



Resultados [rev.00]

## Modelagem de Cascalho e Fluido Aderido

Bacia Pará-Maranhão

---

**PRO\_QGEP\_1405**

Preparado para: Queiroz Galvão Exploração e Produção

Preparado por: Ana Boechat

Marcelo Cabral

22 de junho de 2015

**Prooceano**

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.0040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax + 55 21 2532.5666

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

## Controle de revisão

---

### Revisão nº 01

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 02

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 03

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 04

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 05

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

## Sumário

---

<b>1. Introdução .....</b>	<b>11</b>
1.1. Descrição da Atividade .....	11
<b>2. Metodologia.....</b>	<b>14</b>
2.1. Modelo de Dispersão .....	14
2.2. Estratégias de Modelagem .....	21
2.3. Forçantes .....	37
<b>3. Resultados .....</b>	<b>46</b>
3.1. Resultados Probabilísticos.....	48
3.2. Resultados Determinísticos .....	57
<b>4. Conclusão .....</b>	<b>81</b>
<b>5. Bibliografia.....</b>	<b>83</b>

## Índice das imagens

Figura 1: Localização do Poço Gamela, situado no Bloco PAMA-M-337 (em vermelho). ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). .....	12
Figura 2: Representação esquemática das três fases descritas pelo efluente. Modificado de Brandsma & Smith (1999). .....	14
Figura 3: Fluxograma representativo do algoritmo do modelo DREAM. Adaptado de Reed & Hetland (2002). .....	16
Figura 4: Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença do constituinte a partir de $n$ casos determinísticos. ....	31
Figura 5: Número de simulações realizadas por período do ano. Cada barra colorida reflete uma simulação distinta com duração de 15 dias (tempo total de simulação). Em laranja, são apresentadas as 32 simulações determinísticas realizadas para o verão e, em azul, as 35 simulações determinísticas realizadas para o inverno. ....	33
Figura 6: Domínios das grades utilizadas na modelagem para a pilha de deposição (em verde); e para a pluma de sólidos em suspensão (em azul). ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). .....	36
Figura 7: Localização do ponto de grade do ROMS mais próximo ao ponto de descarte. ....	37
Figura 8: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 500, 1.500 e 2.900 metros, para o período representativo do cenário de verão (dezembro a maio), do ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela. ....	39
Figura 9: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 500, 1.500 e 2.900 metros, para o período representativo do cenário de inverno (junho a novembro), do ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela. ....	40
Figura 10: Perfis de salinidade e temperatura para o ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela. ....	42
Figura 11: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo ao Poço Gamela. ....	44
Figura 12: Histogramas direcionais para os ventos de cada cenário sazonal escolhido. ....	44
Figura 13: Fluxograma de apresentação dos resultados. ....	47
Figura 14: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 0,01 mm, considerando todos os resultados determinísticos de verão. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	48
Figura 15: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 0,1 mm, considerando todos os resultados determinísticos de verão. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	49

Figura 16: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 1 mm, considerando todos os resultados determinísticos de verão. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	49
Figura 17: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 10 mm, considerando todos os resultados determinísticos de verão. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	50
Figura 18: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 0,01 mm, considerando todos os resultados determinísticos de inverno. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000)....	51
Figura 19: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 0,1 mm, considerando todos os resultados determinísticos de inverno. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000)....	51
Figura 20: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 1 mm, considerando todos os resultados determinísticos de inverno. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	52
Figura 21: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 10 mm, considerando todos os resultados determinísticos de inverno. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000)....	52
Figura 22: Mapa de espessura máxima acumulada no fundo oceânico, considerando todos os casos determinísticos de verão. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	54
Figura 23: Mapa de espessura máxima acumulada no fundo oceânico, considerando todos os casos determinísticos de inverno. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	55
Figura 24: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 500, 1.500 e 2.900 metros, para o período representativo do cenário determinístico de espessura máxima, do ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela.....	58
Figura 25: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 500, 1.500 e 2.900 metros, para o período representativo do cenário determinístico de distância máxima, do ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela.....	59
Figura 26: Pilha resultante da integração das seções sem <i>riser</i> , considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – espessura máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	60
Figura 27: Pilha resultante da integração das seções com <i>riser</i> , considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – espessura máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	61
Figura 28: Pilha resultante da integração de todas as seções, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – espessura máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000). ....	61
Figura 29: Pilha resultante da integração das seções sem <i>riser</i> , considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – distância máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	63
Figura 30: Pilha resultante da integração das seções com <i>riser</i> , considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – distância máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	63

Figura 31: Pilha resultante da integração de todas as seções, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – distância máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	64
Figura 32: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil de 2,4 km com orientação SE-NW (painel inferior). Caso determinístico – espessura máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	66
Figura 33: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil de 8,8 km com orientação NW-SE (painel inferior). Caso determinístico – espessura máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	67
Figura 34: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 1 dia do início do descarte. Caso determinístico – espessura máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	69
Figura 35: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 2 dias e 20 horas do início do descarte. Caso determinístico – espessura máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	70
Figura 36: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 4 dias e 20 horas do início do descarte. Caso determinístico – espessura máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	71
Figura 37: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil de 2,5 km com orientação SE-NW (painel inferior). Caso determinístico – distância máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	74
Figura 38: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil de 13,3 km com orientação NW- SE (painel inferior). Caso determinístico – distância máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	75
Figura 39: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 1 dia do início do descarte. Caso determinístico – distância máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	77
Figura 40: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 2 dias e 20 horas do início do descarte. Caso determinístico – distância máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	78
Figura 41: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 4 dias e 20 horas do início do descarte. Caso determinístico – distância máxima. ( <i>Datum</i> SIRGAS 2000).....	79

## Índice das tabelas

---

Tabela 1: Coordenada e profundidade aproximada do ponto utilizado para as simulações. (Datum SIRGAS 2000). .....	12
Tabela 2: Características principais do projeto de perfuração.....	13
Tabela 3: Densidades para o cascalho e fluido aderido e frações dos componentes sólidos e líquidos do fluido aderido.....	13
Tabela 4: Distribuição granulométrica para os descartes de cascalho e fluido de base água. ..	23
Tabela 5: Distribuição granulométrica para os descartes de cascalho e fluido de base sintética. .....	23
Tabela 6: Distribuição granulométrica para os descartes de fluido excedente.....	23
Tabela 7: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção I. .....	25
Tabela 8: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção II. .....	26
Tabela 9: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção III.....	26
Tabela 10: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção IV.....	26
Tabela 11: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção V.....	27
Tabela 12: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção I. ....	27
Tabela 13: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção II. ....	27
Tabela 14: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção III. ....	28
Tabela 15: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção IV.....	28
Tabela 16: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção V.....	28

---

Tabela 17: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido excedente da seção II.....	29
Tabela 18: Número de simulações determinísticas realizadas para compor cada um dos cenários probabilísticos escolhidos. ....	32
Tabela 19: Passo de tempo e <i>output</i> utilizados nas simulações, distintos para os resultados de deposição e suspensão do Poço Itarema.....	33
Tabela 20: Intensidades máximas de corrente obtidas para os cenários de verão e inverno. ...	41
Tabela 21: Temperatura do ar característica para cada cenário. ....	45
Tabela 22: Áreas obtidas para as classes de probabilidade de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, considerando os distintos limiares monitorados, para o cenário de verão. ....	50
Tabela 23: Áreas obtidas para as classes de probabilidade de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, considerando os distintos limiares monitorados, para o cenário de inverno. ....	53
Tabela 24: Distâncias máximas alcançadas para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm), para o cenário de verão.....	54
Tabela 25: Espessuras máximas obtidas a 100, 500 e 1.000 m de distância da fonte, para o cenário de verão. ....	54
Tabela 26: Distâncias máximas alcançadas para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm), para o cenário de inverno. ....	55
Tabela 27: Espessuras máximas obtidas a 100, 500 e 1.000 m de distância da fonte, para o cenário de inverno. ....	56
Tabela 28: Data inicial e final da simulação obtidas para os dois casos determinísticos selecionados. ....	58
Tabela 29: Intensidades máximas de corrente obtidas para os cenários determinísticos de espessura máxima e distância máxima. ....	60
Tabela 30: Espessura máxima, área e maior distância da fonte alcançada pelas pilhas de deposição, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – espessura máxima. ....	62
Tabela 31: Resumo da área encontrada para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm), considerando a integração de todos os descartes. Caso determinístico – espessura máxima. ....	62
Tabela 32: Espessura máxima, área e maior distância da fonte alcançada pelas pilhas de deposição, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – distância máxima. ....	64

---

---

Tabela 33: Resumo da área encontrada para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm), considerando a integração de todos os descartes. Caso determinístico – distância máxima.....	65
Tabela 34: Concentração máxima, distância máxima da fonte e tempo de permanência para as plumas de sólidos em suspensão. Caso determinístico – espessura máxima.....	71
Tabela 35: Distâncias máximas alcançadas para alguns limiares de concentração. Caso determinístico – espessura máxima.....	72
Tabela 36: Concentração máxima, distância máxima da fonte e tempo de permanência para as plumas de sólidos em suspensão. Caso determinístico – distância máxima.....	79
Tabela 37: Distâncias máximas alcançadas para alguns limiares de concentração. Caso determinístico – distância máxima.....	80

## Equipe técnica

---

**Nome: Ana Carolina Rochinha Boechat**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 4961307

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem Hidrodinâmica

---

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

---

**Nome: Marcelo Montenegro Cabral**

---

Registro no Conselho de Classe: 2010110225 - CREA/RJ

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 5621594

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem Hidrodinâmica

---

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

---

# 1. Introdução

Neste documento, é apresentado o estudo de modelagem numérica do comportamento físico do cascalho e fluido de perfuração a serem descartados durante as atividades de perfuração do Poço Gamela, situado no Bloco PAMA-M-337, Bacia Pará-Maranhão.

O trabalho é dividido em duas etapas: a primeira consiste na análise das características meteo-oceanográficas da região, ou seja, os parâmetros capazes de afetar o comportamento do material descartado, como corrente, temperatura do ar, vento, temperatura do mar e salinidade. Para este estudo, foram selecionados dois cenários sazonais distintos (verão e inverno).

A segunda etapa compreende a simulação da dispersão do material, que resulta na formação de pilhas de deposição no assoalho marinho. Essas simulações foram conduzidas em dois modos distintos: o probabilístico e o determinístico.

A escolha dos dados utilizados como forçantes no modelo de dispersão e do método adotado neste estudo procuram atender aos requisitos da Coordenação Geral de Petróleo e Gás (CGPEG/DILIC/IBAMA) para a modelagem de cascalho e fluido de perfuração.

## 1.1. Descrição da Atividade

Este estudo é referente ao projeto de perfuração do Poço Gamela, localizado no Bloco PAMA-M-337, na Bacia Pará-Maranhão. A localização desse ponto é apresentada na Figura 1 e na Tabela 1.

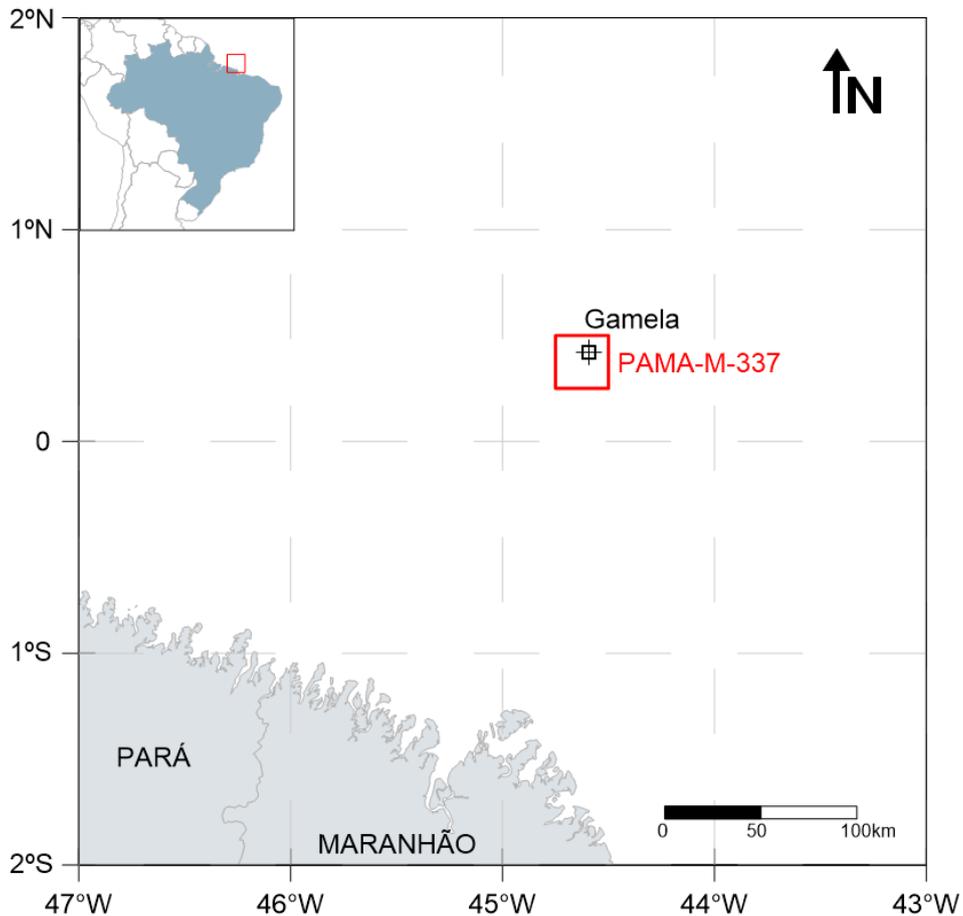


Figura 1: Localização do Poço Gamela, situado no Bloco PAMA-M-337 (em vermelho). (Datum SIRGAS 2000).

Tabela 1: Coordenada e profundidade aproximada do ponto utilizado para as simulações. (Datum SIRGAS 2000).

Identificação	Coordenadas	Profundidade (m)
Poço Gamela	00° 25' 11,837" N 44° 35' 30,535" W	2.965

O projeto de poço prevê a perfuração em cinco seções. Na primeira etapa da perfuração, que enquadra as duas primeiras seções, não será utilizado o riser, com o descarte ocorrendo do fundo e o fluido de perfuração sendo de base aquosa. Na segunda etapa, que abrange as seções III a V, o riser será instalado e o descarte ocorrerá da superfície e o fluido utilizado será de base sintética. É previsto também descarte de fluido excedente da seção II.

As informações a respeito do projeto de perfuração são apresentadas na Tabela 2. O maior volume de material gerado pela atividade será descartado na seção II, porém a maior vazão está relacionada à seção I.

Tabela 2: Características principais do projeto de perfuração.

<b>Características</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
Diâmetro com alargamento (pol)	51,48	34,32	23,61	17,71	12,86
Vol. cascalho descartado (m <sup>3</sup> )	112,62	453,47	164,99	85,67	48,18
Vol. fluido aderido (m <sup>3</sup> )	479,97	1.609,87	84,33	39,41	22,16
Tempo de descarte (h)	6,00	50,00	70,00	60,00	130,00
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	98,77	41,27	3,56	2,08	0,54
Vol. fluido excedente (m <sup>3</sup> )	-	613,77	-	-	-
Tempo de descarte (h)	-	4,50	-	-	-
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	-	136,39	-	-	-
Base do Fluido	Água	Água	Sintético	Sintético	Sintético
Profundidade de Descarte (m)	Fundo	Fundo	Superfície	Superfície	Superfície

Para as simulações de dispersão do material, além das informações sobre o projeto do poço, são também necessárias as densidades de cascalho e fluido aderido, e no caso dos fluidos especificamente, qual a fração de seus componentes líquidos e sólidos (Tabela 3).

Tabela 3: Densidades para o cascalho e fluido aderido e frações dos componentes sólidos e líquidos do fluido aderido.

<b>Cascalho</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2.500	2.170	2.170	2.300	2.330
<b>Fluido Aderido</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1.044,5	1.273,4	1.178,3	1.456,6	1.538,4
Fração dos sólidos no fluido	2,8%	2,8%	9,0%	18,0%	20,5%
Dens. dos sólidos no fluido (kg/m <sup>3</sup> )	2.590,0	4.167,9	3.790,0	3.992,0	4.014,0
Fração dos líquidos no fluido	97,2%	97,2%	91,0%	82,0%	79,5%
Dens. dos líquidos no fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1.000,0	1.190,0	920,0	900,0	900,0

## 2. Metodologia

A metodologia seguida neste estudo é apresentada em algumas etapas. Na primeira etapa, o **modelo numérico** de dispersão de cascalho e fluido aderido utilizado no estudo é descrito com base em suas características e equações governantes. A segunda etapa apresenta as **estratégias de modelagem** adotadas. E a terceira e última etapa consiste na análise dos **parâmetros meteo-oceanográficos** da região, mais especificamente aqueles capazes de afetar o comportamento do efluente lançado.

### 2.1. Modelo de Dispersão

O processo dispersivo do efluente, neste caso cascalho + fluido de perfuração, possui três diferentes fases, apresentadas na Figura 2 e detalhadas abaixo.

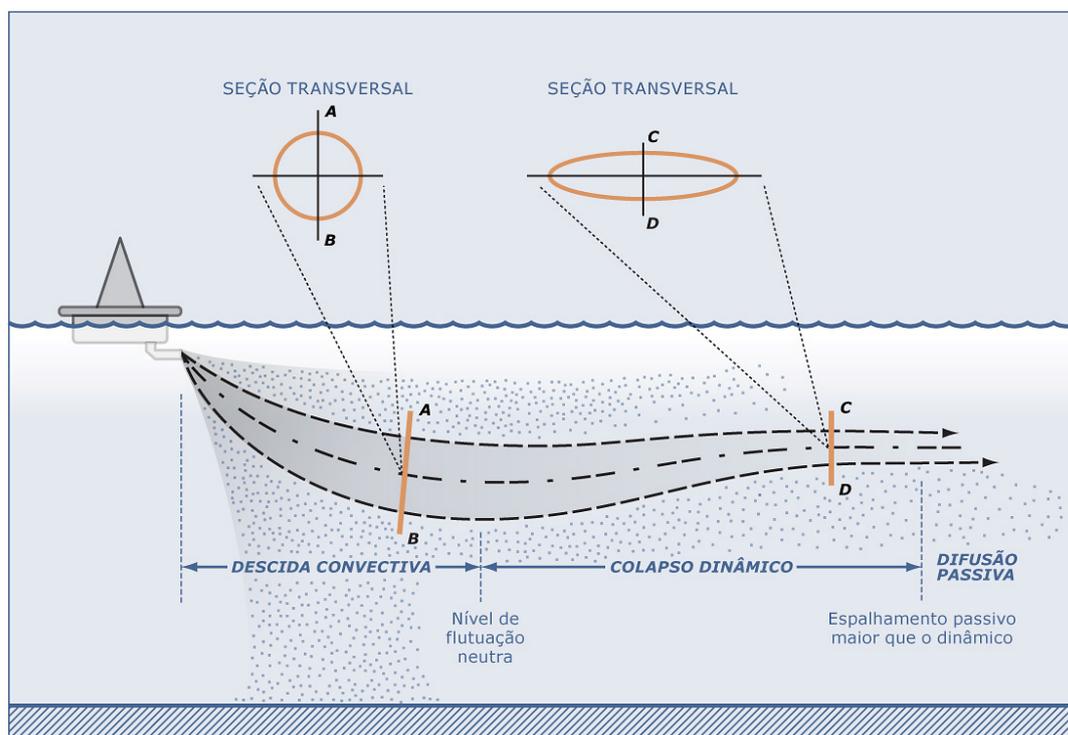


Figura 2: Representação esquemática das três fases descritas pelo efluente. Modificado de Brandsma & Smith (1999).

A primeira fase, denominada **fase de jato**, corresponde à diluição inicial do efluente, onde as forças de empuxo, quantidade de movimento do efluente e os efeitos dinâmicos das correntes locais, resultam em uma rápida mistura e diluição do efluente no corpo d'água receptor. Esta fase ocorre enquanto o efluente possui movimento próprio, dado pela diferença de densidade

com o meio ou pela velocidade de saída da fonte. A fase termina quando o efluente descartado encontra uma superfície horizontal (fundo ou superfície do mar) ou se estabiliza em um nível de flutuação neutra. Finda esta primeira etapa, inicia-se a fase de **colapso dinâmico**, onde o efluente se espalhará na profundidade em que se estabilizou devido, ainda, a sua diferença de densidade em relação ao meio. Esta diferença tende a diminuir com o tempo e, em dado momento, sua contribuição para o espalhamento do efluente será inferior àquela dada pela turbulência do ambiente. Tanto a fase de jato quanto a de colapso dinâmico descrevem a **fase dinâmica, ou campo próximo**.

Ao final da fase de colapso dinâmico, tem início a terceira e última fase, denominada de **dispersão passiva, ou campo afastado**, em que o efluente, a não ser pela velocidade vertical associada a cada constituinte, não possui movimento próprio e segue apenas a dinâmica local. Partículas minerais, como cascalho e materiais pesados, podem se desprender da pluma dependendo da velocidade de deposição e da taxa de entranhamento da água na pluma.

### 2.1.1 Descrição do Modelo

O modelo computacional escolhido para esse estudo foi o **DREAM** (*Dose-Related Exposure Assessment Model*), desenvolvido pela SINTEF para estimar o comportamento e o destino de diversos tipos de efluente (incluindo cascalhos e fluidos de perfuração) no ambiente marinho, tanto na coluna d'água quanto no leito oceânico.

Os processos físico-químicos que regem o modelo são calculados separadamente para cada componente do efluente. Os principais componentes do sistema DREAM são um modelo de campo próximo (Plume3D) e um modelo de trajetória em três dimensões (REED & HETLAND, 2002; RYE *et al.*, 2006; JOHANSEN & DURGUT, 2006).

Um fluxograma representativo do algoritmo do modelo DREAM é apresentado na Figura 3.

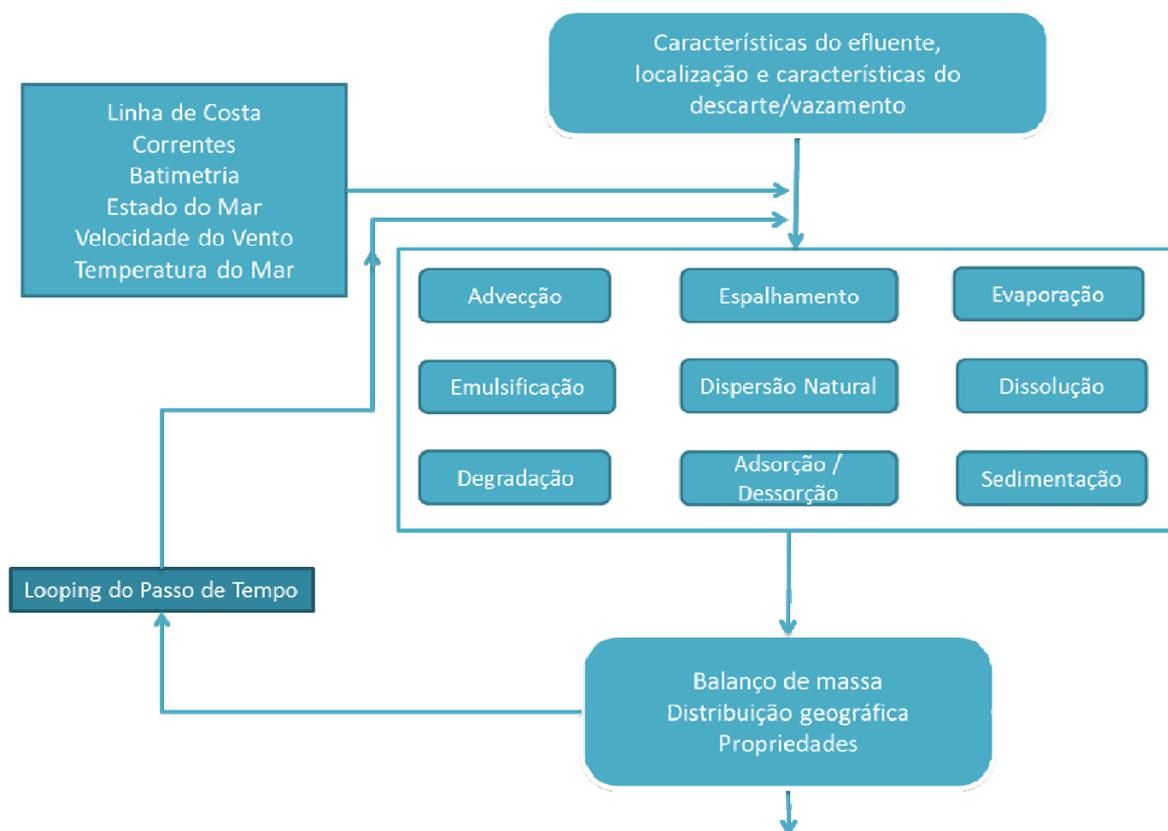


Figura 3: Fluxograma representativo do algoritmo do modelo DREAM. Adaptado de Reed & Hetland (2002).

### 2.1.2 Equações Governantes

A formulação numérica do modelo de campo próximo (Plume3D) é baseada nas formulações de Koh & Chang (1973). Em relação à dispersão passiva, emprega-se um método lagrangiano descrito em Reed & Hetland (2002).

O movimento de uma pluma é regido por equações de conservação de massa e volume, *momentum*, fluatibilidade e partículas sólidas, sal e entalpia. O termo pluma refere-se ao material descartado na coluna d'água, sob ação dos regimes de jato, colapso dinâmico, ou dispersão passiva.

Nas **fases dinâmicas (jato e colapso dinâmico)**, as variações dessas quantidades ocorrem ao longo do eixo no qual a pluma se direciona (centro de massa da pluma). Sendo, portanto, as taxas de mudanças descritas como derivadas em relação a esse eixo.

As equações de conservação que governam o movimento são:

**Massa:**

$$\frac{d}{ds}(\rho Q) = E\rho_a - \sum_i S_i \rho_i \quad (1)$$

onde  $Q$  é a vazão,  $\rho$  a densidade do efluente,  $\rho_a$  é a densidade do ambiente,  $ds$  é a variação do comprimento do eixo,  $E$  o entranhamento,  $\rho_i$  é a densidade do  $i$ -ésimo constituinte ao longo do eixo do jato e  $S_i$  a taxa de variação de volume deste elemento.

**Momentum (Quantidade de Movimento):**

A taxa de variação da quantidade de movimento ao longo do eixo do jato é representada pelo fluxo de fluabilidade mais o entranhamento de quantidade de movimento do ambiente, menos o somatório da taxa de quantidade de movimento de cada constituinte que passa pelo jato, mais a força de arrasto:

$$\frac{d}{ds}(\rho Q U) = \pi b^2 g(\rho - \rho_a) J + E\rho_a U_a - \sum_i (S_i \rho_i U) + F_D \quad (2)$$

Sendo  $g$  a aceleração da gravidade,  $J$  é o vetor unitário na direção vertical,  $U_a$  é a velocidade das correntes ambientais,  $F_D$  é a força de arrasto e  $b$  é o raio do jato.

**Flutuabilidade:**

Representada pela taxa de entranhamento do fluido ambiente devido ao empuxo menos o somatório das taxas de saída de constituintes do jato:

$$\frac{d}{ds}(Q(\rho_a(0) - \rho)) = E(\rho_a(0) - \rho_a) - \sum_i S_i(\rho_a(0) - \rho_i) \quad (3)$$

**Partículas sólidas:**

$$\frac{dP_i}{ds} = -S_i \quad (4)$$

**Temperatura:**

$$\frac{d}{ds}(Q(T_d - T_a)) = E(T_d - T_a) \quad (5)$$

$T_d$  e  $T_a$  sendo a temperatura do efluente e do ambiente, respectivamente.

**Salinidade:**

$$\frac{d}{ds}(Q(S_d - S_a)) = E(S_d - S_a) \quad (6)$$

$S_d$  e  $S_a$  sendo a salinidade do efluente e do ambiente, respectivamente.

**Fluxo de volume:**

$$Q = \pi b^2 |\vec{U}| \quad (7)$$

$b$  sendo o raio da seção transversal da pluma e  $U$  a velocidade da pluma.

Como já citado, uma vez terminada a fase dinâmica da pluma tem início a fase de dispersão passiva. O esquema de dispersão utilizado nesta etapa é um modelo lagrangiano, descrito em Reed & Hetland (2002). Segundo os autores, o modelo DREAM é baseado na equação geral de transporte:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{V} \times \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla} \times D_k \vec{\nabla} C_i + \sum_{j=1}^n r_j C_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n r_{ji} C_i \quad (8)$$

onde  $C_i$  é a concentração do  $i^o$  componente químico liberado;  $t$  é o tempo;  $\vec{V}$  é o vetor de transporte advectivo;  $\vec{\nabla}$  é o operador gradiente; e  $D_k$  é o coeficiente de dispersão turbulenta em  $k =$  direções x, y e z. Os termos  $r_j$  representam as variações dos processos físico-químicos.

Os termos referentes à degradação,  $r_{ij}$ , controlam a degradação de subprodutos, como a transferência de massa de um componente para outro. Desta forma, as mudanças nas propriedades toxicológicas permanecem retidas no modelo.

Concentrações dos componentes do fluido na coluna d'água são calculadas a partir da distribuição de pseudopartículas Lagrangianas no tempo e espaço. Cada partícula matemática

representa, conceitualmente, uma nuvem Gaussiana de componentes dissolvidos, gotículas, ou partículas em decantação. Os campos de concentração são constituídos a partir da superposição de todas essas nuvens. Cada nuvem consiste de um elipsoide com uma partícula em seu centro, e semieixos definidos como uma função de tempo da partícula. A distribuição teórica da massa dentro do elipsoide é Gaussiana, com seus desvios padrões nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  (CSANADY, 1973 *apud* REED & HETLAND, 2002):

$$\sigma_i = \sqrt{2k_i t} \quad (9)$$

$$C = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-z_0)^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (10)$$

onde  $x$ ,  $y$ ,  $z$  são as coordenadas do ponto de interesse;  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  são as coordenadas do centro de massa da nuvem;  $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$ ,  $\sigma_z^2$  são as variâncias e  $m$  a massa.

Cada um desses elipsoides geralmente contribui em massa para muitas células no campo de concentração; e elipsoides vizinhos geralmente se sobrepõem espacialmente. Então, uma determinada célula do campo de concentração contém uma concentração resultante da presença de múltiplas nuvens de partículas próximas. Esse esquema remove grande parte da dependência do campo de concentração calculado sobre o número de partículas e a resolução da grade.

Os processos físico-químicos que regem o comportamento do efluente são:

### Advecção e Dispersão

A advecção é calculada a partir da sobreposição de uma velocidade média local a uma componente turbulenta escolhida aleatoriamente. Geralmente, essa velocidade média local é a soma das componentes climatológicas, de maré e geradas pelos ventos e ondas (Stokes). Essas componentes especificadas são então interpoladas e somadas à componente turbulenta. A partir desse somatório, é calculada a advecção na coluna d'água. A componente turbulenta ( $w'$ ) é expressa como:

$$w' = \sqrt{6k / \Delta t} \quad (11)$$

onde  $k$  é o coeficiente de dispersão turbulenta estimado para as direções horizontais e verticais.

O coeficiente de dispersão horizontal pode ser aproximado a partir de dados obtidos em estudos de dispersão de corantes, como os de Okubo (1971, 1974 *apud* REED & HETLAND, 2002) e revisados posteriormente por Bowden (1983 *apud* REED & HETLAND, 2002):

$$K_x = 0,0027t^{1,34} \quad (12)$$

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

O coeficiente de difusão turbulenta vertical acima da pycnoclina é relacionado às condições de onda, segundo Ichiye (1967 *apud* REED & HETLAND, 2002):

$$K_z = 0,0028 \frac{H^2}{T} \exp(-2kz) \quad (13)$$

sendo  $H$  a altura da onda,  $T$  o período de onda e  $k$  o número da onda.

Abaixo da profundidade da pycnoclina,  $K_z$  é assumido como uma constante de valor  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  (KULLENBERG, 1982 *apud* REED & HETLAND, 2002). Na ausência da pycnoclina, a equação de Ichiye é aplicada da superfície ao fundo.

O deslocamento vertical das partículas é calculado a partir da sobreposição de uma velocidade turbulenta aleatória a uma velocidade ascendente (ou descendente). As velocidades verticais diferenciais são calculadas usando a média harmônica de dois extremos, uma vez que o coeficiente de arrasto é uma função do número de Reynolds (JOHANSEN, 2000 *apud* REED & HETLAND, 2002):

$$w_{rise} = 1/(w_1^{-1} + w_2^{-1}), \text{ solução combinada} \quad (14)$$

$$w_1 = d^2 g' / 18\nu, \text{ (para número de Reynolds} < 1000), \text{ e} \quad (15)$$

$$w_2 = \sqrt{3d / |g'|}, \text{ (para número de Reynolds} > 1000) \quad (16)$$

Onde:

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

### Dissolução

A dissolução é dependente da fração molar de cada componente presente no efluente. A concentração ambiental também é um fator importante, principalmente próximo ao local de descarte/vazamento. A equação que governa a dissolução do componente  $i$  é:

$$dm_i / dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad (17)$$

onde,  $K_d$  é o coeficiente de transferência de massa por dissolução, em m/s;  $A$  a área superficial do efluente, em m<sup>2</sup>;  $F_i$  a fração molar do componente  $i$  remanescente no efluente;  $S_i$  a solubilidade do componente  $i$ , em g/m<sup>3</sup>, ppm; e  $C_i$  a concentração ambiente do componente  $i$ , em g/m<sup>3</sup>.

### Adsorção

A adsorção desempenha um papel importante no transporte e destino dos poluentes no ambiente aquático. Ela determina a extensão do particionamento de um poluente entre a fase de particulado em suspensão e a fase dissolvida, modulando, desta forma, os efeitos tóxicos e a taxa de remoção da coluna d'água para os sedimentos.

## 2.2. Estratégias de Modelagem

No modelo DREAM são necessários os seguintes parâmetros para a caracterização do descarte:

- » Duração do descarte;
- » Extensão da seção;
- » Vazão;
- » Diâmetro da fonte;
- » Profundidade de descarte;
- » Angulação da fonte;

- » Inclinação vertical da fonte;
- » Densidade e massa do cascalho;
- » Densidade e massa dos componentes sólidos e líquidos do fluido aderido;
- » Massa total do fluido aderido.

### 2.2.1 Distribuição Granulométrica dos Sólidos

A distribuição granulométrica dos sólidos é intrínseca ao local, sendo dependente das condições da perfuração, características geológicas e da formulação dos fluidos utilizados (BRANDSMA & SMITH, 1999). Como não ocorreu a perfuração do poço em questão, dados granulométricos específicos desta atividade não estão disponíveis. Por isso, recorreu-se a distribuições granulométricas amplamente utilizadas pela comunidade científica.

Na ausência de dados específicos para o local – que só estarão disponíveis após a perfuração –, a melhor aproximação que pode ser feita para efeito de prognóstico de impacto deve ser obtida através do uso de uma distribuição granulométrica genérica, como as sugeridas por Brandsma & Smith (1999). Segundo os autores, essas distribuições foram obtidas a partir de experimentos e publicações no meio científico (e.g. DAMES & MOORE, 1978; O'REILLY *et al.*, 1989; BRANDSMA, 1993), sendo aconselhável sua utilização. Essas distribuições são amplamente utilizadas pela comunidade científica, tendo sido empregada também no MAPEM (Monitoramento Ambiental em Atividades de Perfuração Exploratória Marítima), projeto desenvolvido por iniciativa dos Centros de Pesquisa das Universidades Federais do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, em parceria com a indústria brasileira de óleo e gás, representada pelo IBP (TOLDO & AYUP- ZOUAIN, 2004).

Dependendo da base do fluido, aquosa ou sintética, há mudança também na sua distribuição granulométrica. Os componentes sólidos presentes nas bases aquosas são mais finos quando comparados aos componentes sólidos de bases sintéticas. A seguir, são especificadas as distribuições granulométricas utilizadas no estudo para o cascalho e sólidos do fluido aderido, Tabela 4 e Tabela 5, e para o fluido excedente, Tabela 6.

Tabela 4: Distribuição granulométrica para os descartes de cascalho e fluido de base água.

Classe	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Fração (%)
1	1.067 – 3.603	24%
2	635 – 1.067	19%
3	232 – 635	20%
4	117 – 232	12%
5	45 – 117	3%
6	14 – 45	6%
7	4 – 14	8%
8	1 – 4	8%

Tabela 5: Distribuição granulométrica para os descartes de cascalho e fluido de base sintética.

Classe	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Fração (%)
1	23.561 – 33.942	16%
2	19.094 – 23.561	17%
3	15.098 – 19.094	17%
4	12.599 – 15.098	16%
5	10.309 – 12.599	13%
6	8.529 – 10.309	9%
7	6.923 – 8.529	6%
8	5.490 – 6.923	3%
9	4.229 – 5.490	2%
10	3.846 – 4.229	1%

Tabela 6: Distribuição granulométrica para os descartes de fluido excedente.

Classe	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Fração (%)
1	43 - 84	3%
2	22 - 43	12%
3	19 - 22	20%
4	17 - 19	17%
5	16 - 17	14%
6	13 - 16	12%
7	9 - 13	8%
8	6 - 9	7%
9	4 - 6	7%

## 2.2.2 Velocidade e Tempo de Queda dos Sólidos

No modelo DREAM, as velocidades de deposição das partículas são divididas em dois regimes: o regime de Stokes e o regime do arrasto constante (RYE *et al.*, 2008). As velocidades de

deposição dentro do regime de Stokes, para partículas de menor tamanho, são dadas pela seguinte equação:

$$W_1 = \frac{d^2 g'}{18\nu} \quad (18)$$

$$g' = g(\rho_{particula} - \rho_{água}) / \rho_{água} \quad (19)$$

onde  $W_1$  é a velocidade laminar de afundamento de Stokes para uma partícula;  $d$  é o diâmetro da partícula;  $g'$  é a gravidade reduzida, expressa pela equação (19);  $g$  é a gravidade padrão;  $\rho$  é a densidade da partícula ou da água do mar;  $\nu$  é a viscosidade cinemática ( $1,358 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , em uma água com  $10^\circ\text{C}$ ).

A segunda contribuição para a deposição das partículas é o regime de arrasto constante com fricção dominante, para partículas maiores. Uma expressão geral para essa velocidade de queda pode ser derivada a partir do balanço entre as forças de flutuação e de arrasto que atuam na partícula (HU & KINTNER, 1955 *apud* RYE *et al.*, 2008), calculada da seguinte forma:

$$W_2 = \sqrt{\frac{4dg'}{3C_D}} \quad (20)$$

O coeficiente de arrasto  $C_D$ , nesta equação, é uma função do Número de Reynolds ( $Re = W_2 d / \nu$ ). Dessa forma, dois regimes assintóticos são identificados, o regime de Stokes e o regime de arrasto constante.

» Regime de Stokes ( $Re < 1$ ):

$$W_1 = \frac{d^2 g'}{18\nu} \quad (21)$$

» Regime de arrasto constante ( $Re < 1000$ ):

$$W_2 = K\sqrt{4dg'} \quad (22)$$

onde  $K$  é uma constante empírica adimensional. Para valores intermediários do Número de Reynolds ( $1 < Re < 1000$ ), uma equação de interpolação para a velocidade de deposição total  $W$  da partícula pode ser utilizada, da seguinte forma:

$$W = \frac{I}{\left( \frac{I}{W_1} + \frac{I}{W_2} \right)} \quad (23)$$

A constante empírica  $K$  é escolhida de forma que a correspondência seja alcançada entre a velocidade de deposição dominada pela fricção. Essa equação considera as partículas como não esféricas e, portanto, com velocidades de deposição menor que as partículas esféricas.

Para fluidos de base água, assume-se que a maior parte dos produtos químicos existentes é dissolvida na coluna d'água. Para outros tipos de fluido (base óleo e sintética), a dissolução dos produtos químicos na coluna d'água ocorre mais lentamente.

Conhecendo a profundidade na qual o efluente será descartado e a velocidade de queda de cada partícula, é possível avaliar o tempo de chegada das partículas ao assoalho oceânico. Essa estimativa, em uma aproximação linear, pode ser realizada pela divisão da camada a ser percorrida pela velocidade de queda de cada classe de grão.

O cálculo da velocidade e tempo de deposição das partículas foi realizado para o cascalho (Tabela 7 a Tabela 11), para os sólidos do fluido aderido (Tabela 12 a Tabela 16) e para o fluido excedente (Tabela 17). As densidades aqui especificadas são referentes somente aos compostos sólidos, tendo sido especificadas na Tabela 3. Para as seções sem *riser*, o descarte foi considerado a 1 m acima do fundo.

Tabela 7: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção I.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	2.500,0	2,56E-01	1,09E-03	< 1
2	2.500,0	1,21E-01	2,29E-03	< 1
3	2.500,0	5,75E-02	4,84E-03	< 1
4	2.500,0	1,55E-02	1,79E-02	< 1
5	2.500,0	4,53E-03	6,13E-02	< 1
6	2.500,0	6,41E-04	4,34E-01	< 1
7	2.500,0	6,12E-05	4,54E+00	< 1
8	2.500,0	4,90E-06	5,66E+01	2,4

Tabela 8: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção II.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	2.170,0	2,23E-01	1,24E-03	< 1
2	2.170,0	1,03E-01	2,70E-03	< 1
3	2.170,0	4,76E-02	5,83E-03	< 1
4	2.170,0	1,23E-02	2,25E-02	< 1
5	2.170,0	3,52E-03	7,89E-02	< 1
6	2.170,0	4,97E-04	5,59E-01	< 1
7	2.170,0	4,75E-05	5,85E+00	< 1
8	2.170,0	3,81E-06	7,30E+01	3,0

Tabela 9: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção III.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	2.170,0	8,94E-01	9,21E-01	< 1
2	2.170,0	7,72E-01	1,07E+00	< 1
3	2.170,0	6,91E-01	1,19E+00	< 1
4	2.170,0	6,22E-01	1,32E+00	< 1
5	2.170,0	5,66E-01	1,46E+00	< 1
6	2.170,0	5,13E-01	1,60E+00	< 1
7	2.170,0	4,65E-01	1,77E+00	< 1
8	2.170,0	4,16E-01	1,98E+00	< 1
9	2.170,0	3,68E-01	2,24E+00	< 1
10	2.170,0	3,36E-01	2,45E+00	< 1

Tabela 10: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção IV.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	2.300,0	9,43E-01	8,73E-01	< 1
2	2.300,0	8,15E-01	1,01E+00	< 1
3	2.300,0	7,29E-01	1,13E+00	< 1
4	2.300,0	6,57E-01	1,25E+00	< 1
5	2.300,0	5,97E-01	1,38E+00	< 1
6	2.300,0	5,42E-01	1,52E+00	< 1
7	2.300,0	4,90E-01	1,68E+00	< 1
8	2.300,0	4,39E-01	1,87E+00	< 1
9	2.300,0	3,89E-01	2,12E+00	< 1
10	2.300,0	3,55E-01	2,32E+00	< 1

Tabela 11: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de cascalho da seção V.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	2.330,0	9,54E-01	8,63E-01	< 1
2	2.330,0	8,24E-01	9,99E-01	< 1
3	2.330,0	7,38E-01	1,12E+00	< 1
4	2.330,0	6,64E-01	1,24E+00	< 1
5	2.330,0	6,04E-01	1,36E+00	< 1
6	2.330,0	5,48E-01	1,50E+00	< 1
7	2.330,0	4,96E-01	1,66E+00	< 1
8	2.330,0	4,45E-01	1,85E+00	< 1
9	2.330,0	3,93E-01	2,09E+00	< 1
10	2.330,0	3,59E-01	2,29E+00	< 1

Tabela 12: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção I.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	2.590,0	2,64E-01	1,05E-03	< 1
2	2.590,0	1,26E-01	2,20E-03	< 1
3	2.590,0	6,00E-02	4,63E-03	< 1
4	2.590,0	1,64E-02	1,69E-02	< 1
5	2.590,0	4,81E-03	5,78E-02	< 1
6	2.590,0	6,80E-04	4,09E-01	< 1
7	2.590,0	6,49E-05	4,28E+00	< 1
8	2.590,0	5,20E-06	5,34E+01	2,2

Tabela 13: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção II.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	4.167,9	3,82E-01	7,27E-04	< 1
2	4.167,9	1,95E-01	1,42E-03	< 1
3	4.167,9	9,86E-02	2,82E-03	< 1
4	4.167,9	3,05E-02	9,10E-03	< 1
5	4.167,9	9,66E-03	2,88E-02	< 1
6	4.167,9	1,37E-03	2,03E-01	< 1
7	4.167,9	1,30E-04	2,13E+00	< 1
8	4.167,9	1,04E-05	2,66E+01	1,1

Tabela 14: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção III.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	3.790,0	1,39E+00	5,93E-01	< 1
2	3.790,0	1,20E+00	6,86E-01	< 1
3	3.790,0	1,07E+00	7,67E-01	< 1
4	3.790,0	9,67E-01	8,52E-01	< 1
5	3.790,0	8,79E-01	9,37E-01	< 1
6	3.790,0	7,98E-01	1,03E+00	< 1
7	3.790,0	7,22E-01	1,14E+00	< 1
8	3.790,0	6,47E-01	1,27E+00	< 1
9	3.790,0	5,72E-01	1,44E+00	< 1
10	3.790,0	5,23E-01	1,58E+00	< 1

Tabela 15: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção IV.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	3.992,0	1,44E+00	5,72E-01	< 1
2	3.992,0	1,24E+00	6,63E-01	< 1
3	3.992,0	1,11E+00	7,40E-01	< 1
4	3.992,0	1,00E+00	8,22E-01	< 1
5	3.992,0	9,11E-01	9,04E-01	< 1
6	3.992,0	8,26E-01	9,97E-01	< 1
7	3.992,0	7,48E-01	1,10E+00	< 1
8	3.992,0	6,70E-01	1,23E+00	< 1
9	3.992,0	5,93E-01	1,39E+00	< 1
10	3.992,0	5,41E-01	1,52E+00	< 1

Tabela 16: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido aderido da seção V.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	4.014,0	1,44E+00	5,70E-01	< 1
2	4.014,0	1,25E+00	6,60E-01	< 1
3	4.014,0	1,12E+00	7,38E-01	< 1
4	4.014,0	1,01E+00	8,19E-01	< 1
5	4.014,0	9,14E-01	9,01E-01	< 1
6	4.014,0	8,29E-01	9,93E-01	< 1
7	4.014,0	7,51E-01	1,10E+00	< 1
8	4.014,0	6,73E-01	1,22E+00	< 1
9	4.014,0	5,95E-01	1,38E+00	< 1
10	4.014,0	5,43E-01	1,52E+00	< 1

Tabela 17: Velocidade e tempo de deposição estimados para as classes de sólidos do fluido excedente da seção II.

Classe	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Vel. Deposição (m/s)	Tempo Deposição (h)	Tempo Deposição (dias)
1	4.167,9	5,47E-03	5,07E-02	< 1
2	4.167,9	1,43E-03	1,94E-01	< 1
3	4.167,9	5,19E-04	5,35E-01	< 1
4	4.167,9	4,00E-04	6,95E-01	< 1
5	4.167,9	3,35E-04	8,29E-01	< 1
6	4.167,9	2,61E-04	1,06E+00	< 1
7	4.167,9	1,54E-04	1,81E+00	< 1
8	4.167,9	7,19E-05	3,86E+00	< 1
9	4.167,9	3,20E-05	8,69E+00	< 1

### 2.2.3 Tempo de Simulação

Para a estimativa do tempo de simulação, é necessário o conhecimento do tempo total gasto para o descarte de todo o material e, ainda, do tempo ao qual este material estará sujeito à deposição no ambiente, como o apresentado no item 2.2.2 (Velocidade e Tempo de Queda dos Sólidos).

Estima-se que, neste estudo, o tempo total de descarte será de 13,35 dias – soma dos tempos previstos para o descarte de todas as seções. O tempo de simulação deve ser suficiente para que a maior parte do material descartado seja depositada no assoalho oceânico.

Visando a melhor representação do descarte, estipulou-se um tempo de simulação de **15 dias**, ~1,65 dias além do tempo total de descarte. Este é suficiente para a deposição de todo o material descartado.

### 2.2.4 Características das Simulações

#### 2.2.4.1 Simulações Probabilísticas

A modelagem determinística consiste em estudar o comportamento do contaminante em um determinado cenário ambiental, apresentando instantâneos deste comportamento em tempos definidos pelo usuário. Cabe à simulação probabilística averiguar o comportamento da dispersão sob a influência de uma extensa combinação de cenários ambientais e determinar a probabilidade de presença do contaminante em cada região de domínio do modelo. A Figura 4 ilustra como que um resultado probabilístico pode ser calculado a partir de  $n$  casos determinísticos.

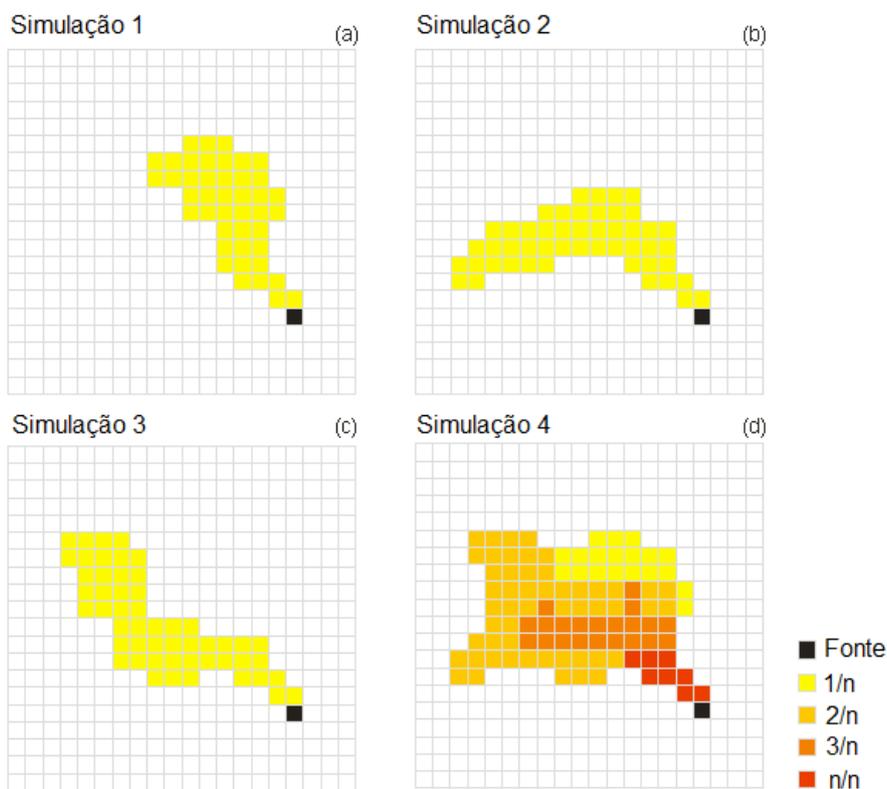


Figura 4: Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença do constituinte a partir de  $n$  casos determinísticos.

Era prática usual nos estudos de licenciamento ambiental que as simulações fossem executadas a partir da seleção prévia de alguns cenários ambientais específicos, comumente separados por estações do ano – verão e inverno – ou por casos extremos de correntes – mais intensas e mais fracas. Tal prática permite um dimensionamento das espessuras e do alcance máximo dos depósitos do material descartado no assoalho marinho. Entretanto, a seleção dos cenários ambientais extremos limita a análise dos resultados a situações específicas com baixa probabilidade de ocorrência, tornando imperativo o emprego de interpretações dos resultados bem conservadoras. Para regiões de águas profundas, a incerteza da modelagem é ainda maior, quando comparada aos resultados de águas rasas. Essa questão é abordada na Nota Técnica nº 06/09, emitida pelo CGPEG/IBAMA. Para uma maior certeza sobre as reais áreas potencialmente impactadas e espessuras formadas, é necessário um estudo probabilístico, no qual uma grande quantidade de cenários ambientais possíveis é avaliada e não apenas os casos extremos.

Mesmo com o advento dos modelos numéricos de simulação de cascalho e fluido aderido, todos ainda são limitados a simulações determinísticas, ao contrário dos modelos numéricos de dispersão de óleo, que apresentam análises em cenários probabilísticos. Dessa forma, foi proposta pela PROOCEANO, a aplicação de uma metodologia que consiste em simular um

determinado número de casos determinísticos no DREAM e após a obtenção desses resultados, extrair qual seria a probabilidade de ocorrência do constituinte para cada ponto de grade.

A aplicação desta metodologia consome um maior tempo para processamento e pós-processamento dos dados, em comparação com os modelos probabilísticos de óleo, mas sua confecção é viável. Esse tempo é variável e dependente da quantidade de cenários determinísticos simulados e do tempo de duração de cada descarte.

Dessa forma, a metodologia a ser empregada deve ser suficiente para captar a variabilidade ambiental e, ao mesmo tempo ser viável – a preparação de 300 simulações determinísticas manualmente seria inviável, por exemplo. Para tal, foi proposto a delimitação de 1 ano para análise, o qual foi dividido em verão e inverno, e para cada período foram simulados descartes de 15 dias (tempo de simulação estimado no item 2.2.3).

Para a separação em cenários sazonais, foi considerado o mesmo critério descrito na Modelagem de Óleo realizada pela empresa PROOCEANO para a mesma região: a observação das informações de correntes e ventos. O período de **verão** compreende os meses de **dezembro a maio** e os meses de **junho a novembro**, caracterizam o período de **inverno**.

A Tabela 18 apresenta o número de simulações determinísticas realizadas para cada período sazonal escolhido: verão e inverno. O intervalo entre cada simulação, tanto de verão quanto de inverno, foi de 5 dias.

Tabela 18: Número de simulações determinísticas realizadas para compor cada um dos cenários probabilísticos escolhidos.

<b>Cenários Sazonais</b>	<b>Número de Simulações</b>
Verão	32
Inverno	35

A Figura 5 apresenta, de maneira esquemática, todas as simulações que foram realizadas para o período de verão e inverno. Nota-se que as simulações abrangem todo o ano de dados disponíveis.

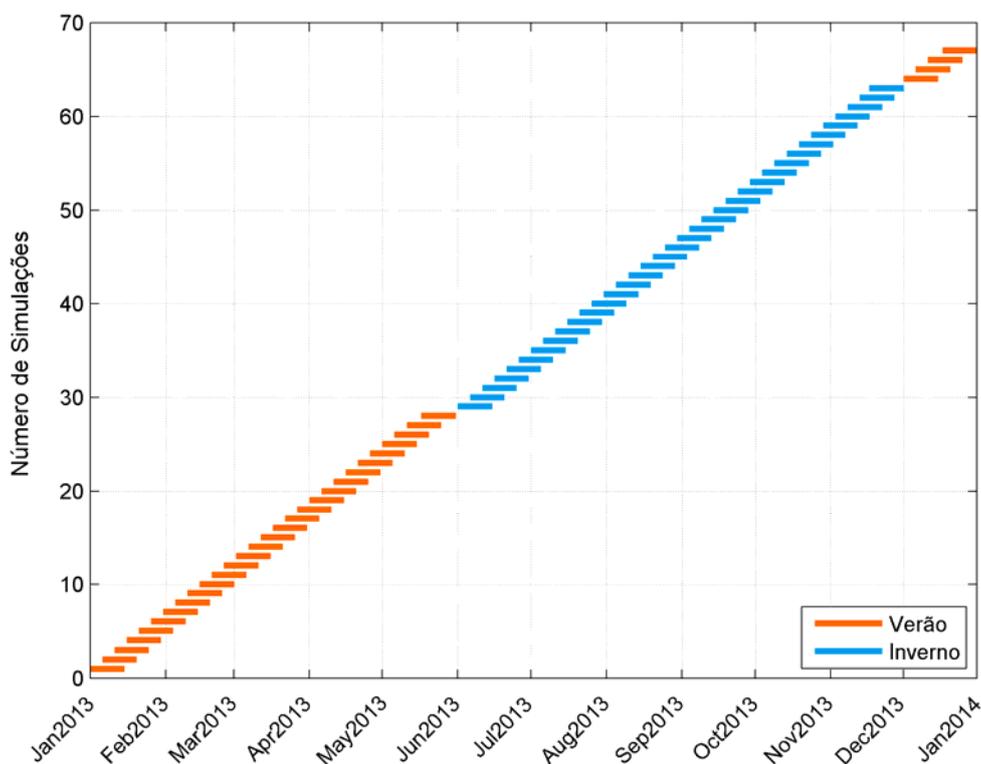


Figura 5: Número de simulações realizadas por período do ano. Cada barra colorida reflete uma simulação distinta com duração de 15 dias (tempo total de simulação). Em laranja, são apresentadas as 32 simulações determinísticas realizadas para o verão e, em azul, as 35 simulações determinísticas realizadas para o inverno.

O maior impacto causado pelo descarte de cascalho e fluido aderido, resultante da perfuração marítima, é o acúmulo de sólidos no fundo oceânico. Ainda levando em conta a viabilidade do trabalho – uma modelagem probabilística dos sólidos em suspensão demandaria o dobro das simulações determinísticas realizadas, já que essas demandam normalmente uma grade maior (item 2.2.6) e um maior refinamento temporal (passo de tempo e *output* – Tabela 19) – e a importância dos resultados a serem apresentados, a apresentação da modelagem probabilística foi restrita às pilhas de deposição formadas no assoalho oceânico. As concentrações dos sólidos em suspensão na coluna d’água serão limitadas às apresentações dos resultados determinísticos.

Tabela 19: Passo de tempo e *output* utilizados nas simulações, distintos para os resultados de deposição e suspensão do Poço Itarema.

<b>Resultados</b>	<b>Passo de Tempo (min)</b>	<b>Output (h)</b>
Pilhas de Deposição	5	6
Sólidos em Suspensão	2	2

## 2.2.4.2 Simulações Determinísticas

Para a escolha dos cenários determinísticos a serem apresentados, foram considerados dois critérios: **espessura máxima** e **distância máxima da fonte**. Dessa forma, dentre todos os cenários determinísticos obtidos, tanto para o verão como para o inverno, serão escolhidos dois casos distintos, aquele em que foi obtido o valor máximo de espessura no fundo, e o que obteve a maior distância da fonte, considerando o limiar mais conservador (0,01 mm).

Para estas simulações serão apresentados resultados referentes às pilhas de deposição e às plumas de sólidos em suspensão.

## 2.2.5 Limiar de Monitoramento

### 2.2.5.1 Pilhas de Deposição

O estudo de Kjeilen-Eilertsen *et al.* (2004) apresenta uma revisão bibliográfica (KRANZ, 1974; MAURER *et al.*, 1980 e 1981; BELLCHAMBERS & RICHARDSON, 1995; CHANDRASEKARA & FRID, 1998; HOLTHAUS *et al.*, 2003) dos limites mínimos de espessura para os quais são identificados efeitos nocivos em diversos grupos e espécies de organismos bentônicos. São considerados quatro efeitos críticos para análise: mortalidade, redução do crescimento da espécie, redução do assentamento larval e mudanças na composição faunística.

Dos trabalhos analisados, o estudo de Holthaus *et al.* (2003) estima a espessura mínima para a qual o soterramento não seria considerado nocivo à comunidade bentônica com base na análise de curvas SSD (Species Sensitivity Distribution). Os valores obtidos são os seguintes:

- » Para sedimentos exógenos (não-nativos): 0,96 cm;
- » Para sedimentos endógenos (nativos): 0,65 cm.

Com base nessa análise, é ainda sugerido no estudo de Kjeilen-Eilertsen *et al.* (2004) que o limite em que já não são sentidos efeitos nocivos seja de 0,5 cm, podendo este ser utilizado como limiar para estudos de modelagem de cascalho e fluidos de perfuração.

Baseado nas referências bibliográficas apresentadas acima, percebe-se que o limiar de 0,1 cm (1 mm) seria conservador o suficiente para a representação e estimativa das pilhas de deposição formadas no assoalho marinho. Entretanto, de maneira geral, os Termos de Referência elaborados pela CGPEG/DILIC/IBAMA para modelagens de cascalho e fluido aderido, normalmente, exigem que as pilhas de deposição sejam monitoradas até o limiar de 0,01 mm. Dessa forma, visando atender ao que usualmente é solicitado, os resultados serão apresentados considerando o limiar de 0,01 mm, sendo sempre comparados com o que foi obtido para 1 mm.

### 2.2.5.2 Sólidos em Suspensão

Smit *et al.* (2006) analisou diversos estudos prévios realizados para identificar o efeito do descarte de cascalho e fluido aderido nos organismos nectônicos. Segundo esses estudos, o menor limiar ao qual os organismos estão sujeitos a alterações significativas, em descartes com fluido de base água, foi de 10 mg/L (~10 ppm). Apesar desse limiar levar em consideração resultados de descartes de fluidos aquosos, é importante ressaltar que essa abordagem é viável, já que esses são os que se dispersam por mais tempo no ambiente, sendo os mais impactantes aos organismos nectônicos. Dessa forma, visando uma abordagem conservadora, o limiar monitorado neste estudo foi de 5 ppm.

### 2.2.6 Descrição da Grade

Os efeitos dos descartes de sólidos no mar variam consideravelmente de acordo com a distância vertical entre a fonte e o assoalho marinho. Nas seções onde o descarte é feito próximo ao fundo (sem utilização do *riser*), o material tende a formar uma pilha de deposição significativamente maior que aquela associada aos descartes que ocorrem junto à superfície. Por outro lado, o material descartado da superfície (com *riser*) irá percorrer uma distância maior, sofrendo influência das forças locais e cobrindo uma área mais extensa quando depositado. Entretanto, também há a questão do tipo de fluido que é descartado, devido a sua menor densidade, os sólidos presentes nos fluidos de base água tendem a se dispersar mais que aqueles derivados de fluidos de base sintética.

Em estudos de modelagem, a relação entre a resolução da grade projetada e a escala do fenômeno estudado é vital na obtenção de bons resultados. Deve-se atentar para o fato de que uma grade ampla, que abranja toda a região de deposição ou de dispersão dos sólidos em suspensão, pode não ter resolução suficiente para mapear com exatidão a região de maior espessura. Da mesma forma, uma grade de alta resolução pode não cobrir uma área suficientemente grande como a que se espera para a deposição do material ou dispersão dos sólidos.

Como solução para o problema apresentado acima, é proposto o uso de duas grades distintas: a primeira com tamanho e resolução suficientes para representar a região de maior acúmulo de sedimentos; e a segunda, com maior área, porém menos refinada, voltada para o alcance dos sólidos em suspensão. Os domínios das grades utilizadas no estudo são apresentados na Figura 6. A grade indicada em verde é referente à pilha de deposição e a grade indicada em azul está relacionada à pluma de sólidos em suspensão.

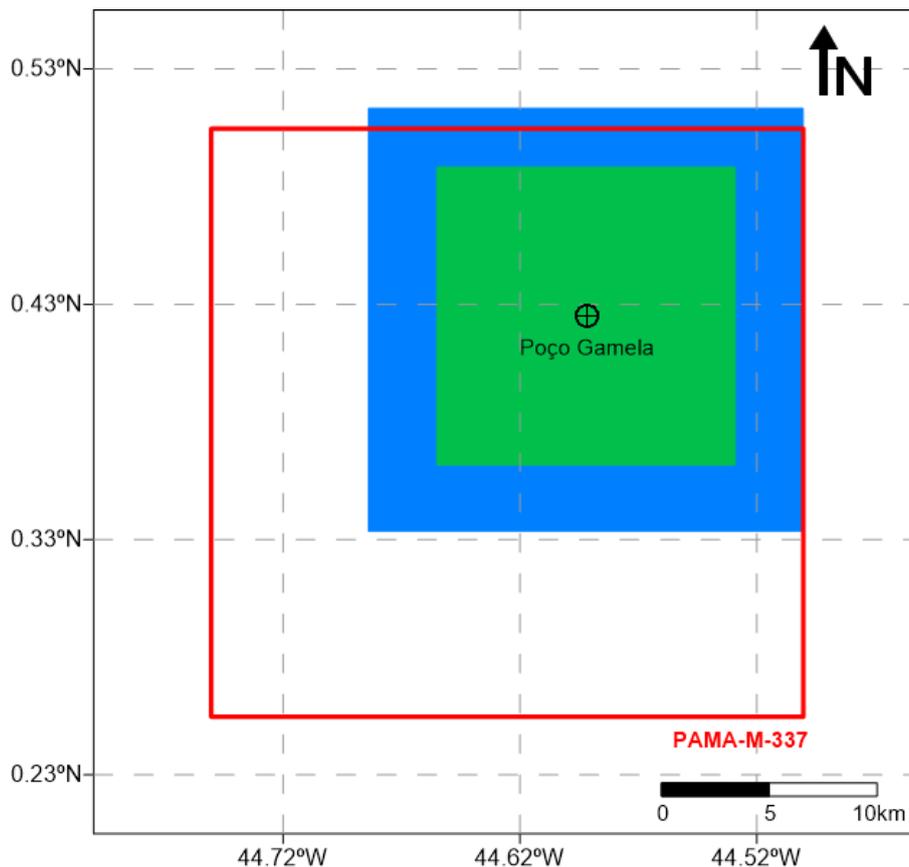


Figura 6: Domínios das grades utilizadas na modelagem para a pilha de deposição (em verde); e para a pluma de sólidos em suspensão (em azul). (Datum SIRGAS 2000).

A grade utilizada para a deposição apresenta um espaçamento de 25 m nas direções zonal e meridional e 29,65 m em cada nível de profundidade. Os seus limites são: ao sul, 00°21'N; ao norte, 00°29'N; a oeste, 44°39'W; e a leste, 44°32'W. Obtendo assim uma matriz com 559x562 células em superfície e 100 células verticais (limite do modelo).

Já, a grade para os sólidos em suspensão foi construída com um espaçamento de 30 m nas direções zonal e meridional e 29,65 m na direção vertical. Esta grade apresenta 679x665 células em superfície e 100 células verticais (limite do modelo), com seus limites compreendidos entre: 00°20'N e 00°31'N, em latitude, e 44°41'W; e 44°30'W, em longitude.

Para fins de modelagem, foi considerada uma profundidade uniforme de 2.965 m em todo o domínio da grade, que corresponde à profundidade da lâmina d'água local informada pela QGEP.

## 2.3. Forçantes

A separação sazonal definida para o presente estudo seguiu o mesmo critério adotado no estudo de modelagem de óleo apresentado neste mesmo processo de licenciamento, onde o período de verão corresponde aos meses de **dezembro a maio** – meses com predominância de ventos de leste-nordeste e correntes de oeste-noroeste – e o período de inverno aos meses de **junho a novembro** – meses com predominância de ventos de leste e correntes oeste-noroeste.

Para manter a coerência, todos os parâmetros de entrada do modelo de dispersão (correntes, temperatura e salinidade do mar, ventos e temperatura do ar) serão apresentados de acordo com os períodos escolhidos.

### 2.3.1 Correntes

Como forçante hidrodinâmica foram utilizados os resultados do modelo hidrodinâmico ROMS, o mesmo utilizado no estudo de modelagem de dispersão de óleo. A localização do ponto de grade mais próximo ao ponto de descarte é apresentada na Figura 7.

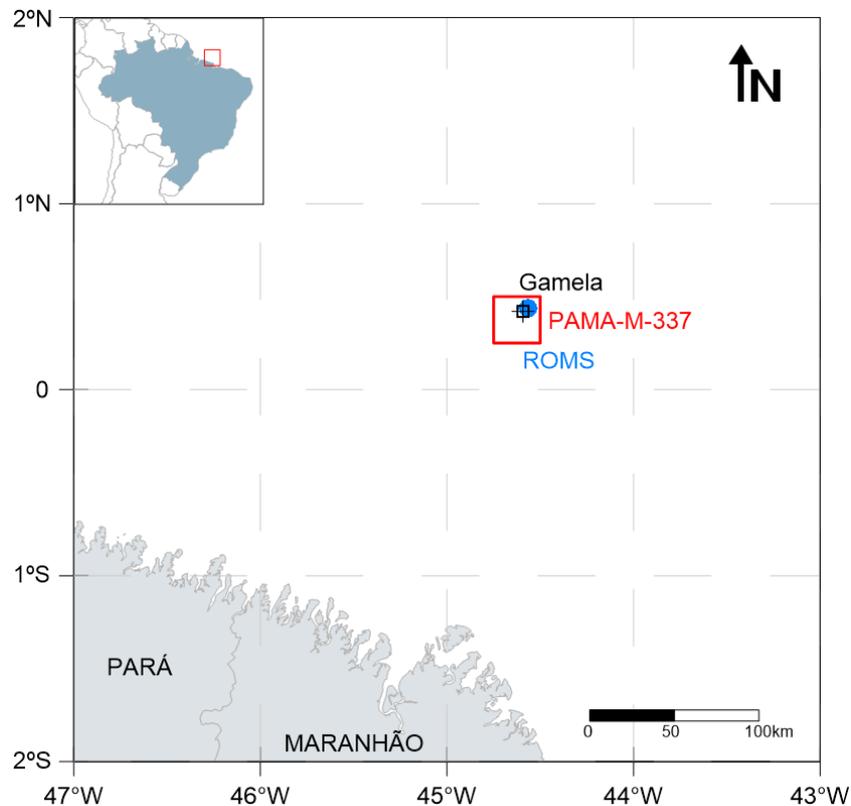


Figura 7: Localização do ponto de grade do ROMS mais próximo ao ponto de descarte.

A seguir, na Figura 8 e na Figura 9, são apresentadas as rosas de correntes obtidas para verão e inverno, respectivamente, variando nas profundidades de 0, 500, 1.500 e 2.900 m, para o ponto mais próximo ao Poço Gamela.

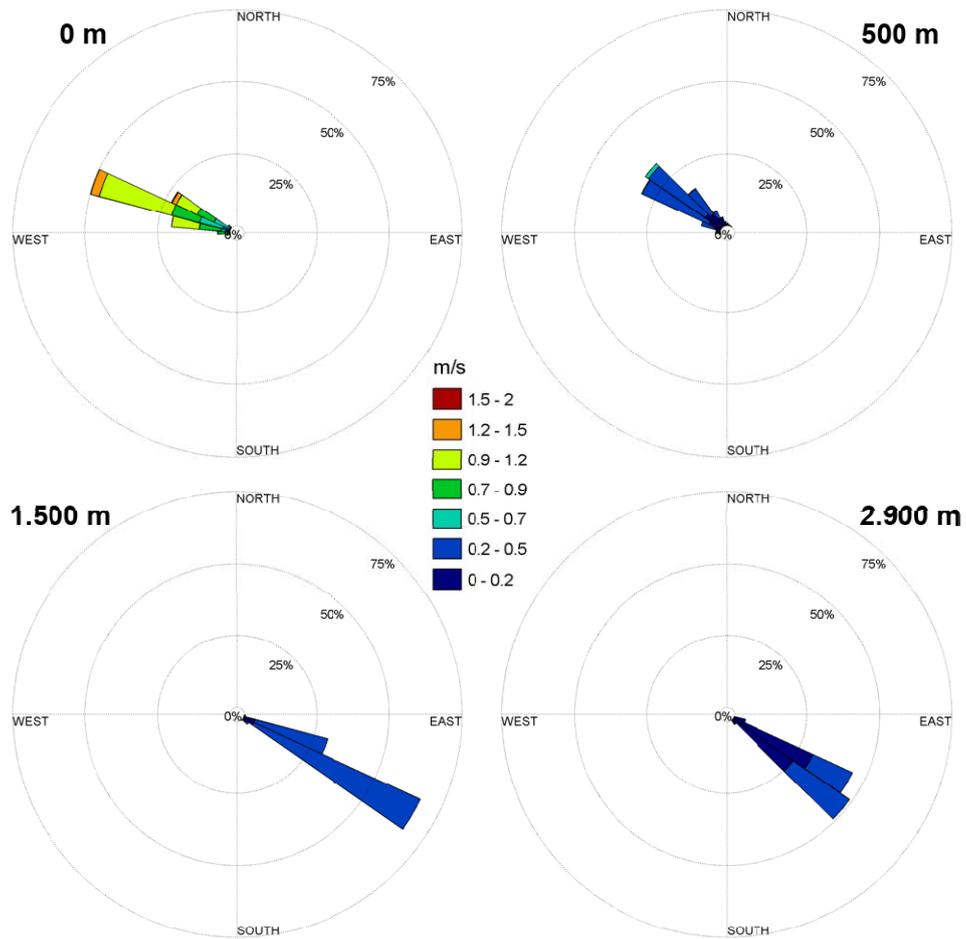


Figura 8: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 500, 1.500 e 2.900 metros, para o período representativo do cenário de verão (dezembro a maio), do ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela.

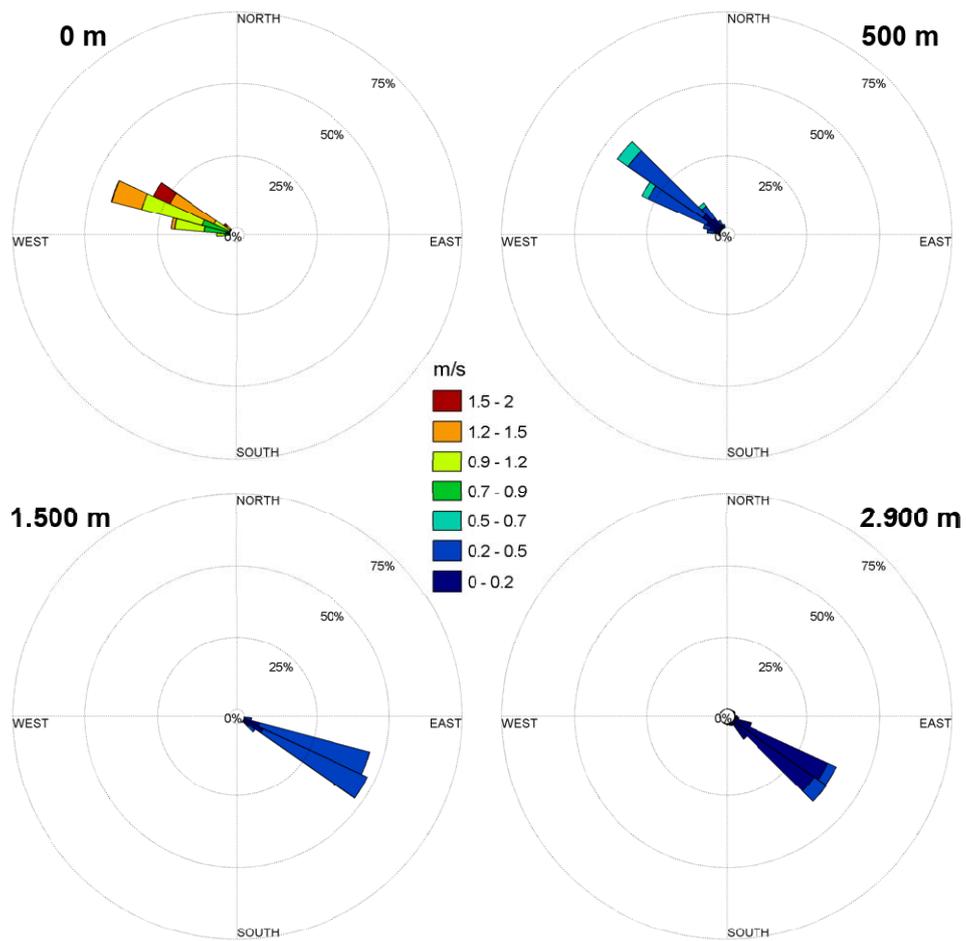


Figura 9: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 500, 1.500 e 2.900 metros, para o período representativo do cenário de inverno (junho a novembro), do ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela.

A Tabela 20 apresenta os valores máximos de intensidade obtidos para ambos os cenários.

Tabela 20: Intensidades máximas de corrente obtidas para os cenários de verão e inverno.

Profundidade (m)	Intensidade Máxima (m/s)	
	Verão	Inverno
0	1,59	1,84
500	0,55	0,68
1500	0,45	0,50
2.900	0,28	0,27

Em superfície, a corrente noroeste é a atuante e, no fundo (2.900 m), é a sudeste. É durante o inverno que há maior ocorrência de correntes mais intensas em superfície, alcançando até 1,84 m/s. Já no fundo, o verão é o cenário que possui dominância de correntes mais intensas, alcançando até 0,28 m/s.

### 2.3.2 Temperatura e Salinidade do Mar

Para definir os perfis de temperatura e salinidade a serem incorporados na modelagem de cascalho, foram utilizados os dados dos resultados da Modelagem Hidrodinâmica. O ponto de grade mais próximo ao ponto de descarte foi apresentado na Figura 7.

No DREAM, apesar de ser utilizada uma série temporal para representar a variabilidade dos dados de corrente, os parâmetros temperatura e salinidade não seguem esse padrão. O usuário do modelo tem a opção de inserir apenas um perfil de temperatura e salinidade para cada cenário. Desta forma, foi calculado um perfil médio desses parâmetros para cada período selecionado (Figura 10).

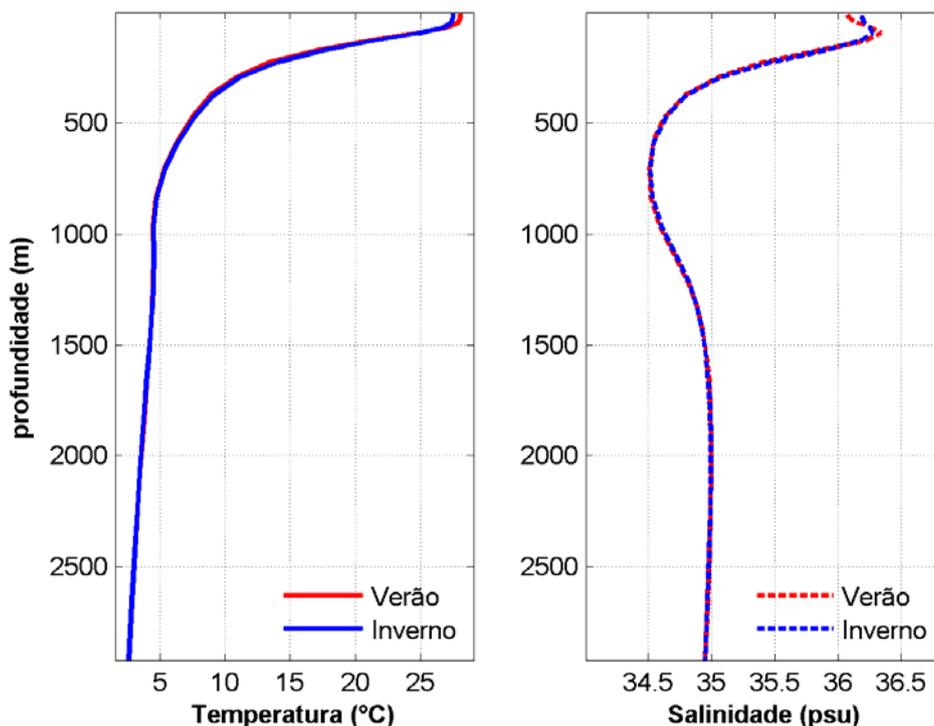


Figura 10: Perfis de salinidade e temperatura para o ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela.

### 2.3.3 Ventos

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

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

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

» Dados globais de radiossondas.

» Dados da superfície do mar obtidos através do projeto COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) no período de 1983 a 1996 (14 anos), originados de diversas fontes, dentre elas, observações de navios, bóias fixas, bóias móveis e estações oceânicas próximas à superfície.

» Dados aéreos, originados de observações por aeronaves em todo o globo, geralmente associados a projetos como GARP (Global Atmospheric Research Program) e GATE (Global Atlantic Tropical Experiment), por exemplo.

» Dados de Satélite, que começaram a ser obtidos em 1967, através de diversos programas. Atualmente, o NCEP/NCAR utiliza dados fornecidos pelo projeto TOVS (Operational Vertical Sounder System), com variáveis em três dimensões, cuja resolução espacial média é de 2,5 graus.

» Dados de vento em superfície, obtidos pelo sensor espacial Microwave/Imager (SSM/I) a partir de 1987, submetidos ao tratamento feito pela rede neural de Kransnopsky *et al.* (1995 *apud* Kalnay *et al.*, 1996).

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

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

Para este estudo, foram utilizados os dados coincidentes com o período disponível para as correntes – ano de 2013 –, tendo uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia). A resolução espacial na área em questão é de aproximadamente 1,8°, tendo sido utilizado o ponto de grade do NCEP mais próximo ao ponto de descarte (Figura 11). A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos (Figura 12), elaboradas para os períodos sazonais escolhidos.

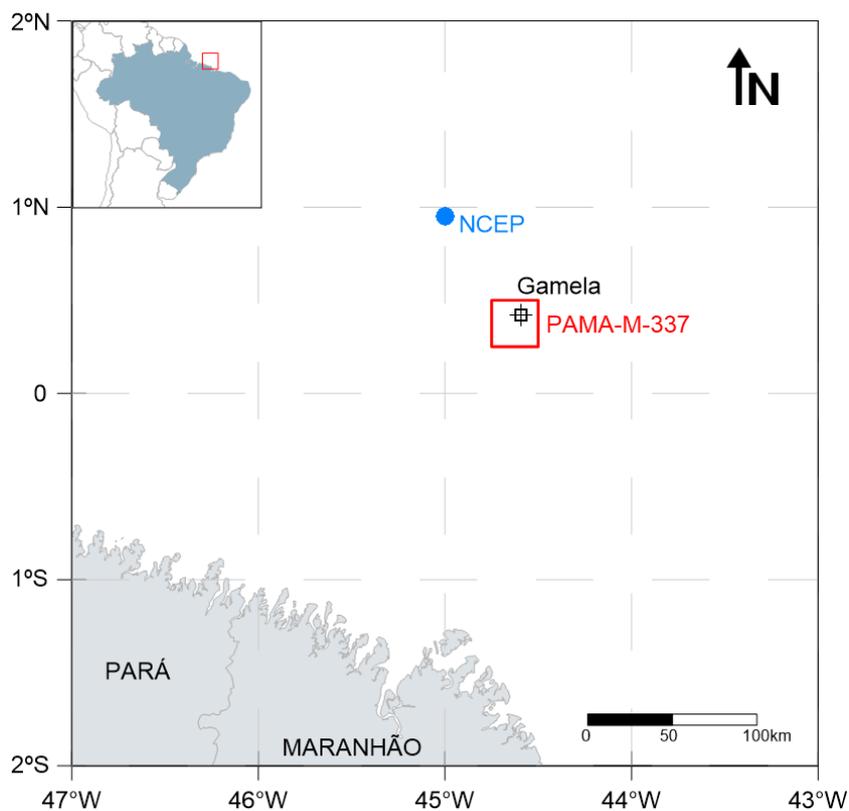


Figura 11: Localização do ponto de grade do NCEP mais próximo ao Poço Gamela.

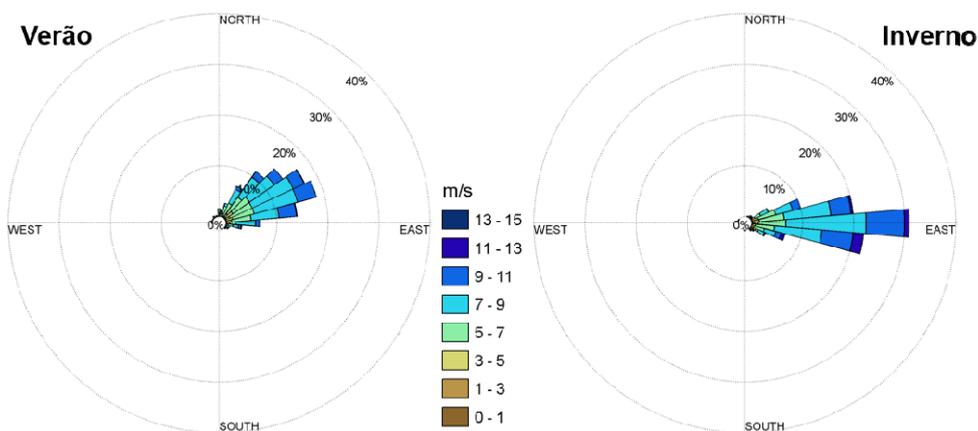


Figura 12: Histogramas direcionais para os ventos de cada cenário sazonal escolhido.

O cenário de verão apresenta predominância de ventos de leste-nordeste e o cenário de inverno exibe ventos majoritários de leste. As maiores intensidades ( $\geq 11$  m/s) são visivelmente mais frequentes no inverno.

### 2.3.4 Temperatura do Ar

Os dados de temperatura do ar utilizados como forçantes do modelo também são oriundos das Reanálises do NCEP. Assim como nos dados de temperatura do mar e salinidade, no DREAM há a opção de inserir apenas um valor de temperatura do ar para cada cenário. Sendo assim, optou-se também por utilizar os valores médios de cada período, apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Temperatura do ar característica para cada cenário.

<b>Cenários Sazonais</b>	<b>Temperatura do Ar (°C)</b>
Verão	27,96
Inverno	27,90

### 3. Resultados

A seguir, serão apresentados os resultados probabilísticos e determinísticos das simulações de dispersão de cascalho e fluido aderido, para os cenários sazonais de verão (dezembro a maio) e inverno (junho a novembro).

Na abordagem probabilística, são realizadas diversas simulações determinísticas, considerando todos os processos citados nos itens anteriores, para diferentes condições meteorológicas. Os resultados probabilísticos são de grande importância, pois ilustram tanto a abrangência da área passível de ser afetada pelo descarte de cascalho e fluido aderido, quanto as regiões com maior probabilidade de serem afetadas por tal descarte.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas diferentes simulações, com intervalos temporais de 5 dias, para cada estação (verão e inverno). Visto que o impacto principal da atividade é o empilhamento de material no assoalho oceânico, os resultados probabilísticos aqui apresentados são restritos à espessura resultante no fundo. Serão apresentados mapas de probabilidade de presença na região para determinados limiares de espessura e mapas da espessura máxima obtida. As concentrações de sólidos em suspensão na coluna d'água serão apresentadas para os casos determinísticos selecionados.

Para a escolha dos cenários determinísticos a serem apresentados, foram considerados dois critérios: **espessura máxima dos depósitos no fundo** e **distância máxima da fonte dos depósitos no fundo**. Dessa forma, dentre todos os cenários determinísticos obtidos, tanto para o verão como para o inverno, serão apresentados dois resultados distintos, aquele em que foi obtido o valor máximo de espessura no fundo, e o que obteve a maior distância da fonte, considerando o limiar mais conservador (0,01 mm). Para tais casos, serão apresentados resultados de espessura, considerando a integração total de todos os descartes e a integração das seções com e sem *riser*, analisadas separadamente, além da concentração dos sólidos em suspensão na coluna d'água.

A Figura 13 resume a forma como os resultados dos modos probabilísticos e determinísticos serão apresentados.

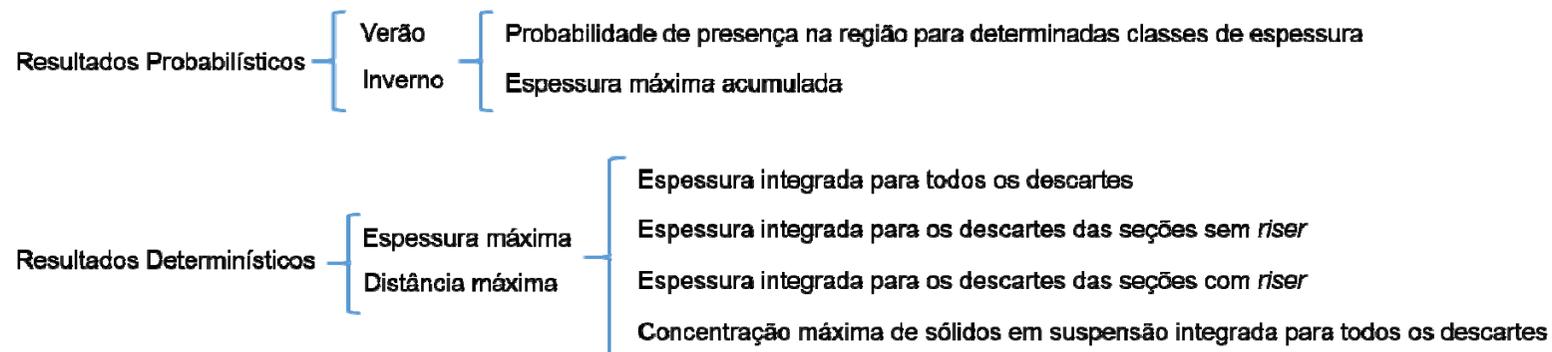


Figura 13: Fluxograma de apresentação dos resultados.

### 3.1. Resultados Probabilísticos

A seguir, serão apresentados mapas de probabilidade de presença de espessuras acima de 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm, considerando todos os casos determinísticos simulados. Serão também apresentados mapas com a espessura máxima observada acima de 0,01 mm, ou seja, para cada ponto de grade, foi extraído o maior valor de espessura observado dentre todos os casos obtidos. Os resultados serão apresentados, separadamente, para os cenários de verão (dezembro a maio) e inverno (junho a novembro).

#### 3.1.1 Probabilidade de Presença

##### 3.1.1.1 Verão

As probabilidades de presença para as classes de espessura acima de 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm são apresentadas da Figura 14 à Figura 17, para o cenário de verão, considerando a integração de todos os descartes.

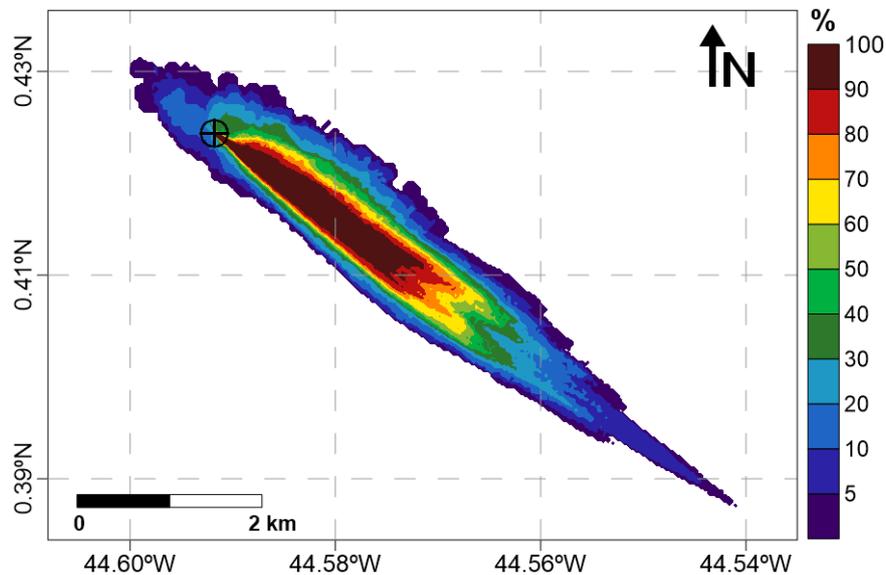


Figura 14: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 0,01 mm, considerando todos os resultados determinísticos de verão. (*Datum* SIRGAS 2000).

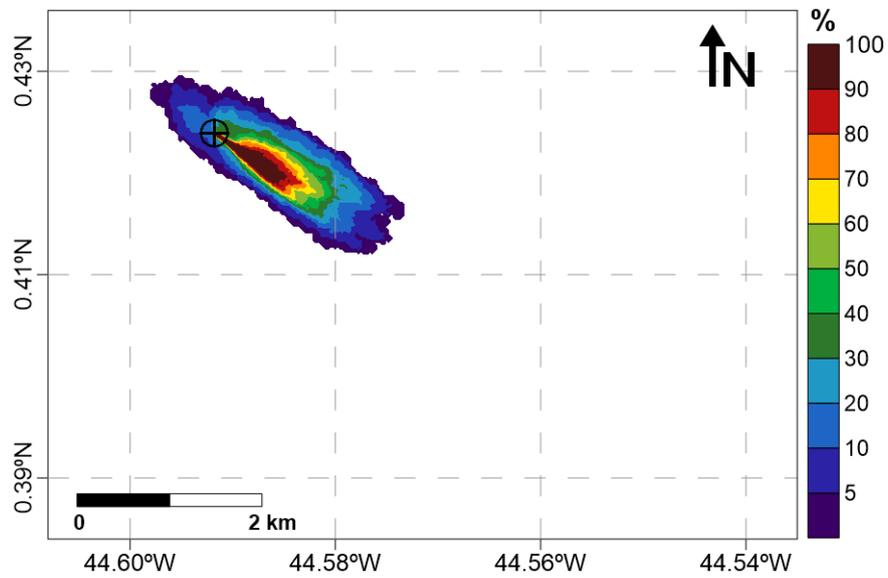


Figura 15: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 0,1 mm, considerando todos os resultados determinísticos de verão. (*Datum* SIRGAS 2000).

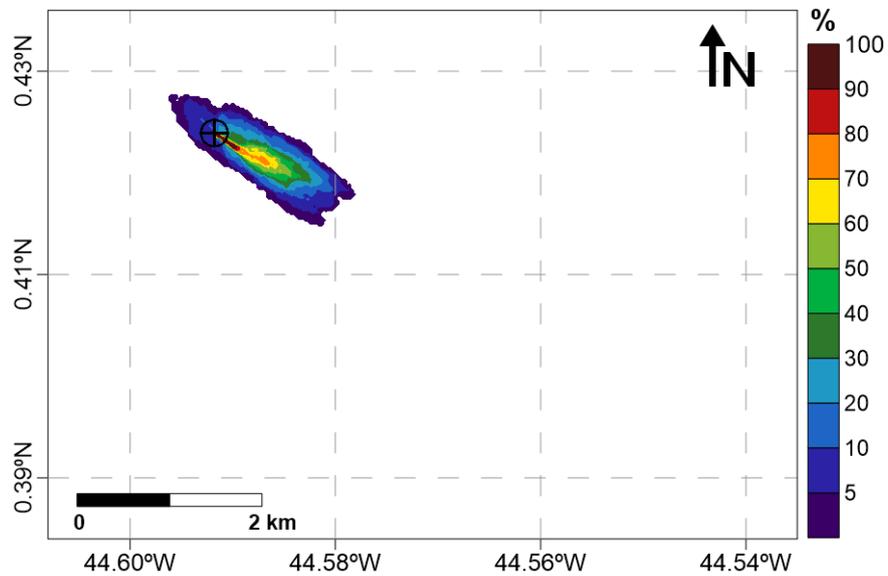


Figura 16: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 1 mm, considerando todos os resultados determinísticos de verão. (*Datum* SIRGAS 2000).

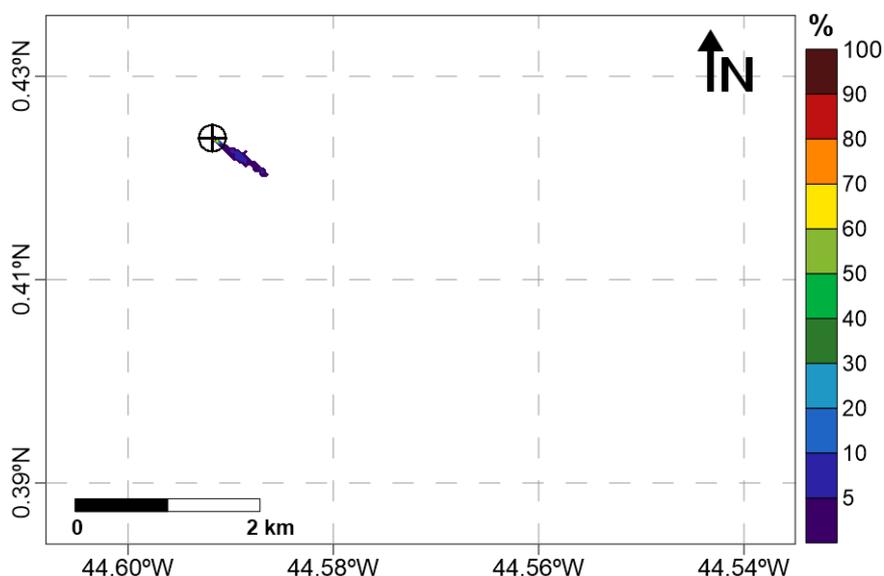


Figura 17: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 10 mm, considerando todos os resultados determinísticos de verão. (Datum SIRGAS 2000).

A seguir, na Tabela 22, são apresentadas as áreas obtidas para algumas classes de probabilidade, durante o cenário de verão, considerando cada limiar monitorado.

Tabela 22: Áreas obtidas para as classes de probabilidade de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, considerando os distintos limiares monitorados, para o cenário de verão.

Probabilidade	Área (km <sup>2</sup> )			
	Limiar de 0,01 mm	Limiar de 0,1 mm	Limiar de 1 mm	Limiar de 10 mm
> 0%	6,33	2,25	1,17	0,05
>= 25%	2,98	0,81	0,33	0,003
>= 50%	1,86	0,40	0,13	0,003
>= 75%	1,20	0,22	0,02	0,001
= 100%	0,43	0,06	0,01	0,001

Pela análise dos resultados, percebe-se que as maiores probabilidades de ocorrência de espessuras são para sudeste. Comparando este resultado com o perfil de correntes – Figura 8 –, nota-se que as correntes de fundo foram as que mais contribuíram para a dispersão do material.

Os resultados mostram também uma diminuição significativa da probabilidade de presença à medida que os maiores limiares são analisados. Para 0,01 mm, por exemplo, a área total de ocorrência é de 6,33 km<sup>2</sup>, um valor muito alto quando comparado ao resultado obtido para 1 mm, de 1,17 km<sup>2</sup>.

### 3.1.1.2 Inverno

As probabilidades de presença para as classes de espessura acima de 0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm são apresentadas da Figura 18 à Figura 21, para o cenário de inverno, considerando a integração de todos os descartes.

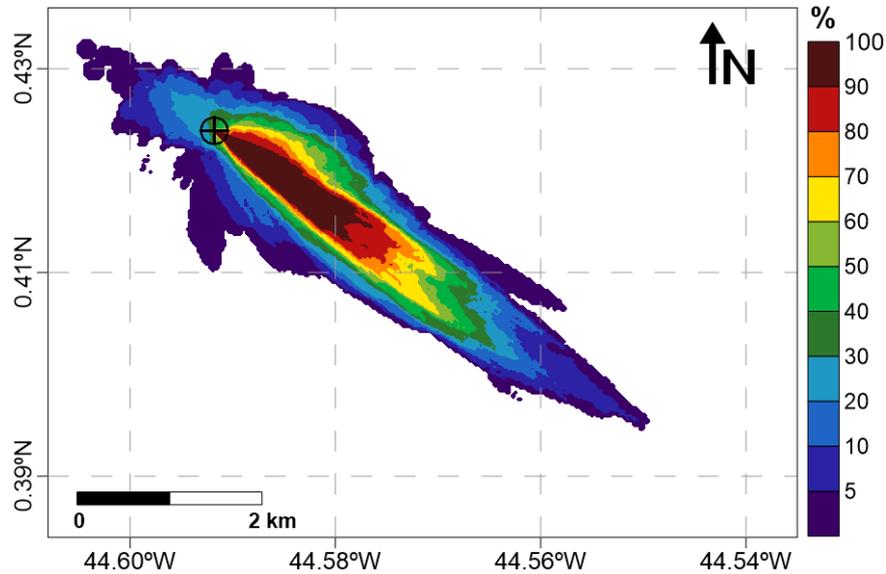


Figura 18: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 0,01 mm, considerando todos os resultados determinísticos de inverno. (*Datum* SIRGAS 2000).

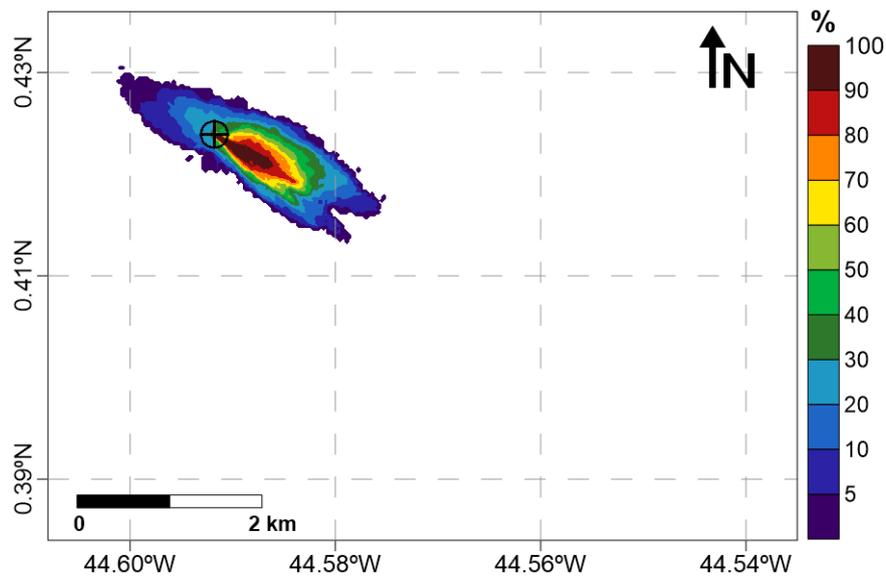


Figura 19: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 0,1 mm, considerando todos os resultados determinísticos de inverno. (*Datum* SIRGAS 2000).

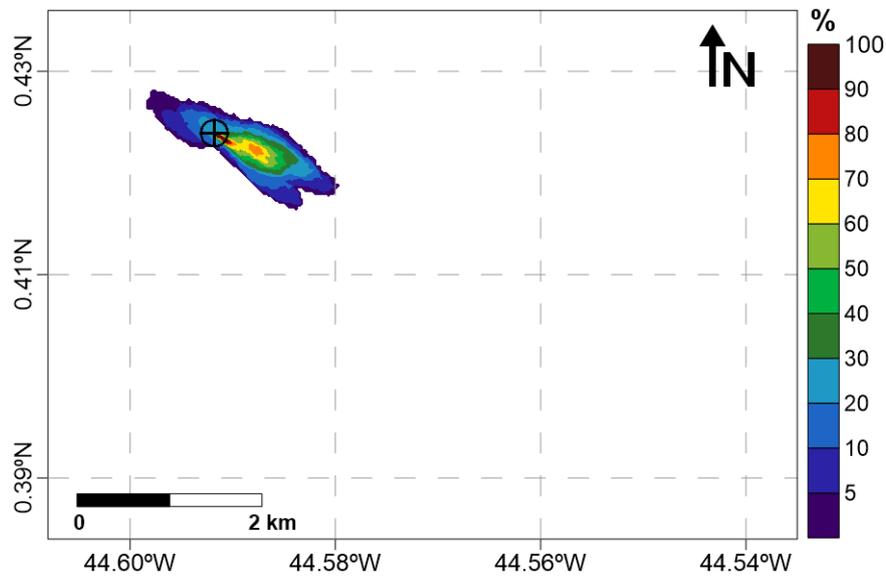


Figura 20: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 1 mm, considerando todos os resultados determinísticos de inverno. (*Datum* SIRGAS 2000).

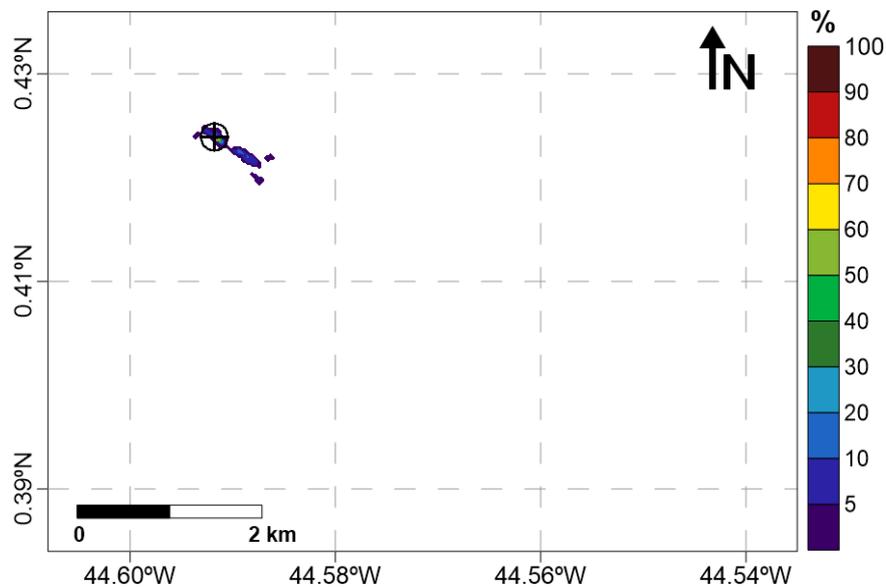


Figura 21: Mapa de probabilidade de presença de espessuras superiores a 10 mm, considerando todos os resultados determinísticos de inverno. (*Datum* SIRGAS 2000).

A seguir, na Tabela 23, são apresentadas as áreas obtidas para algumas classes de probabilidade, durante o cenário de inverno, considerando cada limiar monitorado.

Tabela 23: Áreas obtidas para as classes de probabilidade de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, considerando os distintos limiares monitorados, para o cenário de inverno.

Probabilidade	Área (km <sup>2</sup> )			
	Limiar de 0,01 mm	Limiar de 0,1 mm	Limiar de 1 mm	Limiar de 10 mm
> 0%	7,57	2,05	1,01	0,07
>= 25%	3,02	0,78	0,31	0,004
>= 50%	1,73	0,39	0,11	0,003
>= 75%	0,95	0,19	0,01	0,001
= 100%	0,17	0,01	0,002	0,001

Da mesma forma que o observado para o verão, neste cenário, as correntes de fundo também são as maiores responsáveis pela dispersão do material: deposição preferencial do material para sudeste, o que pode ser contrastado com a Figura 9.

A deposição de material no presente cenário mostra maiores alcances para noroeste, quando comparado ao cenário de verão. Esta evidência deve estar relacionada com as maiores intensidades de corrente em superfície durante o inverno.

Há uma diminuição significativa da probabilidade de presença à medida que os maiores limiares são analisados. A área total de ocorrência para o limiar de 0,01 mm é de 7,57 km<sup>2</sup>, e para o limiar de 1 mm, é de 1,01 km<sup>2</sup>.

### 3.1.2 Espessura Máxima

#### 3.1.2.1 Verão

A Figura 22 apresenta a espessura máxima obtida acima de 0,01 mm para todos os casos determinísticos do verão, considerando a integração de todos os resultados. A espessura máxima obtida neste cenário foi de 1.888,79 mm.

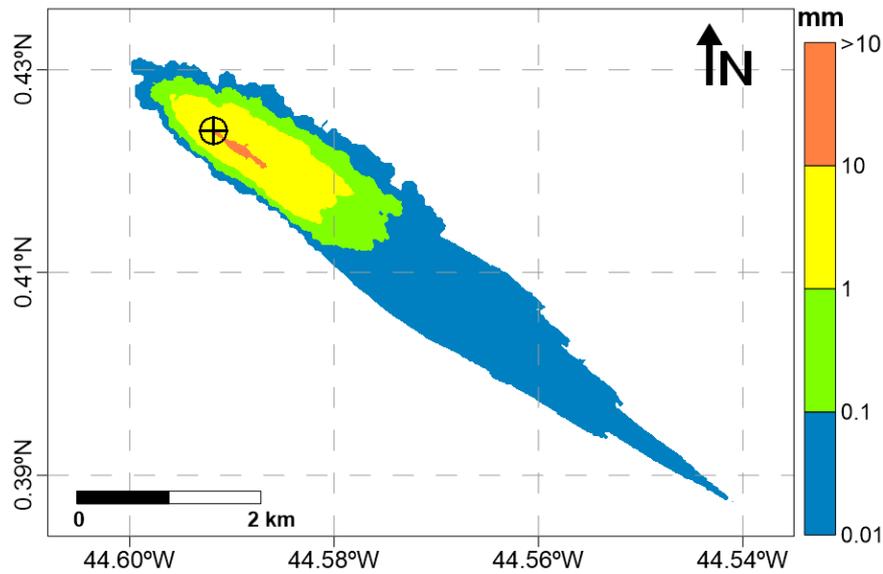


Figura 22: Mapa de espessura máxima acumulada no fundo oceânico, considerando todos os casos determinísticos de verão. (Datum SIRGAS 2000).

A Tabela 24 apresenta as distâncias máximas da fonte alcançadas em função de cada classe de limiar adotado, para o cenário de verão. A distância máxima observada para espessuras acima de 0,01 mm foi de 6,95 km, contrastando com a distância obtida para o limiar de 1 mm, que foi de 1,66 m.

Tabela 24: Distâncias máximas alcançadas para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm), para o cenário de verão.

<b>Espessura</b>	<b>Distância Máxima da Fonte (km)</b>
$\geq 0,01$	6,95
$\geq 0,1$	2,24
$\geq 1$	1,66
$\geq 10$	0,71

A Tabela 25 apresenta as espessuras máximas obtidas a determinadas distâncias da fonte (100, 500 e 1.000 m). A 1 km do ponto de descarte, a máxima espessura observada foi de 6,39 mm.

Tabela 25: Espessuras máximas obtidas a 100, 500 e 1.000 m de distância da fonte, para o cenário de verão.

<b>Distância da Fonte (m)</b>	<b>Espessura Máxima (mm)</b>
100	12,94
500	10,48
1.000	6,39

### 3.1.2.2 Inverno

A Figura 23 apresenta a espessura máxima obtida acima de 0,01 mm para todos os casos determinísticos do inverno, considerando a integração de todos os resultados. A espessura máxima obtida neste cenário, de 1.898,72 mm, foi ligeiramente superior à observada no cenário de verão (1.888,79 mm).

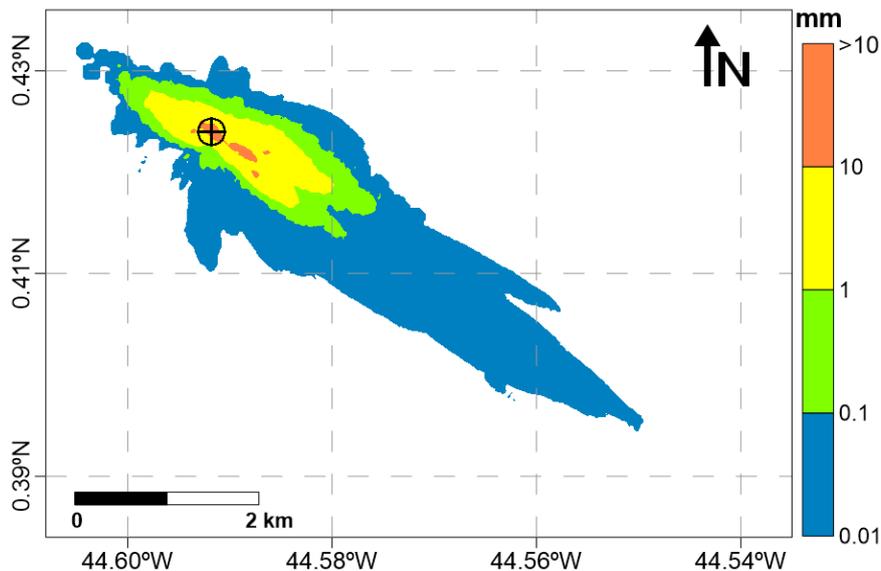


Figura 23: Mapa de espessura máxima acumulada no fundo oceânico, considerando todos os casos determinísticos de inverno. (Datum SIRGAS 2000).

A Tabela 26 apresenta as distâncias máximas da fonte alcançadas em função de cada classe de limiar adotado, para o cenário de inverno. Espessuras acima de 0,01 mm são alcançadas até 5,67 km de distância da fonte, e acima de 1 mm, até 1,46 m.

As distâncias máximas da fonte foram inferiores quando comparadas aos resultados do cenário de verão.

Tabela 26: Distâncias máximas alcançadas para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm), para o cenário de inverno.

<b>Espessura</b>	<b>Distância Máxima da Fonte (km)</b>
$\geq 0,01$	5,67
$\geq 0,1$	1,98
$\geq 1$	1,46
$\geq 10$	0,70

A Tabela 27 apresenta as espessuras máximas obtidas a determinadas distâncias da fonte (100, 500 e 1.000 m). A 1 km do ponto de descarte, a máxima espessura observada foi de 5,95 mm.

Tabela 27: Espessuras máximas obtidas a 100, 500 e 1.000 m de distância da fonte, para o cenário de inverno.

<b>Distância da Fonte (m)</b>	<b>Espessura Máxima (mm)</b>
100	17,28
500	13,85
1.000	5,95

## 3.2. Resultados Determinísticos

Dentre todos os resultados probabilísticos obtidos, foram selecionados aqueles que refletiram os piores cenários possíveis em relação à espessura máxima dos depósitos no fundo e à distância máxima da fonte dos depósitos no fundo, independente do cenário sazonal (verão ou inverno). Dessa forma, serão apresentados dois casos determinísticos.

Os resultados do modo determinístico serão apresentados com enfoque nos impactos que o material descartado pode causar no fundo oceânico e na coluna d'água.

Os resultados obtidos para as pilhas de deposição serão apresentados da seguinte forma:

- » Integração das seções sem *riser*,
- » Integração das seções com *riser*,
- » Integração de todas as seções.

Para a apresentação destes resultados, foi escolhido o limiar de 0,01 mm, como justificado no item 2.2.5.1 (Limiar de Monitoramento – Pilhas de Deposição).

O impacto do material descartado na coluna d'água será apresentado a partir da concentração máxima de sólidos que permanece na água durante e após o descarte. Os resultados serão apresentados considerando todos os descartes realizados. O limiar monitorado foi de 5 ppm, como explicado no item 2.2.5.2 (Limiar de Monitoramento – Sólidos em Suspensão).

Com o objetivo de determinar a área de influência da pluma de sólidos em suspensão, foi extraída a concentração máxima que a pluma pode obter para cada ponto de grade, analisando todos os tempos de simulação. Ou seja, para cada passo de tempo da simulação, registrou-se o valor máximo de concentração em cada ponto de grade, e ao final de todo o período, extraiu-se a máxima de todas as máximas obtidas.

Cabe ressaltar que, apesar desta análise ser ideal para a obtenção da área potencialmente impactada pela atividade, e de resultados como concentração e distância máxima alcançadas, esta não retrata o comportamento da pluma em determinado instante. Para tal, serão apresentados exemplos de mapas com a concentração de sólidos para alguns períodos após o início do descarte.

A Tabela 28 apresenta os períodos de simulação selecionados para cada caso determinístico. Ambos os casos selecionados estão contidos dentro do período de inverno.

Tabela 28: Data inicial e final da simulação obtidas para os dois casos determinísticos selecionados.

Cenário Determinístico	Início	Fim
Espessura Máxima	31-jul-2013	14-ago-2013
Distância Máxima	25-fev-2013	11-mar-2013

A Figura 24 e a Figura 25 apresentam as rosas de correntes limitadas a esses períodos, respectivamente espessura e distância máximas.

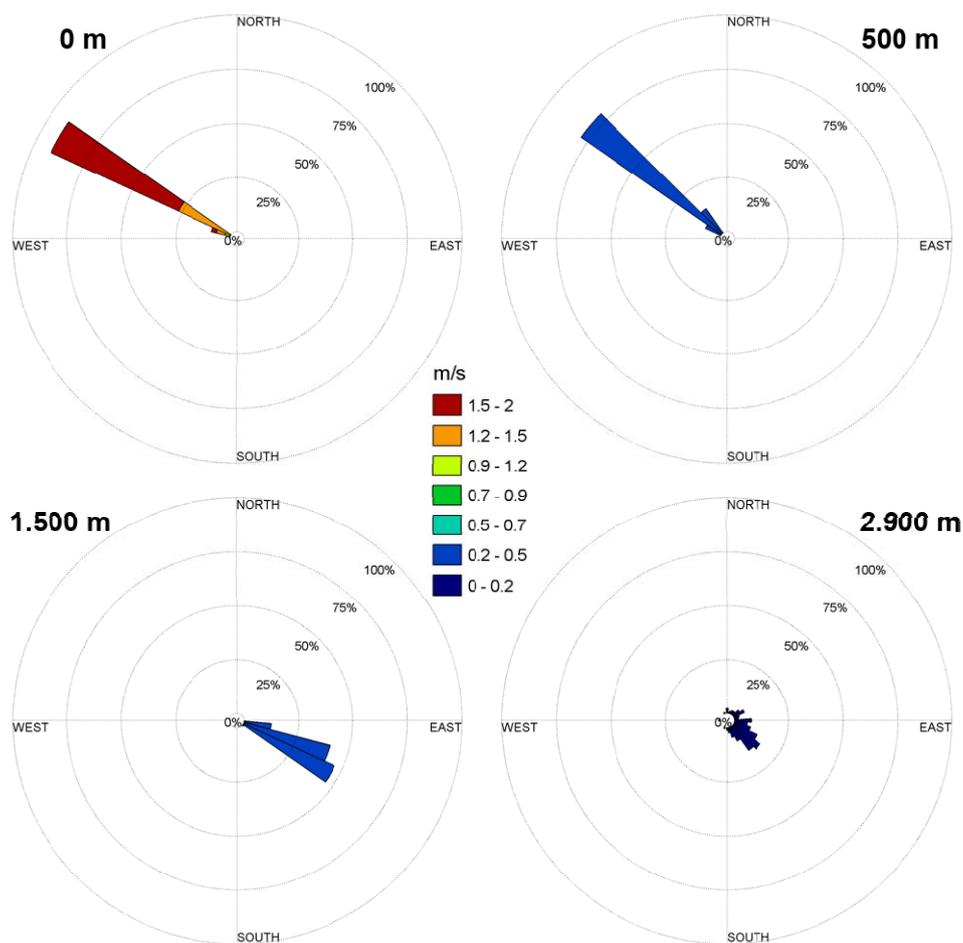


Figura 24: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 500, 1.500 e 2.900 metros, para o período representativo do cenário determinístico de espessura máxima, do ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela.

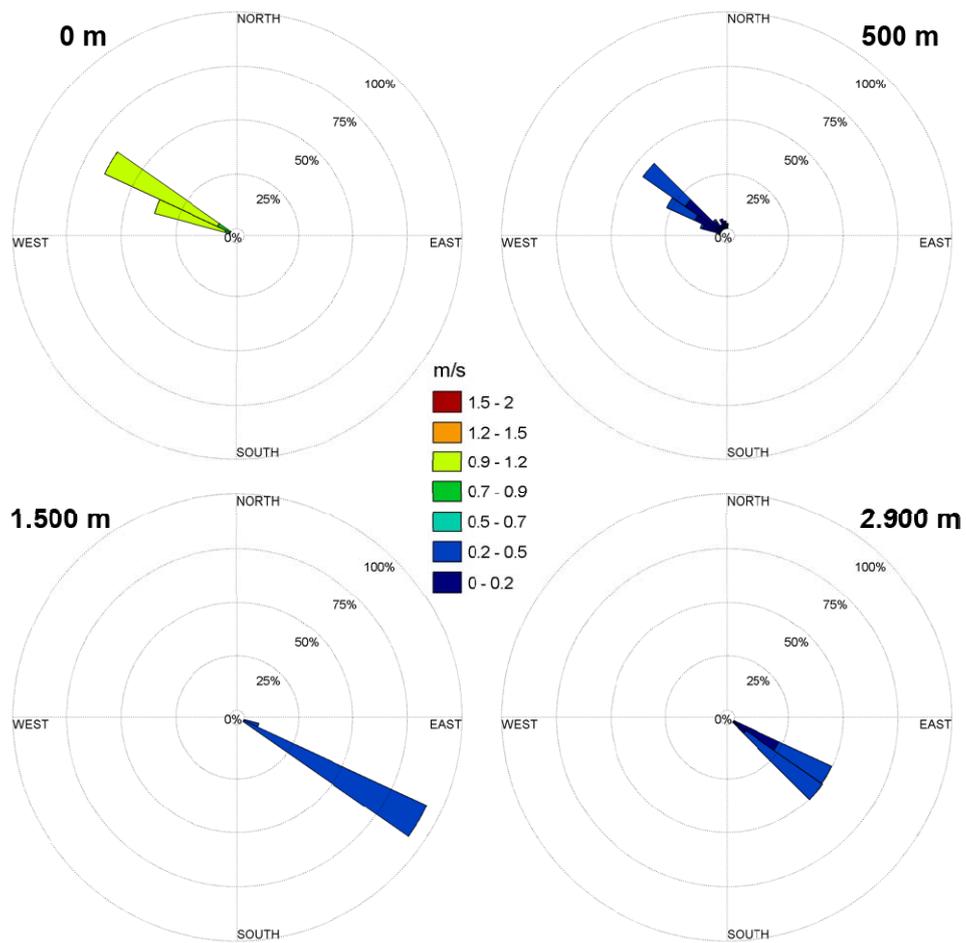


Figura 25: Histogramas direcionais de corrente nas profundidades de 0, 500, 1.500 e 2.900 metros, para o período representativo do cenário determinístico de distância máxima, do ponto de grade do ROMS mais próximo ao Poço Gamela.

A Tabela 29 apresenta os valores máximos de intensidade obtidos para ambos os cenários determinísticos.

Tabela 29: Intensidades máximas de corrente obtidas para os cenários determinísticos de espessura máxima e distância máxima.

Profundidade (m)	Intensidade Máxima (m/s)	
	Det. Esp. Máx.	Det. Dist. Máx.
0	1,84	1,16
500	0,32	0,28
1500	0,37	0,37
2.900	0,10	0,26

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para as pilhas de deposição e para as plumas de sólidos em suspensão para cada um desses cenários determinísticos.

### 3.2.1 Pilhas de Deposição

#### 3.2.1.1 Espessura Máxima

A seguir, serão apresentados os resultados para o caso determinístico que obteve o maior valor de espessura. A integração das seções sem e com *riser* são apresentadas na Figura 26 e na Figura 27, respectivamente.

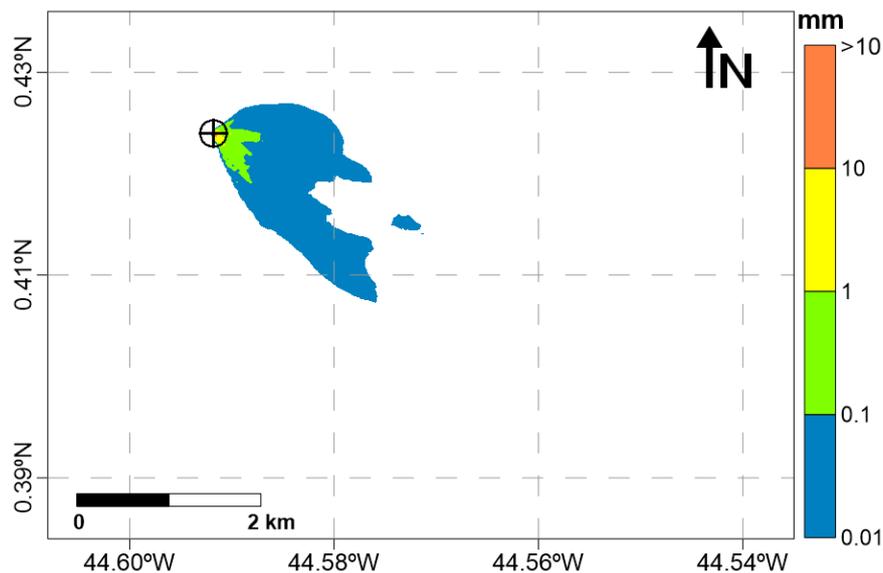


Figura 26: Pilha resultante da integração das seções sem *riser*, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – espessura máxima. (Datum SIRGAS 2000).

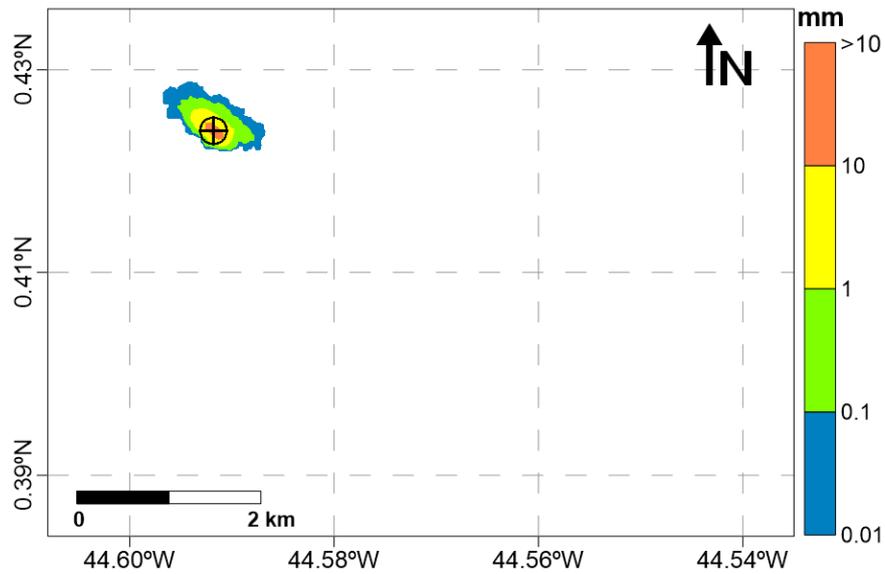


Figura 27: Pilha resultante da integração das seções com riser, considerando o limiar de 0,01 mm.  
Caso determinístico – espessura máxima. (Datum SIRGAS 2000).

A pilha resultante da integração de todos os descartes é apresentada a seguir, na Figura 28.

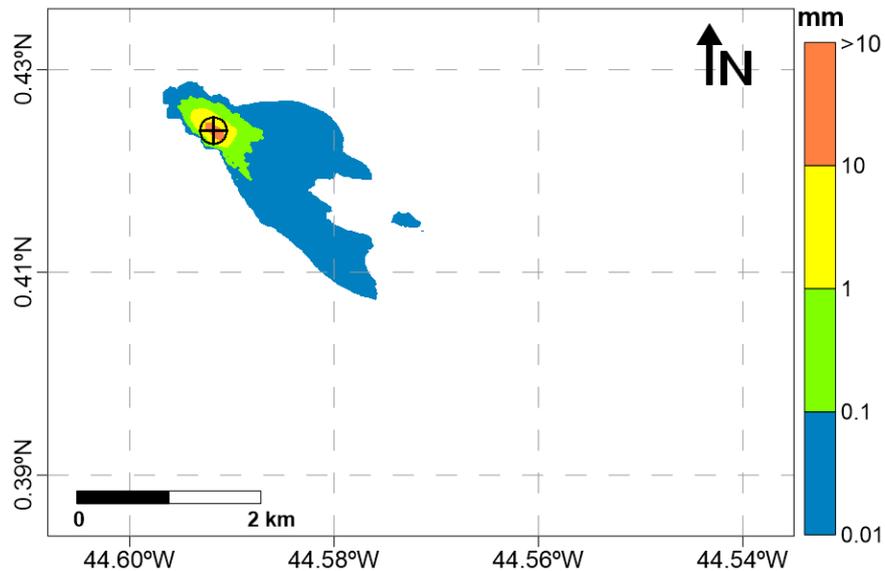


Figura 28: Pilha resultante da integração de todas as seções, considerando o limiar de 0,01 mm.  
Caso determinístico – espessura máxima. (Datum SIRGAS 2000).

A Tabela 30 apresenta um resumo dos resultados obtidos para este cenário.

Tabela 30: Espessura máxima, área e maior distância da fonte alcançada pelas pilhas de deposição, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – espessura máxima.

Descarte	Espessura Máxima (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Distância máx. da fonte (km)
Integração - seções sem <i>riser</i>	1.881,48	2,03	2,54
Integração - seções com <i>riser</i>	17,96	0,50	0,69
Integração - todas as seções	1.898,72	2,34	2,54

Para este caso determinístico, o acúmulo de material no fundo ocorre preferencialmente para sudeste – decorrente dos descartes das seções sem *riser* –, com acumulação em menor área para noroeste – decorrente dos descartes das seções com *riser*. Esta configuração está de acordo com o regime de correntes predominante para a região (Figura 24).

As seções sem *riser* são as responsáveis pelas maiores espessuras (1.881,48 mm), área (2,03 km<sup>2</sup>) e distância da fonte alcançada (2,54 km). É importante ressaltar que as seções com *riser* ocupam maiores áreas quando se compara limiares maiores que 1 mm.

Na Tabela 31, é apresentado um resumo da área encontrada acima de algumas espessuras determinadas na pilha de integração total.

Tabela 31: Resumo da área encontrada para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm), considerando a integração de todos os descartes. Caso determinístico – espessura máxima.

Espessura (mm)	Área (km <sup>2</sup> )
>= 0,01	2,34
>= 0,1	0,38
>= 1	0,13
>= 10	0,02

A espessura máxima alcançada pela integração de todos os descartes foi de 1.898,72 mm, ocupando áreas de 2,34 km<sup>2</sup> e atingindo 2,54 km do ponto de descarte, acima de 0,01 mm. Acima de 1 mm, a área impactada reduz significativamente para 0,13 km<sup>2</sup>.

### 3.2.1.2 Distância Máxima

A seguir, serão apresentados os resultados para o caso determinístico que obteve a maior distância em relação à fonte. A integração das seções sem e com *riser* são apresentadas na Figura 29 e na Figura 30, respectivamente.

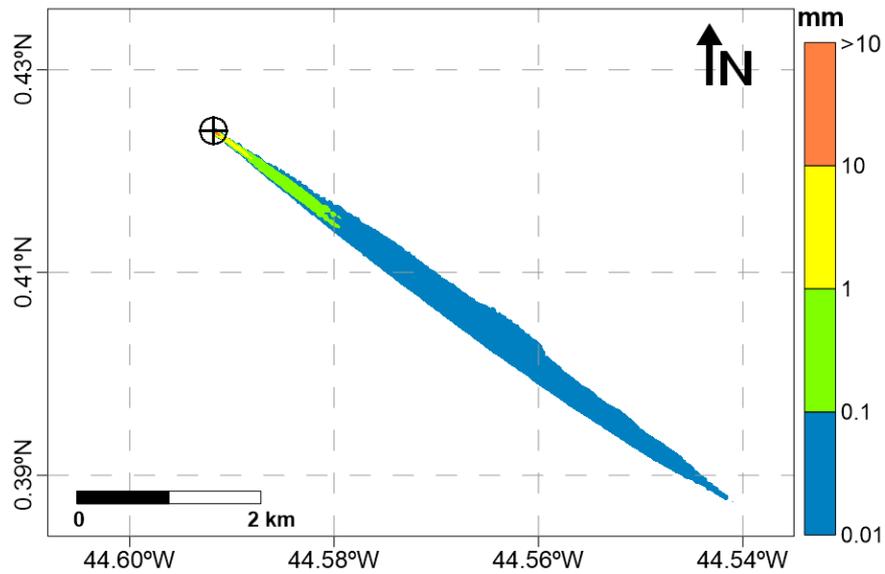


Figura 29: Pilha resultante da integração das seções sem *riser*, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – distância máxima. (*Datum* SIRGAS 2000).

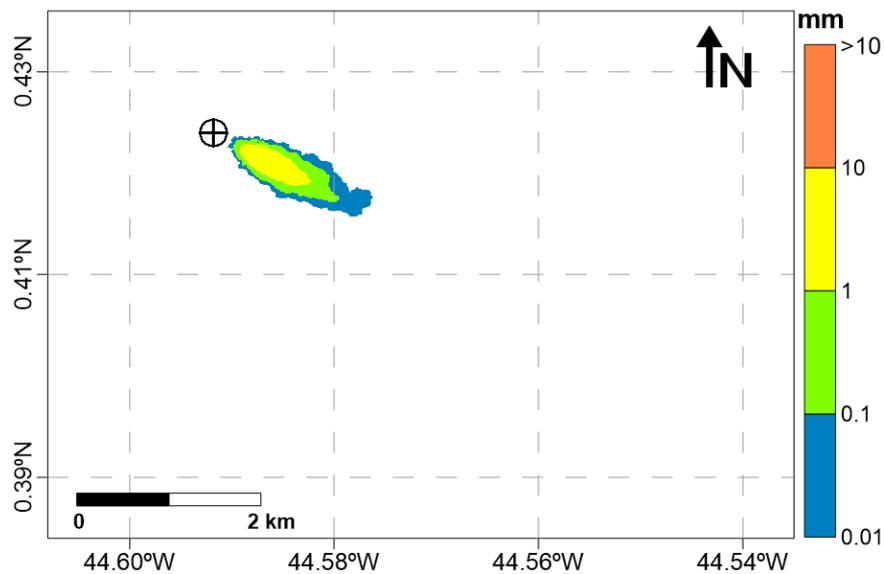


Figura 30: Pilha resultante da integração das seções com *riser*, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – distância máxima. (*Datum* SIRGAS 2000).

A pilha resultante da integração de todos os descartes é apresentada na Figura 31.

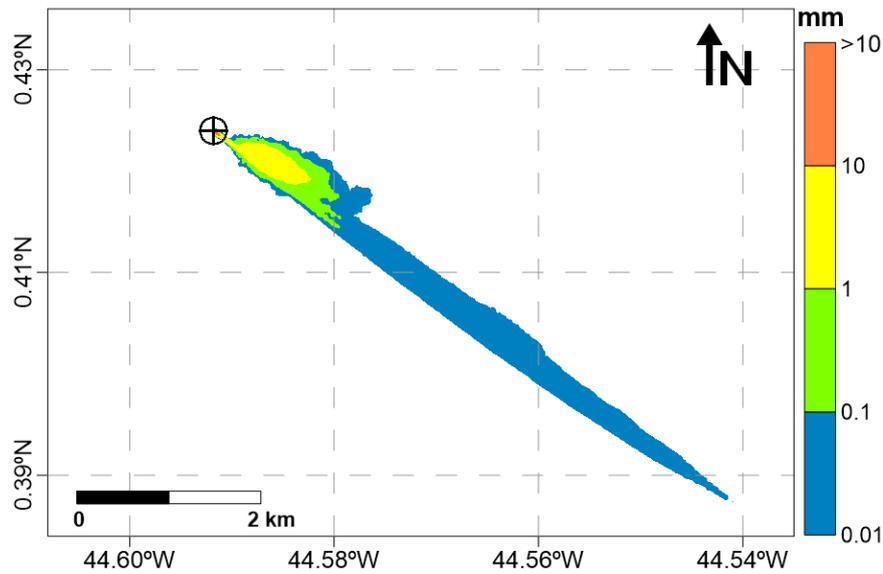


Figura 31: Pilha resultante da integração de todas as seções, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – distância máxima. (Datum SIRGAS 2000).

Um resumo dos resultados obtidos para este cenário é apresentado na Tabela 32.

Tabela 32: Espessura máxima, área e maior distância da fonte alcançada pelas pilhas de deposição, considerando o limiar de 0,01 mm. Caso determinístico – distância máxima.

Descarte	Espessura Máxima (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Distância máx. da fonte (km)
Integração - seções sem <i>riser</i>	1.827,83	1,72	6,95
Integração - seções com <i>riser</i>	8,98	0,66	1,88
Integração - todas as seções	1.827,83	2,21	6,95

Para este caso, todo o acúmulo de sólidos no fundo ocorreu para sudeste, considerando tanto os descartes de superfície como os de fundo. Pela análise das correntes predominantes para a região (Figura 25), nota-se o motivo desta diferença. As correntes de superfície são mais fracas neste cenário – não carregando tanto o material para noroeste –, em contrapartida, as correntes de fundo são mais intensas e a sua direção é majoritária para sudeste.

A espessura máxima (1.827,83 mm), distância máxima (6,95 km) e área (1,72 km<sup>2</sup>) são maiores para as seções sem *riser*.

Na Tabela 33, é apresentado um resumo da área encontrada acima de algumas espessuras determinadas na pilha de integração total.

Tabela 33: Resumo da área encontrada para cada limiar de espessura adotado (0,01 mm, 0,1 mm, 1 mm e 10 mm), considerando a integração de todos os descartes. Caso determinístico – distância máxima.

<b>Espessura (mm)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
>= 0,01	2,21
>= 0,1	0,49
>= 1	0,21
>= 10	0,003

A espessura máxima alcançada pela integração de todos os descartes foi de 1.827,83 mm, ocupando uma área de 2,21 km<sup>2</sup> e atingindo 6,95 km do ponto de descarte, considerando o limiar de 0,01 mm. Acima de 1 mm, a área impactada reduz significativamente para 0,21 km<sup>2</sup>.

## 3.2.2 Sólidos em Suspensão

### 3.2.2.1 Espessura Máxima

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam a concentração máxima de sólidos em suspensão, considerando todo o período de simulação. O mapa em planta é o mesmo em ambas as figuras, diferindo entre elas somente o perfil que foi extraído.

É importante ressaltar que esse resultado não corresponde a um instantâneo, mas sim à integração no tempo de todos os resultados. O objetivo desta análise é determinar a área impactada e quais foram as concentrações máximas e distâncias máximas da fonte obtidas durante toda a simulação.

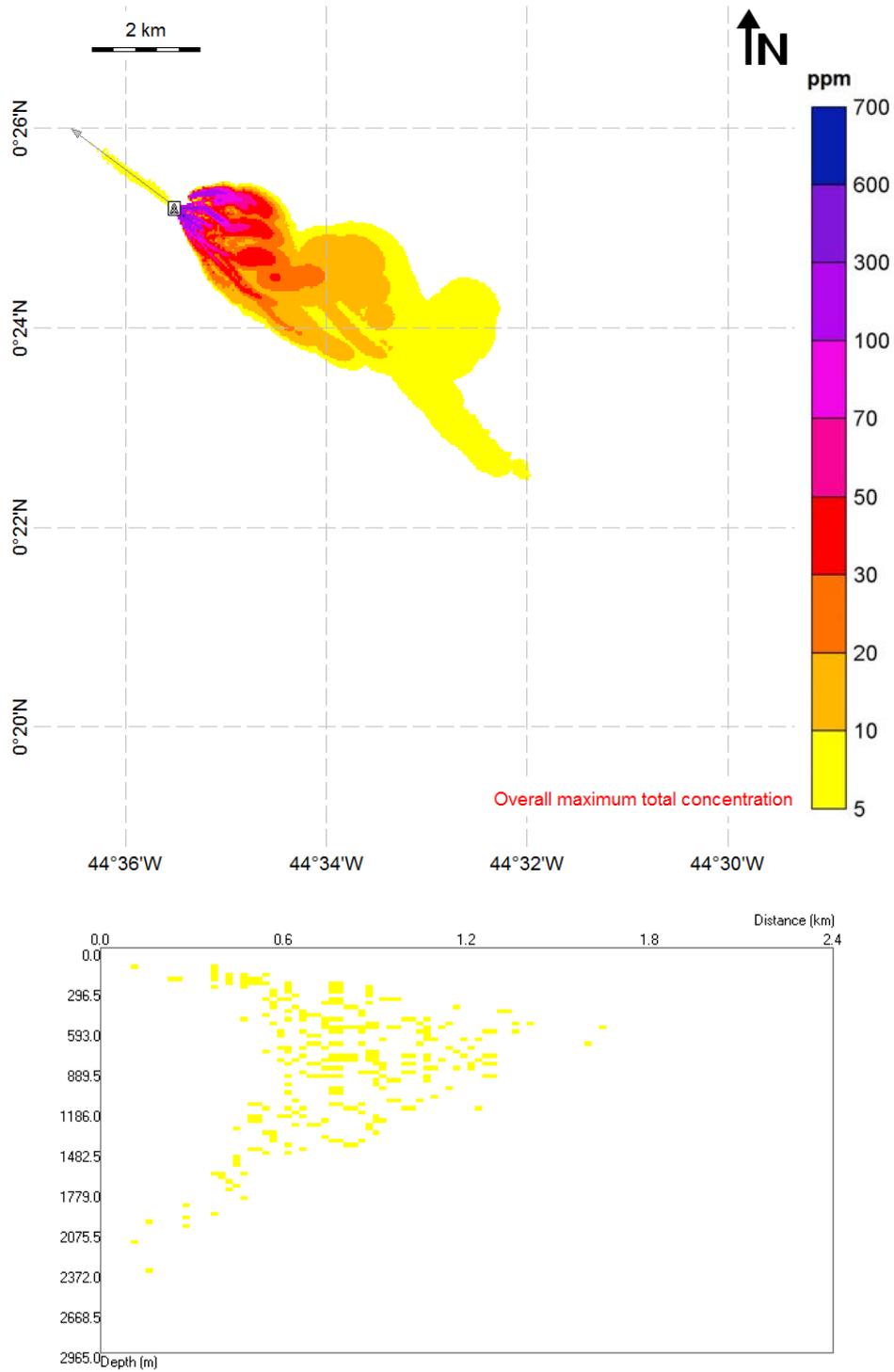


Figura 32: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil de 2,4 km com orientação SE-NW (painel inferior). Caso determinístico – espessura máxima. (Datum SIRGAS 2000).

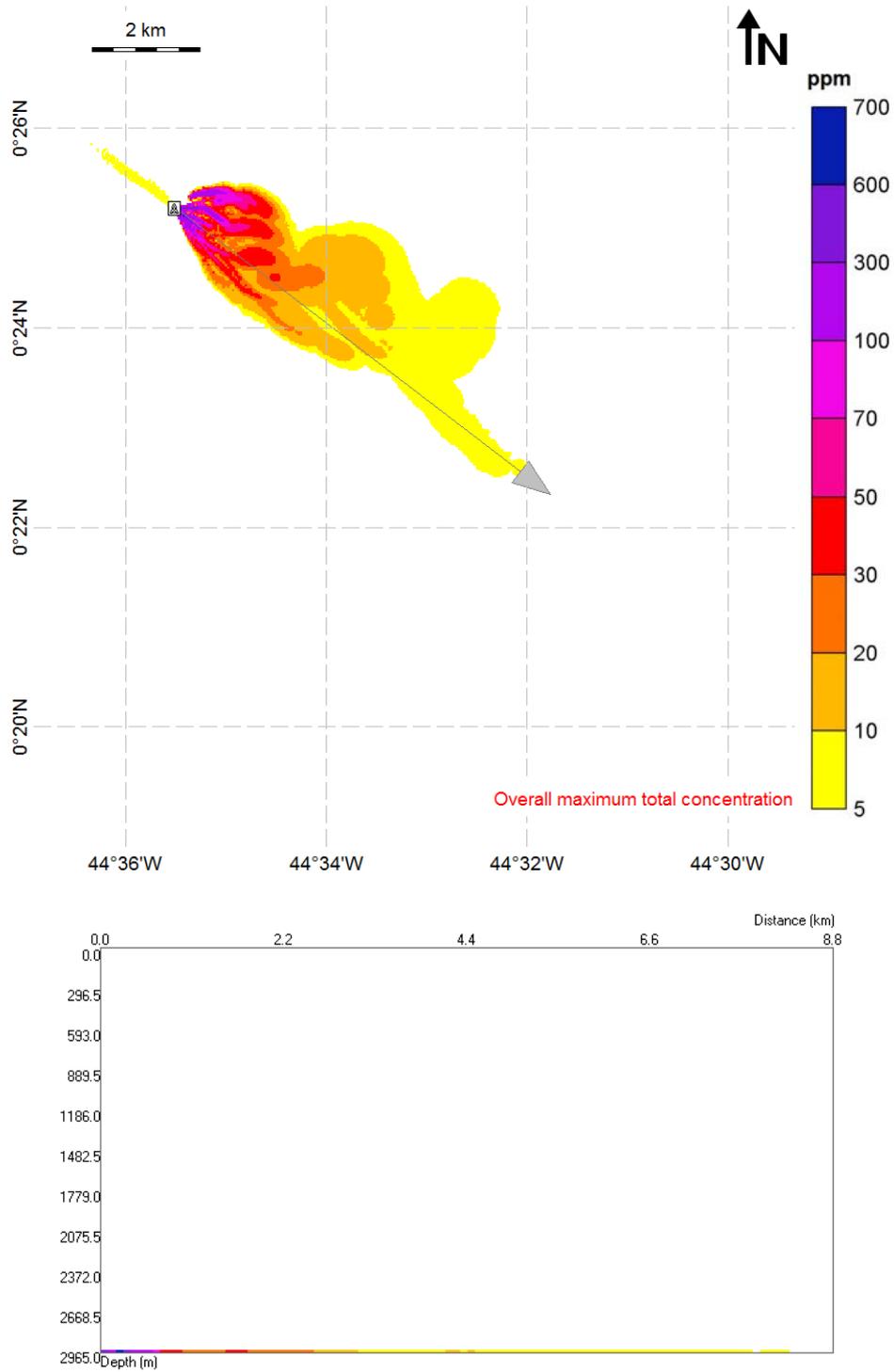


Figura 33: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil de 8,8 km com orientação NW-SE (painel inferior). Caso determinístico – espessura máxima. (Datum SIRGAS 2000).

Da Figura 34 à Figura 36, são apresentados exemplos da dispersão de sólidos na coluna d'água para determinados instantes após o início do descarte. O primeiro exemplo (1 dia após o início do descarte) corresponde a um descarte do fundo, com a pluma se dispersando para leste-sudeste. Já, no segundo exemplo (2 dias e 20 horas após o início do descarte) o descarte do fundo já terminou e o *riser* foi instalado, formando duas plumas distintas: uma a sudeste, descartada do fundo e já se dissipando no ambiente; e outra a noroeste, resultante do descarte de superfície. O último exemplo apresentado (4 dias e 20 horas após o início do descarte) mostra os sólidos para noroeste, descartados de superfície.

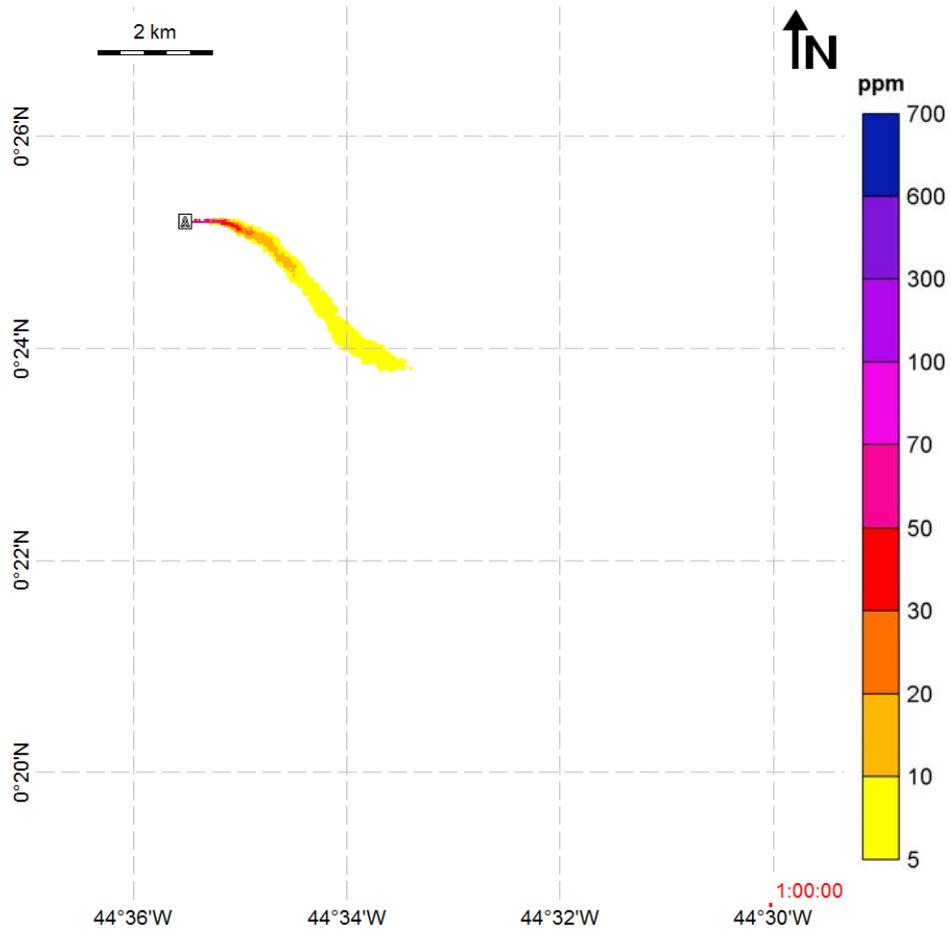


Figura 34: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 1 dia do início do descarte. Caso determinístico – espessura máxima. (Datum SIRGAS 2000).

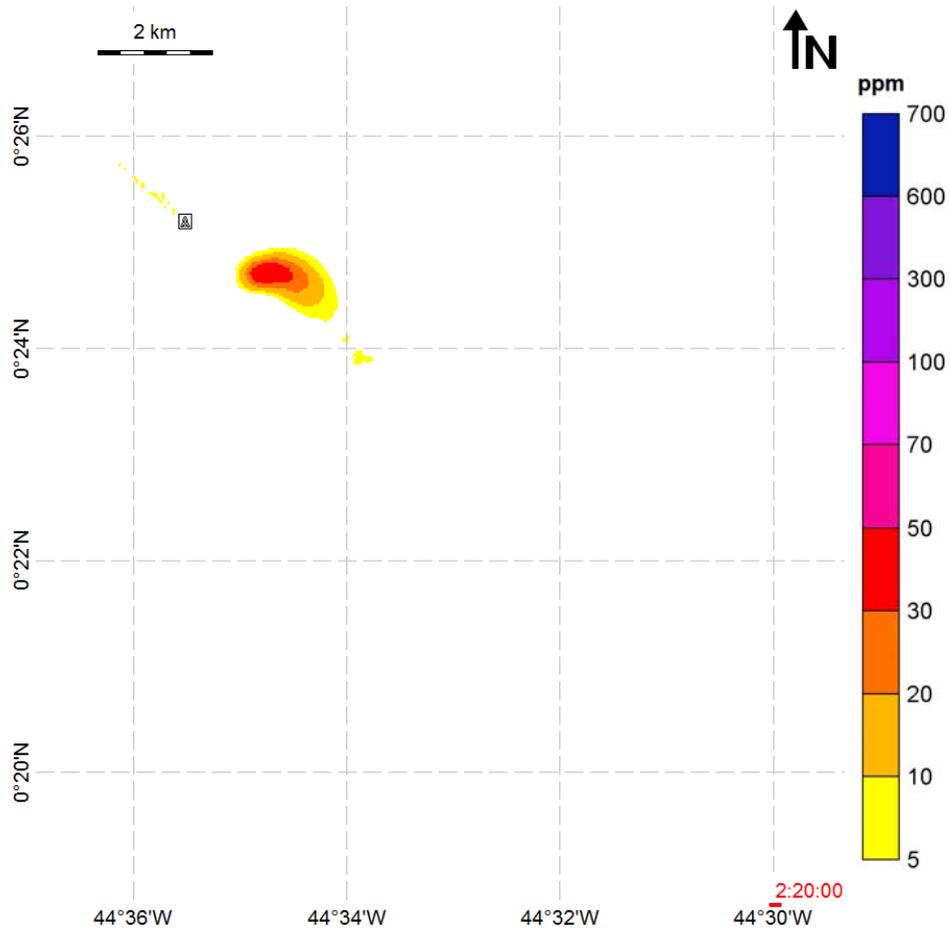


Figura 35: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 2 dias e 20 horas do início do descarte. Caso determinístico – espessura máxima. (Datum SIRGAS 2000).

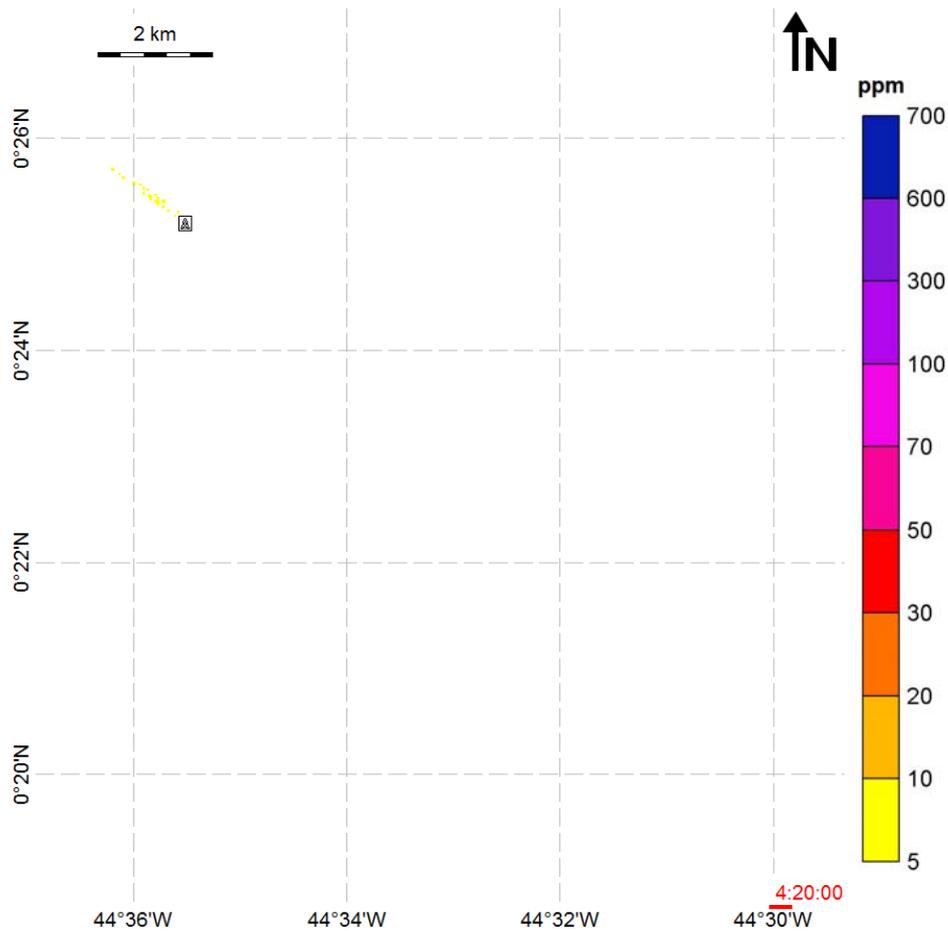


Figura 36: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 4 dias e 20 horas do início do descarte. Caso determinístico – espessura máxima. (Datum SIRGAS 2000).

A seguir, na Tabela 34, são apresentados os valores máximos de concentração de sólidos em suspensão, distância da fonte e tempo de permanência obtidos.

Tabela 34: Concentração máxima, distância máxima da fonte e tempo de permanência para as plumas de sólidos em suspensão. Caso determinístico – espessura máxima.

Parâmetros	Valores
Concentração Máxima (ppm)	616,5
Distância Máxima da Fonte (km)	8,23
Tempo de Permanência (h)	< 2

Como visto nos resultados, a maior parcela dos sólidos em suspensão está limitada ao fundo, já que esses são mais finos e de baixa densidade, o que diminui significativamente a sua velocidade de deposição e permite uma alta dispersão do material. Por sua vez, os sólidos descartados em superfície são mais densos que a água do mar e possuem uma granulometria mais grosseira, como o apresentado no item 2.2.2 (Velocidade e Tempo de Queda dos

Sólidos), se depositando rapidamente. Em menores profundidades, não são observadas concentrações superiores a 10 ppm.

A concentração máxima observada foi de 616,5 ppm e a pluma alcançou até 8,23 km do ponto de descarte. Após 2 h do término do descarte, já não são mais observadas concentrações acima do limiar monitorado.

A Tabela 35 apresenta as distâncias máximas alcançadas para algumas classes de concentração.

Tabela 35: Distâncias máximas alcançadas para alguns limiares de concentração. Caso determinístico – espessura máxima.

<b>Concentração (ppm)</b>	<b>Distância (km)</b>
>= 5	8,23
>= 10	4,77
>= 20	3,30
>= 30	2,34
>= 50	1,49
>= 70	1,23
>= 100	0,98
>= 300	0,41

### 3.2.2.2 Distância Máxima

A Figura 37 e a Figura 38 apresentam a concentração máxima de sólidos em suspensão, considerando todo o período de simulação. O mapa em planta é o mesmo em ambas as figuras, diferindo entre elas somente o perfil que foi extraído.

É importante ressaltar que esse resultado não corresponde a um instantâneo, mas sim à integração no tempo de todos os resultados. O objetivo desta análise é determinar a área impactada e quais foram as concentrações máximas e distâncias máximas da fonte obtidas durante toda a simulação.

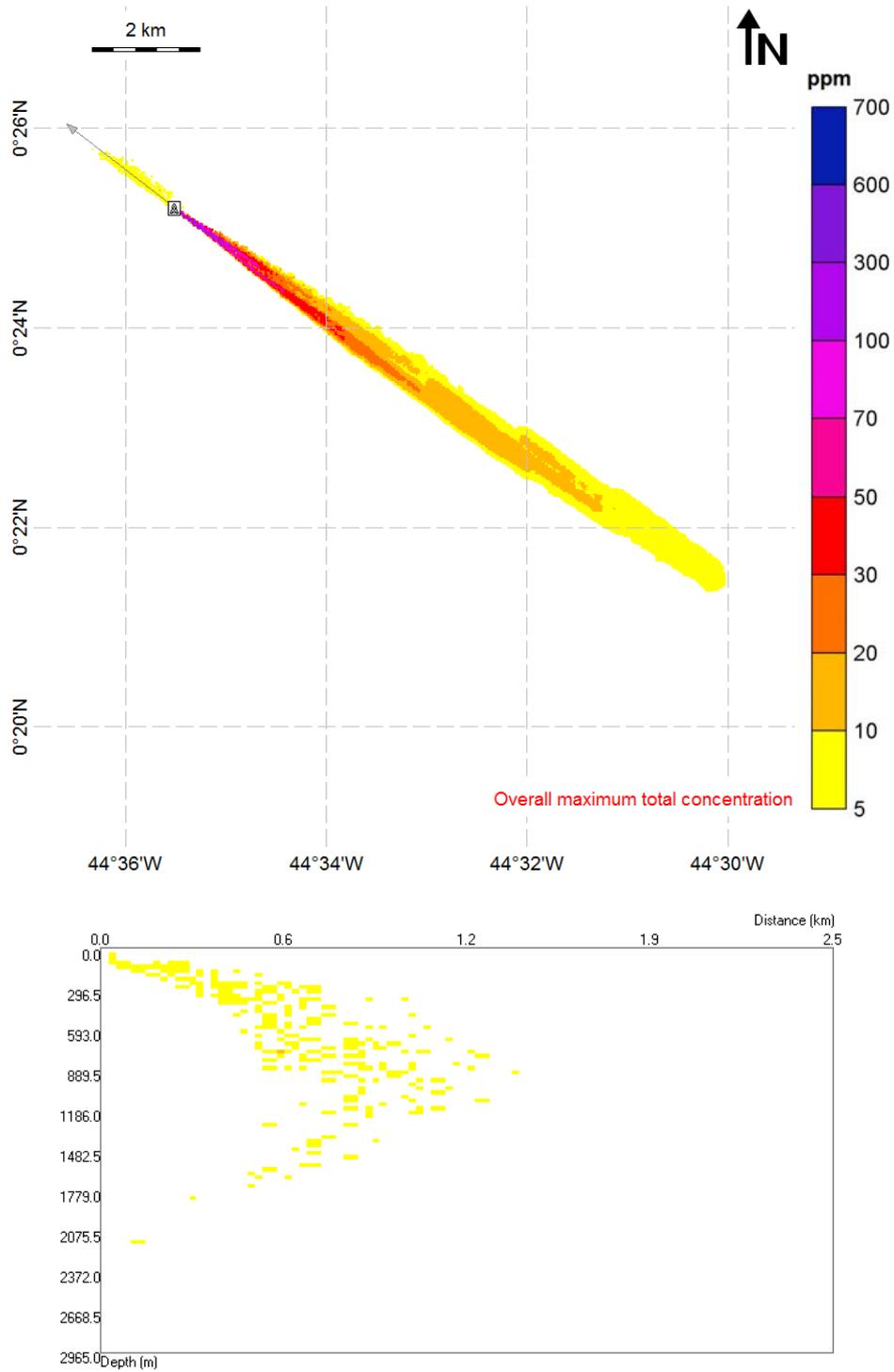


Figura 37: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil de 2,5 km com orientação SE-NW (painel inferior). Caso determinístico – distância máxima. (*Datum* SIRGAS 2000).

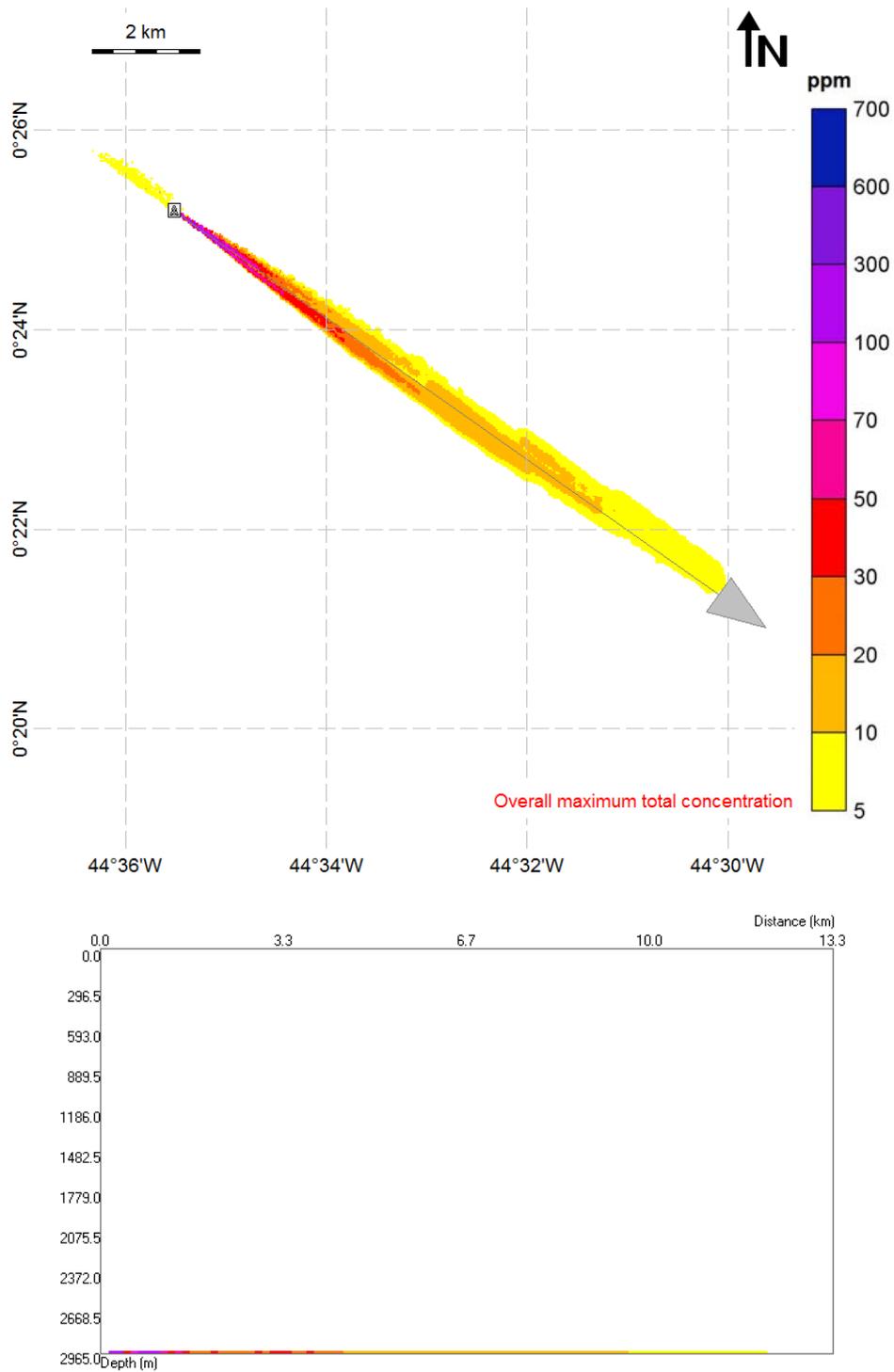


Figura 38: Concentração máxima de sólidos na coluna d'água considerando todo o período de simulação e todos os descartes: visão em planta (painel superior) e em perfil de 13,3 km com orientação NW- SE (painel inferior). Caso determinístico – distância máxima. (*Datum* SIRGAS 2000).

Da Figura 39 à Figura 41, são apresentados exemplos da dispersão de sólidos na coluna d'água para os mesmos instantes exibidos para o caso determinístico de espessura máxima.

Da mesma forma, o primeiro exemplo corresponde a um descarte do fundo, com a pluma se dispersando para sudeste. Após 2 dias e 20 h do início do descarte, o *riser* já foi instalado e o descarte ocorre de superfície, sendo este representado pela pluma a noroeste na Figura 40. Neste mesmo exemplo, é possível visualizar ainda resíduos dos sólidos descartados do fundo, que aparecem como uma pluma se dispersando para sudeste. O último exemplo retrata uma pluma para noroeste, descartada da superfície.

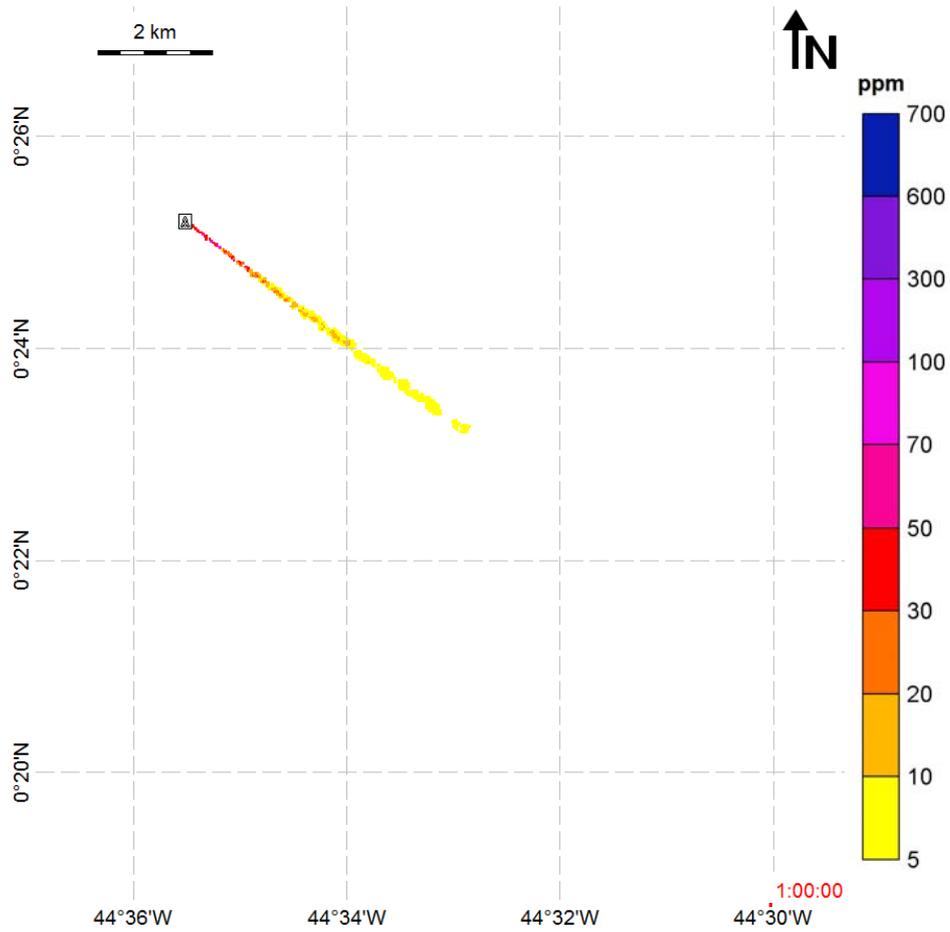


Figura 39: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 1 dia do início do descarte. Caso determinístico – distância máxima. (*Datum* SIRGAS 2000).

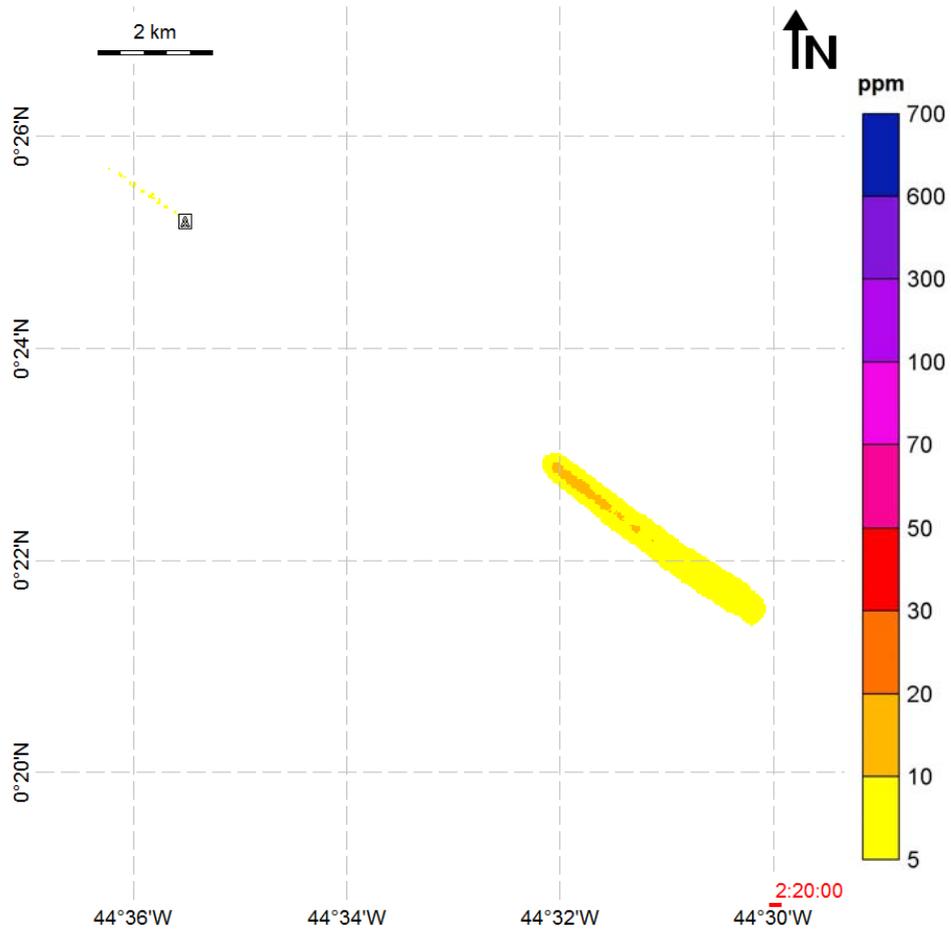


Figura 40: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 2 dias e 20 horas do início do descarte. Caso determinístico – distância máxima. (*Datum* SIRGAS 2000).

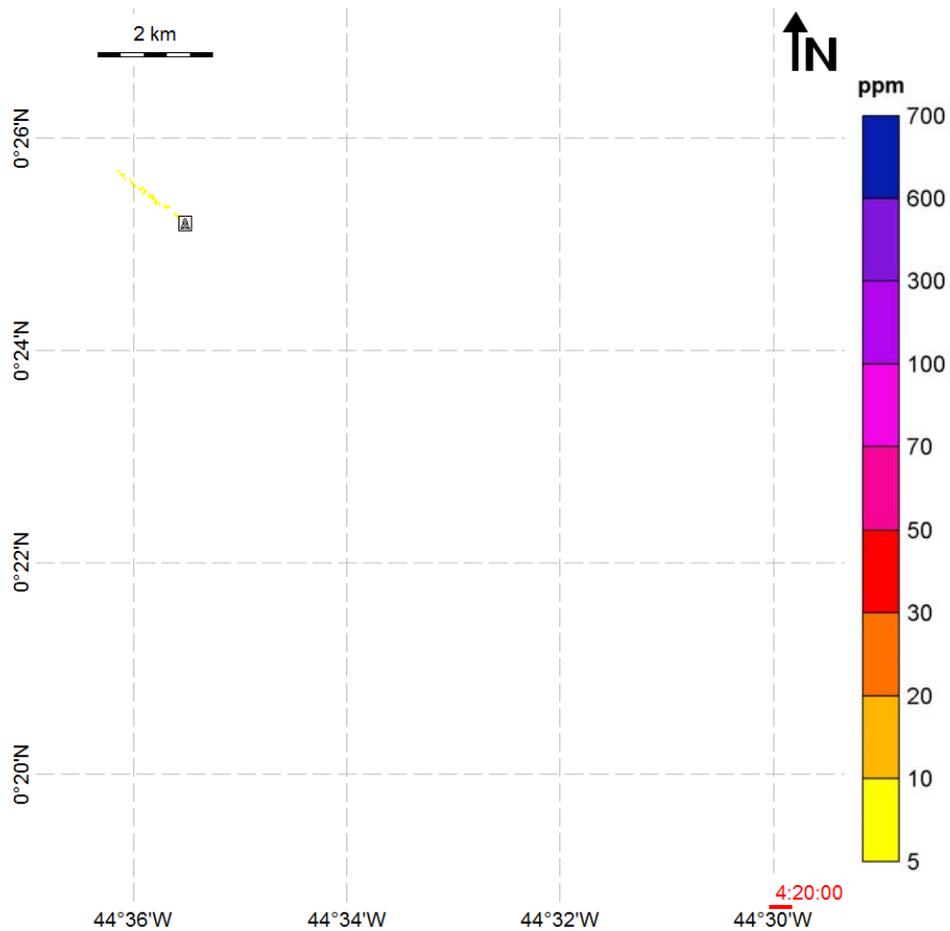


Figura 41: Visão em planta da concentração de sólidos na coluna d'água após 4 dias e 20 horas do início do descarte. Caso determinístico – distância máxima. (Datum SIRGAS 2000).

A seguir, na Tabela 36, são apresentados os valores máximos de concentração de sólidos em suspensão, distância da fonte e tempo de permanência obtidos.

Tabela 36: Concentração máxima, distância máxima da fonte e tempo de permanência para as plumas de sólidos em suspensão. Caso determinístico – distância máxima.

Parâmetros	Valores
Concentração Máxima (ppm)	320,7
Distância Máxima da Fonte (km)	9,98
Tempo de Permanência (h)	< 2

A exemplo do observado para os demais cenários, os resultados mostram que os descartes das seções sem *riser* são os principais responsáveis pelas elevadas concentrações de sólidos em suspensão, sendo estas limitadas ao fundo. Em menores profundidades, não são observadas concentrações superiores a 30 ppm.

A concentração máxima observada foi de 320,7 ppm, com a pluma alcançando até 9,98 km do ponto de descarte. Em comparação com o outro caso determinístico escolhido<sup>1</sup>, este caso obteve menores concentrações e maior distância em relação à fonte. Este fato indica que a escolha dos cenários determinísticos com base na espessura é adequada para a análise dos casos extremos de sólidos em suspensão: o caso de espessura máxima de depósitos no fundo obteve o maior valor de concentração, enquanto que o de distância máxima de depósitos no fundo obteve a maior distância.

Após 2 h do término do descarte, já não são mais observadas concentrações acima do limiar monitorado.

A Tabela 37 apresenta as distâncias máximas alcançadas para algumas classes de concentração.

Tabela 37: Distâncias máximas alcançadas para alguns limiares de concentração. Caso determinístico – distância máxima.

<b>Concentração (ppm)</b>	<b>Distância (km)</b>
>= 5	9,98
>= 10	9,84
>= 20	5,65
>= 30	3,94
>= 50	2,55
>= 70	2,23
>= 100	1,36
>= 300	0,07

<sup>1</sup> Cenário Determinístico – Espessura Máxima: Concentração máxima e distância máxima da fonte de 616,5 ppm e 8,23 km, respectivamente.

## 4. Conclusão

Simulações numéricas foram realizadas para determinar o comportamento físico do material a ser descartado durante a atividade de perfuração do Poço Gamela, localizado no Bloco PAMA-M-337 (Bacia Pará-Maranhão). Os resultados foram analisados de modo a identificar os potenciais impactos da atividade no assoalho oceânico e na coluna d'água.

O projeto de poço analisado prevê a perfuração em 5 (cinco) seções, com previsão de descarte de fluido excedente ao término da seção II. Nas duas primeiras seções (fases sem *riser*), o descarte ocorrerá próximo ao fundo, e o fluido de perfuração utilizado será de base água. Das seções III a V (fases com *riser*), o descarte ocorrerá próximo à superfície e o fluido será de base sintética.

As simulações foram realizadas a partir do modelo numérico DREAM (*Dose-related Risk and Exposure Assessment Model*), desenvolvido pela SINTEF para estimar o comportamento e o destino de diversos tipos de efluente (incluindo cascalhos e fluidos de perfuração) no ambiente marinho.

Foram realizadas simulações probabilísticas e determinísticas para a obtenção dos resultados. Para os resultados probabilísticos, foi considerado um ano de dados de correntes gerados pelo modelo hidrodinâmico ROMS e, para este período, foi feita a separação em verão (dezembro a maio) e inverno (junho a novembro). No total, foram utilizadas 67 simulações determinísticas distintas para o cálculo da probabilidade.

Dentre todos os resultados probabilísticos obtidos, foram selecionados aqueles em que foram obtidos maiores valores de espessura e distância da fonte dos depósitos no fundo, independente do cenário sazonal. Para estes dois casos determinísticos também foram apresentadas as concentrações dos sólidos em suspensão.

Para as simulações, foi necessária a criação de duas grades distintas para cada ponto, uma que abrangesse toda a área impactada pelas pilhas de deposição, considerando o limiar de 0,01 mm, e outra, com domínio maior e menor refinamento, para a apresentação dos resultados dos sólidos em suspensão, considerando o limiar de 5 ppm.

Os resultados probabilísticos obtidos mostraram diferenças entre os cenários sazonais escolhidos (verão e inverno). Durante o verão, a pilha de sólidos possui predominância de acúmulo para sudeste. No inverno, o acúmulo é também preferencial para sudeste, mas a distância alcançada é menor (5,67 km, em comparação com o obtido no verão, 6,95 km), e há ainda uma pilha de deposição mais significativa para noroeste. Nota-se que a porção de sólidos acumulada a sudeste coincide com as seções descartadas do fundo (sem *riser*) e que a porção a noroeste equivale às seções descartadas da superfície (com *riser*).

Resumidamente, para os resultados probabilísticos, o inverno (junho a novembro) foi o cenário que apresentou a maior espessura (1.898,72 mm), mas a maior distância da fonte (6,95 km) foi durante o verão (dezembro a maio). Para o verão, é prevista uma área de 1,86 km<sup>2</sup> com probabilidade de ocorrência acima de 50%, para o limiar de 0,01 mm de espessura. Essa área é de 1,73 km<sup>2</sup> para o inverno. Esses valores passam a 0,13 km<sup>2</sup> e 0,11 km<sup>2</sup>, respectivamente, considerando o limiar de 1 mm.

Pela análise dos casos determinísticos selecionados, verificou-se que as seções descartadas da superfície (com *riser*) são as que se depositam mais rapidamente (item 2.2.2), por conta das maiores densidades do fluido aderido e pela presença de classes granulométricas mais grosseiras em sua composição.

Analisando os resultados dos sólidos em suspensão obtidos para os dois casos determinísticos, nota-se que, seguindo a tendência das correntes, há predominância de concentrações acima de 5 ppm para sudeste, com uma ocorrência limitada e de baixas concentrações para noroeste. Dessa forma, nota-se que as seções descartadas no fundo são as que mais contribuem para os resultados de sólidos em suspensão acima de 5 ppm. A concentração máxima obtida foi de 616,5 ppm e a distância máxima foi de 9,98 km.

A escolha dos cenários determinísticos para os casos extremos de sólidos em suspensão, com base na espessura, foi comprovada com os resultados, uma vez que o caso de espessura máxima de depósitos no fundo obteve o maior valor de concentração, enquanto que o de distância máxima de depósitos no fundo obteve a maior distância.

Ressalta-se que 2 h após o término dos descartes, já não são mais observadas concentrações na coluna d'água acima do limiar monitorado, o que indica que as concentrações são rapidamente dispersadas no ambiente.

A partir da análise de todos os resultados apresentados, conclui-se que os resultados probabilísticos gerados deram maior robustez à modelagem, ao delimitar as áreas com maior probabilidade de serem impactadas. A escolha de cenários extremos para estimativa da área impactada é válida, mas limita a análise dos resultados a situações específicas com baixa probabilidade de ocorrência, tornando imperativo o emprego de interpretações dos resultados de forma conservadora.

## 5. Bibliografia

- BELLCHAMBERS, L.M. & A.M.M. RICHARDSON, 1995. The effect of substrate disturbance and burial depth on the venerid clam, *Katelysis scalarina* (Lamarck, 1818). *J. Shellfish Res.* 14, 41-44.
- BRANDSMA, M.; SMITH, J. 1999. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model - Report and User Guide. In: Relatório EPR.29PR.99. Production Operations Division. Exxon Production Research Company. Houston, Texas.
- BRANDSMA, M.G. 1993. Computer Simulations of Oily Cuttings Discharges in the North Sea. Volume 1 & 2 Project Report, Final Report Dated June 1993.
- CHANDRASEKARA, W.U. & C.L.J FRID, 1998. A laboratory assessment of the survival and vertical movement of two gastropod species, *Hydrobia ulvae* (Pennant) and *Littorina littorea* Linnaeus), after burial in sediment. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 221: 1991-207.
- DAMES; MOORE. Drilling Fluid Dispersion and Biological Effects Study for the Lower Cook Inlet C.O.S.T. Well. In: Report prepared for Atlantic Richfield Company, Volume 102, Record 946 of USEPA Rulemaking Record for the Offshore Effluent Limitations Guidelines, 1978.
- HOLTHAUS, K.I.E., J.E. TAMIS, M.G.D. SMIT, R.G. JAK, 2003. SSD approach applied to three types of Sediment Disturbances related to Drilling Discharges. TNO Report DRAFT November 2003.
- JOHANSEN, Ø.; DURGUT, I. Implementation of the near-field module in the ERMS model. In: ERMS Report, v.77, n.23. 2006.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R. The NCEP /NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society.* v. 77, p. 437-470. 1996.
- KISTLER, R.; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J. The NCEP-NCAR 50 Year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society,* v. 82, pp. 247-267. 2001.
- KJEILEN-EILERTSEN, G.; TRANNUM, H.; JAK, R. G.; SMIT, M. G. D.; NEFF, J.; DURELL, G. Literature report on burial: derivation of PNEC as componente in the MEMW model tool. In: ERMS Report no. 9B. 2004.
- KOH, R. C. Y.; CHANG, Y. 1973. Mathematical Model for Barge Ocean Disposal of Wastes. In: Relatório EPA-6602-73-029, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon.

- KRANZ, P.M. The anastrophic burial of bivalves and its paleoecological significance. *Journal of Geology*, v. 82, p. 237-265. 1974.
- MAURER, D.; KECK, R.T.; TINSMAN, J.C.; LEATHEM, W.A. Vertical migration and mortality of benthos in dredged material. Part I: Mollusca. *Mar. Environ. Res.*, v. 4, p. 299-319. 1980.
- MAURER, D.; KECK, R.T.; TINSMAN, J.C.; LEATHEM, W.A. Vertical migration and mortality of benthos in dredged material: Part II: Crustacea. *Mar. Environ. Res.*, v. 5, p. 301-317. 1981.
- O'REILLY, J.E., SAUER, T.C., AYERS, R.C. JR., BRANDSMA, M.G., MEEK, R. 1989. Field Verification of the OOC Mud Discharge Model. In: *Drilling Fluids*. F.R. Engelhart, J.P. Ray, A.H. Gillam, Eds., Elsevier Applied Science. Nova Iorque. Pp 647-665.
- REED, M.; HETLAND, B. DREAM: a Dose-Related Exposure Assessment Model Technical Description of Physical-Chemical Fate Components. In: *SPE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEALTH, SAFETY AND ENVIRONMENT IN OIL AND GAS EXPLORATION AND PRODUCTION*. Kuala Lumpur, Malaysia. 2002.
- RYE, H.; REED, M.; DURGUT, I.; DITLEVSEN, M.K. Documentation report for the revised DREAM model. In: *ERMS Report nº.18*. 2006.
- RYE, H.; REED, M.; FROST, T.; SMIT, M.; DURGUT, I.; JOHANSEN, O.; DITLEVSEN, M. Development of a numerical model for calculating exposure to toxic and nontoxic stressors in the water column and sediment from drilling discharges. *Integrated Environmental Assessment and Management*, v. 4, n. 2, pp. 194-203. 2008.
- SMIT, M. G. D.; HOLTHAUS, K. I. E.; KAAG, N. B. H. M.; JAK, R. G. The derivation of a PNEC-water for weighting agents in drilling mud. *EMRS Report no. 6*. 2006.
- TOLDO, E. E. JR.; AYOUP-ZOUAIN, R. N. *MAPEM – Monitoramento Ambiental em Atividades de Perfuração Exploratória Marítima, Águas Profundas*, Publicação CECO-IG-UFRGS, Porto Alegre. 2004.