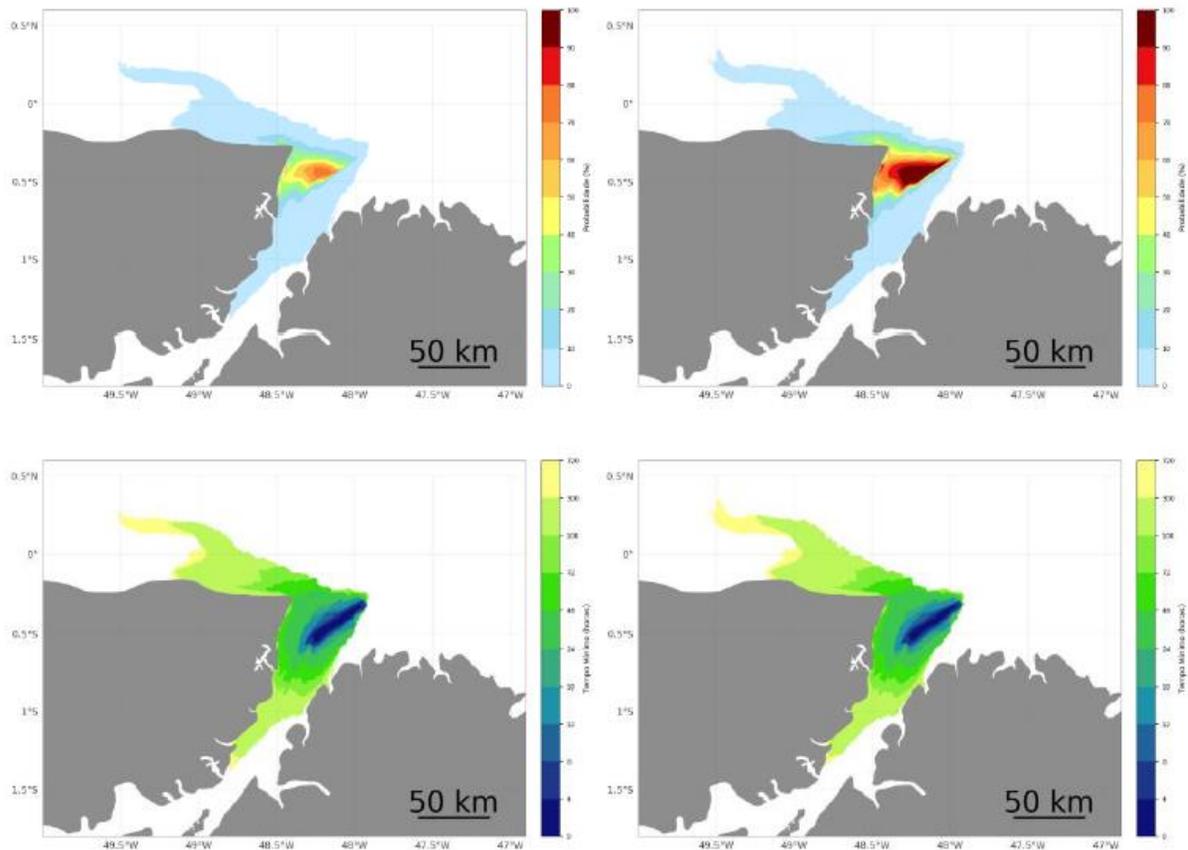


Figura 8-41: Mapa de probabilidade (acima) e tempo mínimo de chegada (abaixo) considerando o ponto de vazamento no 15 para o cenário de vazamento instantâneo (esquerda) e com duração de 24 horas (direita).

Os testes com durações de vazamento instantâneos apresentaram mapas de probabilidade consideravelmente diferentes dos vazamentos de 24 horas. Foi necessário, portanto, desenvolver uma nova abordagem que permitisse lidar melhor com a representação da passagem de manchas de óleo com duração diferentes na entrada do domínio estuarino.

Foi proposto que ao invés de considerar um mesmo valor de duração do vazamento para todas as simulações determinísticas que compõe o resultado probabilístico, considerar a variação deste valor ao longo de cada determinístico. Para isso, propõe-se utilizar uma nova variável, chamada tempo de exposição ao óleo, que forneceria a distribuição de valores a serem utilizados.

O tempo de exposição reflete, de forma aproximada, o tempo que uma mancha teria passado por um ponto de grade em cada simulação determinística podendo, portanto, representar a “duração de lançamento das partículas” na nova escala. Essa variável seria proveniente da escala anterior, ou seja, para a sua utilização na escala estuarina seria necessário obtê-la na escala *offshore*. Portanto, foi necessário uma atualização no código do modelo para armazenar esta variável.

De forma numérica o tempo de exposição é obtido a partir do número de passos de tempo ao qual uma célula da grade do modelo ficou exposta a pelo menos 1 partícula de óleo. Dessa forma, se uma célula nunca apresentou ao menos 1 partícula em ao menos um passo de tempo, o valor seria zero. Contrariamente, se alguma célula apresentou ao menos 1 partícula ao longo de todos os seus passos de tempo, o valor do tempo de exposição seria o máximo possível, ou seja, igual a duração da simulação. O cálculo foi então implementado e os resultados de tempo de exposição máximo para a grade *offshore* podem ser vistos na Figura 8-42.

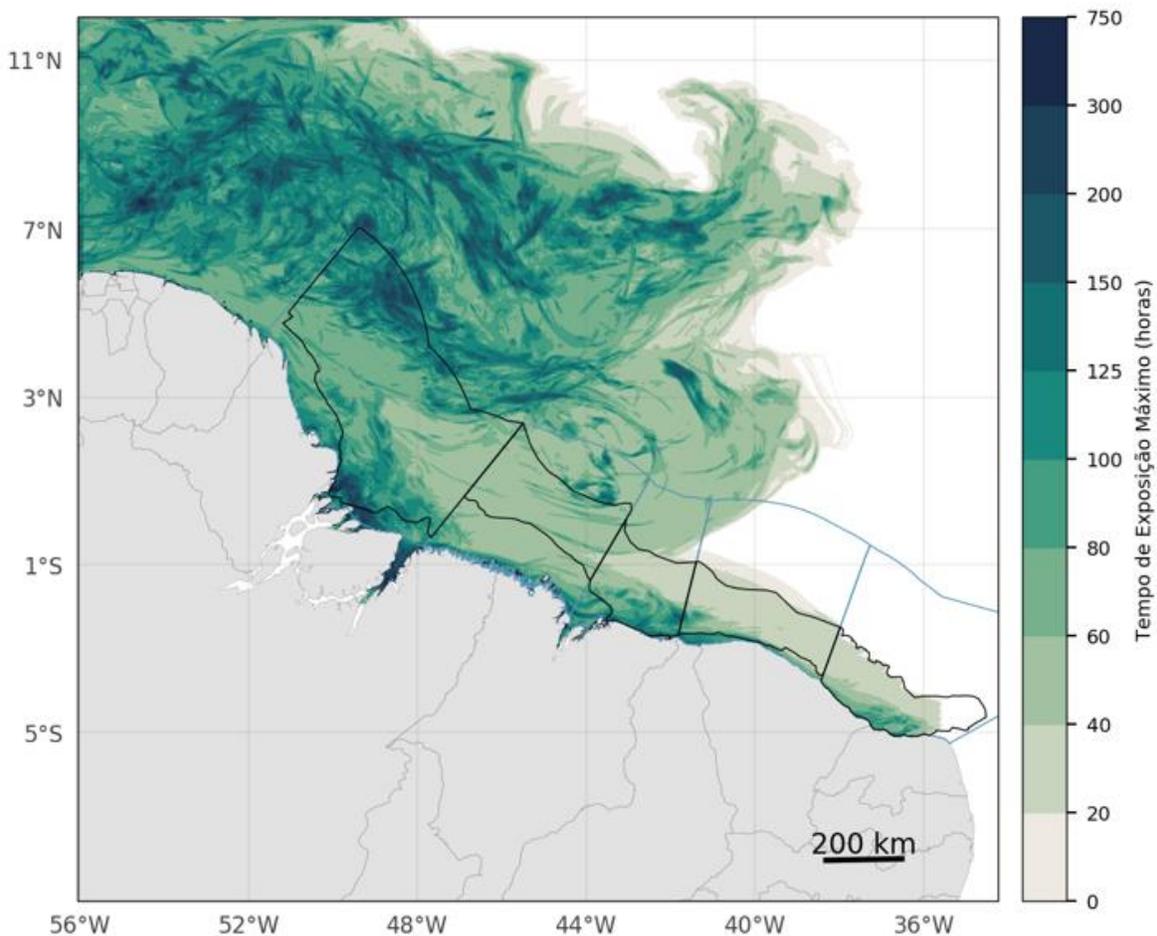


Figura 8-42: Tempo de exposição máximo em cada ponto de grade dos resultados da rodada *offshore*.

A próxima etapa consistiu em extrair os valores de tempo de exposição em cada ponto de grade que fosse mais próximo a cada um dos 31 pontos de vazamento da simulações estuarina. O mapa acima apresenta os resultados de tempo de exposição **máximos** em cada ponto de grade. Entretanto, para a seleção dos tempos de vazamento foram considerados todos os casos, isto é, o número de pontos de vazamento das simulações *offshore* (1138) multiplicado pelo número de determinísticos (183), resultando em 208.254 valores. Em seguida, todos os valores iguais a zero (0) foram descartados, pois

esses casos refletem os cenários nos quais a mancha de óleo não teria atingido à região das simulações estuarinas. Um exemplo de conjunto de valores restantes é apresentado na Figura 8-43.

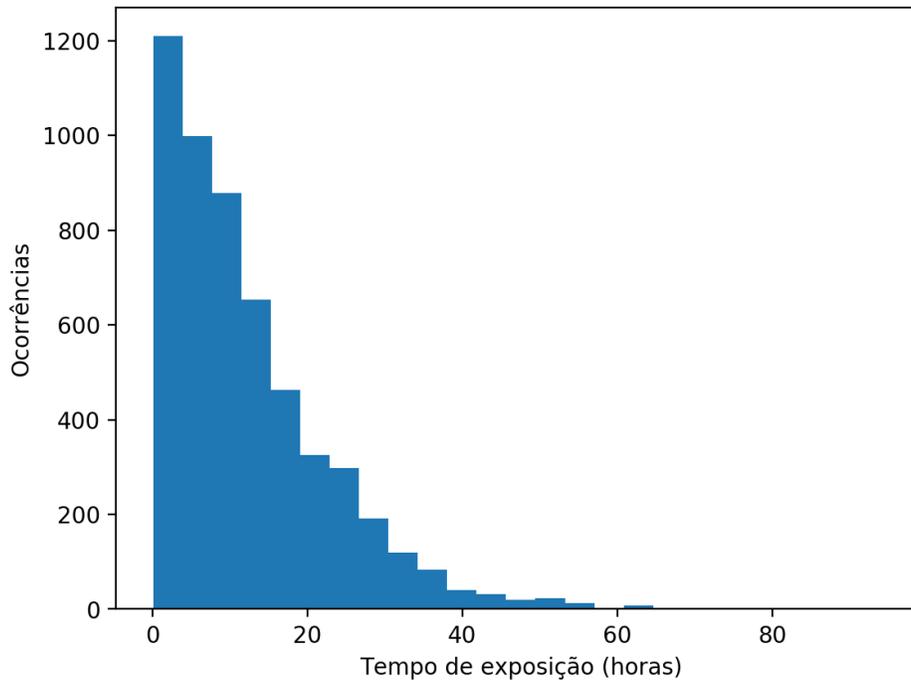


Figura 8-43: Histograma dos tempos de exposição (horas) retirados para o ponto 15 do modelo de dispersão de óleo estuarino do Rio Pará.

A partir da distribuição total dos tempos de exposição da escala *offshore* em cada ponto de interface entre as escalas (Figura 8-37), os valores de tempo de vazamento para a escala estuarina são obtidos retirando-se amostras aleatoriamente e sem reposição.

O modelo de dispersão para o Rio Pará foi rodado com as seguintes configurações, 31 pontos de vazamento, simulações com duração de 15 dias e intervalo entre simulações de 3 horas, resultando em 2.928 simulações determinísticas em cada ponto de vazamento ao longo do ano de 2016 (90.768 simulações determinísticas ao total). Os resultados de probabilidade integrada, máxima e tempo mínimo de chega de óleo podem ser vistos da Figura 8-44 a Figura 8-47. Esta abordagem foi considerada coerente com o processo a ser estudado e uma saída metodologicamente robusta e viável, sendo replicada para a definição os tempos de vazamento dos demais aninhamentos.

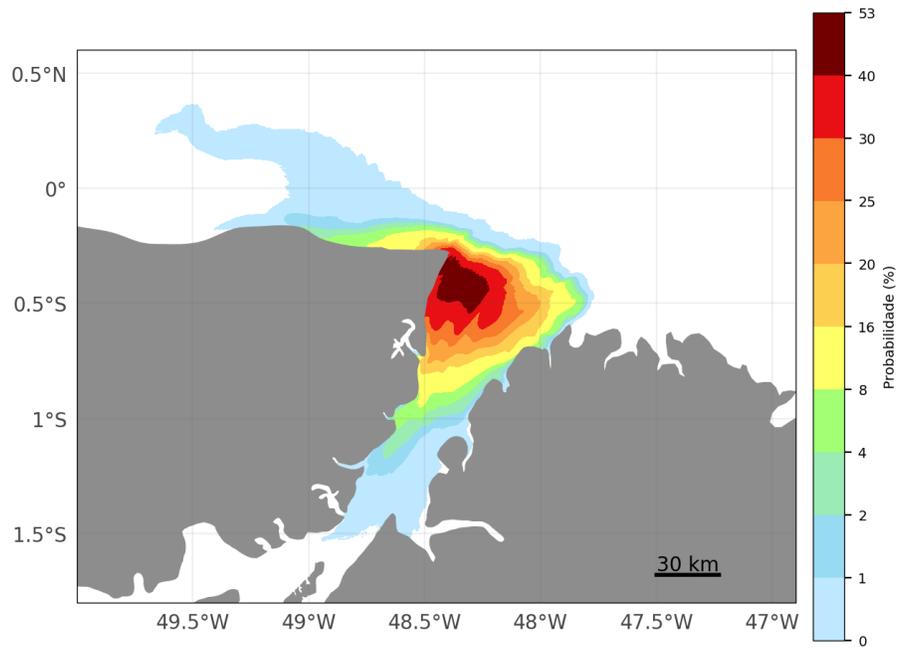


Figura 8-44: Probabilidade integrada em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala estuarina usando durações de vazamento variáveis.

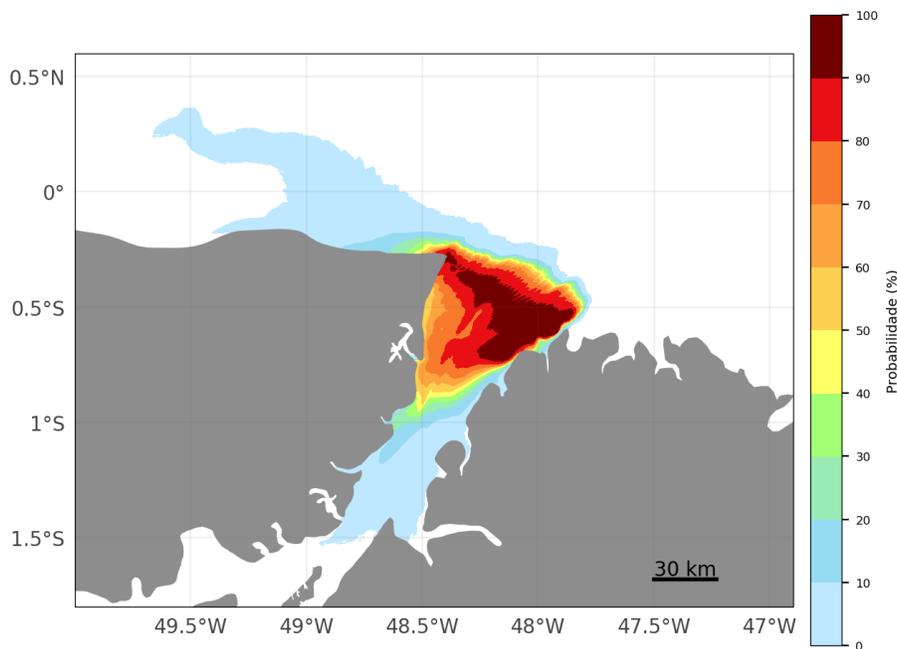


Figura 8-45: Probabilidade máxima em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala estuarina usado durações de vazamento variáveis.

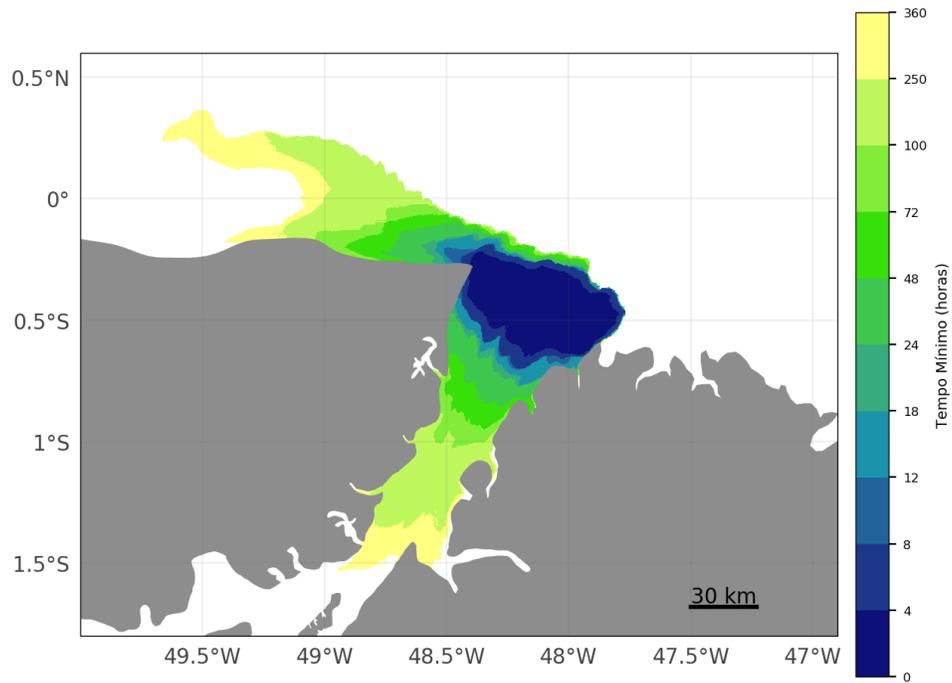


Figura 8-46: Tempo mínimo de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala estuarina usado durações de vazamento variáveis.

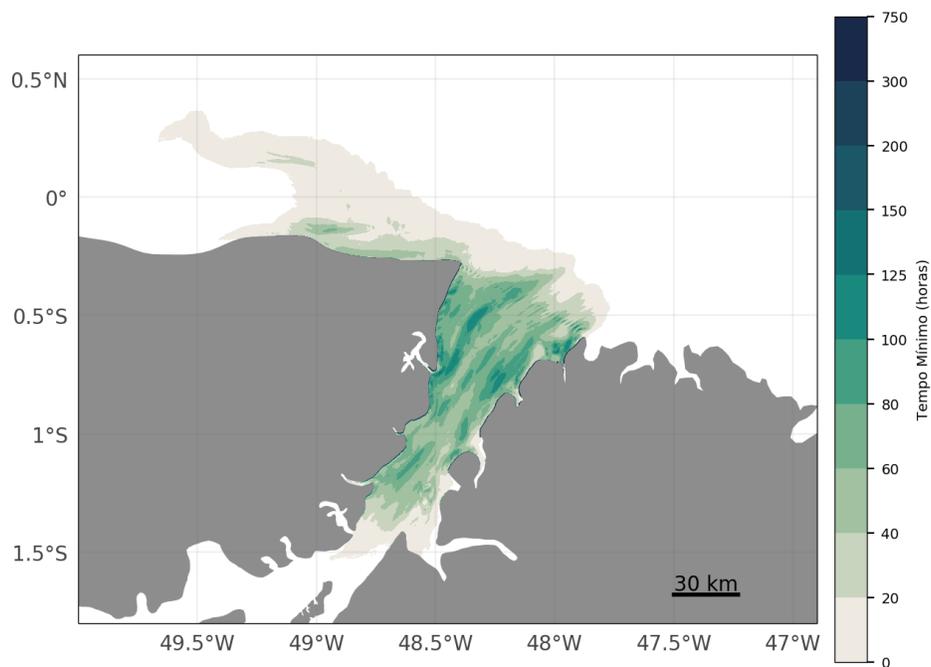


Figura 8-47: Tempo de exposição máximo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala estuarina usado durações de vazamento variáveis.

A segunda questão a se resolver é como se daria a integração dos resultados probabilísticos das escalas a serem acopladas. A base dessa integração foi resolvida a partir da multiplicação dos valores de probabilidade. Para isso, verifica-se o valor da probabilidade máxima de presença de óleo, obtido no resultado *offshore*, no ponto de grade mais próximo a cada um dos pontos de vazamento (n pontos) da escala aninhada. Os mapas probabilísticos de cada um dos n pontos são multiplicados pelos valores correspondentes, para obtenção de novos mapas. Por último, em cada ponto da grade lagrangiana estuarina é verificado o valor máximo ao se comparar os n mapas multiplicados, obtendo-se o mapa de probabilidade máxima integrado final.

A Figura 8-48 apresenta um exemplo esquemático (para o ponto 09 dos 31 pontos da modelagem estuarina do Rio Pará) de como foi realizada a multiplicação. O painel da esquerda apresenta o resultado de probabilidade máxima para a escala *offshore*. O quadrado laranja, na região do estuário do Rio Pará representa o ponto de onde foi retirado o valor correspondente a coordenada do ponto 09 da grade estuarina (29,0%). O mapa probabilístico do ponto 09 é exibido no painel da direita. Por fim, o resultado combinado é apresentado no painel inferior. Em seguida, na Figura 8-49 é apresentado o resultado completo, considerando todos os 31 pontos.

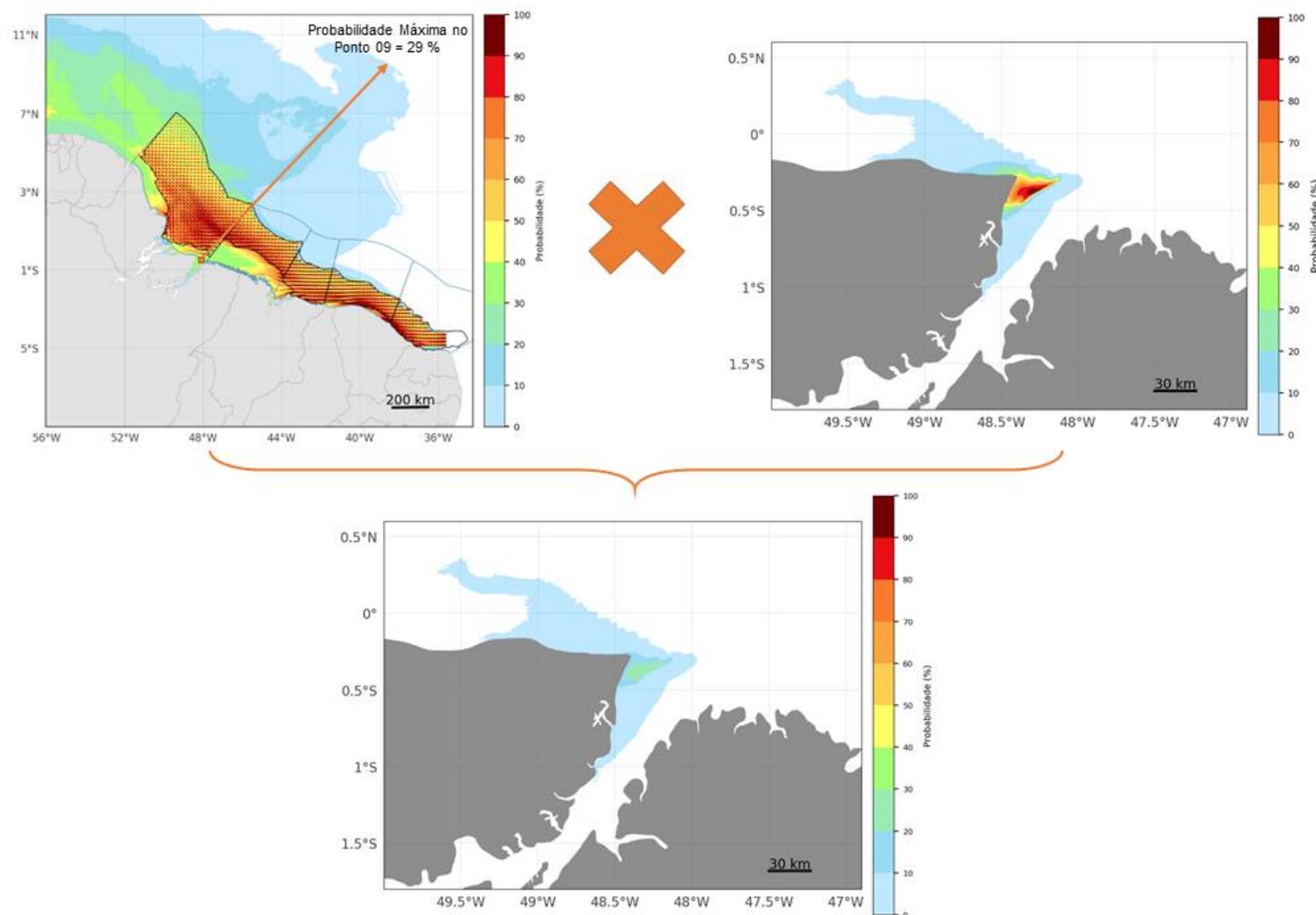


Figura 8-48: Exemplo de integração de probabilidades máximas entre os resultados *offshore* e estuarino, considerando o ponto 09 estuarino.

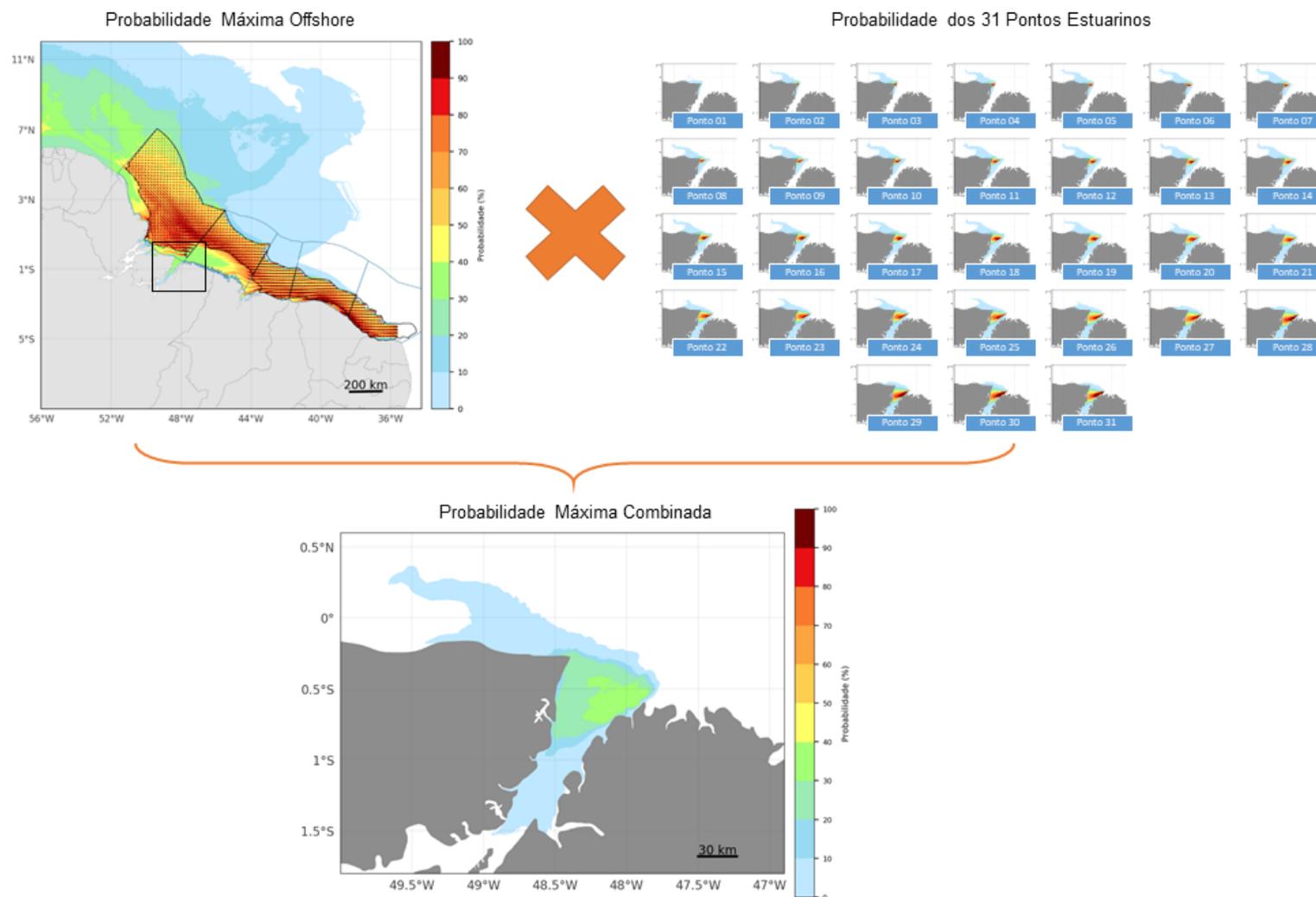


Figura 8-49: Integração de probabilidades máximas entre os resultados *offshore* e estuarino, considerando os 31 pontos de vazamento estuarinos.

A metodologia elaborada para a integração de escalas pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Rodar o modelo de dispersão de óleo estocástico com múltiplas fontes em escala *offshore*, com duração de vazamento fixo. São gravados resultados de área varrida, tempo mínimo de toque e tempo de exposição em uma grade regular.
2. Selecionar pontos na interseção entre as escalas para serem usados como fontes de partículas da escala estuarina. São extraídos os tempos de exposição dos resultados da rodada *offshore* em cada ponto fonte da escala estuarina. Essa informação reflete a variabilidade de uma mancha de óleo passando e é usada para definir a distribuição das durações dos vazamentos da rodada estuarina.
3. Rodar o modelo de dispersão de óleo estocástico com múltiplas fontes em escala estuarina. A duração de vazamento de cada rodada determinística (de cada fonte) é selecionada aleatoriamente do conjunto de tempos de exposição obtido no passo anterior.
4. Os resultados probabilísticos de ambas as escalas rodadas são integrados baseado em multiplicação de probabilidades. A probabilidade máxima da rodada *offshore* é computada em cada ponto fonte da rodada estuarina (pontos de interseção). Os mapas probabilísticos de cada fonte da rodada estuarina são multiplicados pela probabilidade computada da rodada *offshore*. Ao final, a probabilidade máxima na região estuarina é computada em cada ponto de grade lagrangiana.

Ressalta-se que a metodologia pode ser replicada para múltiplos aninhamentos – como feito para alcançar a escala do modelo de São Caetano de Odivelas, no qual a integração entre as escalas se dá em 2 estágios, Bacias da MEB > Rio Pará > São Caetano de Odivelas (Figura 8-50).

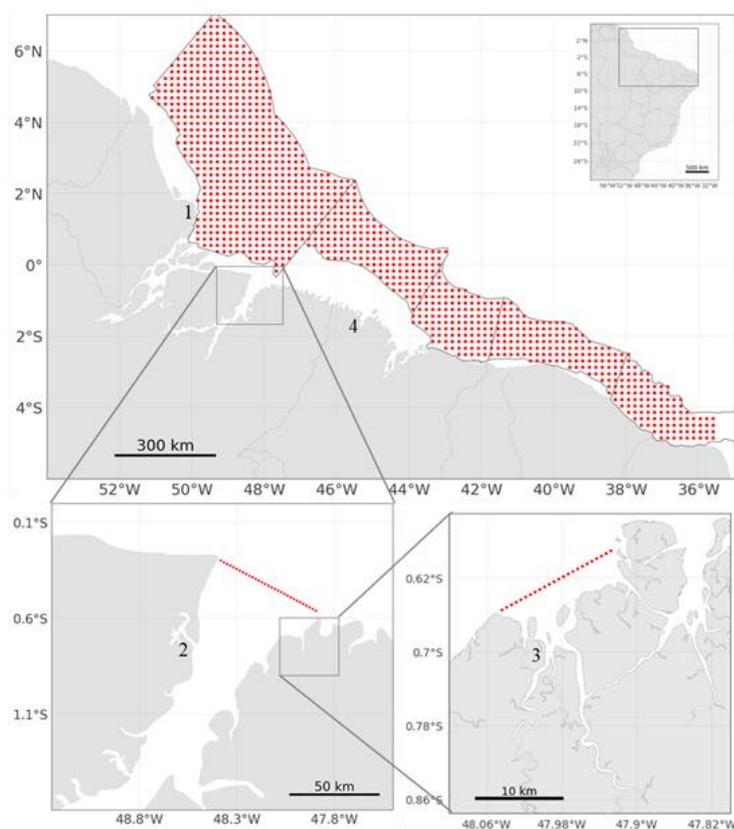


Figura 8-50: Figura esquemática dos aninhamentos dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes até chegar no modelo de São Caetano de Odivelas. O quadro superior representa os pontos de vazamento distribuídos nas bacias da MEB do modelo de escala *offshore*. O quadro inferior esquerdo indica os pontos de vazamento do modelo aninhado Rio Pará e o quadro inferior direito indica as fontes de vazamento do modelo de São Caetano de Odivelas.

8.3.1.2.2. Seleção de Cenários Ambientais

Outro ponto relevante são os cenários ambientais que irão compor o produto final de suscetibilidade. A ideia adotada no PCN foi de considerar diferentes escalas temporais na hora de realizar a separação de cenários, em função da escala espacial.

Tomando como exemplo as simulações de deriva de óleo *offshore*: elas são compostas por centenas de pontos de vazamento, com novas simulações se iniciando a cada 2 dias e com duração de 30 dias. Pela grande extensão geográfica e principalmente temporal, seria inviável uma separação de cenários em escalas muito curtas, como por exemplo da ordem de dias. Dessa forma, propôs-se trabalhar com escalas sazonais para a separação dos resultados provenientes das simulações *offshore*, em seguida, separações por ciclos de sizígia e quadratura de maré para as regiões estuarina (Rio Pará) e para as regiões de florestas de mangue (Turiaçu, Soure, São Caetano de Odivelas e Sucuriçu).

Desta forma, além dos resultados probabilísticos considerando todo o período simulado, é possível obter mapas probabilísticos a partir da integração das simulações determinísticas iniciadas em determinado intervalo de tempo. Com isso, foram definidos dois cenários para a escala *offshore*, Seco (julho a dezembro) e Chuvoso (Janeiro a Junho) e dois cenários para as escalas estuarinas e de florestas de mangue, Sizígia e Quadratura. Com o cruzamento destes cenários, os resultados nas escalas estuarinas e de florestas de mangue são divididos em 4 – Seco/Quadratura; Seco/Sizígia; Chuvoso/Quadratura; Chuvoso/Sizígia.

Para realizar a separação das simulações iniciadas em instantes de sizígia ou quadratura o seguinte método foi utilizado:

1. A partir da série de elevação na boca da Baía de Marajó extraída dos resultados do modelo hidrodinâmico utilizado (Pará-Maranhão), foi realizada uma análise harmônica para obtenção das constantes astronômicas.
2. Isolando as constantes M2 e S2 – cuja interação gera a sizígia e quadratura – foi reconstruída sinteticamente uma série de elevação para o período da simulação de óleo (Figura 8-51a).
3. A partir desta série reconstituída, obtém-se uma série das preamares. O nível médio da altura das preamares foi utilizado como separador dos períodos de sizígia e quadratura (Figura 8-51a).
4. A partir desta separação, são obtidos os índices dos momentos de início de simulação que estão contidos em cada intervalo de sizígia e quadratura (Figura 8-51b). Estes índices são utilizados para pós-processar os resultados nos cenários propostos.

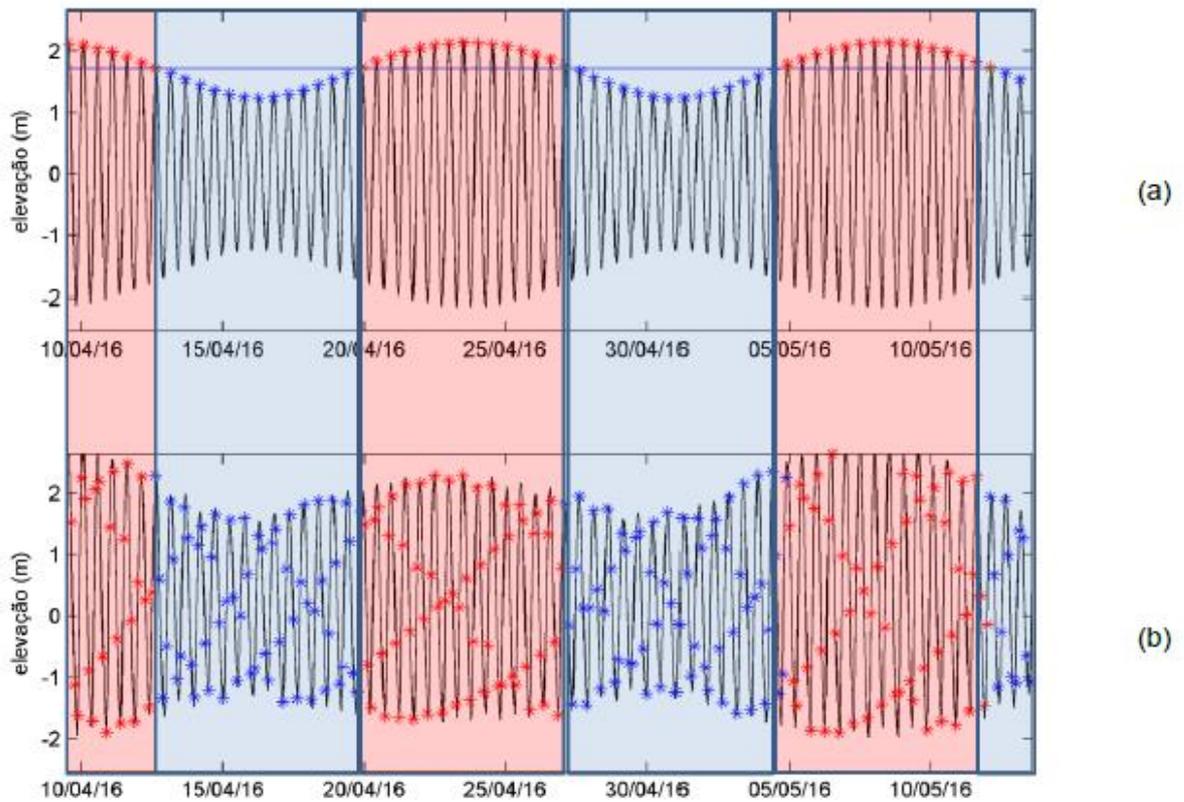


Figura 8-51: Acima, série de maré sintética na boca da baía de Marajó reconstituída a partir das constantes M2 e S2. A linha azul representa a média das alturas de preamar e os instantes com preamar acima do nível médio foram considerados momentos de sizígia e abaixo, de quadratura. Abaixo, instantes de início das simulações de óleo na escala estuarina separados em sizígia (pontos vermelhos) e quadratura (pontos azuis), sobre a série de maré original, obtida do modelo hidrodinâmico estuarino desenvolvido no Projeto Costa Norte.

8.3.1.2.3. Interação Mangue-Óleo

Ao alcançar uma floresta de mangue, o poluente pode ser advectado para seu interior, onde tanto a hidrodinâmica quanto o intemperismo do óleo serão afetados pela própria floresta. Conforme demonstrado em diversos estudos (WOLANSKY *et al.* 1992, MAZDA e WOLANSKY 1995, MAZDA *et al.* 1997, MAZDA *et al.* 2005, MAZDA e KAMIYAMA, 2007), a hidrodinâmica é afetada pela interação do fluido com a vegetação de maneira complexa e diversas abordagens de parametrizações são propostas na literatura.

Da mesma forma, pode-se supor que a interação do óleo com diversos aspectos da floresta de mangue (vegetação, sedimento, tocas de caranguejos) irá ocorrer de forma a reter massa através de diversos processos altamente variáveis de acordo com o tipo do óleo e características específicas de cada floresta.

Assim, do ponto de vista da questão da Suscetibilidade, uma importante questão pode ser formulada: Até que distância, a partir do seu limite externo, determinada floresta de mangue é suscetível à contaminação por hidrocarbonetos?

A resposta à essa pergunta passa pelos seguintes fatores:

- Que tipo de óleo chegou ao manguezal?
- Qual a quantidade de óleo que chegou no manguezal?
- Como é o campo hidrodinâmico na floresta de mangue?

- Como é a interação do poluente com o ambiente, considerando a vegetação e o tipo de sedimento?

O fator 4 é dependente do fator 1 na medida que a interação do óleo com a floresta de mangue será variável para cada tipo de óleo (p. ex. um derivado leve terá uma adsorção diferente de um óleo altamente emulsificado).

A metodologia proposta não leva em conta o tipo e a quantidade de óleo, apenas obtém mapas de probabilidade de presença considerando múltiplas fontes distribuídas pela MEB. Visto que a metodologia busca ser abrangente o suficiente para considerar centenas de fontes espalhadas ao longo de uma vasta área, não tem sentido fixar um tipo de óleo. Desta forma, os dois primeiros pontos não podem ser levados em conta com esta metodologia.

O terceiro ponto “Como é o campo hidrodinâmico na floresta de mangue?”, é resolvido diretamente pelos modelos hidrodinâmicos nas regiões foco do projeto. Esses modelos utilizaram topografia de altíssima resolução (LiDAR) nas regiões de florestas de mangue e foram calibrados para considerar o efeito de atrito do manguezal sobre o fluxo nas regiões onde o PCN mapeou a existência de manguezal (ver Capítulo 7). Dessa forma, a dispersão das partículas nas regiões de mangue é forçada por um campo hidrodinâmico que leva em conta não só a topografia detalhada destas regiões como também o efeito do mangue sobre o fluxo das correntes.

Por fim, resta a última questão “Como é a interação do poluente com o ambiente, considerando a vegetação e o tipo de sedimento?”. Pela alta dependência desta questão com o tipo de óleo, assim como pela ausência de estudos pretéritos que indiquem alguma parametrização para este efeito (algo como um fator de absorção em função das características do manguezal e do óleo), esta questão foi considerada quase que inteiramente uma incerteza, e qualquer valor adotado seria puramente especulativo. A única exceção é a influência do vento sobre a deriva das partículas. Enquanto adveçadas em mar aberto, as partículas que representam o óleo são transportadas pela ação conjunta das correntes e do vento. Contudo, ao adentrar uma floresta de mangue, a ação do vento sobre as partículas cessa, impedido pela barreira física das árvores de mangue e suas raízes.

Desta forma, foi realizada uma alteração no código do modelo para que partículas nas áreas de mangue não sofram ação do vento na advecção. Para isso, foi necessário obter uma nova máscara (para áreas de mangue) e inserir no código a verificação das posições das partículas para que, uma vez dentro da área considerada de mangue, a ação do vento fosse zerada.

8.3.1.2.4. Configuração dos modelos

Como pôde ser visto, ao longo do desenvolvimento do método foram testadas algumas configurações diferentes para os modelos de dispersão com múltiplas fontes. Pela forma de construção do subcapítulo 8.3 – optando pelo processo de desenvolvimento da metodologia e não apenas pela descrição da metodologia obtida ao final – este item tem o objetivo de apresentar de forma objetiva as configurações finais dos modelos de dispersão de múltiplas fontes utilizadas na análise de Suscetibilidade do Projeto Costa Norte.

Como ilustra esquematicamente a Figura 8-36, foram utilizados 6 modelos de dispersão de óleo utilizando a metodologia de múltiplas fontes e de integração entre escalas para chegar nos resultados de Suscetibilidade. Todos os modelos foram rodados para o ano de 2016, e as configurações básicas encontram-se descritas na Tabela 8-8 a seguir:

Tabela 8-8: Resumo das configurações dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes utilizados na metodologia de Suscetibilidade do Projeto Costa Norte.

| Modelo | Nº de fontes | Resolução | Intervalo entre simulações | Duração das simulações | Duração do Vazamento | Nº de partículas | Forçante Hidrodinâmica |
|---------------|--------------|-----------|----------------------------|------------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| Bacias da MEB | 1.138 | 1 km | 2 dias | 30 dias | 24 horas | 10.000 | ROMS G1 |
| Rio Pará | 31 | 200 m | 3 horas | 15 dias | Variável | 5.000 | Pará-Amazonas |
| TUR | 30 | 50 m | 3 horas | 15 dias | Variável | 5.000 | Turiaçu |
| SCO | 32 | 10 m | 3 horas | 15 dias | Variável | 5.000 | São C. Odivelas |
| SOU | 41 | 50 m | 3 horas | 15 dias | Variável | 5.000 | Soure |
| SUC | 33 | 20 m | 3 horas | 15 dias | Variável | 5.000 | Sucuriçu |

A seguir será feita uma breve descrição da definição das configurações de cada modelo. A descrição será iniciada pelas configurações do modelo ‘Bacias da MEB’, de maior abrangência espacial e no qual se encontram todas as fontes de vazamento consideradas na análise de suscetibilidade das florestas de mangue das bacias FZA e PAMA a vazamentos de óleo.

Ainda que as análises do PCN sejam focadas nas bacias Foz do Amazonas e Pará-Maranhão, os resultados das simulações prévias (8.3.1.1.2) demonstraram que não seria possível avaliar a suscetibilidade das florestas de mangue das áreas de estudo apenas considerando as fontes de vazamento nessas duas bacias. Dessa forma, ao invés de realizar a distribuição dos pontos dentro dos blocos de exploração, como havia sido feito nas simulações prévias, decidiu-se por utilizar o conceito de bacias efetivas. Segundo MME/EPE (2017) elas são definidas como *“a parte da bacia sedimentar com chances para a existência de acumulações de petróleo ou de gás natural. Fora dela, considera-se que a prospectividade da área sedimentar é praticamente nula, conforme o conhecimento vigente na época da avaliação”*. Dessa forma, ao invés de se considerar apenas áreas que já tem perspectiva de exploração próxima (blocos), pode-se levar em conta áreas com possibilidade de exploração futura. Ressalta-se que, como enunciado, a avaliação da prospectividade que resulta na definição das bacias efetivas é balizada pelo conhecimento vigente na época de avaliação e é, portanto, passível de atualização. A Figura 8-52 apresenta um mapa com os pontos de vazamento escolhidos e as bacias efetivas (polígonos laranja), totalizando 1138 fontes.

Dessa forma, as análises de suscetibilidade e vulnerabilidade passam a abranger todas as fontes possíveis de vazamentos de *blowout* nas fases de exploração e produção ao longo das bacias da Margem Equatorial Brasileira. Ressalta-se que pela flexibilidade e interatividade do método, os resultados considerando este grande conjunto de fontes pode ser adaptado à fontes específicas apenas com pós-processamento, sem a necessidade de repetir as rodadas (ver item 8.3.1.2.5).

A partir dos testes de sensibilidade e pela abrangência espacial (Figura 8-53), definiu-se que a resolução da grade lagrangiana – na qual são armazenados os resultados de área varrida, tempo mínimo e tempo de exposição – seria de 1 km, que seriam utilizadas 10.000 partículas por simulação determinística e que as simulações teriam espaçamento de 2 dias entre sí. Foi definido que o vazamento teria duração de 24 horas por ser a duração utilizada em simulações de *blowout* nos processos de licenciamento ambiental de exploração e produção de óleo e gás no Brasil.

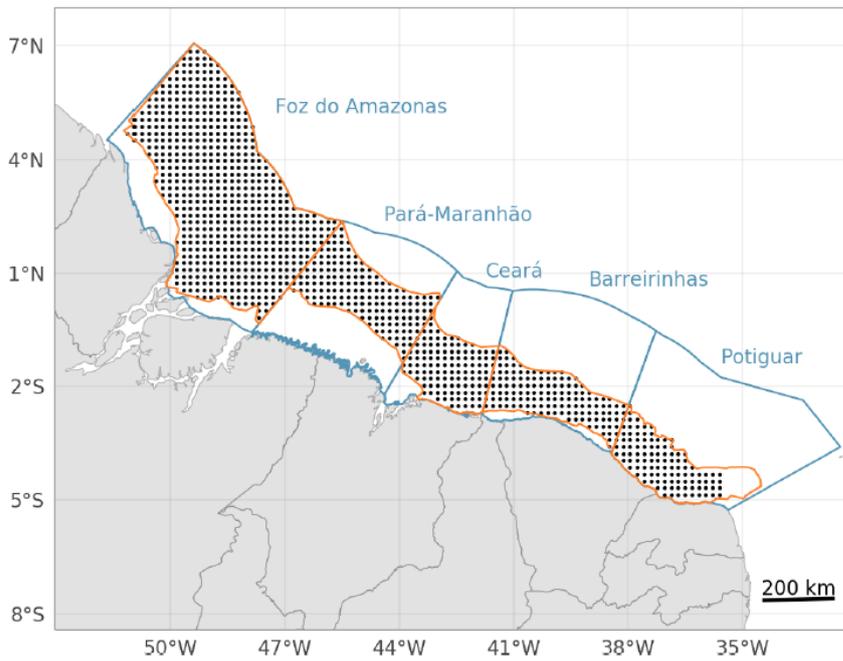


Figura 8-52: Pontos de vazamento para a modelagem de dispersão de óleo de múltiplas fontes nas bacias da Margem Equatorial Brasileira. Os polígonos laranja representam as bacias efetivas.

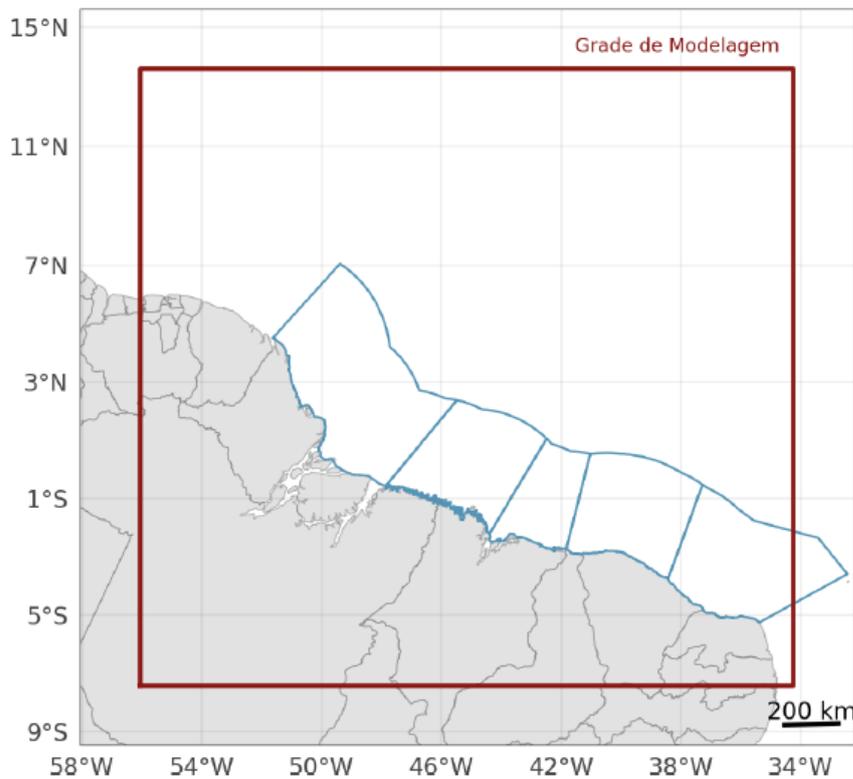


Figura 8-53: Limites da grade lagrangiana para a modelagem de dispersão de óleo de múltiplas fontes nas bacias da Margem Equatorial Brasileira. Os polígonos azuis representam as bacias sedimentares da MEB.

O processo de determinação das configurações das rodadas em escala estuarina e de floresta de mangue foi similar para todas as rodadas, visto que todas se enquadram em modelos de dispersão aninhados.

Como visto no item 8.3.1.2.1, o primeiro passo para configurar os modelos aninhados é o posicionamento das fontes de vazamento ao longo de uma região que represente a interface entre os modelos hidrodinâmicos utilizados. Ou seja, os pontos de vazamento devem estar posicionados de tal forma que a dinâmica seja bem representada por ambos os modelos hidrodinâmicos – o que forçou o modelo de dispersão da escala anterior, “trazendo” as partículas até ali, e o que irá forçar o modelo de dispersão desta escala, “levando” as partículas para o interior do domínio aninhado. Esse passo é de suma importância, visto que a integração dos resultados probabilísticos é baseada na multiplicação das probabilidades e, portanto, os resultados de probabilidade do modelo “fonte” nos pontos de interface devem ser confiáveis. A partir das fontes definidas, pode-se extrair os resultados de tempo de exposição do modelo no qual este será aninhado, para se obter as durações dos vazamentos da rodada.

O segundo passo é a determinação dos limites entre água, manguezal e terra, para que a advecção das partículas no domínio seja coerente com o conceitual metodológico ao serem guiadas pelo algoritmo correto para cada região. Por exemplo, as partículas em água devem sofrer a influência das correntes e ventos, já quando se encontram em região de manguezal, devem ser advectadas apenas pelas correntes, e quando encontram regiões que sejam ou outros tipos de cobertura de solo ou regiões fora do domínio do modelo hidrodinâmico, devem parar sua trajetória. Para esta definição, foram utilizados os dados de Sensoriamento Remoto do Mapeamento da Cobertura do Solo (ver Capítulo 9) para orientar a definição da interface entre as florestas de mangue, a água, e outras coberturas do solo.

Os passos subsequentes são a definição da grade para a gravação dos resultados (limites e resolução), definição do passo de tempo do modelo de dispersão, do número de partículas lançadas por simulação, do intervalo entre as simulações que compõe os resultados probabilísticos e do tempo de simulação.

O número de partículas foi escolhido de forma a representar a área varrida de uma mancha de óleo em cada simulação determinística. A grade para a gravação dos resultados foi elaborada de forma a alcançar a maior resolução possível para cada domínio e, portanto, varia de modelo para modelo, a depender da abrangência espacial. O passo de tempo do modelo de dispersão é definido a partir de testes curtos, seguindo a lógica da condição *CFL* (uma partícula não deve ser capaz de “pular” uma célula de grade em 1 passo de tempo) e, portanto, varia de modelo para modelo a depender da dinâmica e da resolução de grade do hidrodinâmico que força a dispersão das partículas. Por fim, o intervalo entre as simulações foi definido a partir de testes para que haja a representação da variabilidade das condições dinâmicas no conjunto de simulações determinísticas que irão compor o resultado probabilístico.

Os parâmetros utilizados para cada modelo podem ser vistos na Tabela 8-8 e nas Figura 8-54, Figura 8-55 e Figura 8-56 são apresentadas as fontes de vazamento e a representação das interfaces entre água, manguezal e terra para os modelos de dispersão de óleo aninhados.

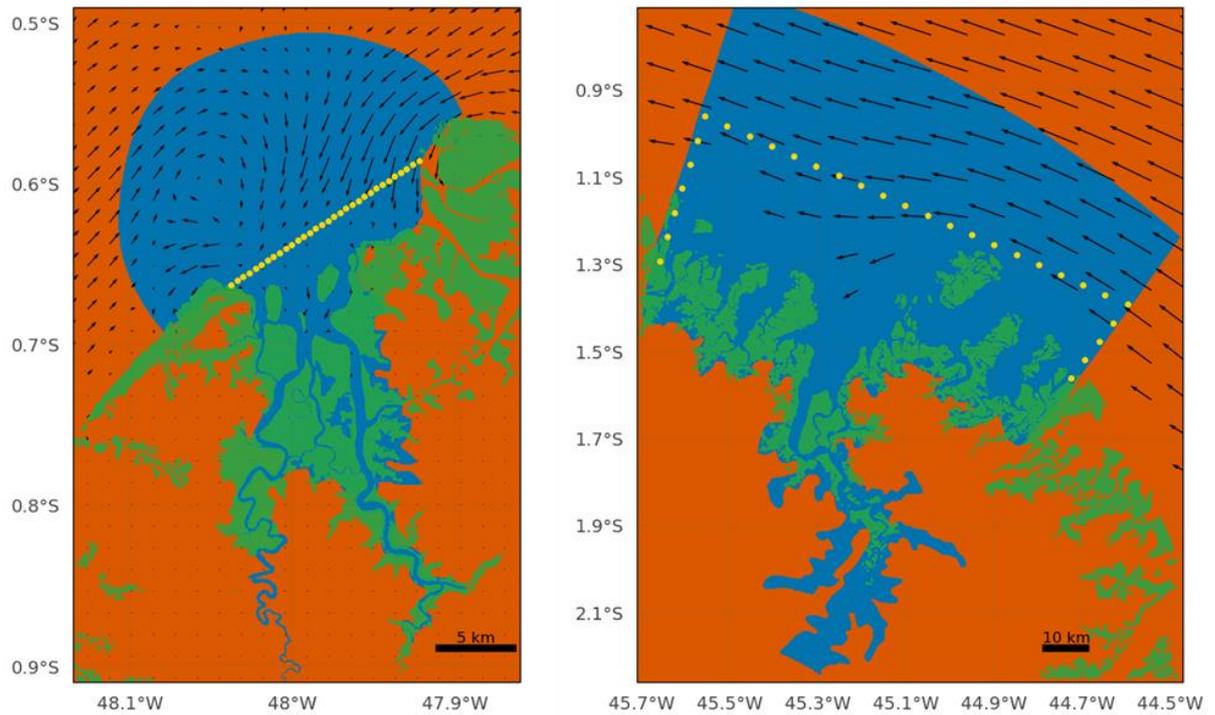


Figura 8-54: Fontes de vazamento (pontos amarelos), limites do modelo hidrodinâmico utilizado (área azul), regiões de manguezal (áreas verdes) e regiões fora do domínio de advecção das partículas (áreas laranjas). A esquerda, modelo de São Caetano de Odivelas e a direita, de Turiaçu.

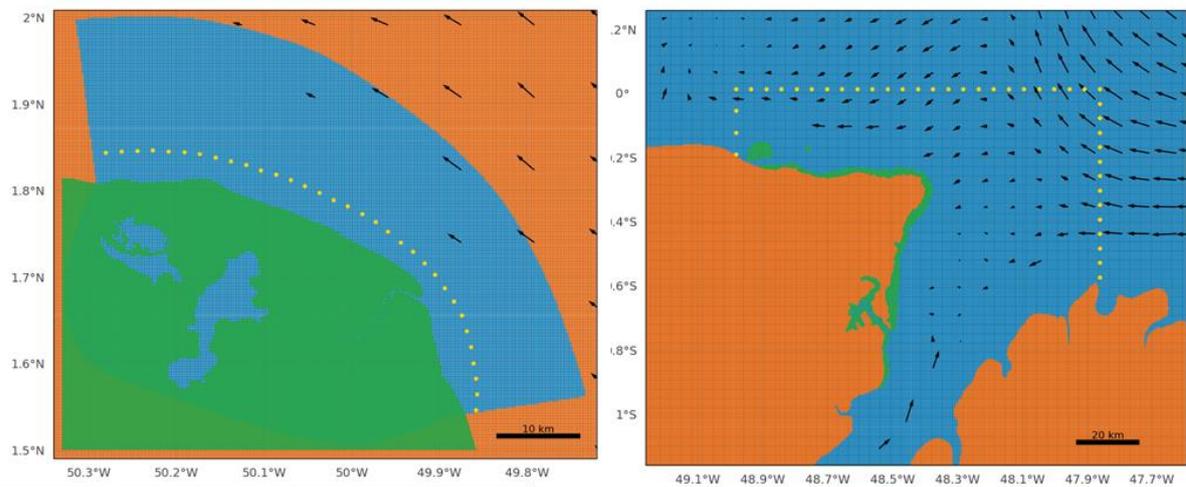


Figura 8-55: Fontes de vazamento (pontos amarelos), limites do modelo hidrodinâmico utilizado (área azul), regiões de manguezal (áreas verdes) e regiões fora do domínio de advecção das partículas (áreas laranjas). A esquerda, modelo de Sucuriju e a direita, de Soure.

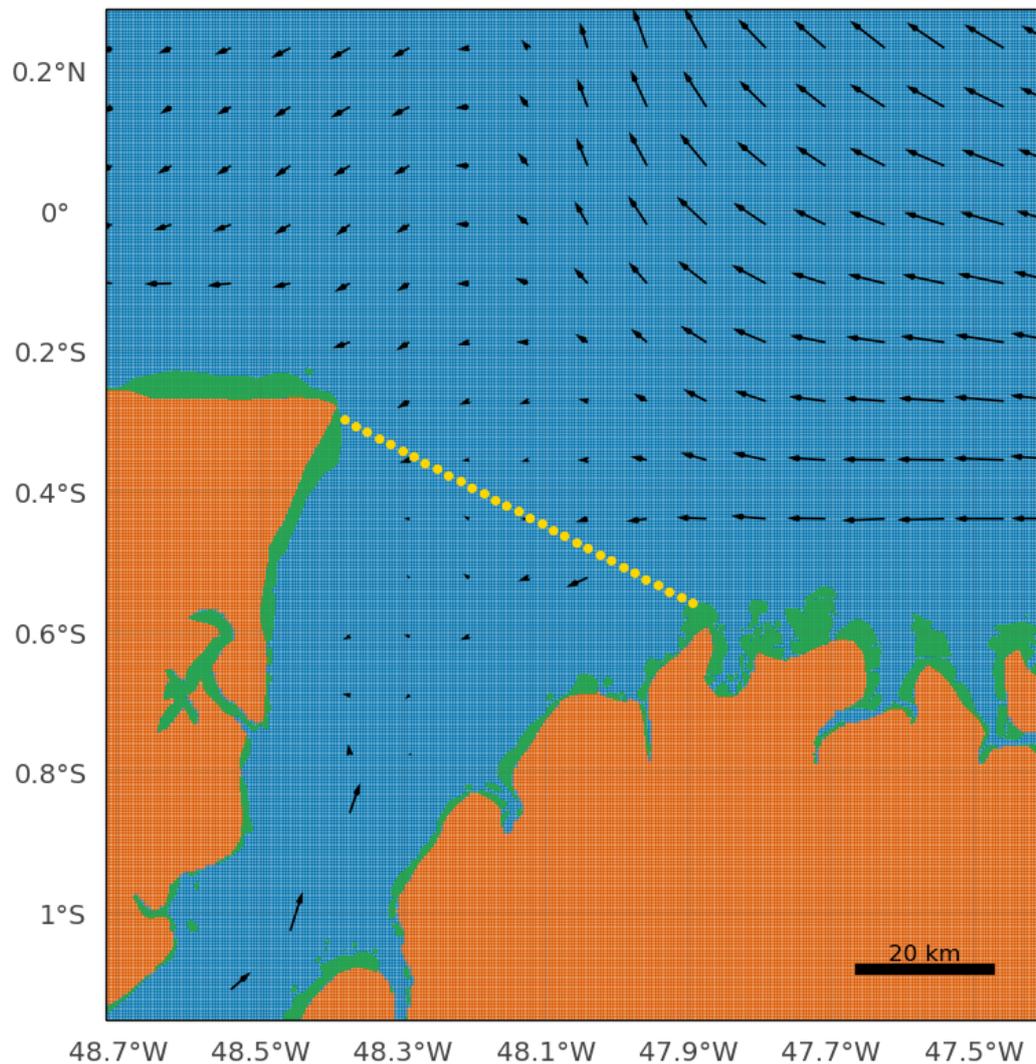


Figura 8-56: Fontes de vazamento (pontos amarelos), limites do modelo hidrodinâmico utilizado (área azul), regiões de manguezal (áreas verdes) e regiões fora do domínio de advecção das partículas (áreas laranjas). Modelo Rio Pará, de escala estuarina e intermediário para São Caetano de Odivelas.

8.3.1.2.5. Interatividade

Um dos pontos mais interessantes dessa metodologia diz respeito a potencial interatividade dos resultados. Como visto, o modelo de dispersão com múltiplas fontes tem como resultado intermediário as áreas varridas pelas manchas de cada simulação determinística, para cada fonte considerada - que são utilizadas para compor um mapa de probabilidade de presença de óleo para cada fonte de vazamento. Ao final, os resultados podem ser pós-processados para se obter um mapa de probabilidade máxima considerando diversas fontes de vazamento.

Por ser uma etapa posterior às rodadas do modelo de dispersão, o sistema se torna flexível para ser utilizado com diferentes finalidades, ou seja, permite que o usuário selecione um grupo de quantos pontos desejar dentre os pontos-fonte rodados para analisar os resultados, com um baixíssimo custo computacional.

A Figura 8-57 ilustra essa potencialidade, onde são selecionadas apenas 4 fontes de vazamento na bacia Pará-Maranhão (dentre as 1.138 ao longo da MEB) e os resultados de probabilidade máxima, considerando

a metodologia de integração das escalas, pode ser visualizado desde a escala *offshore* até a escala estuarina na Baía de Marajó.

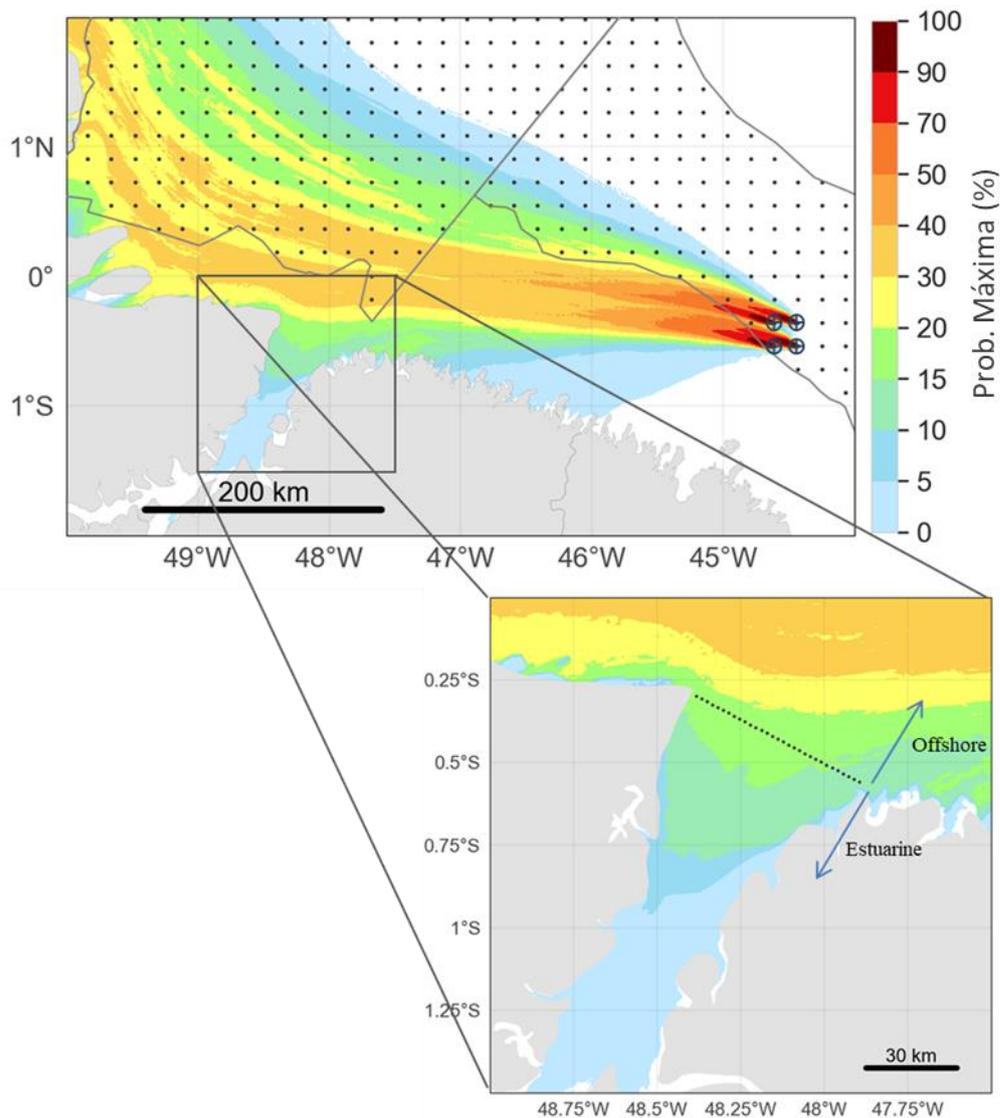


Figura 8-57: Probabilidade máxima de presença de óleo considerando um subset de 4 fontes de vazamento localizadas *offshore* na bacia Pará-Maranhão. A integração dos resultados estuarinos é obtida a partir da metodologia de integração entre as escalas descrito nesse capítulo.

Diversas possibilidades surgem a partir desta flexibilidade como, por exemplo, avaliar regiões dentro de bacias específicas quanto ao impacto potencial de vazamentos de óleo, visando a identificação de áreas preferenciais para exploração e produção de Óleo e Gás. No Projeto Costa Norte esta interatividade na seleção de fontes de vazamento é disponível para os usuários que acessarem o site do projeto (ver Capítulo 12 – Plataforma WEB).

8.3.1.3. Taxa de Afastamento

Ao longo das discussões metodológicas interdisciplinares do PCN, foi identificada a possibilidade de utilizar a ferramenta de modelagem de dispersão com múltiplas fontes para obter um *proxy* para compor a definição de Resiliência (componente de Vulnerabilidade), na medida em que pudesse indicar a capacidade de remoção física do poluente que já houvesse hipoteticamente atingido determinada parcela de mangue.

A metodologia consiste em simular a deriva de partículas a partir de pontos espalhados nas regiões de floresta de mangue – simulando o hipotético “risco materializado”, conceito base da componente Resiliência (para ver essa e outras discussões conceituais sobre Vulnerabilidade, ver o Volume 1). Dependendo da hidrodinâmica de cada parcela das florestas de mangue, as partículas levarão mais, ou menos tempo para serem removidas e carreadas para longe do ponto inicial. Dessa forma, regiões com tendência a estagnação e com baixa dinâmica apresentariam menor taxa de afastamento das partículas do ponto inicial, um dos indicadores que aquela parcela possui menor Resiliência.

Dessa forma, foram executadas simulações de dispersão de múltiplas fontes para cada estuário foco do PCN (Turiaçu, São Caetano de Odivelas, Soure e Sucuriju), nos quais houve o desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos que representam as correntes dentro das florestas de mangue (ver Capítulo 7). Nestas simulações, foram distribuídas fontes de vazamento espaçadas aproximadamente 100 metros entre si nas regiões de floresta de mangue. As simulações foram conduzidas ao longo de um ano, com espaçamento temporal entre simulações de 3 horas e duração de cada simulação por 15 dias. Ao contrário das rodadas para a análise de Suscetibilidade, cada simulação utiliza apenas 1 partícula.

Para realizar essa análise, foi necessário alterar o código do modelo para que salvasse a trajetória de cada partícula simulada a cada 1 hora - ocupando uma quantidade grande de espaço em disco. Desta forma, após o término da simulação, duas formas de pós-processamento foram inicialmente testadas.

1. Para cada simulação de cada ponto de lançamento, gravar o tempo necessário para a partícula sair de uma área de mangue e entrar em área de canal.
2. Para cada ponto de lançamento, obter a velocidade de afastamento da partícula em relação ao ponto inicial, promediada por todas as simulações ao longo do ano simulado (2.920 simulações por ponto ao longo do ano).

Foram obtidos resultados para ambas as opções e a partir de reuniões interdisciplinares, a opção “2” foi avaliada como mais adequada para o propósito, e o seu resultado final foi nomeada como “taxa de afastamento”.

Na Figura 8-58 apresenta-se um trecho do domínio do modelo de São Caetano de Odivelas para exemplificar a distribuição das fontes de lançamento distribuídas nas áreas de florestas de mangue. Ressalta-se que esta análise, por posicionar as fontes dentro do manguezal, só faz sentido se a hidrodinâmica dentro das florestas de mangue esteja bem representada – condição garantida apenas nas regiões com levantamento de altimetria por LiDAR (ver capítulo 5 e capítulo 7 para a utilização nos modelos hidrodinâmicos estuarinos).

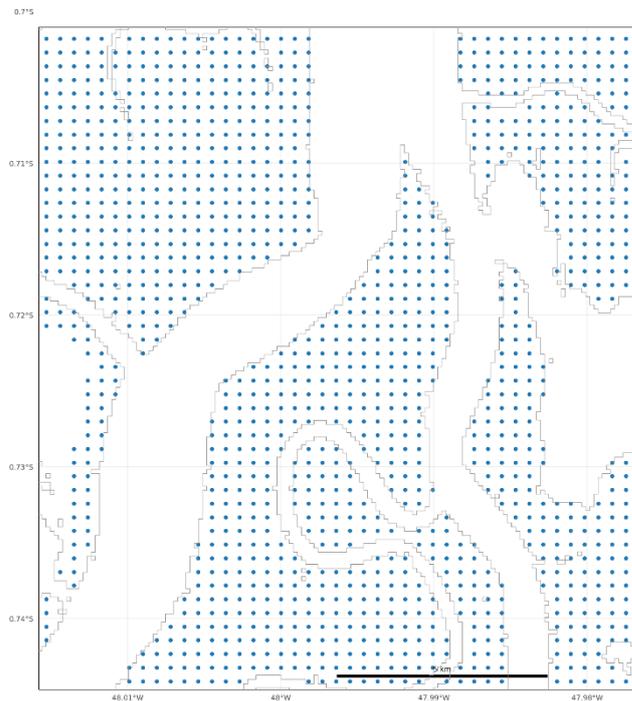


Figura 8-58: Zoom em região de floresta de mangue em São Caetano de Odivelas exemplificando os pontos iniciais das simulações de tempo de residência (pontos azuis).

8.3.1.4. Análise Inversa

Considerando o ponto de vista não orientado por uma fonte específica de derramamento de óleo, mas pelo próprio ativo ambiental, a origem potencial de derramamentos que atingem um local específico pode ser estimada usando o mesmo conjunto de resultados estocásticos do sistema de dispersão de óleo de múltiplas fontes.

Esta análise consiste em um pós-processamento que busca entre cada resultado probabilístico de cada fonte de derramamento, a probabilidade e o tempo mínimo de chegada a um determinado local selecionado. Ambos os valores são armazenados no local das fontes de derramamento, que podem ser usados para criar mapas de possíveis regiões de origem de óleo a um ponto específico. Em outras palavras, o algoritmo grava no ponto de vazamento os valores de probabilidade e tempo mínimo computados em um outro ponto selecionado. Dessa forma identifica-se quais pontos de vazamento - dentre os considerados no modelo de múltiplas fontes - geram probabilidade de toque de óleo para aquele ponto.

Além da interatividade na obtenção dos resultados de probabilidade de presença de óleo, o sistema de múltiplas fontes também possibilitou a realização da análise inversa. Este nome foi escolhido para o diferenciar das modelagens reversas – cujos algoritmos integram as equações de transporte “para trás” no tempo, incorrendo em um outro universo de incertezas relacionadas à turbulência.

Esta análise possui potenciais diversos, por exemplo, a equipe gestora de uma área de proteção ambiental pode usar a análise inversa para identificar as áreas mais arriscadas de fonte de óleo. Outro uso potencial para essa metodologia está na investigação de fontes desconhecidas de vazamentos. A partir das informações das áreas costeiras impactadas e da hora aproximada de chegada, a análise inversa pode ser usada para identificar regiões de origem em potencial, restringindo a área de pesquisa de imagens de satélite e investigação de AIS (*automatic identification system*). No Projeto Costa Norte esta análise inversa é disponível para os usuários através do site do projeto (ver Capítulo 12 – Plataforma WEB).

8.3.1.5. Variabilidade Interanual

Graças à utilização de computação em paralelo e às adaptações feitas nos códigos de dispersão de óleo – simplificando, porém, mantendo o conservadorismo –, o sistema de modelagem de múltiplas fontes também possibilita rodadas mais longas. Neste item será dado um exemplo de uma análise que combina múltiplas fontes de vazamento com extenso período de forçantes ambientais.

Foi possível realizar simulações de deriva de óleo ao longo de 10 anos de dados ambientais (correntes e ventos de 2007 a 2016) utilizando 122 fontes de vazamento distribuídos nos blocos da Bacia Pará-Maranhão. Em cada simulação o óleo foi monitorado por 30 dias e cada nova simulação teve sua data inicial espaçada de 2 dias em relação à anterior (1825 simulações por ponto de vazamento, totalizando 215.350 simulações de deriva de óleo). Para isso, foi utilizado o *hindcast* longo do modelo hidrodinâmico ROMS G1 sem assimilação de dados (ver Capítulo 7) e ventos oriundos de reanálise global (NCEP R2).

Os 10 anos de resultados permitiram a condução de estudos sobre a variabilidade interanual nos mapas de probabilidade. Ressalta-se a diferença desta análise em relação à análises de variabilidade interanual das correntes ou ventos, e a escassez de estudos similares. Essa análise aborda uma questão muito usual em estudos de modelagem de dispersão de óleo: qual o período do estudo necessário para representar as principais variabilidades ambientais? Qual o impacto da variabilidade interanual nos resultados de um estudo abrangente de dispersão de óleo? Qual é a perda de representatividade de utilizar apenas 1 ano ao invés 2 (e de 5, ou 10)?

A Figura 8-59 apresenta as 122 origens de manchas de óleo colocadas dentro dos blocos de exploração de petróleo sobre a bacia do Pará-Maranhão e a Tabela 8-9 apresenta as informações básicas do experimento.

Tabela 8-9: Parâmetros básicos do experimento.

| Parâmetro | Valor |
|-----------------------------------|----------|
| Duração de cada simulação | 30 dias |
| Duração do vazamento | 24 horas |
| Intervalo entre as simulações | 2 dias |
| Simulações por ponto de vazamento | 1.825 |
| Número total de simulações | 215.350 |

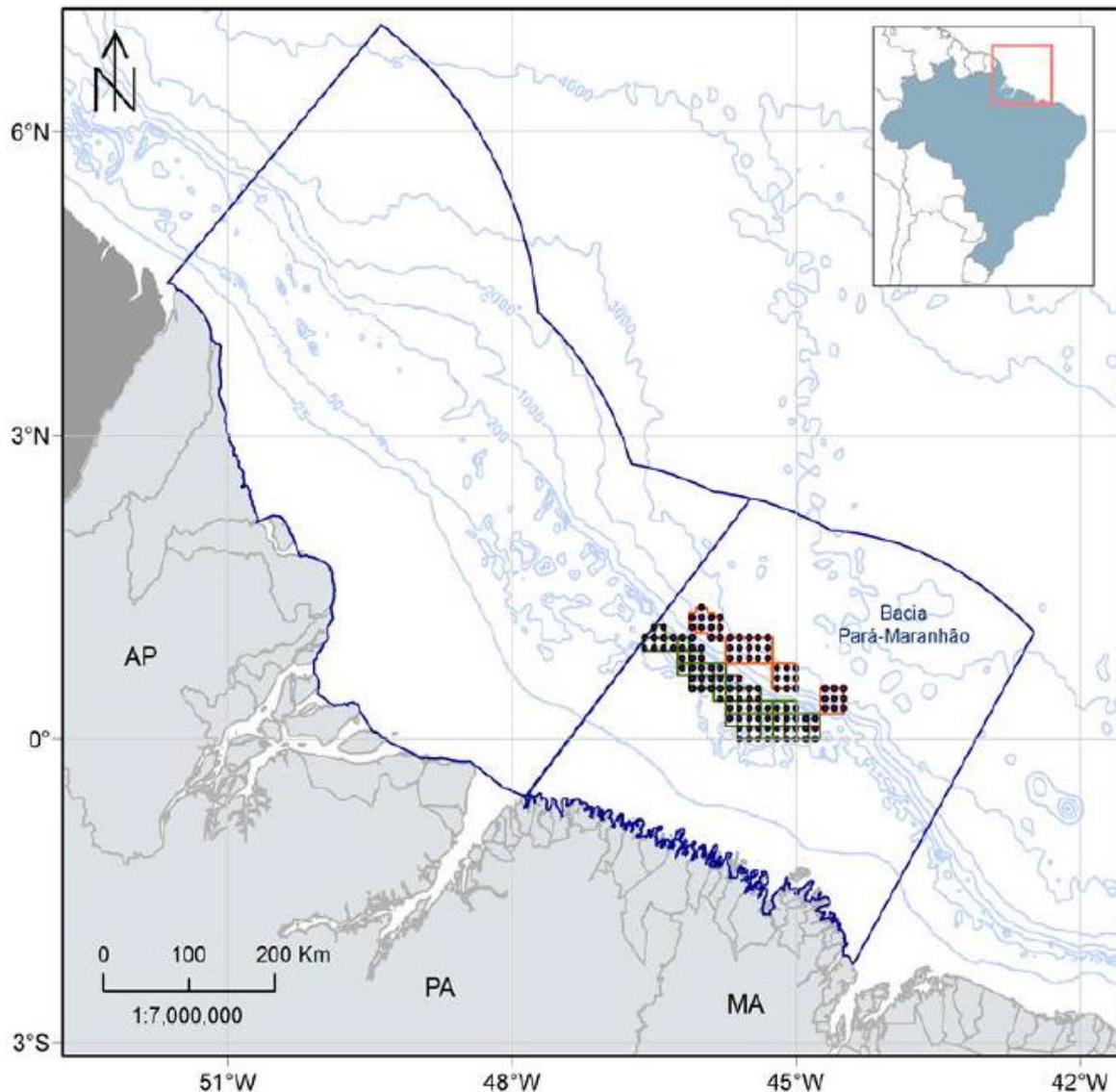


Figura 8-59: Fontes de vazamento consideradas na simulação (122 pontos pretos), distribuídos com espaçamento de 10 km nos blocos de exploração de óleo e gás (polígonos verdes e laranjas) na Bacia Pará-Maranhão.

Após o término das rodadas, mapas anuais de probabilidade de presença de óleo foram obtidos e usados para construir mapas do desvio de cada ano em relação a média dos 10 anos, assim como gráficos da distribuição cumulativa dos desvios de probabilidade global (integradas no domínio).

8.3.2. Resultados

Neste item serão exemplificados os resultados obtidos com o sistema de dispersão de óleo estocástica com múltiplas fontes de vazamento aplicado às metodologias derivadas.

8.3.2.1. Análise de Suscetibilidade

Como visto, os resultados dos modelos de dispersão com múltiplas fontes podem ser explorados de diversas formas, selecionando de 1 a n fontes de vazamento. Serão apresentados mapas exemplificando os resultados de suscetibilidade à vazamentos de óleo ocorridos em todas as fontes distribuídas nas bacias efetivas da MEB, tanto para o modelo em escala *offshore* quanto para as regiões estuarinas, porém, o leitor é encorajado a explorar os resultados no site do PCN (projetocostanorte.eco.br/mapa).

8.3.2.1.1. Margem Equatorial Brasileira

Os resultados considerando todas as fontes (1138) do modelo de dispersão de óleo com múltiplas fontes distribuídas pelas bacias efetivas da MEB pode ser visto nas figuras a seguir.

Na Figura 8-60 é apresentado o mapa de probabilidade integrada de todas as fontes, ou seja, as probabilidades são ponderadas pelo número de fontes utilizado. Este tipo de resultado pode ser utilizado para avaliar as regiões com tendência a concentrar as trajetórias de vazamentos de óleo de múltiplas fontes. Vê-se, por exemplo, que ao longo da MEB, as maiores probabilidades se concentram na região da plataforma continental. Outra feição bem aparente é a influência da retroflexão da CNB e que no geral, as maiores áreas de concentração de probabilidade são fora do mar brasileiro, em frente à Guiana Francesa. Na Figura 8-61, observa-se outra forma de análise a partir dos mesmos resultados, a probabilidade máxima. Nesta análise, cada ponto de grade mostra a probabilidade máxima dentre todas as simulações de todas as fontes. Dessa forma, notam-se as máximas probabilidades próximas a cada ponto de vazamento, assim como as regiões costeiras com maior probabilidade de serem impactadas, considerando todas as fontes. Por fim, na Figura 8-62 é apresentado o tempo mínimo de chegada do óleo. Naturalmente, os menores tempos estão associados às regiões próximas aos pontos de vazamento.

Para compor as análises de Suscetibilidade apresentadas no Volume 1, foram utilizados os resultados de probabilidade máxima considerando todos os pontos de vazamento.

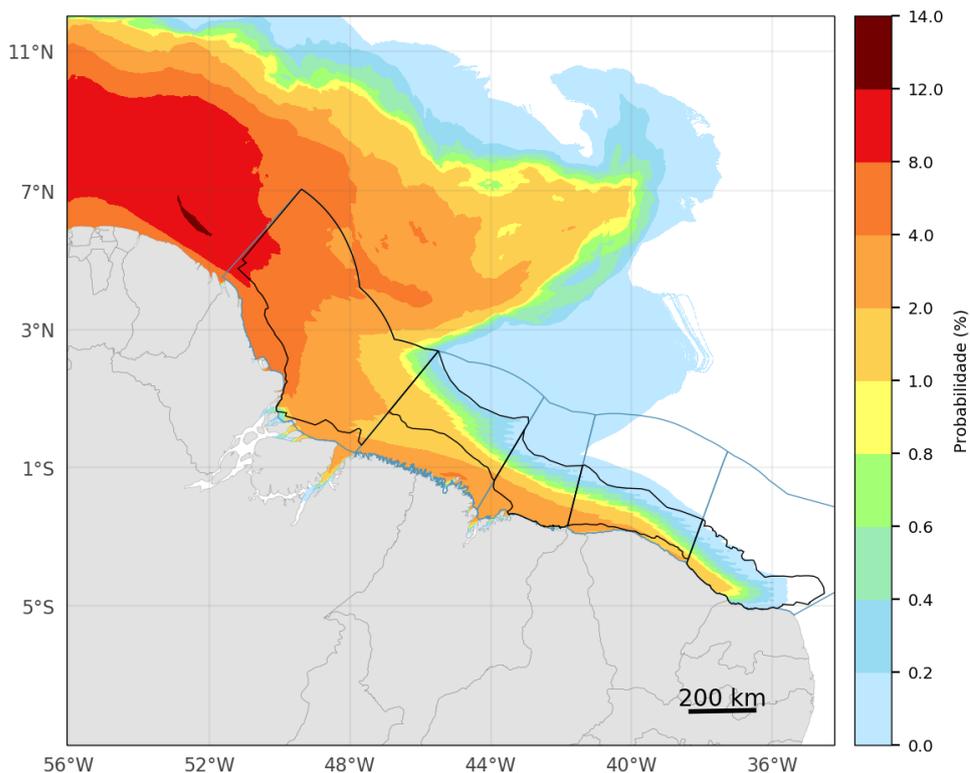


Figura 8-60: Probabilidade integrada em cada ponto de grade dos resultados da rodada *offshore* usando a base hidrodinâmica com assimilação de dados.

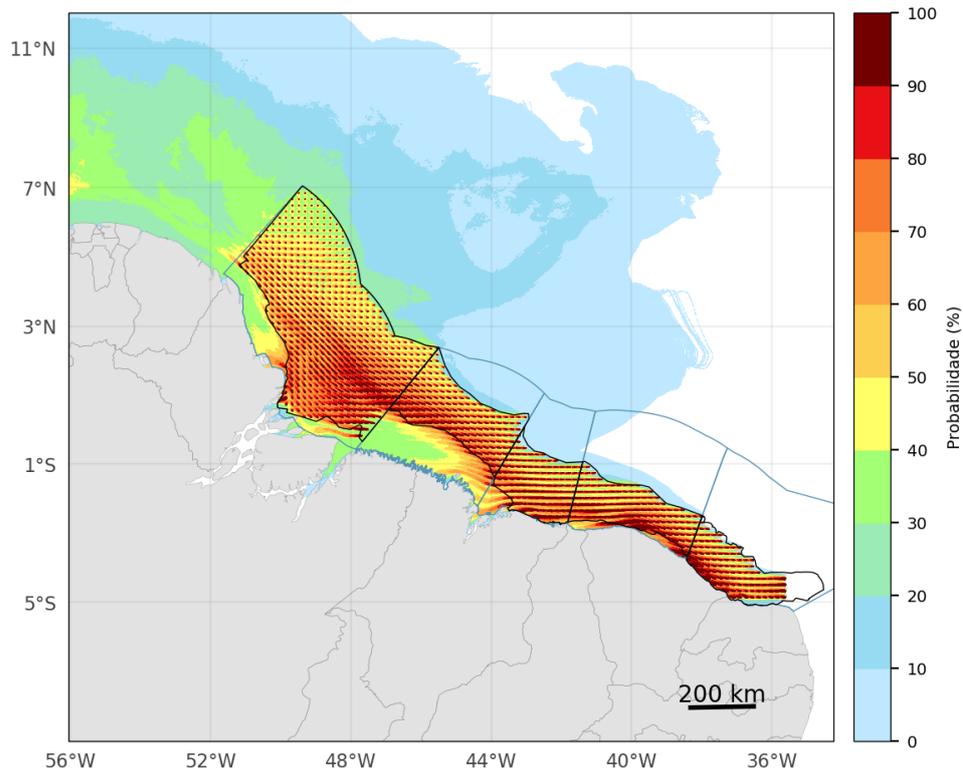


Figura 8-61: Probabilidade máxima em cada ponto de grade dos resultados da rodada *offshore* usando a base hidrodinâmica com assimilação de dados.

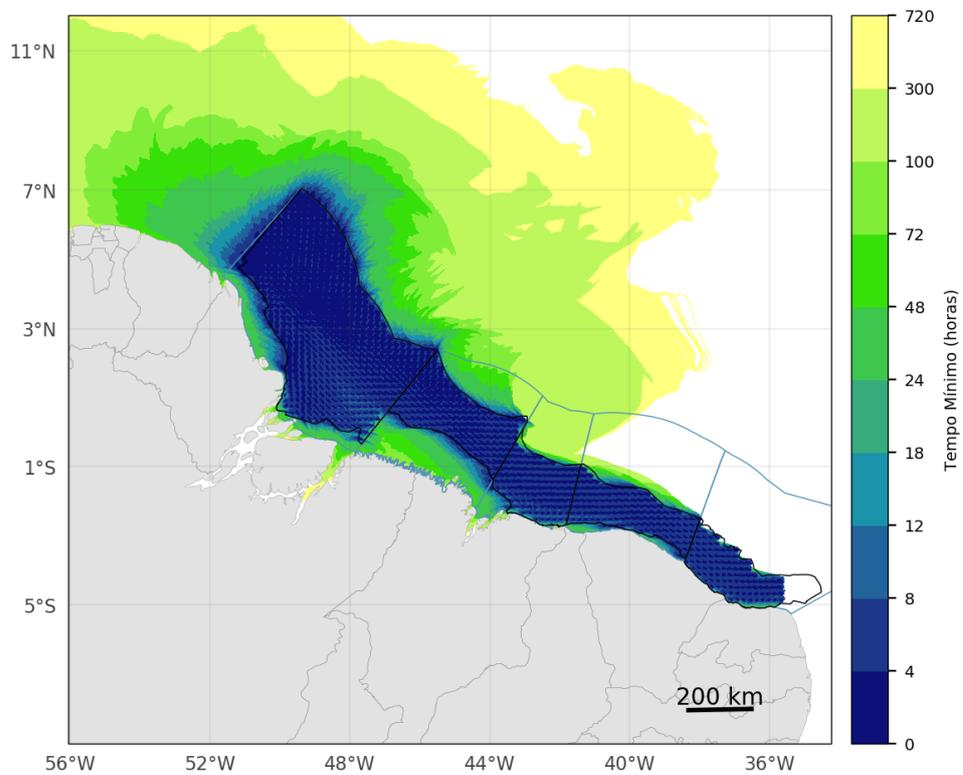


Figura 8-62: Tempo mínimo de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada *offshore* usando a base hidrodinâmica com assimilação de dados.

De forma a exemplificar outra potencialidade de análise a partir destes resultados, apresenta-se a probabilidade máxima e o tempo mínimo considerando apenas as fontes de cada bacia da MEB (Figura 8-63 a Figura 8-67). Da mesma forma, cada bacia efetiva ainda poderia ser dividida em sub-regiões menores para avaliar áreas com maior ou menor impacto potencial.

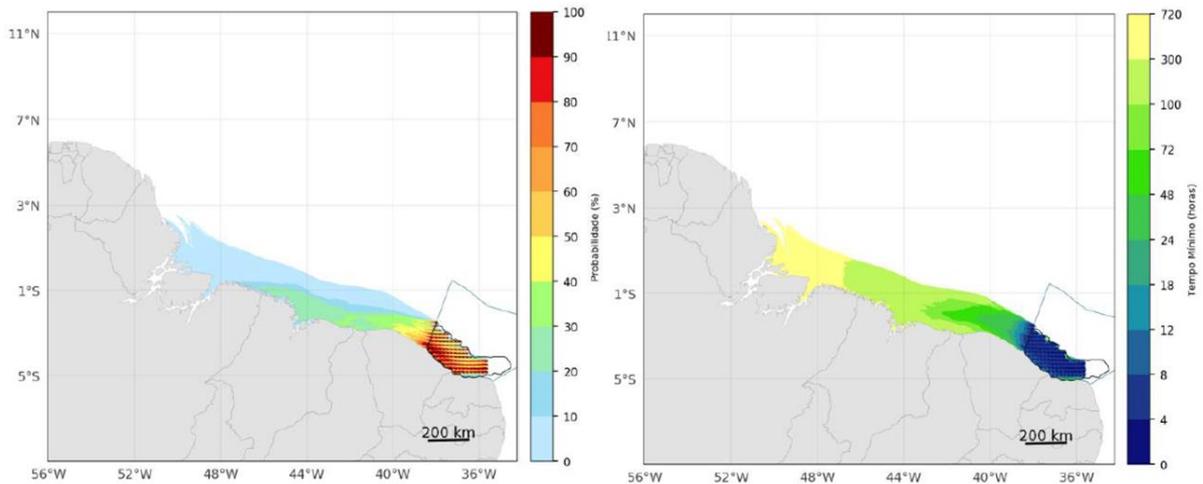


Figura 8-63: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva de Potiguar.

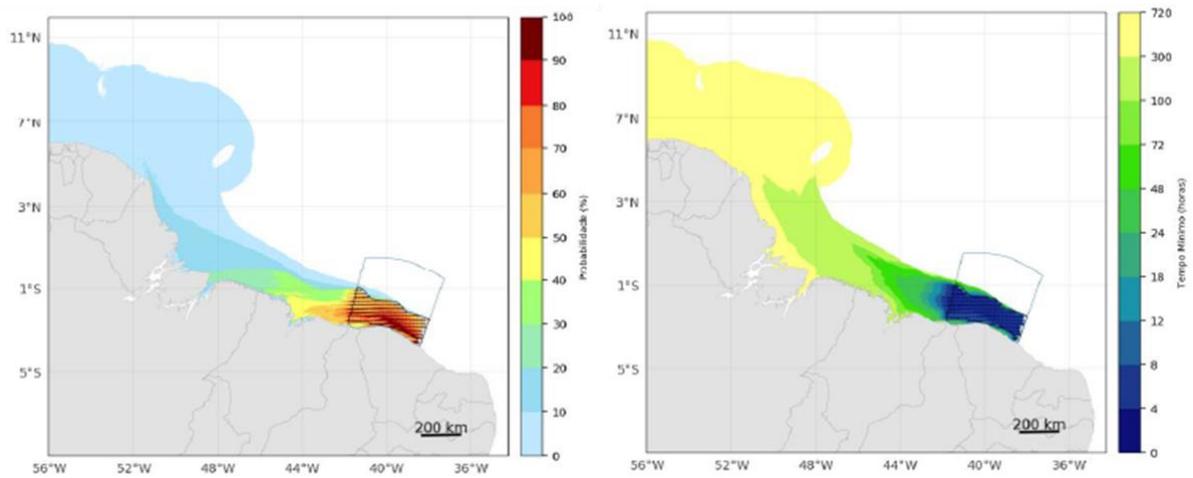


Figura 8-64: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva do Ceará.

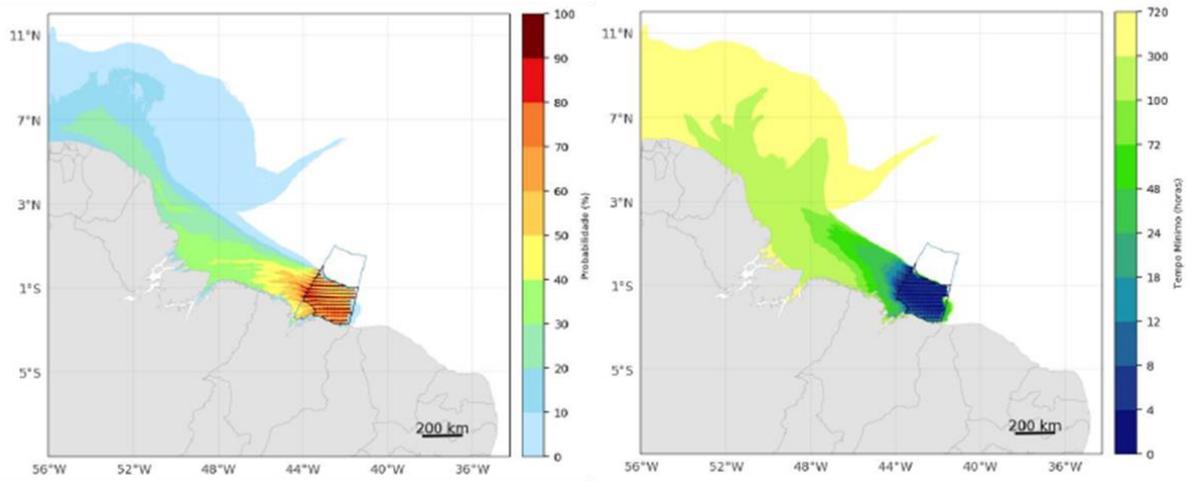


Figura 8-65: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva de Barreirinhas.

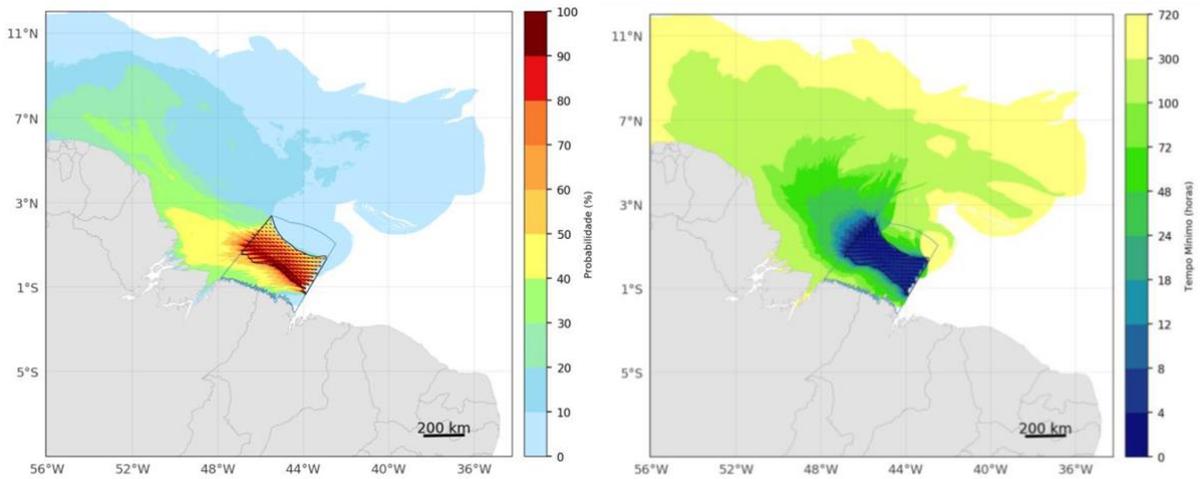


Figura 8-66: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva de Pará-Maranhão.

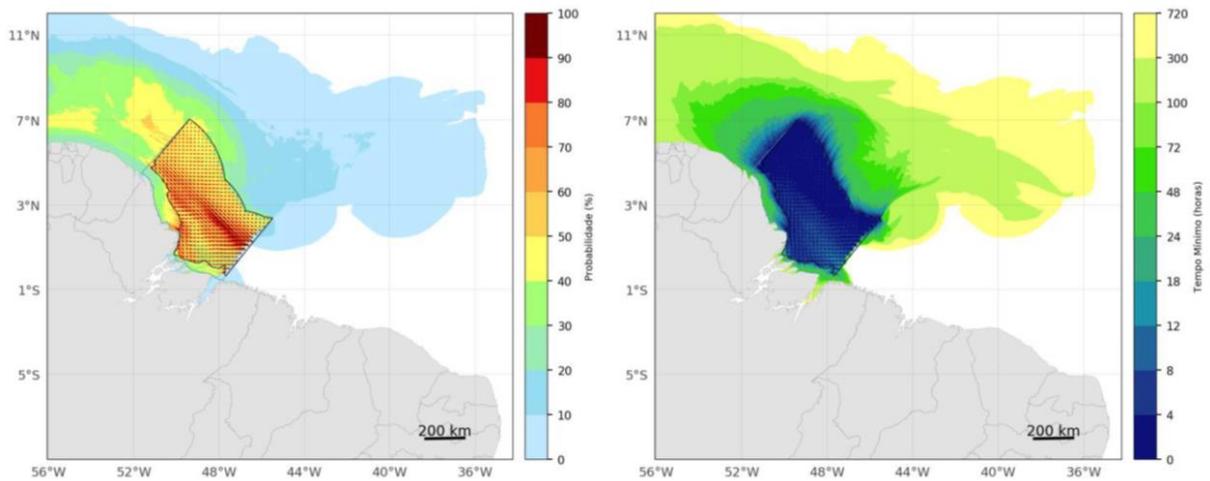


Figura 8-67: Probabilidade máxima (esquerda) e tempo mínimo de chegada do óleo (direita), considerando todas as fontes da bacia efetiva da Foz do Amazonas.

Por último, são apresentados os resultados do modelo em escala *offshore* considerando as separações sazonais utilizadas para essa escala (Figura 8-68). Os cenários foram selecionados como Período Chuvoso (janeiro a junho) e Período Seco (julho a dezembro). Nota-se a influência da retroflexão da CNB mais presente no período Seco. Nesta estação também são observadas maiores probabilidades na região de plataforma e costeira das bacias, em especial da Foz do Amazonas, o que pode estar relacionado com o padrão de ventos e a menor descarga do Amazonas (ver capítulo de caracterização meteoceanográfica do Volume 1).

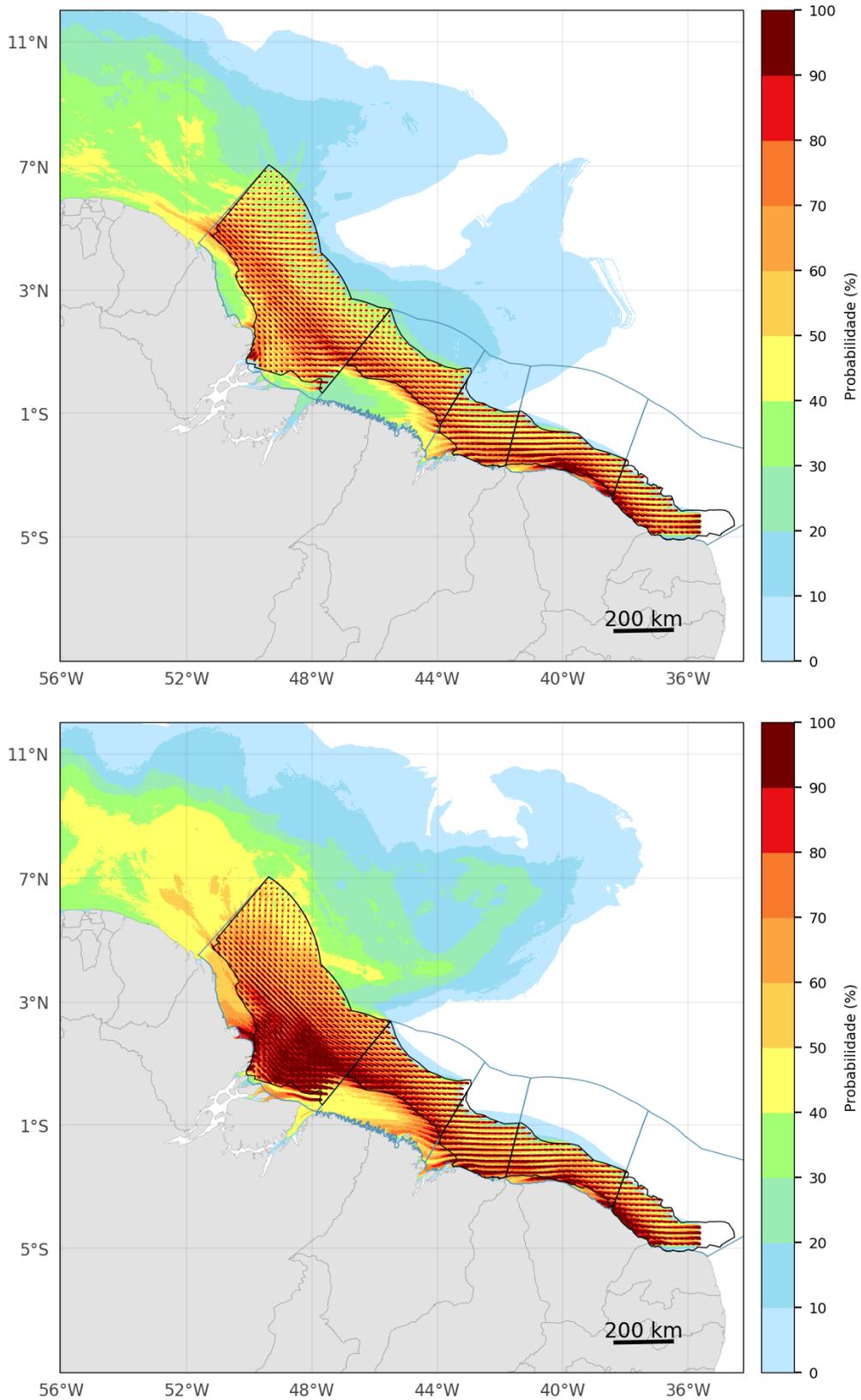


Figura 8-68: Probabilidade máxima de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala offshore. Período Chuvoso (painel superior) e Período Seco (painel inferior).

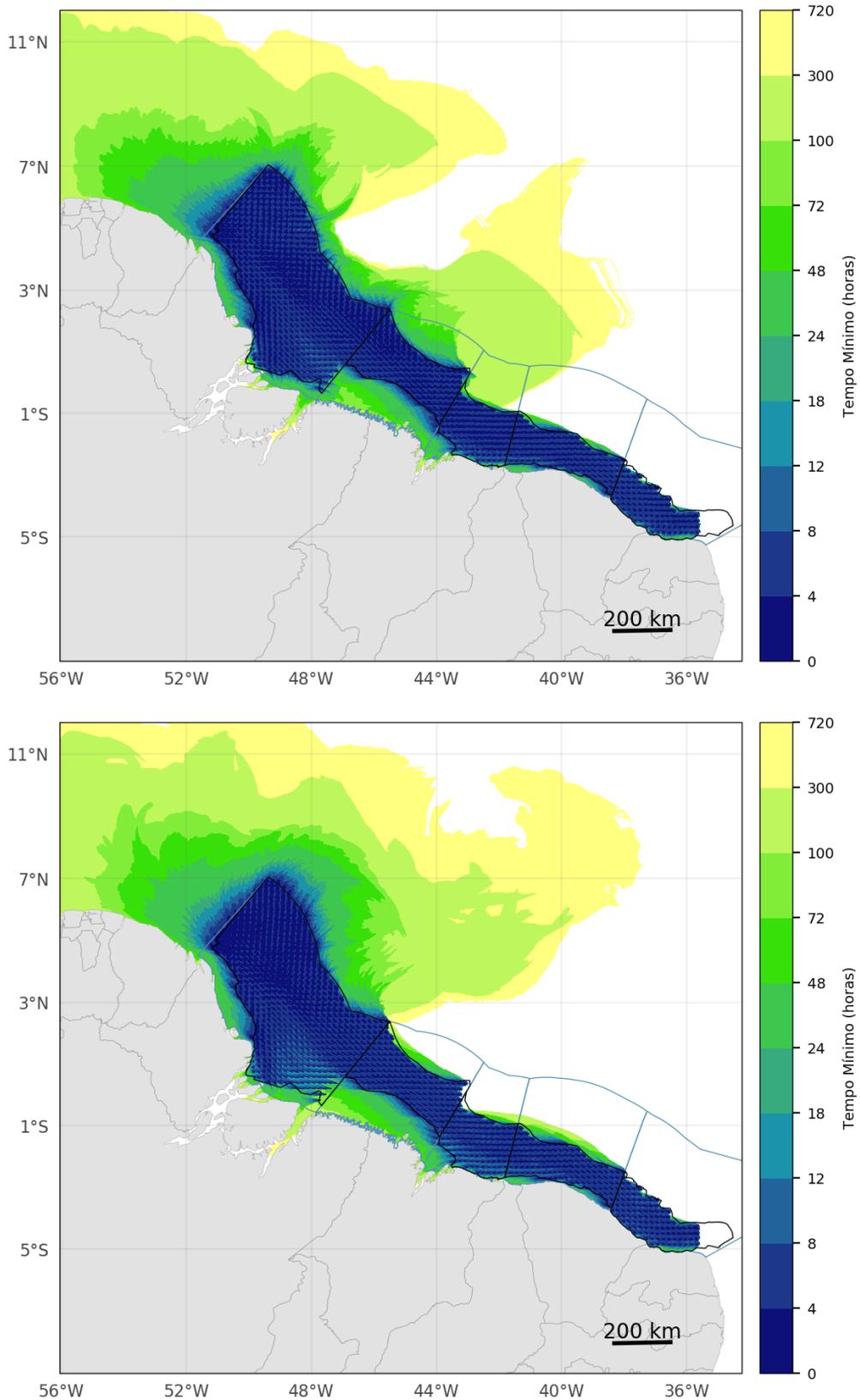


Figura 8-69: Tempo mínimo de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala *offshore*. Período Chuvoso (painel superior) e Período Seco (painel inferior).

8.3.2.1.2. Florestas de Mangue

A partir da metodologia de integração das escalas, foi possível obter as probabilidades máximas de presença de óleo oriundo de vazamentos ocorridos nas bacias da MEB nos sistemas costeiros e estuarinos e nas florestas de mangue. Serão apresentados resultados de probabilidade máxima divididas nos 4 cenários propostos (Seco e Chuvoso, Sízígia e Quadratura), e para o cenário completo.

Ressalta-se que, devido às particularidades do sistema costeiro de Sucuriju, algumas limitações se impuseram à modelagem hidrodinâmica deste sistema (ver Capítulo 5 do Volume 1). Após criteriosa análise, identificou-se que os resultados hidrodinâmicos nas áreas alagáveis com florestas de mangue deste sistema ainda necessitam de aprimoramentos e desenvolvimentos para validação. Portanto, os resultados de suscetibilidade no sistema costeiro de Sucuriju não foram utilizados na aplicação da metodologia para determinação da **vulnerabilidade** das áreas de estudo (Capítulo 4 do Volume 1).

Os resultados de SCO para o cenário completo pode ser visto na Figura 8-70 e nos quatro cenários podem ser vistos nas Figura 8-71 e Figura 8-72. Notam-se maiores probabilidades no período seco, em relação ao chuvoso, o que se dá por efeito direto da integração com as escalas estuarina (Rio Pará) e *offshore* (Bacias da MEB) nas quais, por influência dos padrões de ventos e correntes, apresentam probabilidade de até 40% na entrada do estuário do Rio Pará no período seco (julho a dezembro). É possível notar também que no período chuvoso as regiões de manguezal apresentam maior área com probabilidade de presença de óleo, possivelmente influenciados pela elevação do nível causado pela maior vazão fluvial. Em ambos os períodos sazonais, nota-se um alcance de maiores probabilidades mais para dentro do estuário nos cenários de sízígia, o que seria esperado graças à maior excursão da maré nesses períodos.

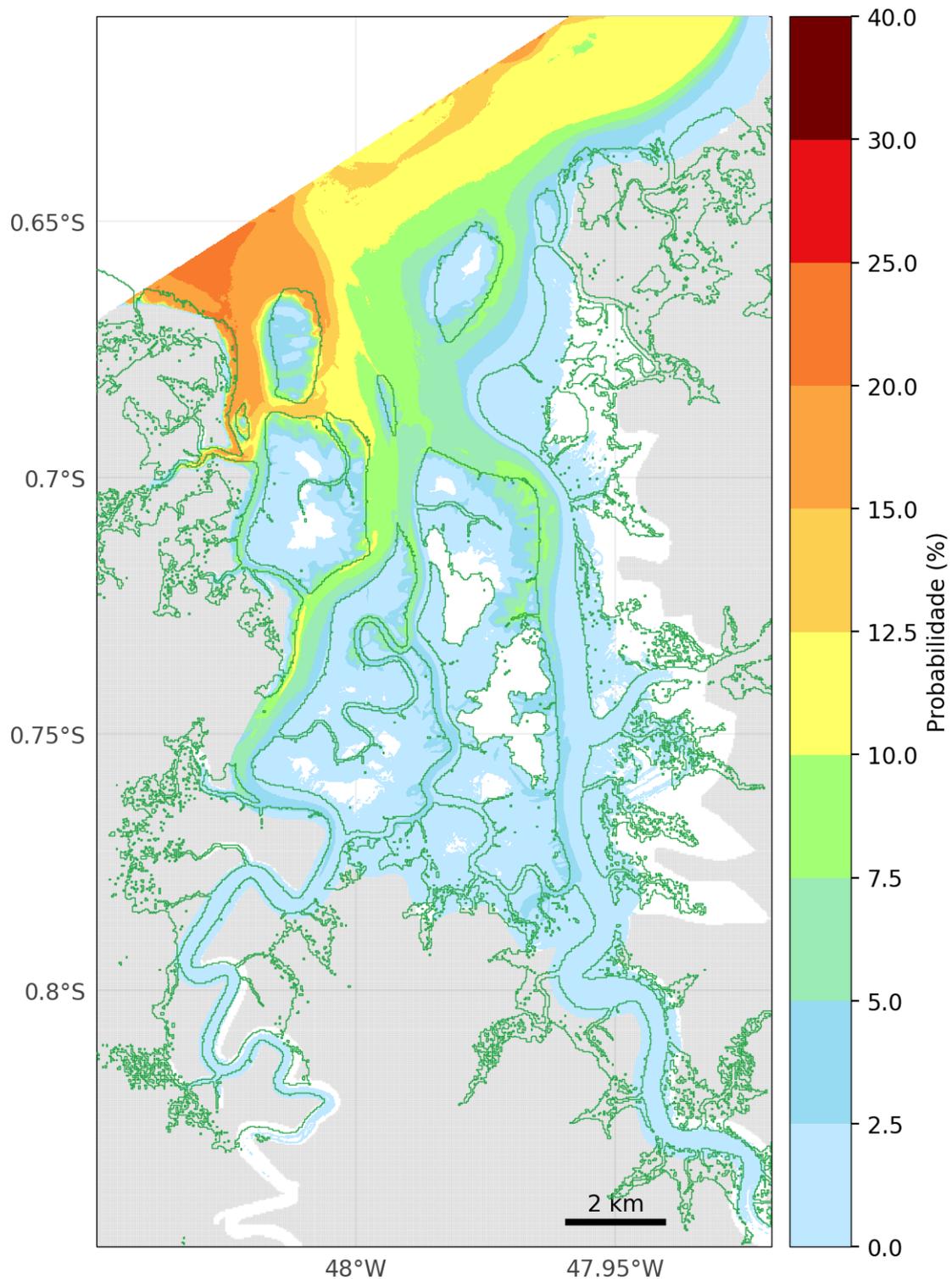


Figura 8-70: Probabilidade máxima de toque em São Caetano de Odivelas considerando todo o período estudado (ano de 2016). As áreas em cinza representam regiões de terra e as linhas verdes representam as regiões de florestas de mangue.

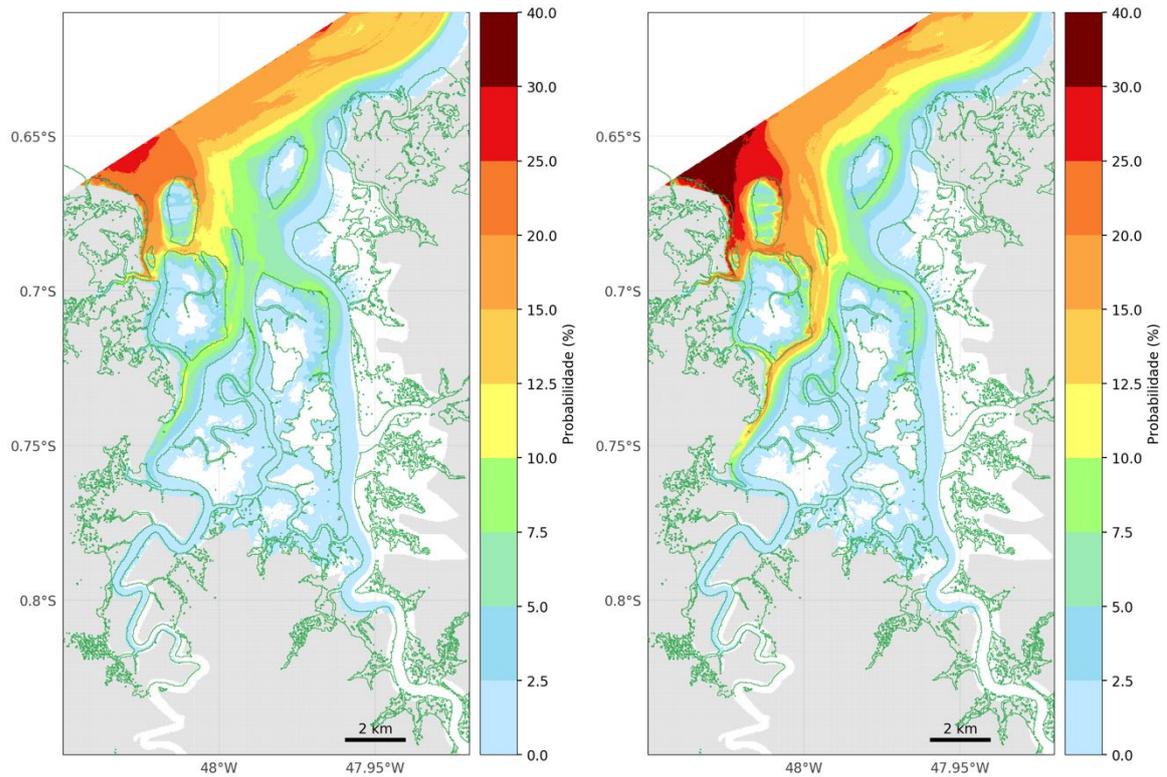


Figura 8-71: Probabilidade máxima de toque em São Caetano de Odivelas considerando o período Seco em Quadratura (esquerda) e Sízigia (direita). As áreas cinzas representam a terra e as linhas verdes representam as florestas de mangue.

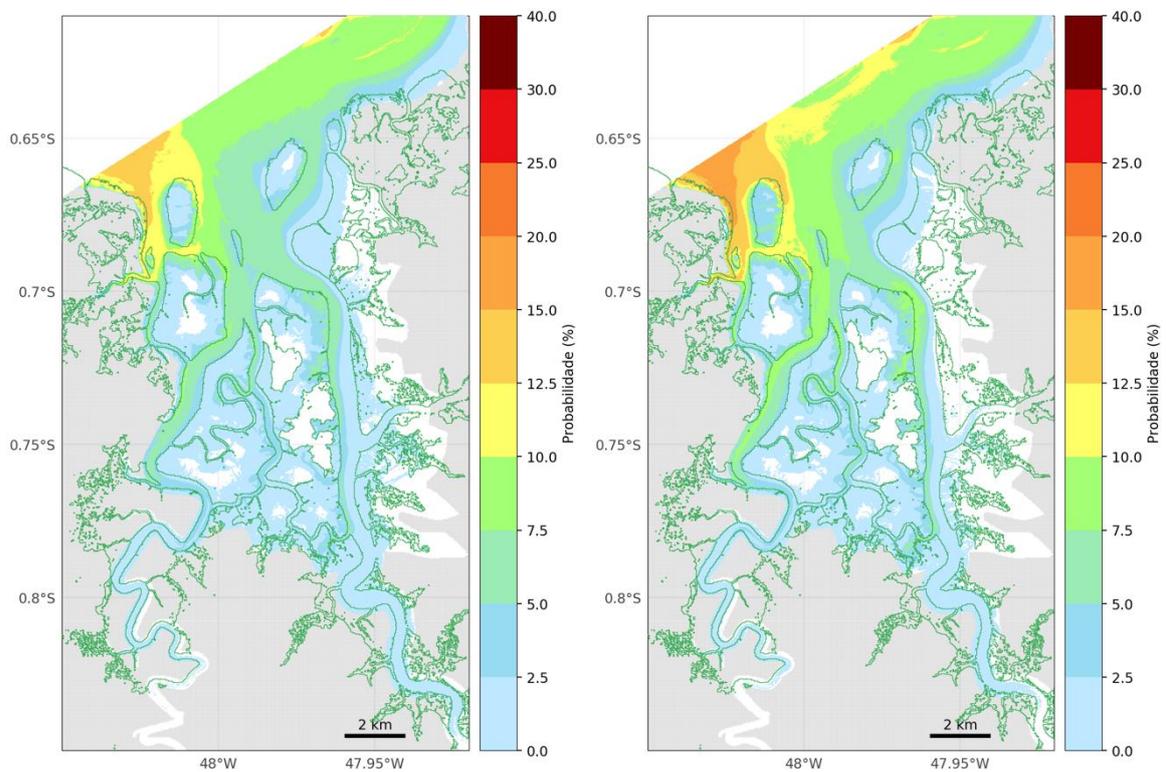


Figura 8-72: Probabilidade máxima de toque em São Caetano de Odivelas considerando o período Chuvoso em Quadratura (esquerda) e Sízigia (direita). As áreas cinzas representam a terra e as linhas verdes representam as florestas de mangue.

A seguir, são apresentados os resultados de Suscetibilidade em Turiacu (MA), para o cenário completo (Figura 8-73) e para os cenários de quadratura e sizígia no período seco (Figura 8-74) e chuvoso (Figura 8-75). Pode-se observar que durante o período seco ocorrem maiores probabilidades na região de entrada do estuário de Turiacu. Em ambos os cenários sazonais (seco e chuvoso), observa-se um limite de entrada no estuário bem semelhante, porém no período chuvoso pode-se observar uma maior área de mangue com alguma probabilidade de presença de óleo.

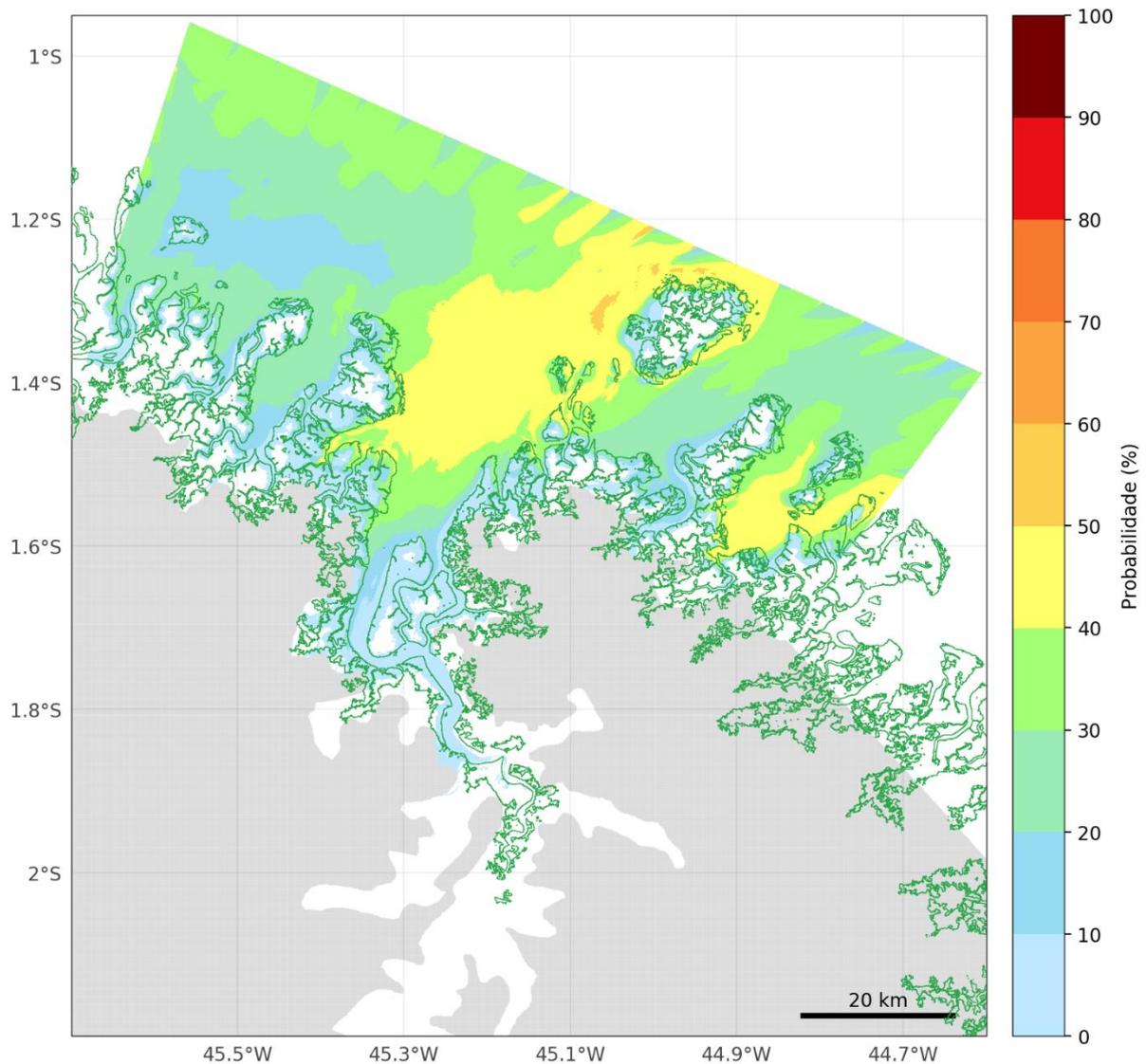


Figura 8-73: Probabilidade máxima de toque em Turiacu (MA) considerando todo o período estudado (ano de 2016). As áreas em cinza representam regiões de terra e as linhas verdes representam as regiões de florestas de mangue.

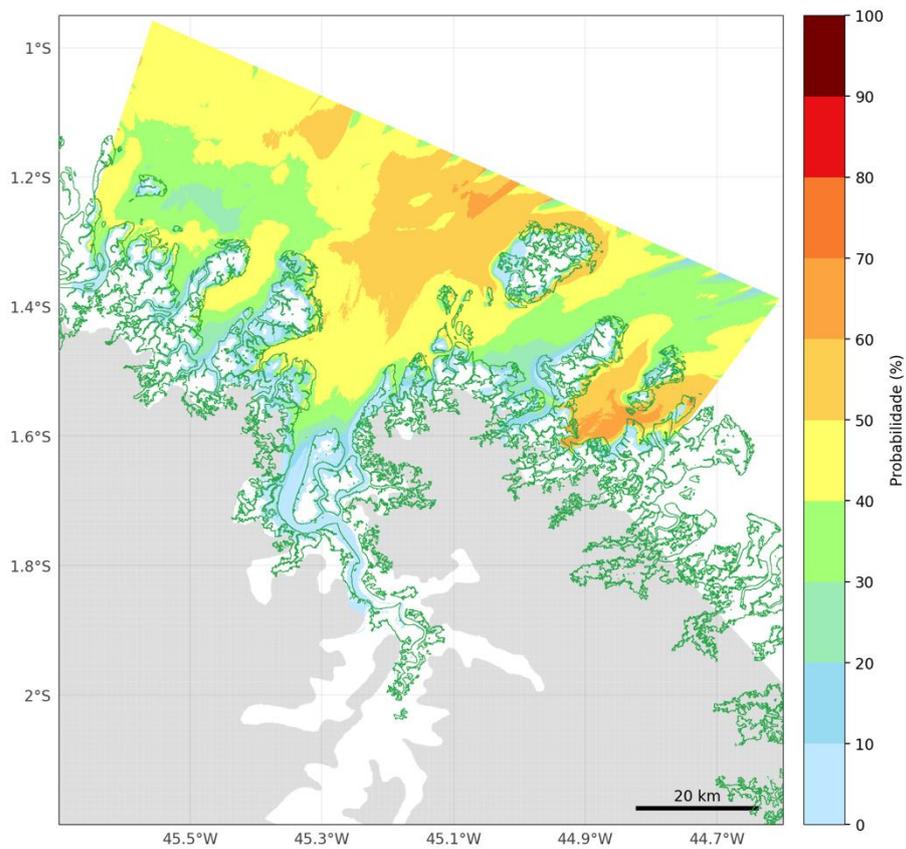
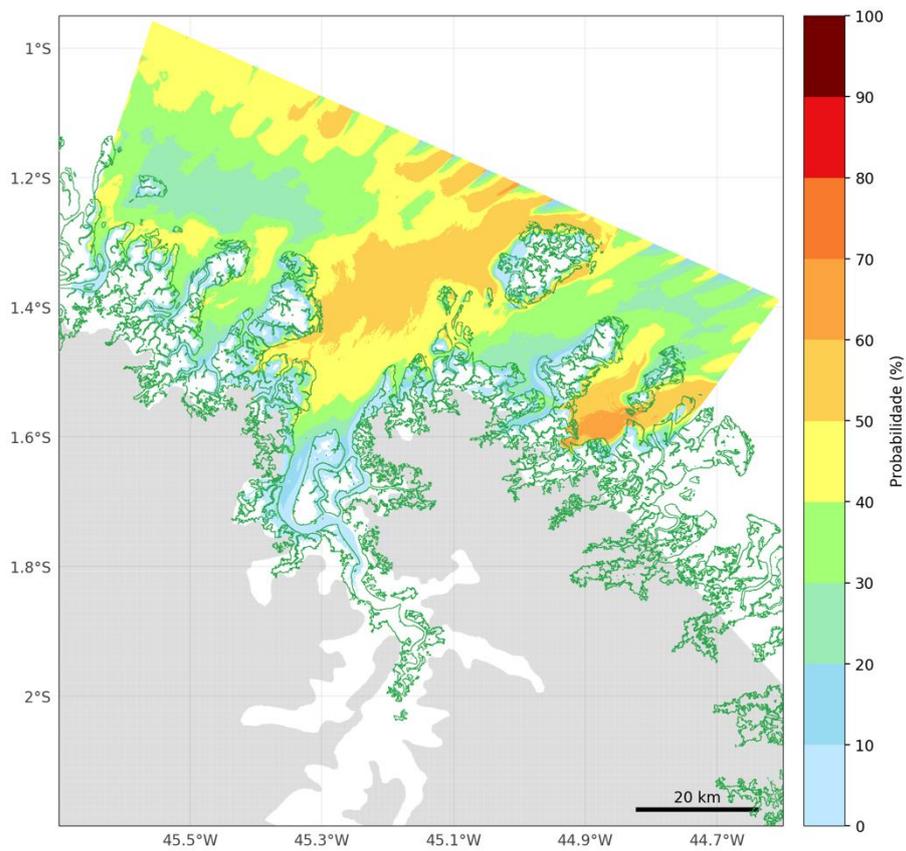


Figura 8-74: Probabilidade máxima de toque em Turiaçu considerando o período Seco em Quadratura (acima) e Sizígia (abaixo). As áreas cinzas representam a terra e as linhas verdes representam as florestas de mangue.

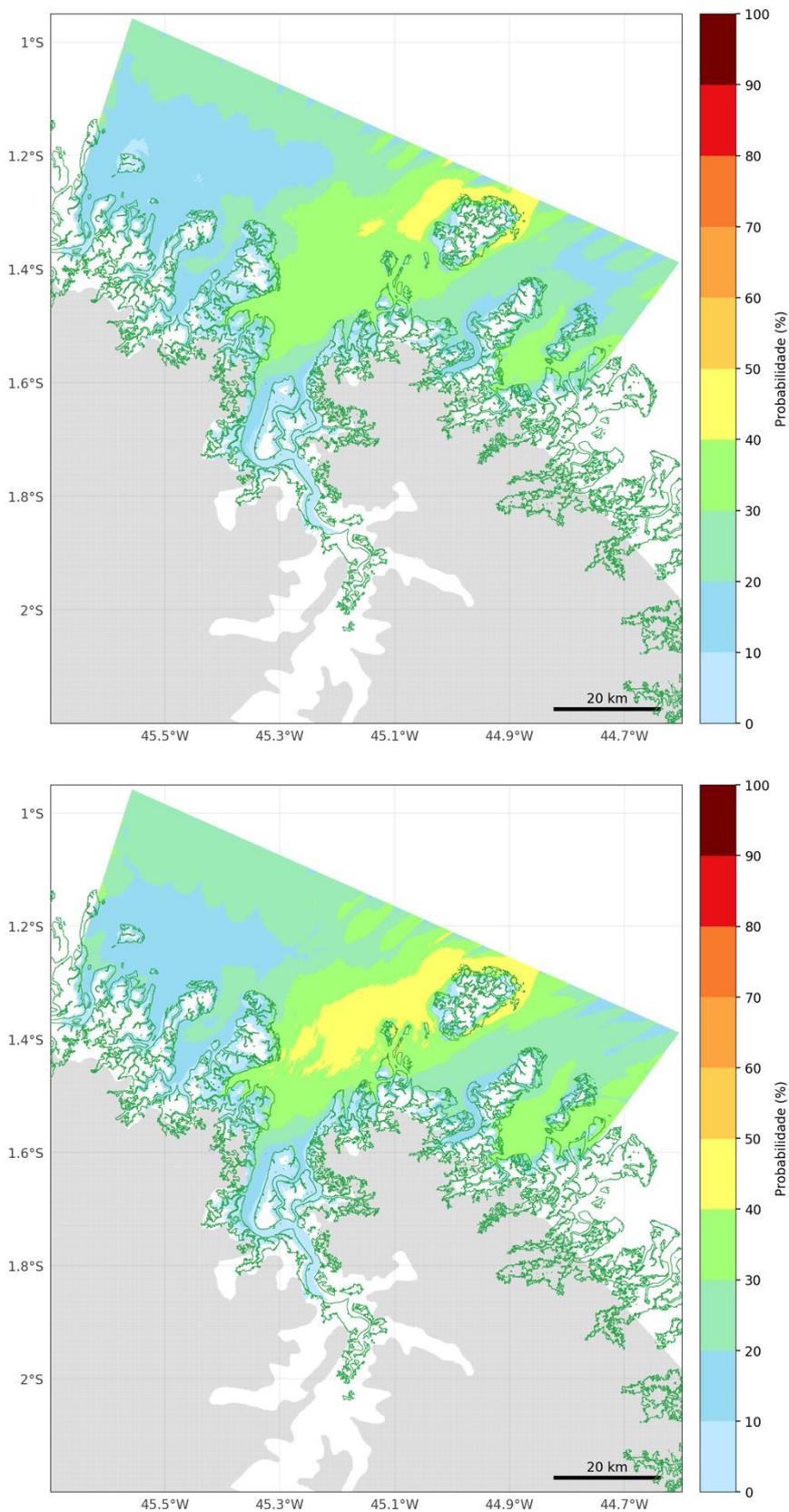


Figura 8-75: Probabilidade máxima de toque em Turiaçu considerando o período Chuvoso em Quadratura (esquerda) e Sizígia (direita). As áreas em cinza representam regiões de terra e as linhas verdes representam as regiões de florestas de mangue.

A seguir, são apresentados os resultados do modelo de dispersão de óleo de Sucuriju, para o cenário completo (Figura 8-76) e para os cenários de quadratura e sizígia no período seco (Figura 8-77) e chuvoso (Figura 8-78). Novamente é observado o mesmo padrão, com maiores probabilidades vindas de *offshore* no período seco, e o período chuvoso apresentando áreas de manguezal atingido ligeiramente maior.

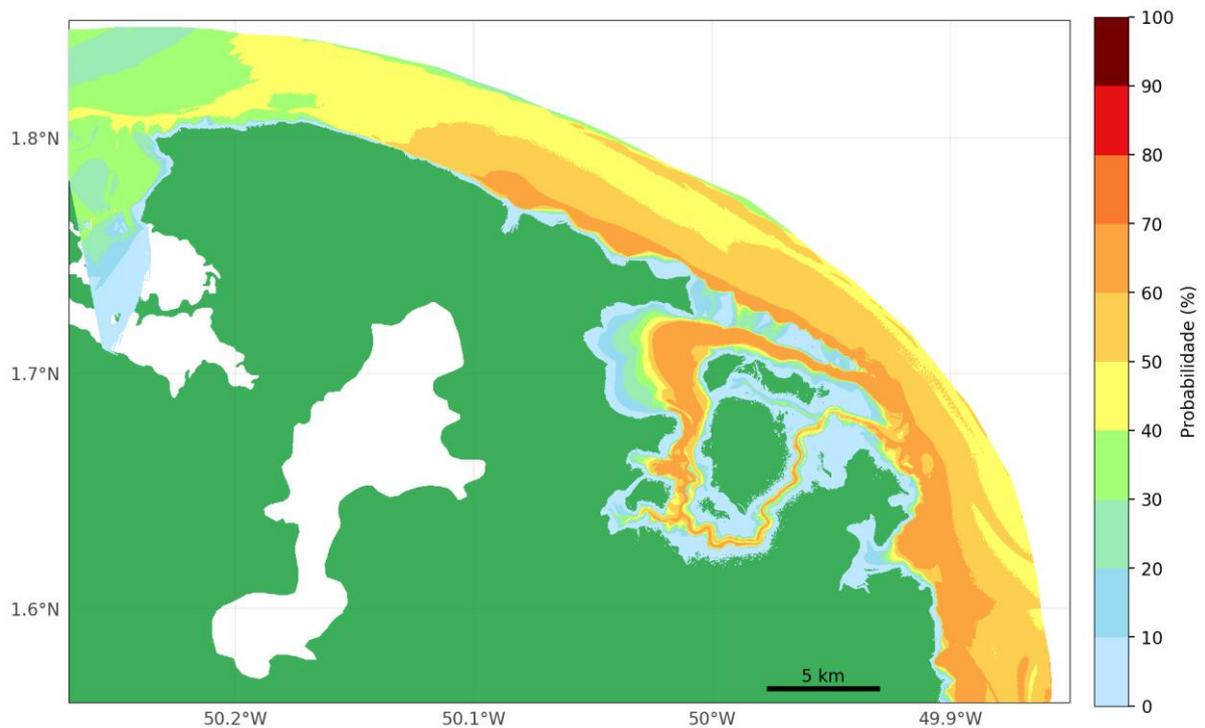


Figura 8-76: Probabilidade máxima de toque em Sucuriju (AP) considerando todo o período estudado (ano de 2016). As áreas em verde representam regiões florestas de mangue.

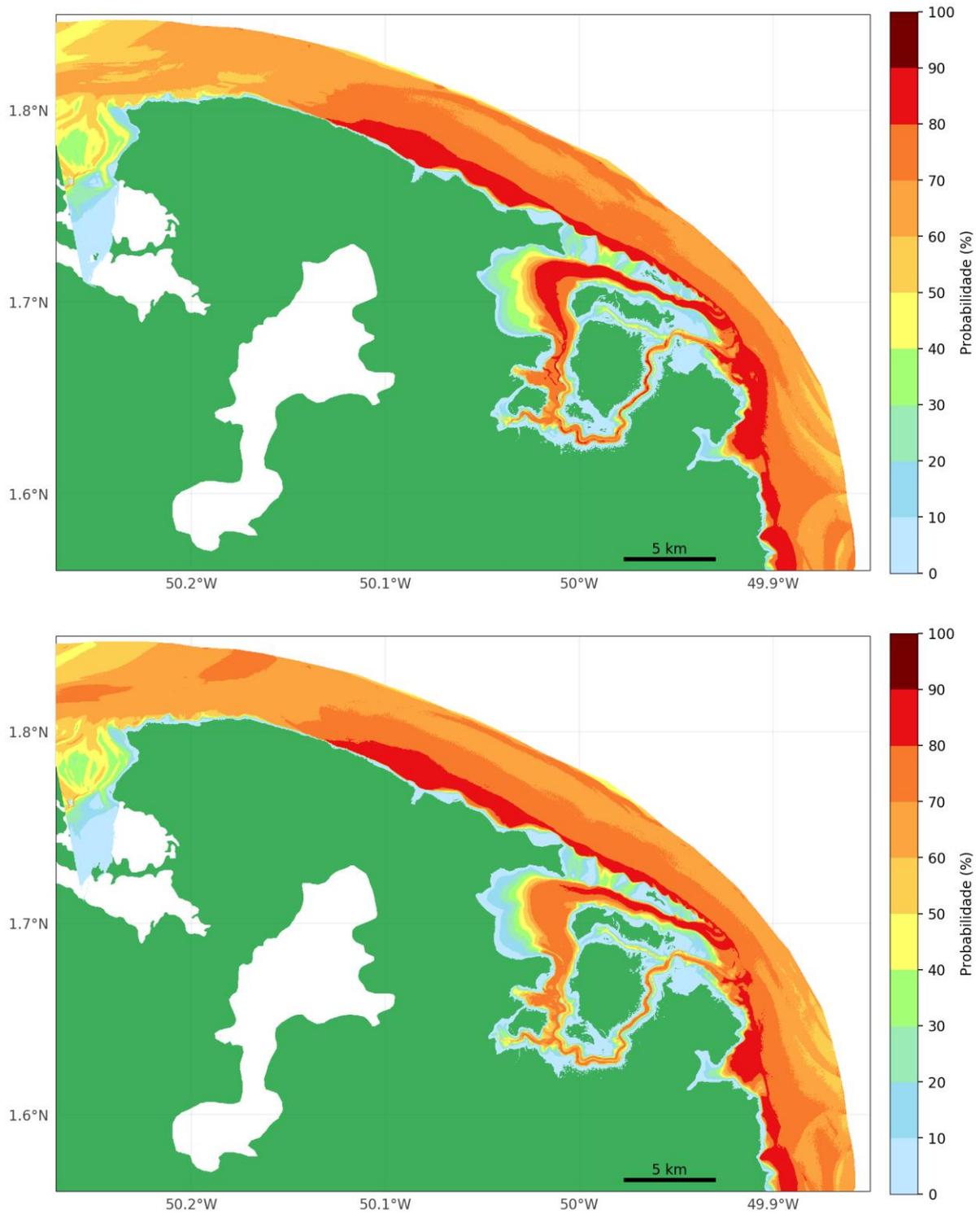


Figura 8-77: Probabilidade máxima de toque em Sucuriju considerando o período Seco em Quadratura (acima) e Sizígia (abaixo). As áreas em verde representam regiões florestas de mangue.

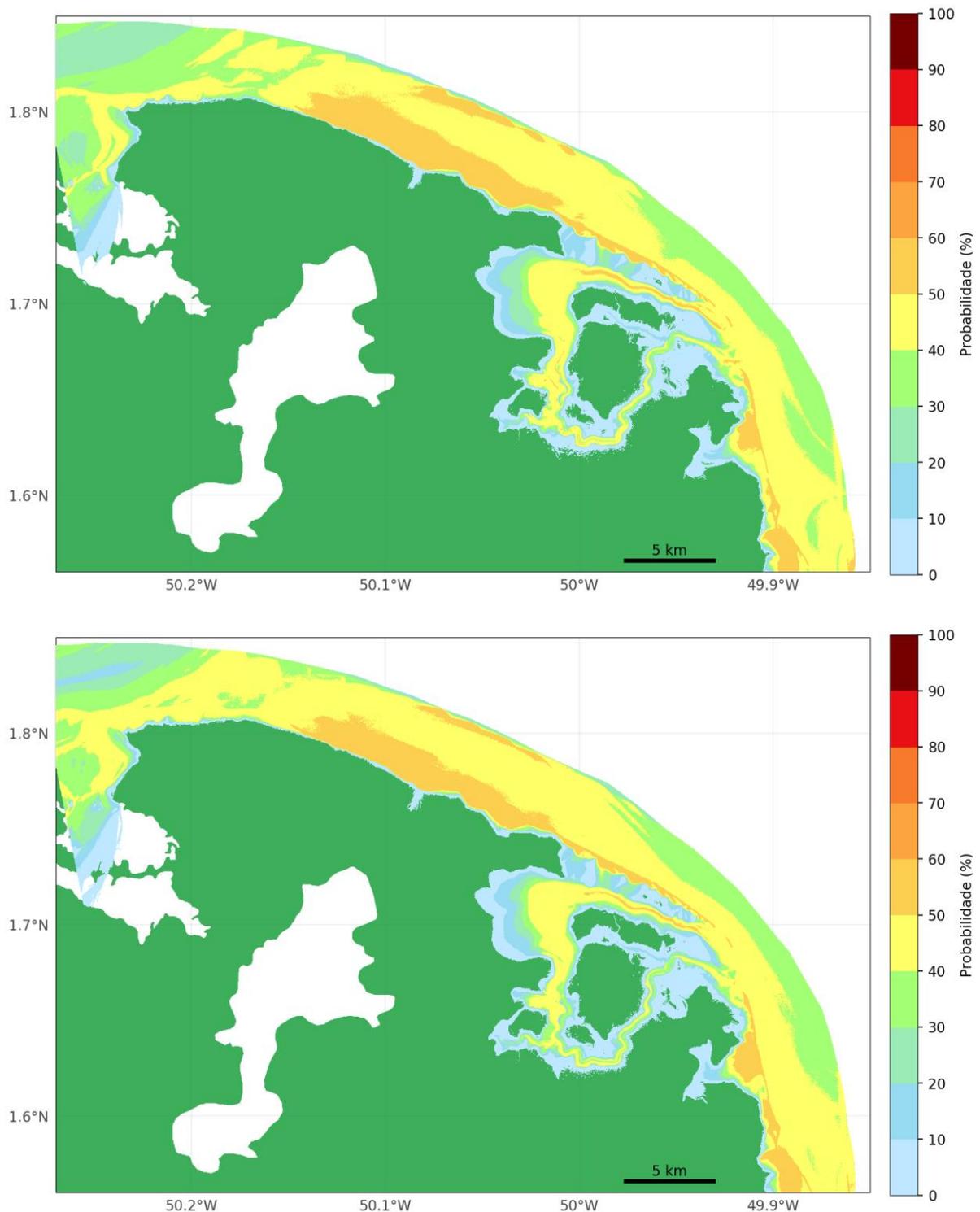


Figura 8-78: Probabilidade máxima de toque em Sucuriju considerando o período Chuvoso em Quadratura (acima) e Sízígia (abaixo). As áreas em verde representam regiões florestas de mangue.

Finalmente, são apresentados os resultados de Suscetibilidade para Soure (PA), para o cenário completo (Figura 8-79) e para os cenários de quadratura e sizígia no período seco (Figura 8-80) e chuvoso (Figura 8-81). Nota-se que de forma geral, a região norte de Soure apresenta maiores probabilidades que a região leste. Como nas demais regiões, durante o período Seco há maior probabilidade de presença de óleo em

toa a região, com probabilidades de até 80% na porção norte e até 40% na porção leste – enquanto no período Chuvoso, observam-se probabilidade de até 50% na porção norte e até 20% na porção leste.

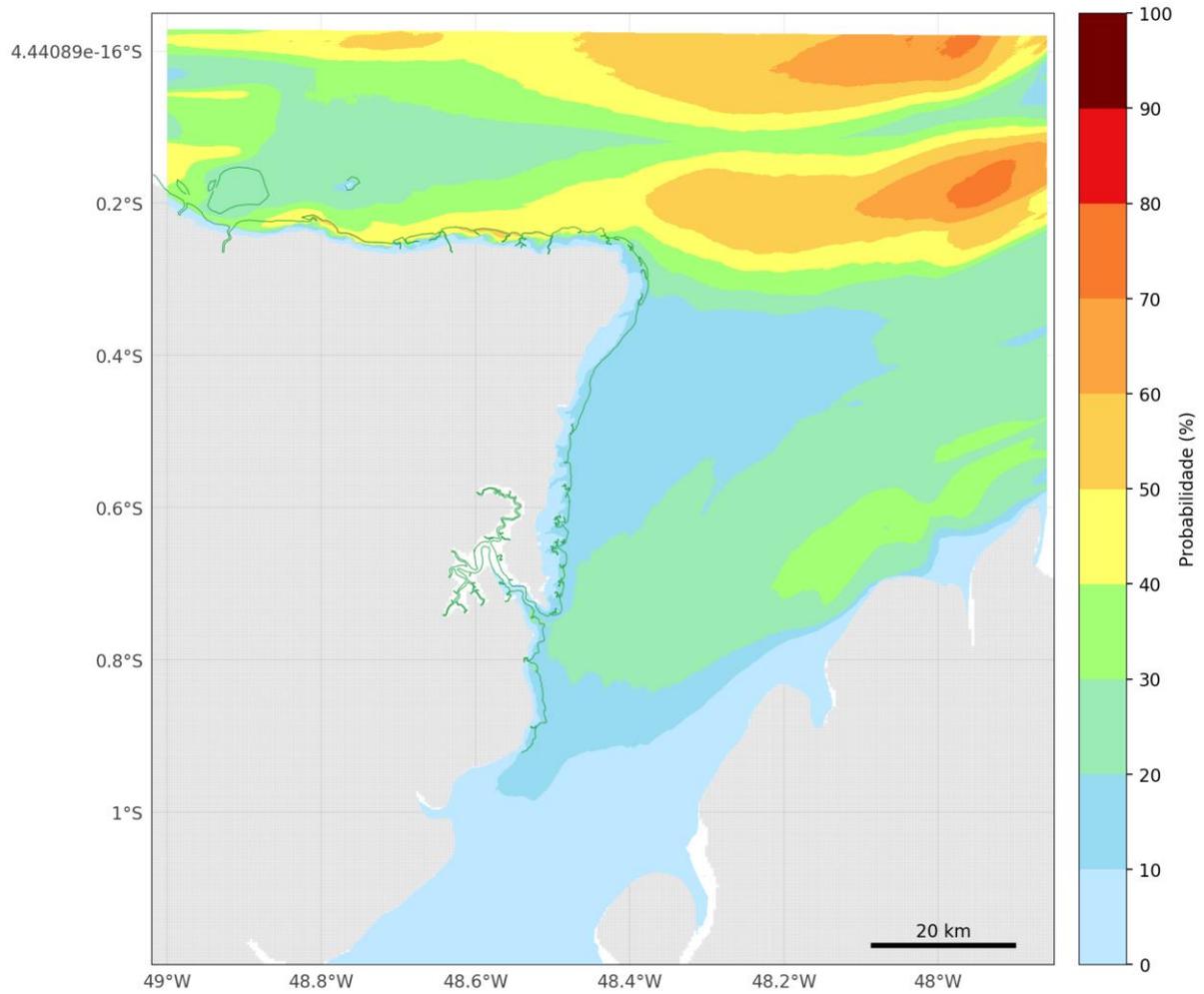


Figura 8-79: Probabilidade máxima de toque em Soare (AP) considerando todo o período estudado (ano de 2016). As áreas em cinza representam áreas de terra e as linhas verdes representam regiões de florestas de mangue.

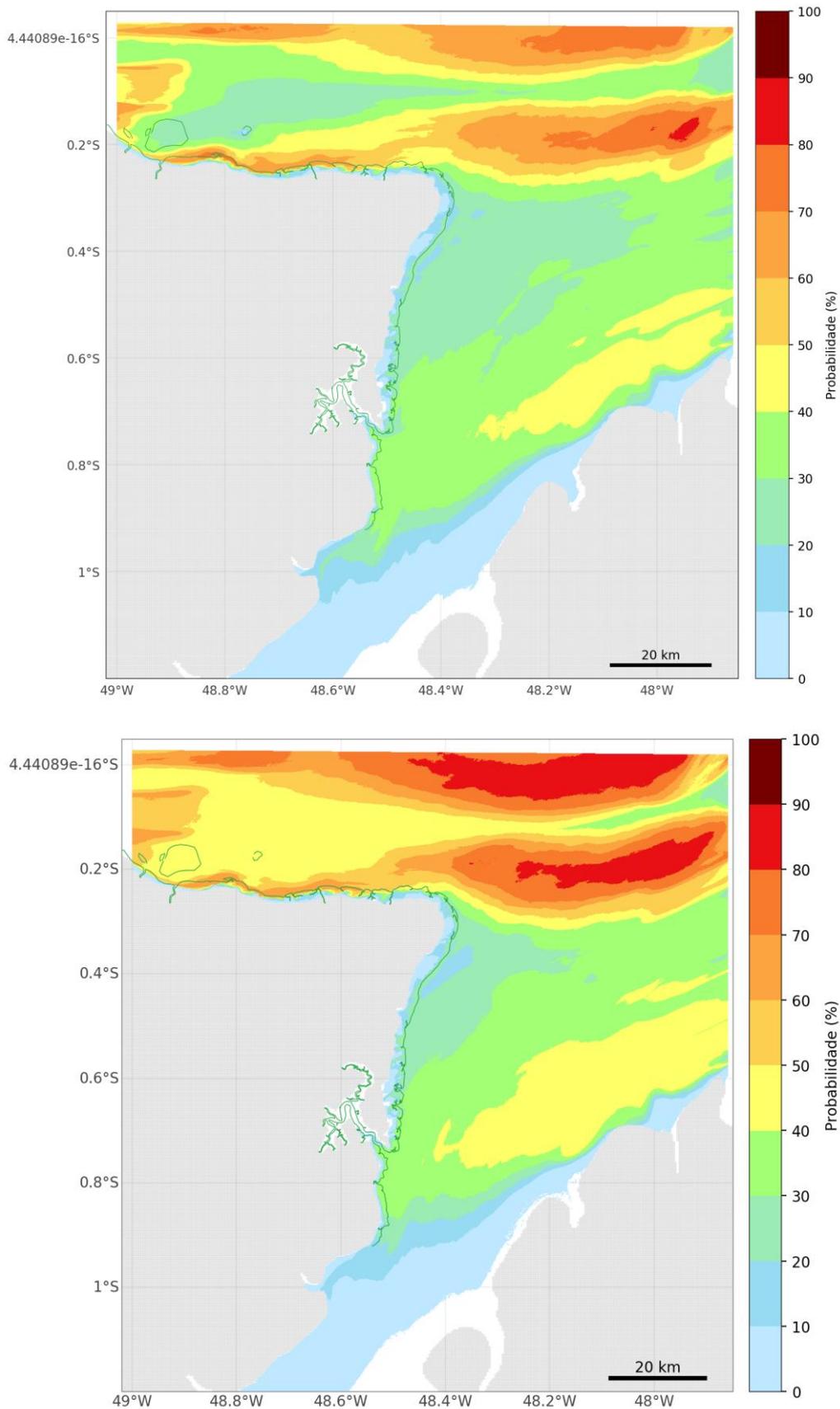


Figura 8-80: Probabilidade máxima de toque em Soure considerando o período Seco em Quadratura (acima) e Sizígia (abaixo). As áreas em cinza representam áreas de terra e as linhas verdes representam regiões de florestas de mangue.

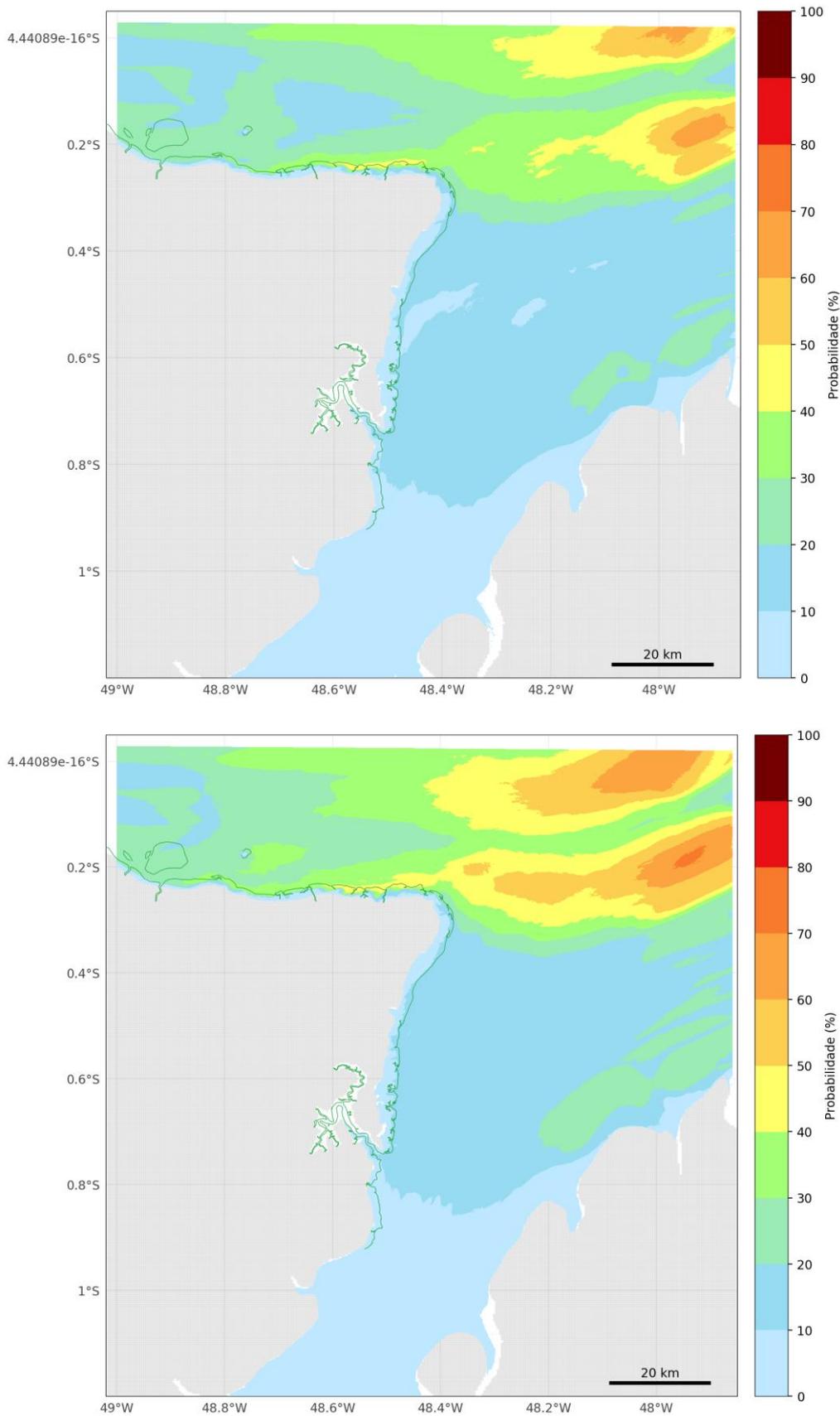


Figura 8-81: Probabilidade máxima de toque em Soure (PA) considerando o período Chuvoso em Quadratura (acima) e Sízgia (abaixo). As áreas em cinza representam áreas de terra e as linhas verdes representam regiões de florestas de mangue.

Os resultados apresentados acima são para toda a grade dos modelos em escala de Floresta de Mangue, ou seja, regiões de água e regiões de florestas de mangues. Para a análise de Vulnerabilidade das florestas de mangue do PCN, esses resultados foram interpolados apenas para as áreas de florestas de mangue cobertas pelo levantamento LiDAR, em uma grade padronizada para todos os parâmetros que compõe a Vulnerabilidade (para ver esses mapas, referir-se ao Volume 1).

Observando o resultado obtido em Turiaçu, nota-se que é possível enxergar a posição dos pontos de vazamento na interface entre as escalas a partir de manchas de maiores probabilidades. Essa constatação indica uma melhoria necessária a ser feita nesta metodologia. Como visto no item 8.3.1.2.3, os pontos de vazamento do modelo aninhado são posicionados com um determinado espaçamento (2 Km). Porém, a resolução da grade aninhada é de 50 metros e, como as 5.000 partículas são lançadas no mesmo ponto em cada simulação determinística, a região mais próxima das fontes fica com maiores probabilidades do que o seu entorno, causando esse efeito descontínuo na interface – o que não é desejado. Na medida que adentram o domínio, a difusão age na trajetória das partículas e o efeito de descontinuidade cessa. Dessa forma, a partir dos resultados obtidos, indica-se a possibilidade de melhoria na representação das fontes de vazamento nas grades aninhadas, para aumentar a continuidade na representação da interface entre as escalas. Duas opções são indicadas: posicionar uma fonte de vazamento a cada célula da grade aninhada (na interface), ou manter o espaçamento maior, porém lançar as partículas não em um ponto único, mas distribuídas aleatoriamente em um raio igual ao espaçamento utilizado.

8.3.2.2. Taxa de Afastamento

A taxa de afastamento é um parâmetro obtido a partir de outra aplicação possibilitada pelo sistema de dispersão de óleo com múltiplas fontes. Serão apresentados mapas exemplificando os resultados de taxa de afastamento para as florestas de mangue focadas no PCN.

Como já visto, este parâmetro indica a capacidade hidrodinâmica em afastar uma partícula de um ponto de origem – distribuídos nas regiões de florestas de mangue dos estuários Turiaçu, São Caetano de Odiveles, Soure e Sucuriju. Desta forma, este parâmetro tem uma relação positivamente proporcional com a composição da Resiliência, componente de Vulnerabilidade. Os resultados devem ser interpretados comparativamente, ou seja, regiões com maior taxa de afastamento tendem a ter maior capacidade de remover fisicamente o óleo.

Outro ponto relevante, é que esta metodologia depende de uma boa representação da hidrodinâmica no interior das florestas de mangue – possibilitado no PCN nas regiões com levantamento de altimetria por LiDAR. Dessa forma, é importante atentar nos mapas para a representação da área de levantamento LiDAR (linha tracejada vermelha), pois é apenas nas regiões contidas nestas áreas que os resultados podem ter validade.

Da Figura 8-82 a Figura 8-85 são apresentados os mapas de taxa de afastamento para os estuários de Turiaçu, São Caetano de Odiveles, Soure e Sucuriju. Nota-se que apesar das diferenças nas distribuições espaciais, as regiões apresentam limites similares, variando de 0 a 90 m/h (ou 0 a 0,025 m/s), ou seja, de um modo geral, as taxas de afastamento são baixas. Como este parâmetro é obtido pela taxa de afastamento média de um ponto desde a sua origem ao longo de 15 dias, ela integra as velocidades não só no ponto de lançamento, mas também em seu entorno. Desta forma, vê-se que no geral este ambiente apresenta baixa capacidade de remoção física do óleo devido à ação hidrodinâmica. Outro padrão comum

entre as regiões é que as regiões de manguezal com maior taxa de afastamento normalmente encontram-se mais próximas às margens dos rios e canais.

Observa-se que São Caetano de Odivelas apresenta valores mais baixos que os demais, e apresenta menores valores quanto mais para o interior do estuário. Turiaçu apresenta valores no geral mais próximos do limite superior, provavelmente devido à alta intensidade hidrodinâmica neste estuário que apresenta regime de hipermaré – 6 a 8 metros de amplitude (para mais detalhes, ver Capítulo 4). Sucuriçu apresenta amplitudes ainda maiores de maré - de até 10 metros – influenciando a hidrodinâmica no interior das florestas de mangue e gerando altas taxas de afastamento – a exceção de regiões mais altas. Sucuriçu apresenta ainda extensas regiões de lagos internos, alguns com lâmina d'água livre e outras entremeadas com mangue, tornando a circulação desta região ainda mais complexa.

Para a análise de Vulnerabilidade do PCN, esses resultados foram interpolados apenas para as áreas das florestas de mangue cobertas pelo levantamento LiDAR, em uma grade padronizada para todos os parâmetros que compõe a Vulnerabilidade (para ver esses mapas, referir-se ao Volume 1).

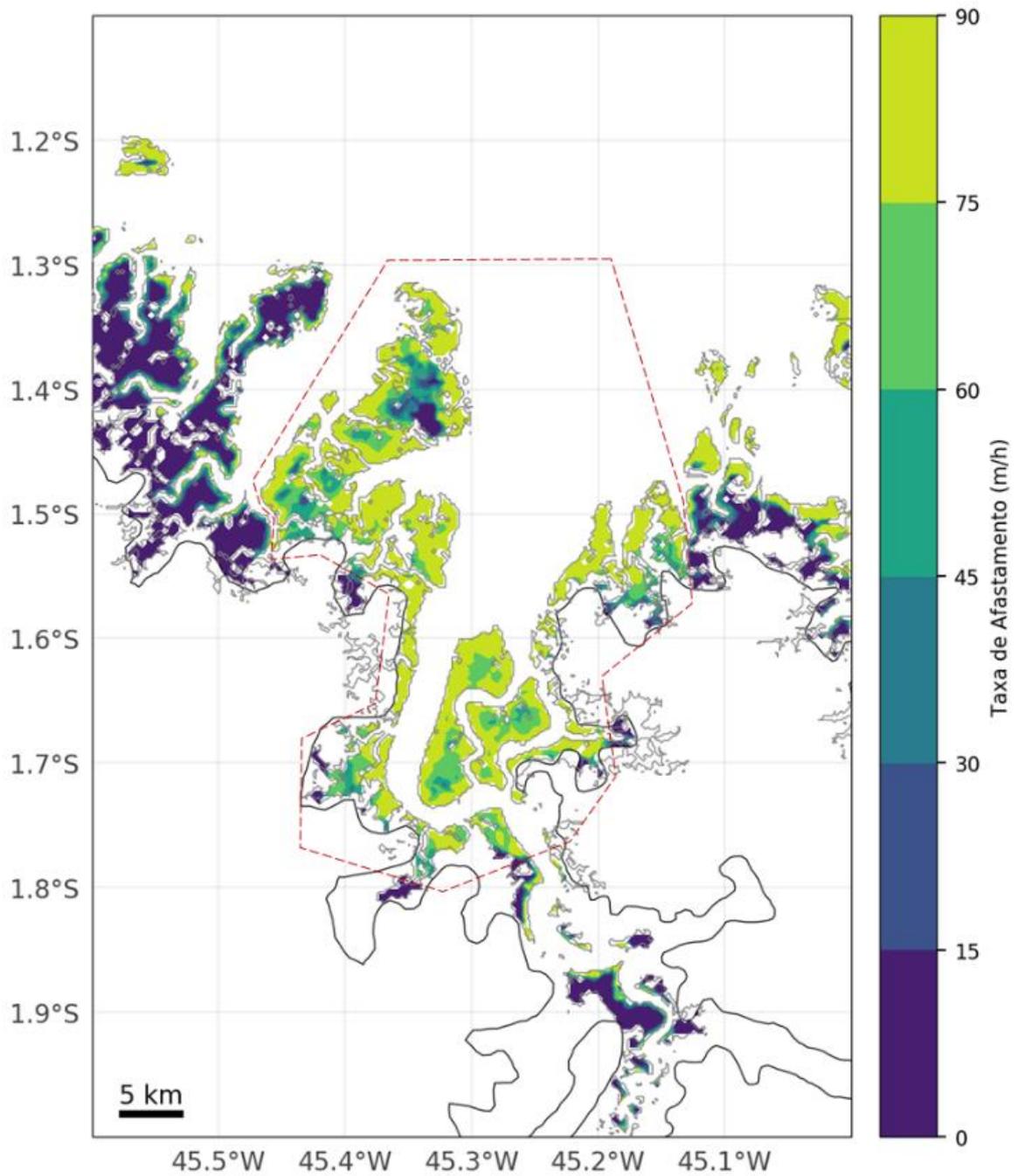


Figura 8-82: Taxa de afastamento nas florestas de manguezal em Turiacu (MA). O polígono tracejado em vermelho representa as áreas com aquisição de dados de altimetria LiDAR.

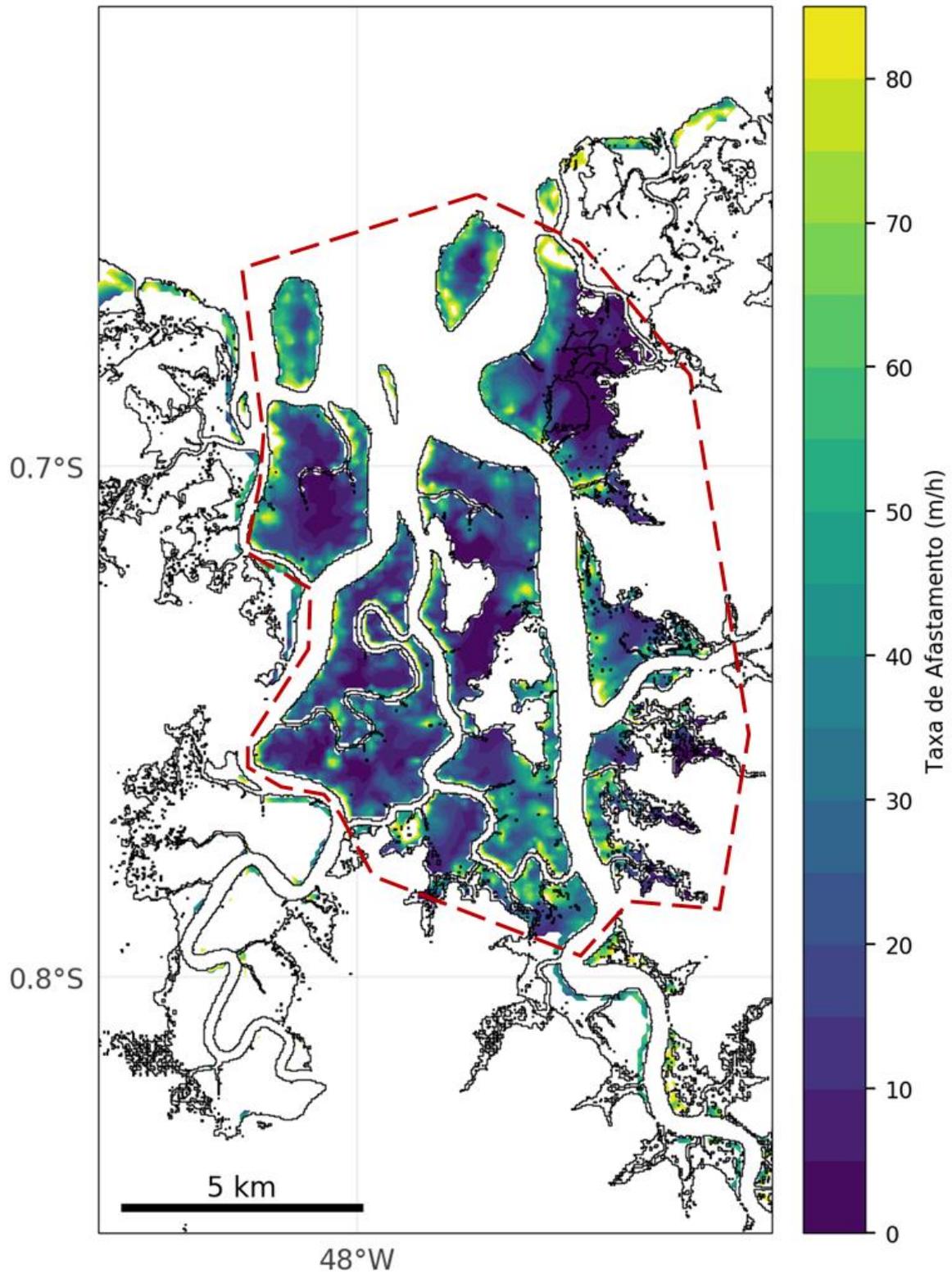


Figura 8-83: Taxa de afastamento nas florestas de manguezal em São Caetano de Odivelas (PA). O polígono tracejado em vermelho representa as áreas com aquisição de dados de altimetria LiDAR.

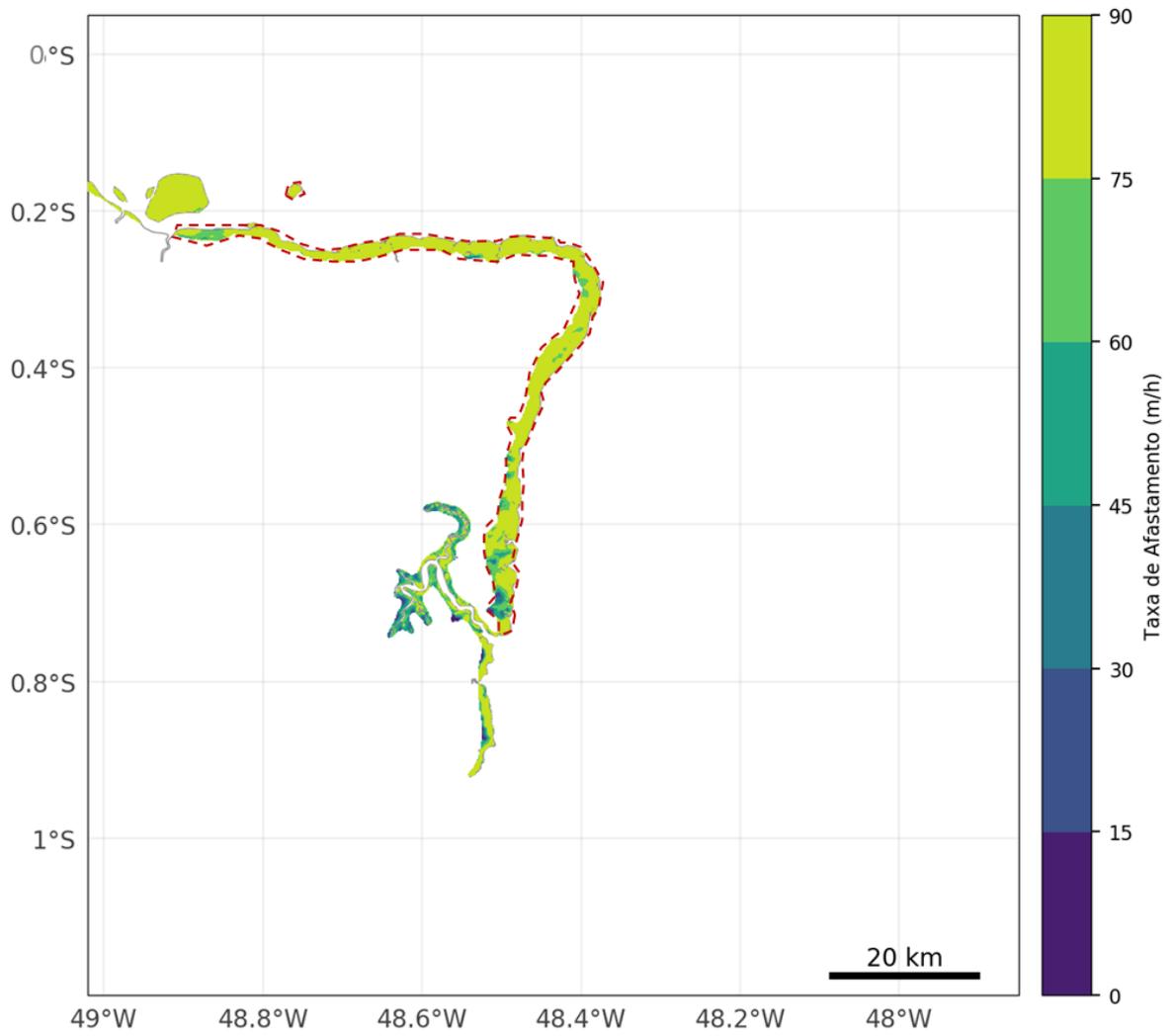


Figura 8-84: Taxa de afastamento nas florestas de manguezal em Soure (PA). O polígono tracejado em vermelho representa as áreas com aquisição de dados de altimetria LiDAR.

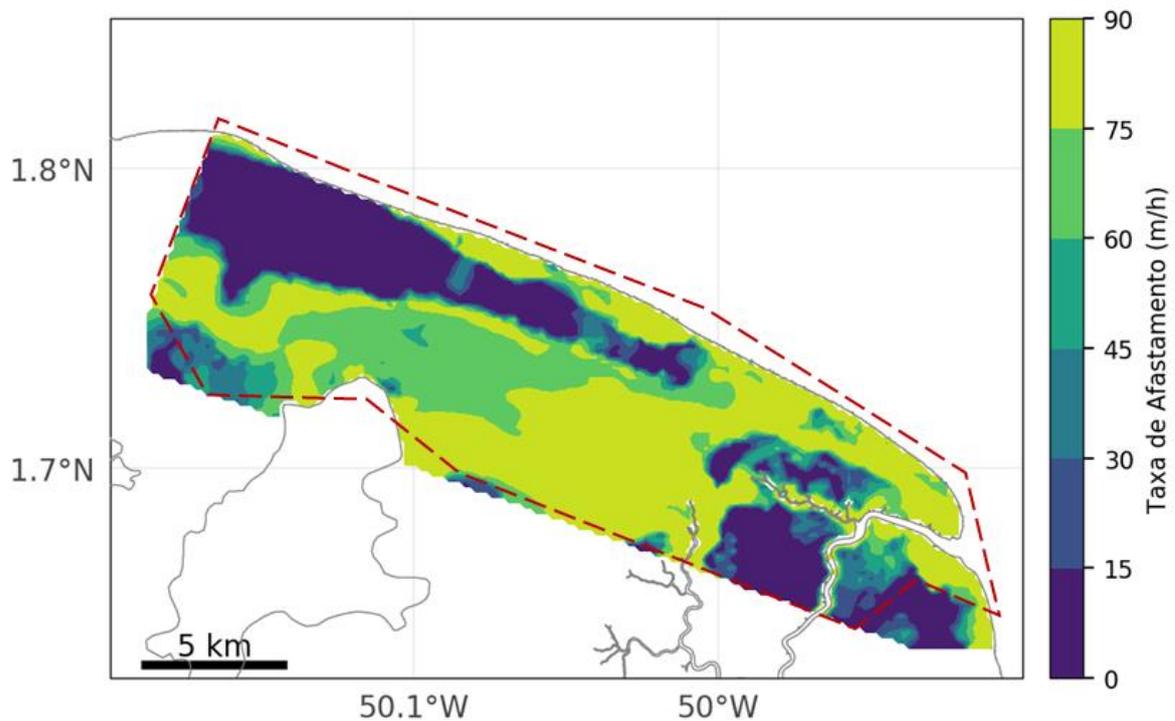


Figura 8-85: Taxa de afastamento nas florestas de manguezal em Sucuriçu (AM). O polígono tracejado em vermelho representa as áreas com aquisição de dados de altimetria LiDAR.

Ressalta-se que, devido à particularidades do sistema costeiro de Sucuriçu, algumas limitações se impuseram à modelagem hidrodinâmica deste sistema (ver Capítulo 5 do Volume 1). Após criteriosa análise, identificou-se que os resultados hidrodinâmicos nas áreas alagáveis com florestas de mangue deste sistema ainda necessitam de aprimoramentos e desenvolvimentos para validação. Portanto, os resultados de taxa de afastamento no sistema costeiro de Sucuriçu não foram utilizados na aplicação da metodologia para determinação da **vulnerabilidade** das áreas de estudo (Capítulo 4 do Volume 1).

8.3.2.3. Análise Inversa de toque de óleo

Como foi introduzido, a análise inversa é uma metodologia cujo potencial reside na interatividade dos resultados, pois a cada local escolhido, gera-se um mapa de identificação das potenciais fontes de óleo para ele, com a respectiva distribuição de probabilidades e tempos mínimos. Será apresentado um exemplo para um local escolhido, porém, os resultados desta metodologia podem ser explorados através do site do PCN (projetocostanorte.eco.br/mapa).

Um exemplo é apresentado para a escolha de um ponto na entrada na Baía de Turiçu, uma das regiões foco do PCN localizada no estado do Maranhão. A Figura 8-86 apresenta as fontes de derramamento de óleo que apresentam risco para o local selecionado, a probabilidade associada e o tempo mínimo de chegada.

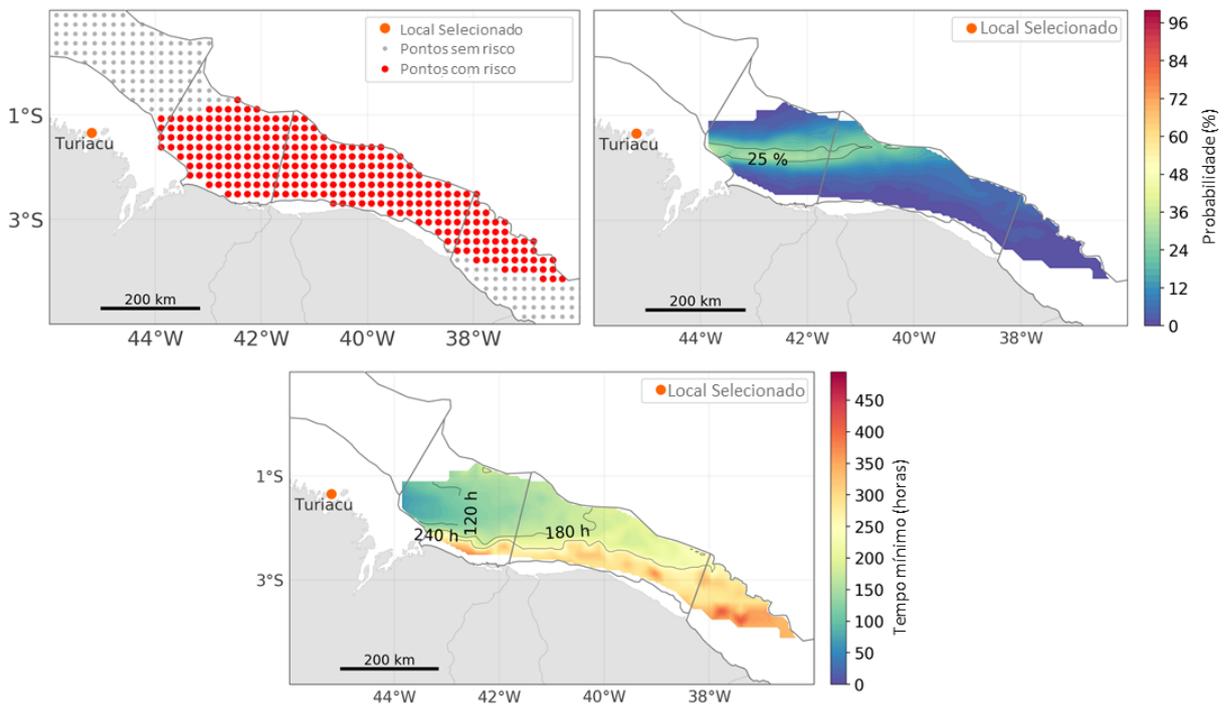


Figura 8-86: Exemplificação da Análise Inversa. Acima a esquerda, fontes de vazamento que apresentam risco (pontos vermelhos) e que não apresentam risco (pontos cinzas) para o local selecionado (ponto laranja, Turiacu). Acima a direita, a probabilidade e abaixo, o tempo mínimo de chegada, associados aos pontos que apresentam risco para Turiacu.

8.3.2.4. Variabilidade Interanual

Primeiramente, a partir dos resultados de mapas anuais de probabilidade de presença de óleo gerados previamente, foi obtido o mapa de desvio padrão das probabilidades, apresentado na Figura 8-87. Notam-se maiores desvios na região da retroflexão da CNB, em especial nas áreas centradas em $5,0^{\circ}\text{N}$ e $47,5^{\circ}\text{O}$, podendo ser decorrentes, por exemplo, de uma variação da posição média da feição ao longo dos anos. Contudo, a região costeira da bacia Foz do Amazonas apresenta desvio padrão de 3-4%.

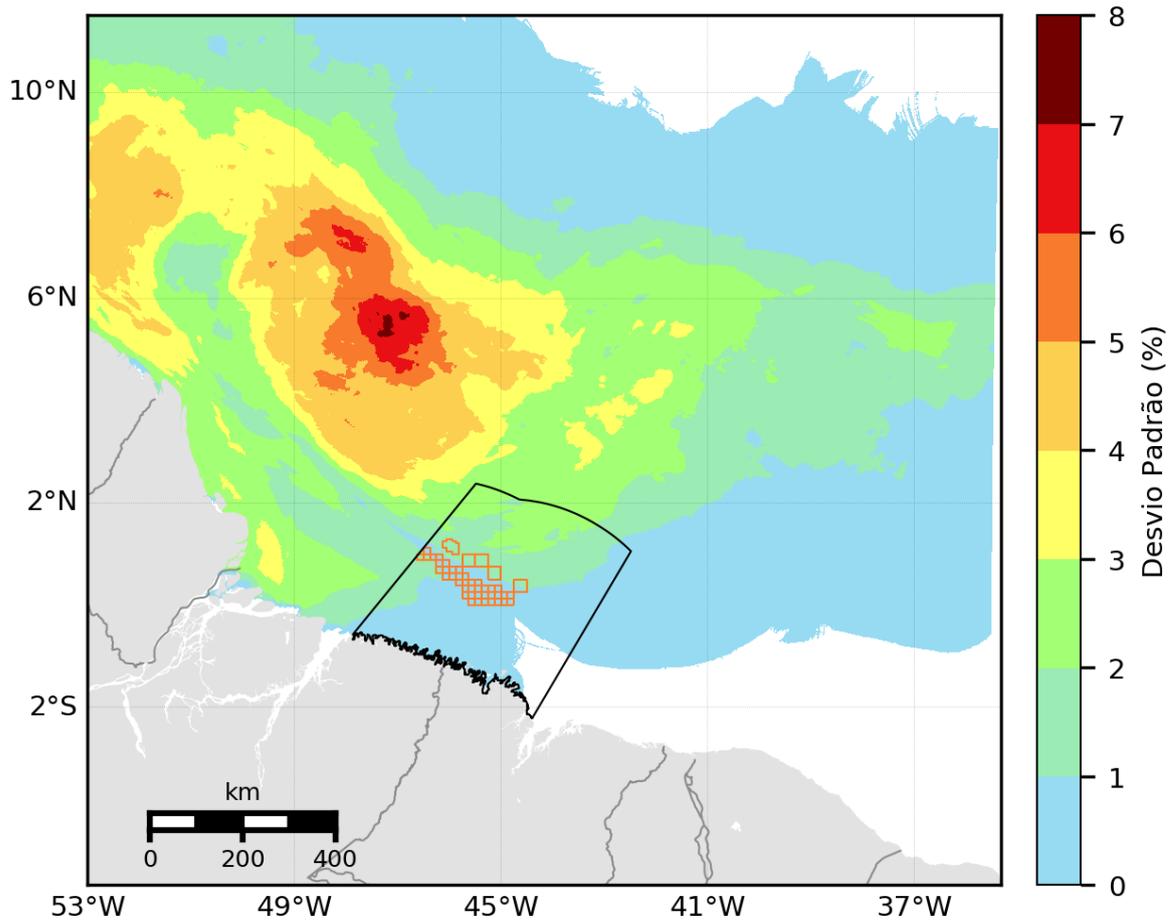


Figura 8-87: Mapa de desvio padrão de probabilidades relativo aos mapas anuais de probabilidade de presença de óleo entre os anos de 2008 e 2016, obtidos a partir da simulação de múltiplos pontos de vazamento dentro dos blocos da Bacia Pará-Maranhão.

Na sequência foram feitos gráficos de distribuição acumulada dos desvios absolutos de probabilidade em relação à média dos 10 anos. A Figura 8-88 apresenta as curvas para cada ano entre 2008 e 2016.

O ano de 2016, como destacado pela linha tracejada em preto da figura, foi o que apresentou o maior valor de desvio quando o valor da distribuição acumulada chega em 99%. Nesse caso, 99% dos desvios se encontram abaixo de 8,6%.

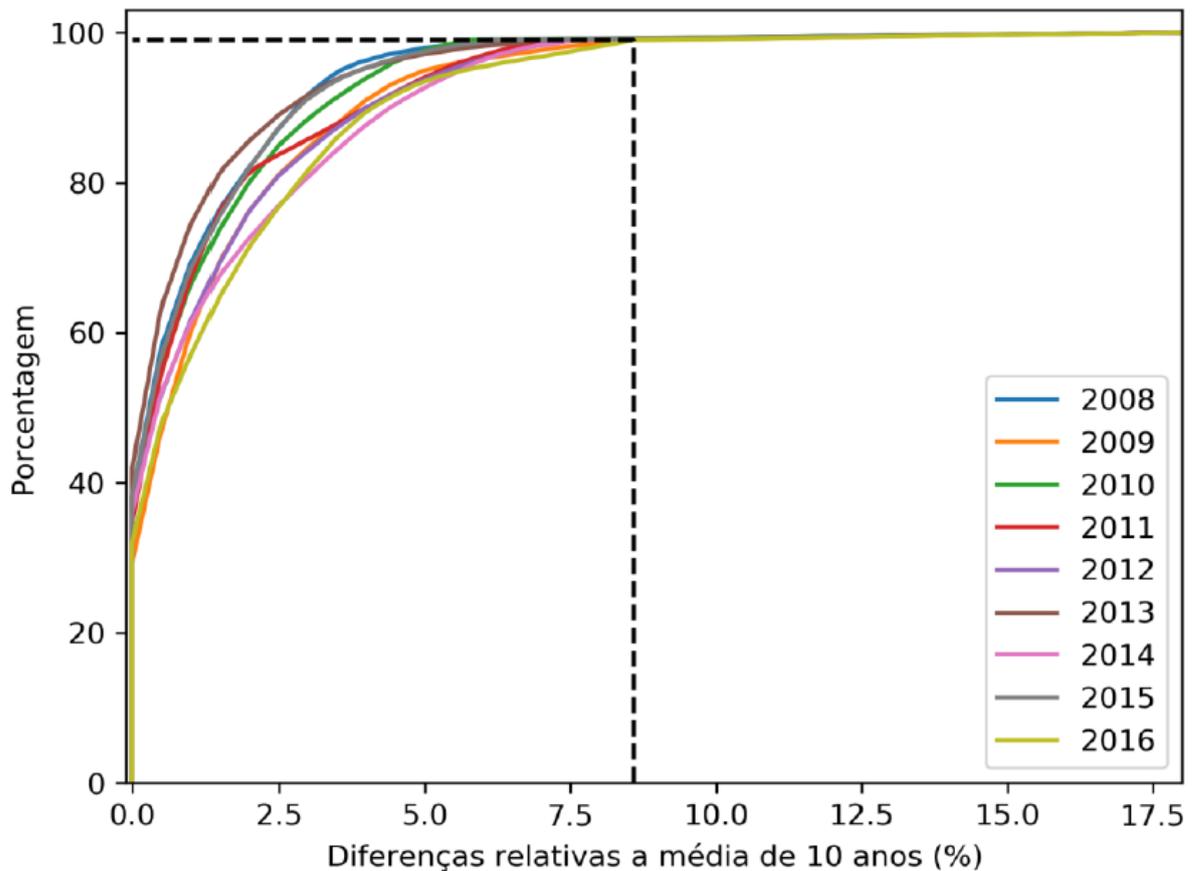


Figura 8-88: Distribuição acumulada dos desvios absolutos de probabilidade anual (2008 a 2016) em relação às médias de 10 anos. A linha tracejada preta se refere ao ano (2016) que apresenta o maior valor de desvio ao alcançar 99% de distribuição acumulada.

De forma a compreender como cada ano difere em relação à média do período, e se existem áreas preferenciais para as diferenças observadas nos gráficos, foram feitos mapas do desvio anual em relação à média de 10 anos em cada ponto de grade. Os mapas são apresentados nas Figura 8-89 e Figura 8-90. Observando os mapas, notou-se que as diferenças podem ocorrer tanto em regiões offshore como também próxima a costa e que, próximo à costa na bacia Foz do Amazonas observam-se anos com desvios variando de aproximadamente +6% a -7% de probabilidade de presença de óleo.

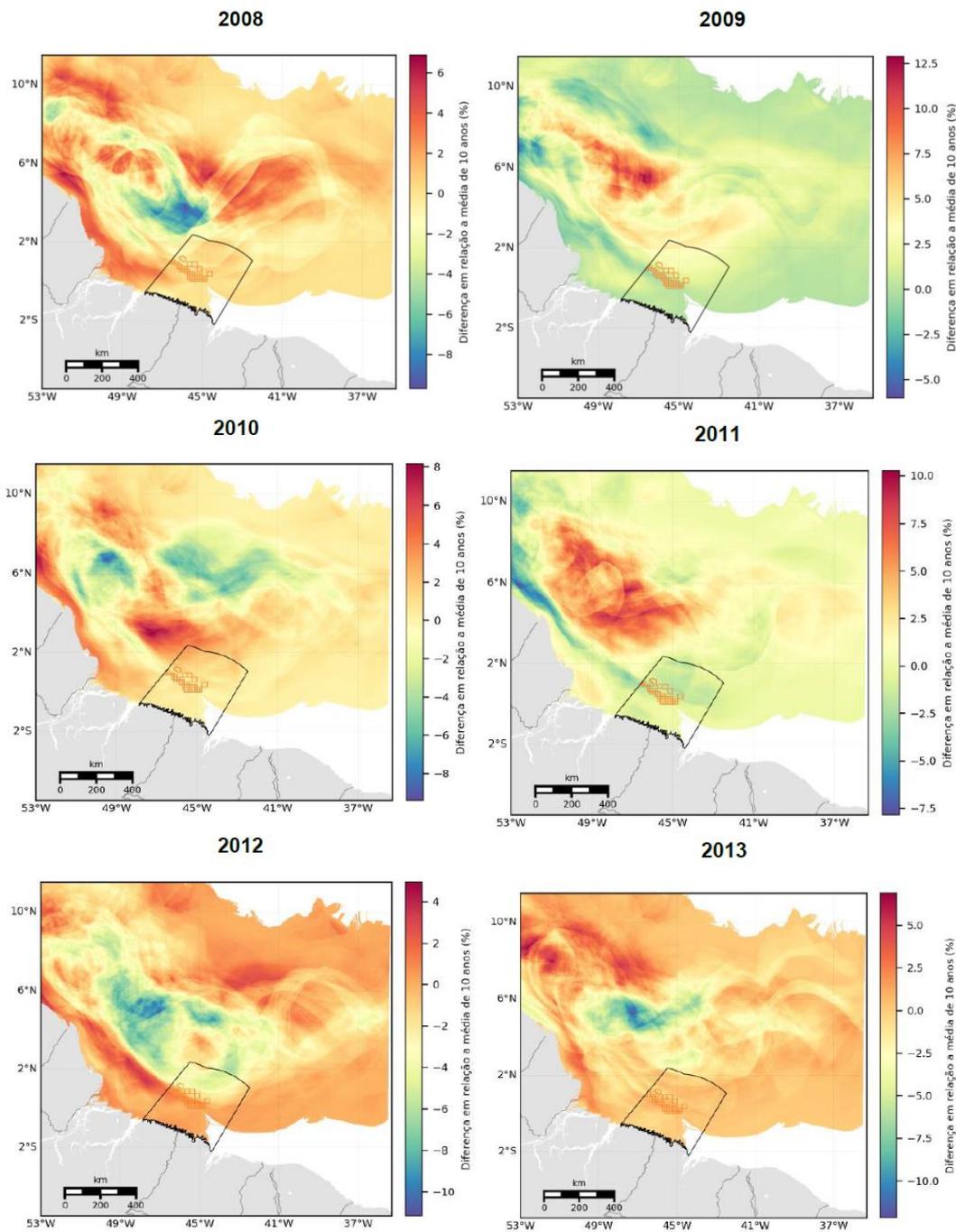


Figura 8-89: Desvio dos mapas anuais de probabilidade de presença de óleo de 2008 a 2013 em relação à média do período de 10 anos. Resultados anuais obtidos pela integração de todos os pontos de vazamento selecionados dentro dos blocos exploratórios da Bacia Pará-Maranhão.

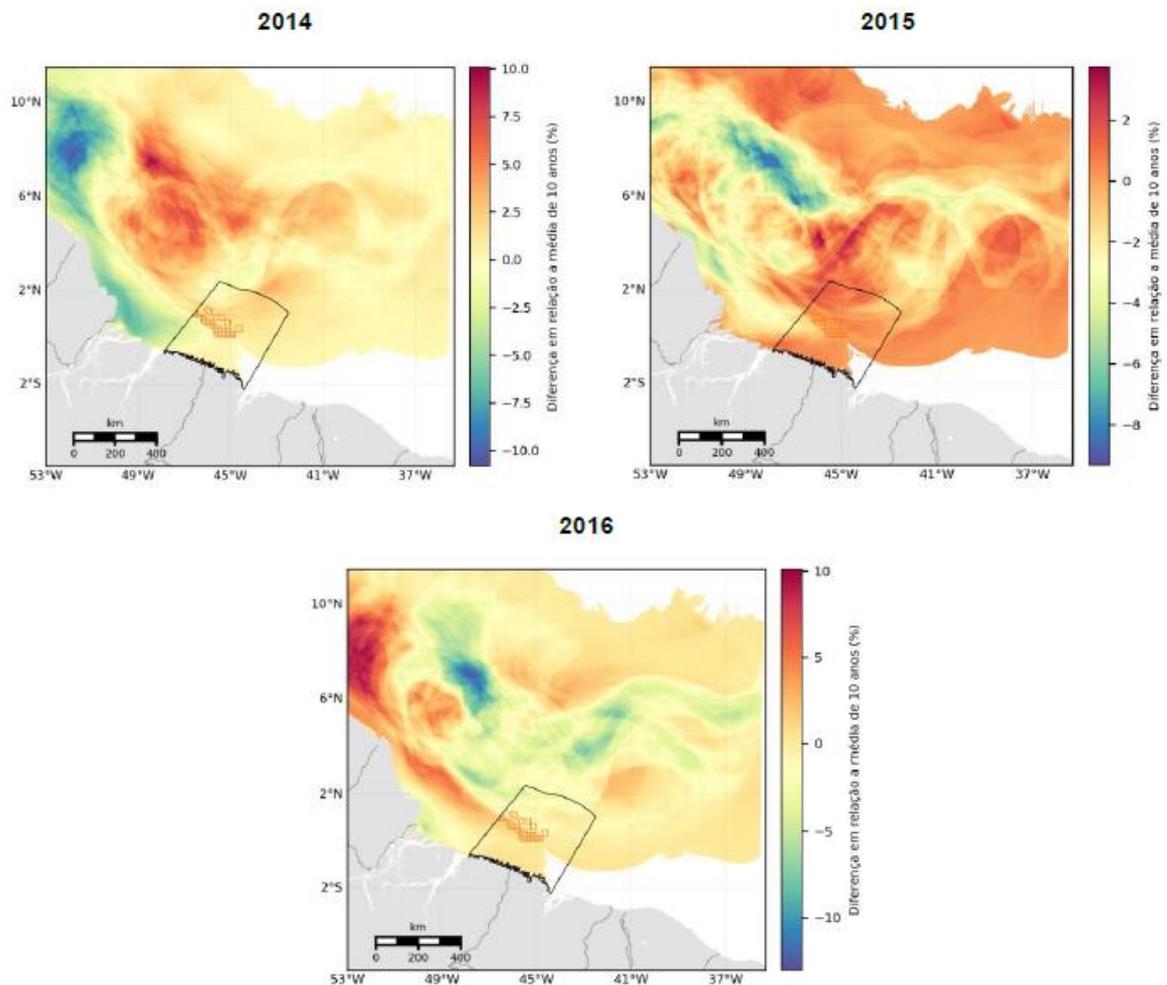


Figura 8-90: Desvio dos mapas anuais de probabilidade de presença de óleo de 2014 a 2016 em relação à média do período de 10 anos. Resultados anuais obtidos pela integração de todos os pontos de vazamento selecionados dentro dos blocos exploratórios da Bacia Pará-Maranhão.

Em alguns anos, como 2013, são observadas maiores probabilidades na porção noroeste da retroflexão, enquanto sua porção sudeste apresenta valores negativos, ou seja, inferiores à média. O caso contrário, com valores positivos a sudeste e negativos a noroeste pode ser visto no ano de 2014. Esses anos citados exemplificam a variabilidade da posição da retroflexão refletindo nos mapas probabilísticos. Além disso, nota-se que tanto áreas costeiras, quanto *offshore* estão sujeitas a essa variabilidade de probabilidades.

Os 10 anos de resultados permitiram avaliar a variabilidade interanual nos mapas de probabilidade na região analisada. Foram feitos mapas de desvio de cada ano em relação à média, bem como histogramas que permitiram quantificar a variabilidade em termos percentuais. O desvio padrão mais alto está associado à retroflexão CNB (~ 8% no máximo) e o desvio padrão próximo à costa é de cerca de 3-4%.

A maior diferença em relação à média foi observada no mapa de 2016, onde 99% dos pontos da grade apresentaram valores com desvios abaixo de 8,6% da probabilidade de presença de óleo. Os desvios anuais da média de 10 anos exemplificam como a retroflexão desempenha um papel importante na variabilidade dinâmica regional da região. Além disso, observou-se que as diferenças podem ocorrer tanto em regiões *offshore* quanto próximas à costa.

8.4. Referências

- ALLEN, A., DALE, D. 1996. Computerized Mission Planners: Useful tools for the planning and implementation of oil spill response operations. Proceedings of the Prevention is the Key: A Symposium on Oil Spill Prevention and Readiness, Valdez, AK, pp 24.
- ALMASI, G.S. & GOTLIEB, A. 1989. Highly Parallel Computing. Benjamin-Cummings, Redwood City, CA.
- ALMEDA, R., HYATT, C., BUSKEY, E.J. 2014. Toxicity of dispersant Corexit 9500A and crude oil to marine microzooplankton. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Elsevier, 106, 76–85.
- ANP, 2020. Estudo Ambiental de Área Sedimentar (EAAS) da Bacia de Sergipe-Alagoas/Jacuípe.
- ASCE Task Committee on Modeling Oil Spills of the Water Resources Engineering Division. 1996. State-of-the-Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122 (11), Nov., 594 – 609.
- ASTM F-1870 - Standard Guide for Estimating Oil Spill Recovery System Effectiveness: F 1780-97, pp. 1-6, 2002 (Reapproved).
- BACA B., WARD, G.A., LANE, C.H, SCHULER, P.A. 2005. NET ENVIRONMENTAL BENEFIT ANALYSIS (NEBA) OF DISPERSED OIL ON NEARSHORE TROPICAL ECOSYSTEMS DERIVED FROM THE 20 YEAR “TROPICS” FIELD STUDY. *International Oil Spill Conference Proceedings: May 2005*, 2005 (1), 453-456.
- BERRY, A., DABROWSKI, T., LYONS, K. 2012. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 64, pp. 2489-2501.
- BUCHANAN, I., HURFORD, N. 1988. Methods for Predicting the Physical Changes in Oil Spill at Sea. *Oil & Chemical Pollution*, 4, pp. 311-328.
- CARVALHO, G.V.; CABRAL, M.M.; DE OLIVEIRA, A.L.S.C.; GARÇÃO, H.F., AND PELLEGRINI, J.A.C., 2020. Methodology to evaluate the coastal susceptibility to oil spills originated in large marine areas – Costa Norte Project. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020. Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 95, pp. 1344–1348. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208. doi.org/10.2112/SI95-258.1
- CEKIRGE, H. M., PALMER, S. L. 2001. Mathematical modeling of oil spilled into marine waters. In: *Oil Spill Modelling and Processes*. WITpress, Londres.
- CERC. 1984. Shore Protection Manual Volume I. Coastal Engineering Research Centre, Dept. of the Army, Waterways Experiment Station, USACE, Vicksburg, MS, USA.
- CHEN, H., LI, D., LI, X. 2007. Mathematical modeling of oil spill on the sea and application of the modeling in Daya Bay. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 19, 282-291.
- DELVIGNE, G.A.L., SWEENEY, C.E. 1988. Natural dispersion of oil. *Oil & Chemical Pollution*, 4, pp. 281-310
- DELVIGNE, G.A.L., HULSEN, L.J.M. 1994. Simplified laboratory measurements of oil dispersion coefficients – application in computations of natural oil dispersion. In: *Proceedings of the Seventeenth AMOP Technical Seminar*, Environment Canada, Ontario, pp. 173-187.

- ELEY, D.D., HEY, M.J., SYMONDS, J.D. 1988. Emulsions of Water in Asphaltene-Containing Oils 1. Droplet Size Distribution and Emulsification Rates. *Colloids and Surface*, 32, pp. 87-101.
- FAY, J.A. 1969. The Spread of oil slicks on a calm sea. *Oil on the Sea*, Plenum Press, New York, pp. 53-63.
- FAY, J.A. 1971. Physical processes in the spread of oil on a water surface. In: *Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spill*, American Petroleum Institute, Washington, DC, pp. 463-467.
- FISHER, H.B., LIST, E.J., KOH, R.C.Y., IMBERGER, J., BROOKS, N.H. 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press Inc., New York, 483 pp.
- FRAGOSO JR, C.R., FERREIRA, T.F., MARQUES, D.M. 2009. *Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos*. Oficina de textos, São Paulo, 304 pp.
- FRENCH-MCCAY, D.P. 2004. Oil spill impact modelling: development and validation. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23, pp. 2441-2456.
- GALT, J.A. 2009. *Oil Weathering – Technical Documentation and Recommended Use Strategies*. Genwest Systems, Inc.
- GENWEST SYSTEMS, INC. 2011. *Response Options Calculator (ROC) - Technical Documentation*, Washington, USA.
- GUO, W. J., WANG, Y.X. 2009. A numerical oil spill model based on a hybrid method. *Marine Pollution Bulletin*, 58, 726-734.
- GUO, W. J., WANG, Y.X., XIE, M.X., CUI, Y.J. 2009. Modeling oil spill trajectory in coastal waters based on fractional Brownian motion. *Marine Pollution Bulletin*, 58, 1339-1346.
- HELFRICH, M.Z., KROOPS, W., MURK, A.J. 2015. The NET effect of dispersants – a critical review of testing and modelling of surface oil dispersion. In: *Marine Pollution Bulletin*, 100, 102-111.
- IPIECA, 2014. At-sea monitoring of surface dispersant effectiveness. IPIECA_IOPG Final Report. Oil Spill Response Joint Industry Project.
- IPIECA, 2015a. Dispersants: surface application. Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel. IOPG Report 532.
- IPIECA, 2015b. Dispersants: subsea application. Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel. IOPG Report 533.
- JANEIRO, J., FERNANDES, E., MARTINS, F., FERNANDES, R. 2008. Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 56, 650-665.
- Jl, Z-G, JOHNSON, W.R, DUFORE, C.M., 2017. Oil-Spill Risk Analysis Gulf of Mexico Outer Continental Shelf (OCS) Lease Sales, Eastern Planning Area, Central Planning Area, and Western Planning Area, 2017–2022, and Gulf-wide OCS Program, 2017–2086.
- JONES, R.K. 1997. A Simplified Pseudo-Component Oil Evaporation Model. *Proceedings of the 20th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar*, Canada, pp 43-61.

- LEHR, W.J. 2001. Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior. In: BREBBIA, C.A. (Ed.). *Oil Spill Modelling and Processes*. Southampton: WIT Pres, pp 51-90.
- LEHR, W.J., JONES, R., EVANS, M., SIMECEK-BEATTY, D., OVERSTREET, R. 2002. Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environmental Modelling & Software* 17, pp 191-199.
- LEHR, W.J., SIMECEK-BEATTY, D. 2000. The relation of Langmuir circulation processes to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms. *Spill Science & Technology Bulletin*, 6, pp. 247-253.
- LESSARD, R.R., DEMARCO, G. 2000. The Significance of Oil Spill Dispersants. In: *Spill Science & Technology Bulletin*, 6 (1), 59-68.
- LIUNGMAN, O., MATTSSON, J. 2011. Scientific documentation of SeatrackWeb; physical processes, algorithms and references. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 32.
- LYNCH, D.R., GREENBERG, D.A., BILGILI, A., MCGILLICUDDY JR., D.J., MANNING, J.P., ARETXABALETA, A.L. 2015. Oil – Chemically Active Particles. In: *Particles in the Coastal Ocean*, Cambridge University Press, pp. 337- 388.
- MACKAY, D., BUIST, I., MASCARENHAS, R., PATTERSON, S. 1980. *Oil Spill Processes and Models*. Environment Canada, Ottawa, Canada.
- MACKAY, D., ZAGORSKI, W. 1981. Studies of the Formation of Water-In-Oil-Emulsions. Proceedings of the Fourth AMOP Technical Seminar, Environment Canada, Ottawa, pp. 75-86.
- MACKAY, D., SHIU, W.Y., HOSSAIN, K., STIVER, W., MCCURDY, D., PATTERSON, S., TEBEAU, P.A. 1983. Development and Calibration of an Oil Spill Behavior Model. Report No. CG-D-27-83, United States Coast Guard Office of Research and Development, Groton, Conn., USA.
- MAS, I., KITTS, C. 2014. Cooperative Tasks Using Teams of Mobile Robots. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 247, 83-99.
- MAZDA, Y. et al. Drag force due to vegetation in mangrove swamps. *Mangroves and Salt Marshes*, [s.l.], v. 1, no 3, p. 193–199, 1997.
- MAZDA, Yoshihiro; KAMIYAMA, K. Tidal deformation and inundation characteristics within mangrove swamps. *Mangrove Science*, [s.l.], v. 45, no March, p. 21–29, 2007.
- MAZDA, Yoshihiro; KANAZAWA, N.; WOLANSKI, E. Tidal asymmetry in mangrove creeks. *Hydrobiologia*, [s.l.], v. 295, no 1–3, p. 51–58, 1995.
- MAZDA, Yoshihiro; KOBASHI, D.; OKADA, S. Tidal-scale hydrodynamics within mangrove swamps. *Wetlands Ecology and Management*, [s.l.], v. 13, no 6, p. 647–655, 2005.
- MAZDA, Yoshihiro; WOLANSKI, E. Hydrodynamics and Modeling of Water Flow in Mangrove Areas. *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach*. First edit ed. [s.l.]: Elsevier, p. 231–262, 2009.
- MOONEY, M. 1951. The Viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles. *Journal of Colloidal Science*, 10, pp. 162-170.

- MUTTIN, F. 2015. Structural Analysis of Oil-Spill Booms. In: Mathematical Modelling and Numerical Simulation of Oil Pollution Problems. Ehrhardt, M. (Ed.), 141-166.
- PAYNE, J.R., KIRSTEIN, B.E., CLAYTON, J.R., CLARY, C., REDDING, R., MCNABB, D., FARMER, G. 1987. Integration of Suspended Particulate Matter and Oil Transportation Study. Final Report, Report No. MMS 87-0083, U.S. Minerals Management Service, Anchorage, Alaska, USA.
- PEREIRA, M. M. R. 2004. Estudo do Transporte Local de Poluentes em Iperó por Meio de um Modelo Lagrangiano de Partículas. Tese (Doutorado em Ciências – Área: Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- REED, M., TURNER, C., ODULO, A. 1994. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1 (2), 143-15.
- REED, M., JOHANSEN, É., BRANDVIK, P. J., DALING, P., LEWIS, A., FIOCCO, R., MACKAY, D., PRENTKI, R. 1999. Oil Spill Modeling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. *Spill Science & Technology Bulletin*, 5, 3-16.
- SAYOL, J.M., ORFILA, A., SIMARRO, G., CONTI, D., RENAULT, L., MOLCARD, A.A. 2014. Lagrangian Model for Tracking Surface Spills and SAR Operations in the Ocean. *Environmental Modelling & Software*, 52, 74-82.
- SIQUEIRA, L.F.G. 2015. Sobre a Eficiência de Operações de Recolhimento de Derramamentos de Óleo com e sem Técnica de Decantação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Rio de Janeiro.
- SMAGORINSKY, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91, pp. 99-164.
- SPAULDING, M.L. 2017. State of the art review and future directions in oil spill modeling. *Marine Pollution Bulletin*, 115, 7-19.
- STERLING, M., BONNER, J., ERNEST, A. 2004. Chemical dispersant effectiveness testing: influence of droplet coalescence. In: *Marine Pollution Bulletin*, 48, 969–977.
- STIVER, W., MACKAY, D. 1984. Evaporation rate of spills of hydrocarbon and petroleum mixtures. *Environ. Sci. Technol.* 18 (11) 834-840.
- WANG, S.D., SHEN, Y.M., ZHENG, Y.H. 2005. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. *Ocean Engineering*, 32, 1556-1571.
- WANG, S.D., SHEN, Y.M., GUO, Y., TANG, J. 2008. Three-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. *Ocean Engineering*, 35, 503-510.
- WOLANSKI, E.; MAZDA, Y.; RIDD, P. Mangrove hydrodynamics. [s.l.], v. 41, p. 43–62, 2011.