



RELATÓRIO TÉCNICO [REV. 00]

**MODELAGEM DE MATERIAL PARTICULADO
BM-PAMA-16**

/poço TAPEREBÁ 01

Preparado para:
HABTEC Engenharia Ambiental

Preparado por:
Bruna Cerrone
Natalia Gomes

Revisado por:
Francisco dos Santos

17 de março de 2009

PROOCEANO

AV. RIO BRANCO, 311 / 1224 CENTRO

CEP 20.0040-009 RIO DE JANEIRO RJ

TEL | FAX +55 21 2532-5666

WWW.PROOCEANO.COM.BR

RELATÓRIO TÉCNICO [REV.00]

MODELAGEM DE MATERIAL PARTICULADO

/BM-PAMA-16 – poço TAPEREBÁ 01

Preparado para:
HABTEC Engenharia Ambiental

Preparado por:
Bruna Cerrone
Natalia Gomes

Revisado por:
Francisco dos Santos

17 de março de 2009

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO.....	3
II. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE.....	3
III. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO	3
III.1. Corrente, Temperatura e Salinidade.	3
III.2. Onda.....	3
IV. ESTRATÉGIA DE MODELAGEM	3
IV.1. Modelo Adotado.....	3
IV.2. Descrição das Grades	3
IV.4. Construção das Matrizes de Sólidos.....	3
IV.5. Tempo de Descarte.....	3
<i>IV.5.1. Pilhas de Deposição.....</i>	<i>3</i>
<i>IV.5.2. Plumas de Sólidos em Suspensão.....</i>	<i>3</i>
V. RESULTADOS.....	3
V.1. Pilhas de Deposição.....	3
<i>V.1.1. Grade 1</i>	<i>3</i>
<i>V.1.2. Grade 2.....</i>	<i>3</i>
V.2. Plumas de Sólidos em Suspensão	3
VI. CONCLUSÕES.....	3
VII. BIBLIOGRAFIA.....	3

I. INTRODUÇÃO

Este relatório estuda, através da modelagem numérica, o destino físico do material a ser descartado pela atividade de perfuração do poço Tapereba 01, no Bloco BM-PAMA-16, Bacia do Pará-Maranhão. O modelo e método usados visam atender aos requisitos da Coordenadoria Geral de Petróleo e Gás (CGPEG/IBAMA) para a atividade em questão.

II. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE

O poço em questão situa-se à $0^{\circ}27'9,9''S$ e $44^{\circ}6'13,7''W$ sobre a plataforma continental a aproximadamente 230 Km da cidade de São Luís. A lâmina d'água no ponto de operação é de 71 m (Figura 1).

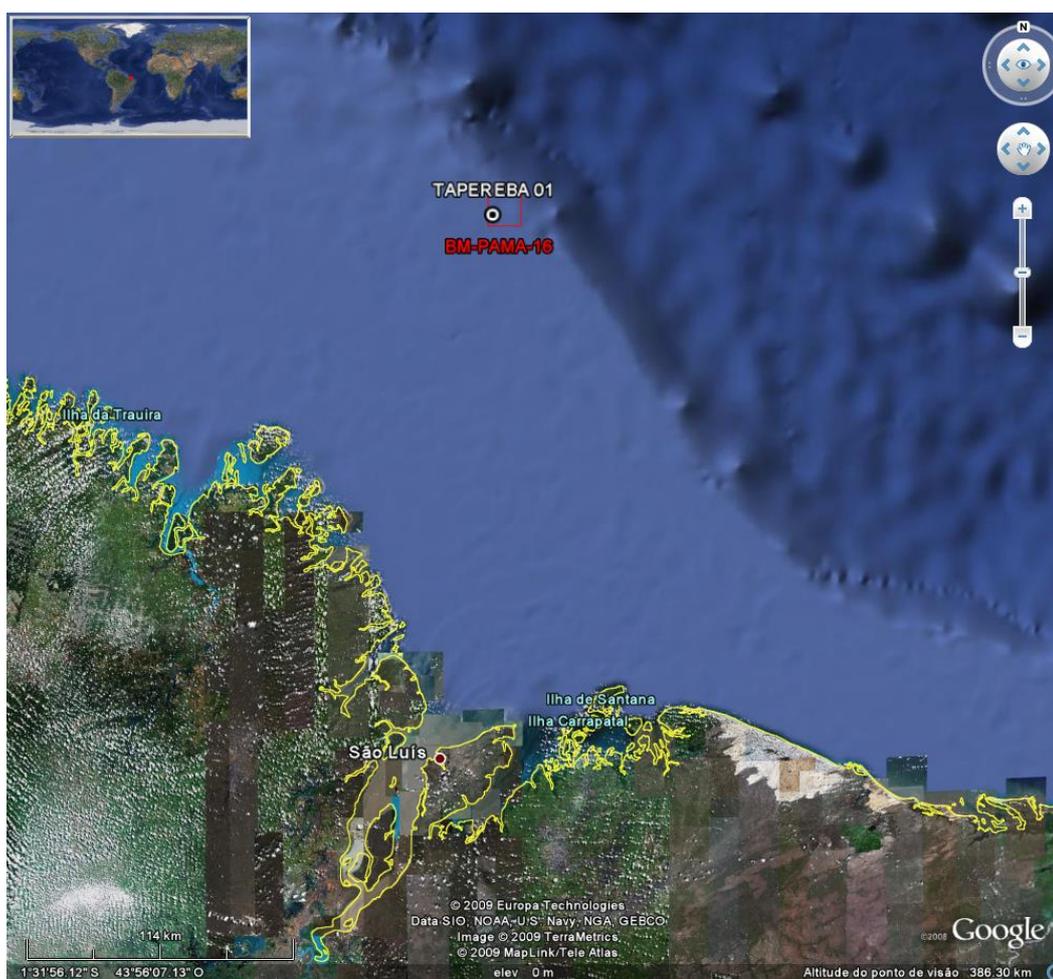


Figura 1: Localização do poço Tapereba 01 no bloco BM-PAMA-16 - Bacia do Pará-Maranhão.

A perfuração ocorrerá em cinco seções. Nas duas primeiras, onde o descarte ocorre a aproximadamente 7 m do fundo (a cerca de 64 m da superfície), será usado um fluido de base água. Terminadas estas etapas, o *riser* é instalado e iniciam-se as demais seções, cujos fluidos também serão de base água.

Durante toda a operação, apenas ao final da seção 5 é previsto o descarte de fluido excedente. Este descarte ocorrerá durante 4 horas a uma vazão de aproximadamente 69,9 m³/h.

Os volumes e vazões descartados em cada seção são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Descartes previstos para o poço Tapereba 01 no bloco BM-PAMA-16.

Parâmetros	unidade	seção 1	seção 2	seção 3	seção 4	seção 5
profundidade de descarte	m	64,00	64,00	10,00	10,00	10,00
orientação vertical do tubo de descarga	°	-90	-90	90	90	90
cascalho e fluido aderido						
volume de cascalho	m ³	81,27	156,20	198,35	45,30	32,42
volume de fluido aderido	m ³	219,91	746,79	297,53	67,94	48,63
duração do descarte	h	10,00	38,00	171,00	74,00	110,00
volume total descartado	m ³	301,18	902,99	495,88	113,24	81,04
vazão	m ³ /h	30,12	23,76	2,90	1,53	0,74
base do fluido	-	aquosa	aquosa	aquosa	aquosa	aquosa
fluido excedente						
volume de fluido excedente	m ³	-	-	-	-	279,77
duração do descarte	h	-	-	-	-	4,00
vazão	m ³ /h	-	-	-	-	69,94
base do fluido	-	-	-	-	-	aquosa

III. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO

III.1. Corrente, Temperatura e Salinidade.

Neste estudo, os dados de temperatura, salinidade e corrente são resultantes de um experimento de longo termo com o modelo *HYCOM* (Hybrid Coordinate Model).

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

Com o auxílio desses três sistemas de coordenadas, o modelo pode conservar as características das massas d'água por longos períodos de tempo em regiões oceânicas (coordenada isopicnal), obter alta resolução na camada de mistura ou em regiões com pouca estratificação (coordenada *z*), e resolver melhor a topografia de fundo em áreas costeiras ou sobre a plataforma continental (coordenada sigma).

Desta forma, o *HYCOM* é basicamente um modelo em camadas isopicnais, que pode realizar uma transição suave para os sistemas de coordenadas *z* e sigma, próximo aos contornos superiores e inferiores, ou quando a resolução vertical é inadequada (GABIOUX, 2008). A combinação das vantagens dos diferentes sistemas de coordenadas permite simular, de forma otimizada, as características da circulação oceânica e costeira, sendo atribuída ao usuário a determinação das zonas de transição entre os sistemas de coordenadas (CHASSIGNET et al., 2003).

Para esta caracterização foram utilizados dados disponíveis do *HYCOM Consortium*. Os resultados do hindcast¹ que contempla a região da plataforma encontram-se disponíveis para utilização na página do projeto (<http://hycom.rsmas.miami.edu/dataserver/>). Os dados usados possuem uma resolução espacial de 1/12º e uma série temporal de janeiro de 2003 a julho de 2006. Os resultados obtidos pelo *HYCOM* se ajustam às principais características regionais descritas na literatura, o que valida a sua utilização neste estudo.

¹ O termo "hindcast" é usado para descrever previsões numéricas realizadas para tempos pretéritos. É uma tentativa de reconstituição das condições ambientais em um determinado período.

Os perfis típicos de corrente, temperatura e salinidade utilizados como forçantes na simulação foram obtidos utilizando a técnica de análise de funções ortogonais empíricas (EOF), usada no auxílio à compreensão da variabilidade de fenômenos oceanográficos através de séries temporais.

A análise de EOF oferece, associada a cada modo normal estatístico, uma descrição resumida da variabilidade espacial e temporal da dinâmica. Trata-se da decomposição dos dados em modos normais, onde é possível obter a variação temporal de cada um destes modos e também a quantificação da representatividade de cada modo dentro da variância total dos dados.

Os perfis sintéticos construídos são resultados do primeiro modo da EOF, que representa a maior parte da variância. Quanto à variação temporal, optou-se por utilizar o valor modal deste dado, de forma a representar a situação mais freqüente.

O perfil de corrente obtido a partir desta análise é apresentado na Figura 2. Observa-se que nas primeiras camadas, a corrente apresenta sentido, preferencialmente, W e intensidade em torno de 0,42 m/s. A partir da profundidade de 30 m até o final da coluna d'água, a corrente começa a fluir em direção ao NW, com intensidades em torno de 0,3 m/s.

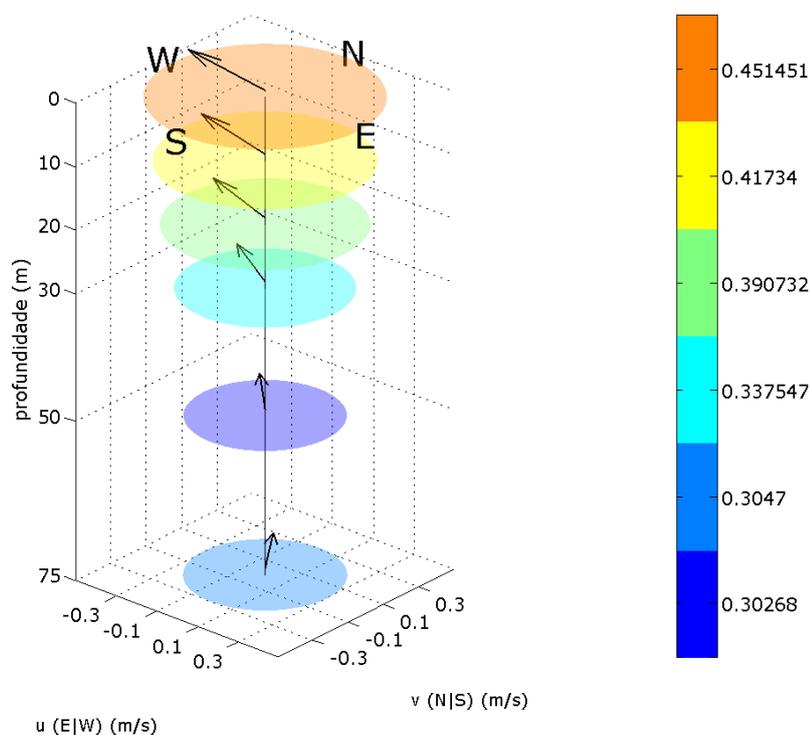


Figura 2: Perfil de correntes utilizado para as simulações. Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado.

Os valores das componentes da corrente utilizados nas simulações, resultantes da análise EOF, podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2: Componentes u e v , e intensidade da corrente.

profundidade (m)	u (m/s)	v (m/s)	intensidade (m/s)
0,0	-0,4451	0,0757	0,4515
10,0	-0,4041	0,1045	0,4173
20,0	-0,3687	0,1294	0,3907
30,0	-0,2891	0,1742	0,3375
50,0	-0,2127	0,2153	0,3027
75,0	-0,1759	0,2488	0,3047

Os dados de temperatura e salinidade utilizados nas simulações são apresentados na Figura 3 e Tabela 3.

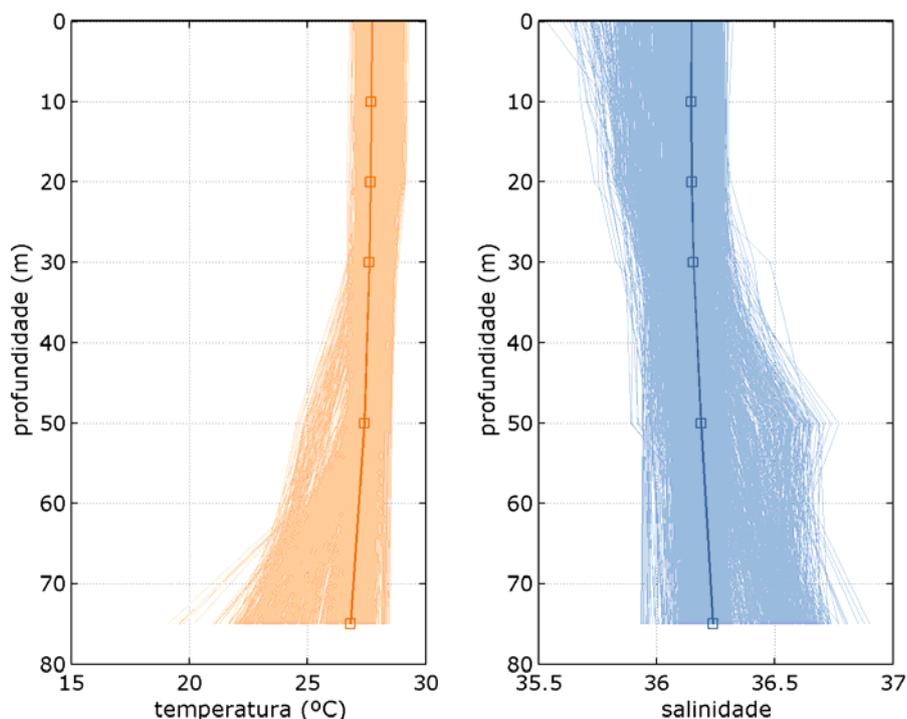


Figura 3: Perfis típicos de temperatura e salinidade e os perfis sintéticos resultantes do primeiro modo da EOF.

Tabela 3: Dados de temperatura e salinidade com a profundidade.

profundidade (m)	temperatura (°C)	salinidade
0,0	27,729	36,146
10,0	27,687	36,146
20,0	27,667	36,148
30,0	27,612	36,156
50,0	27,396	36,187
75,0	26,812	36,238

III.2. Onda

O Bloco BM-PAMA-16 está localizado na região equatorial da plataforma continental externa norte-nordeste da América do Sul, cuja direção forma um ângulo menor do que 45° com o Equador. Por esta razão, ela é influenciada por ondas de longas pistas no quadrante norte e leste. Ondas originadas por ventos de tempestade de inverno extra-tropicais do Atlântico Norte, que ocorrem principalmente entre dezembro e março, atingem

a área do Bloco na forma de *swell*. Segundo Inocentinni *et. al.* (2000) na região Norte do Brasil, do Amapá até aproximadamente Natal no Rio Grande do Norte, as ondas incidentes são formadas pelos alísios e apresentam altura abaixo de 1-1,5 m em mar aberto. Eventualmente, chegam ondas com período de 15-20 s provenientes de tempestades formadas no extremo norte do Atlântico.

Coincidentemente, durante o inverno do Hemisfério Norte a Convergência Intertropical cruza a área em direção ao sul, expondo a região às ondas geradas pelos alísios de nordeste.

Para a caracterização da agitação marítima na região adjacente ao bloco foram utilizados os dados disponíveis no BNDO para a área, no período de 1963 a 1999.

Na Figura 4, Figura 5 e Figura 6 são apresentados os histogramas de altura e período de ondas elaborados com os dados do BNDO. Em cada figura é também apresentado o número de dados amostrados em cada mês.

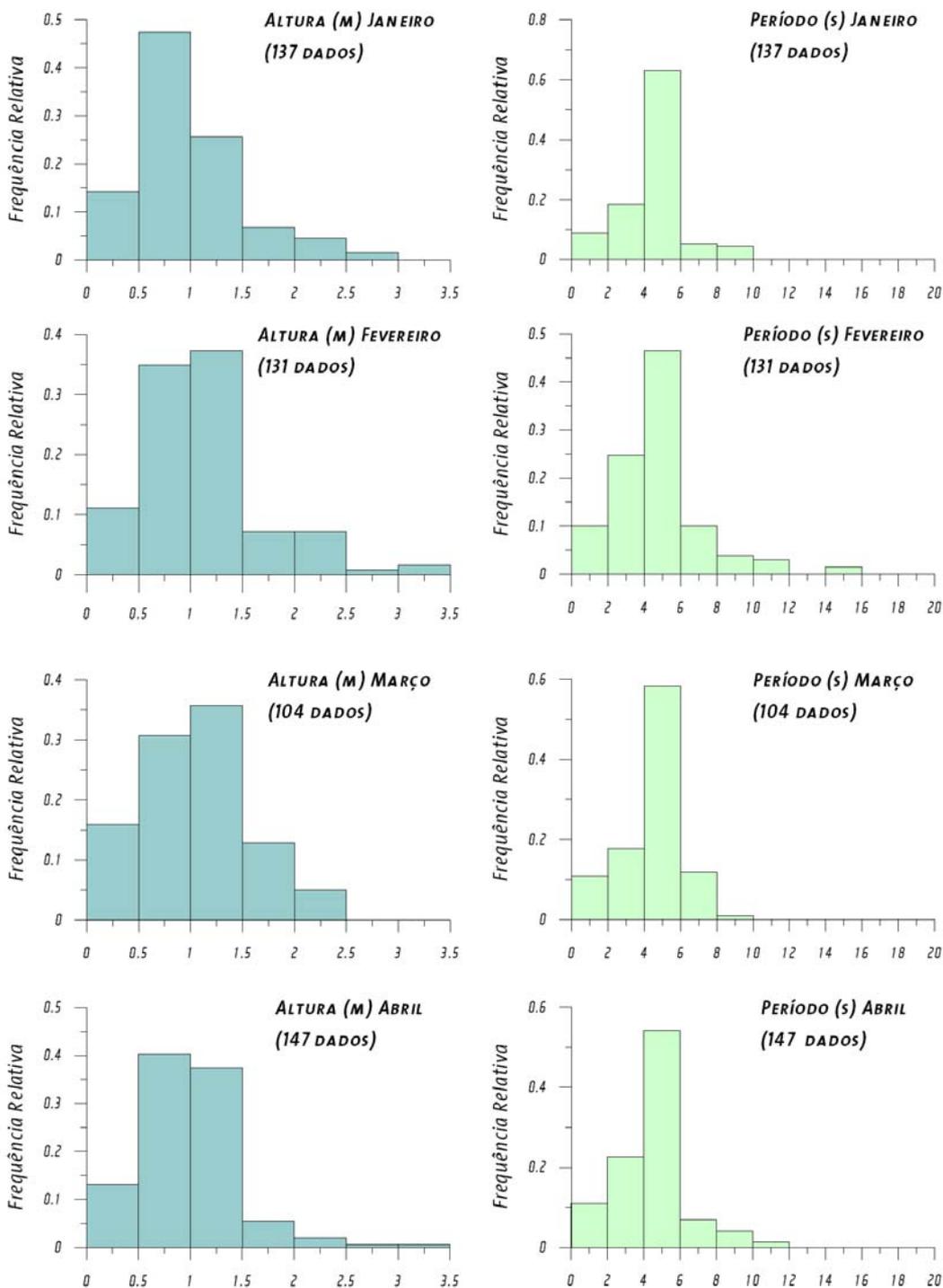


Figura 4: Histogramas de altura e período de ondas, para os meses de janeiro a abril, elaborados com os dados do BND0.

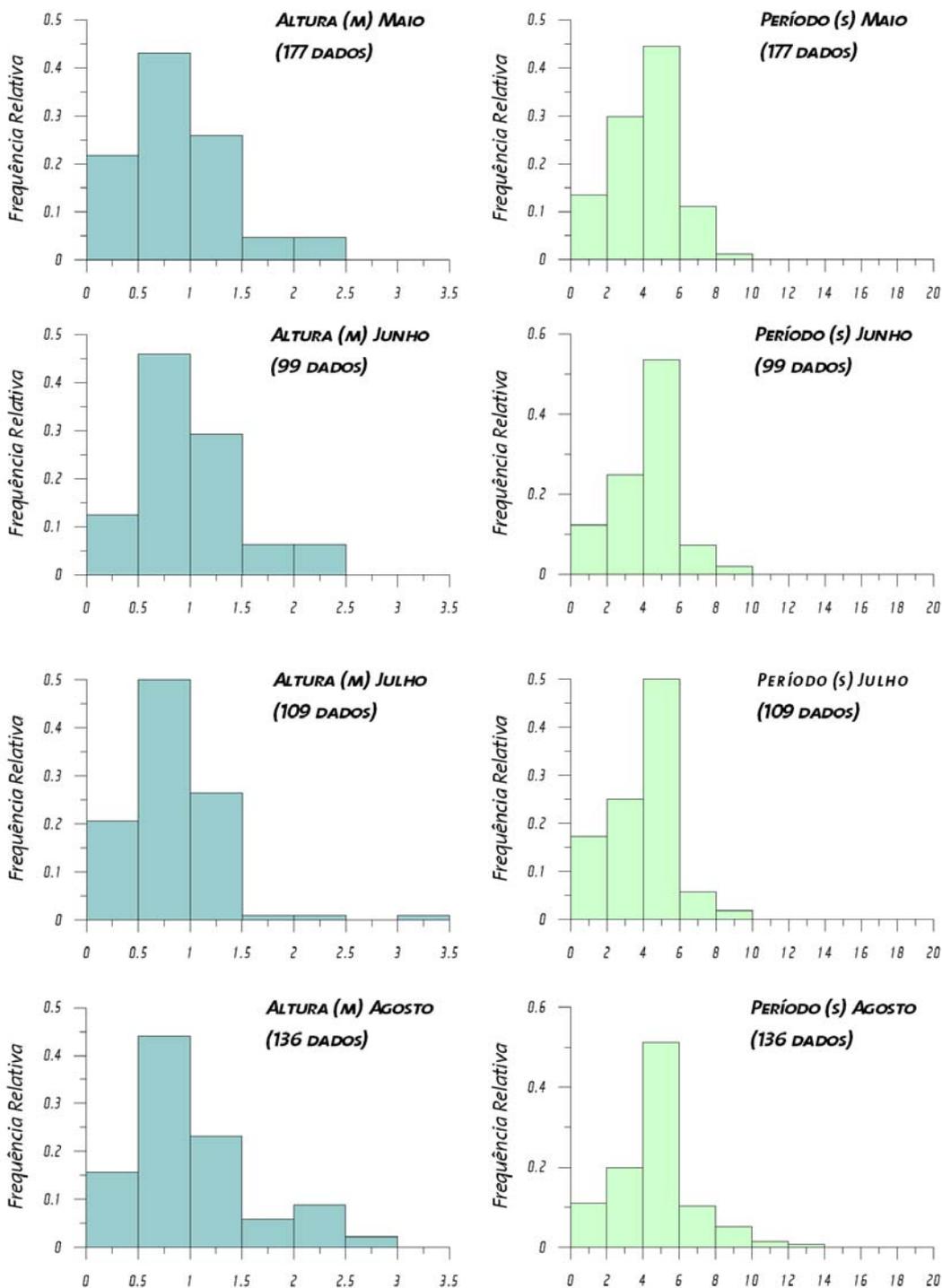


Figura 5: Histogramas de altura e período de ondas, para os meses de maio a agosto, elaborados com os dados do BNDO.

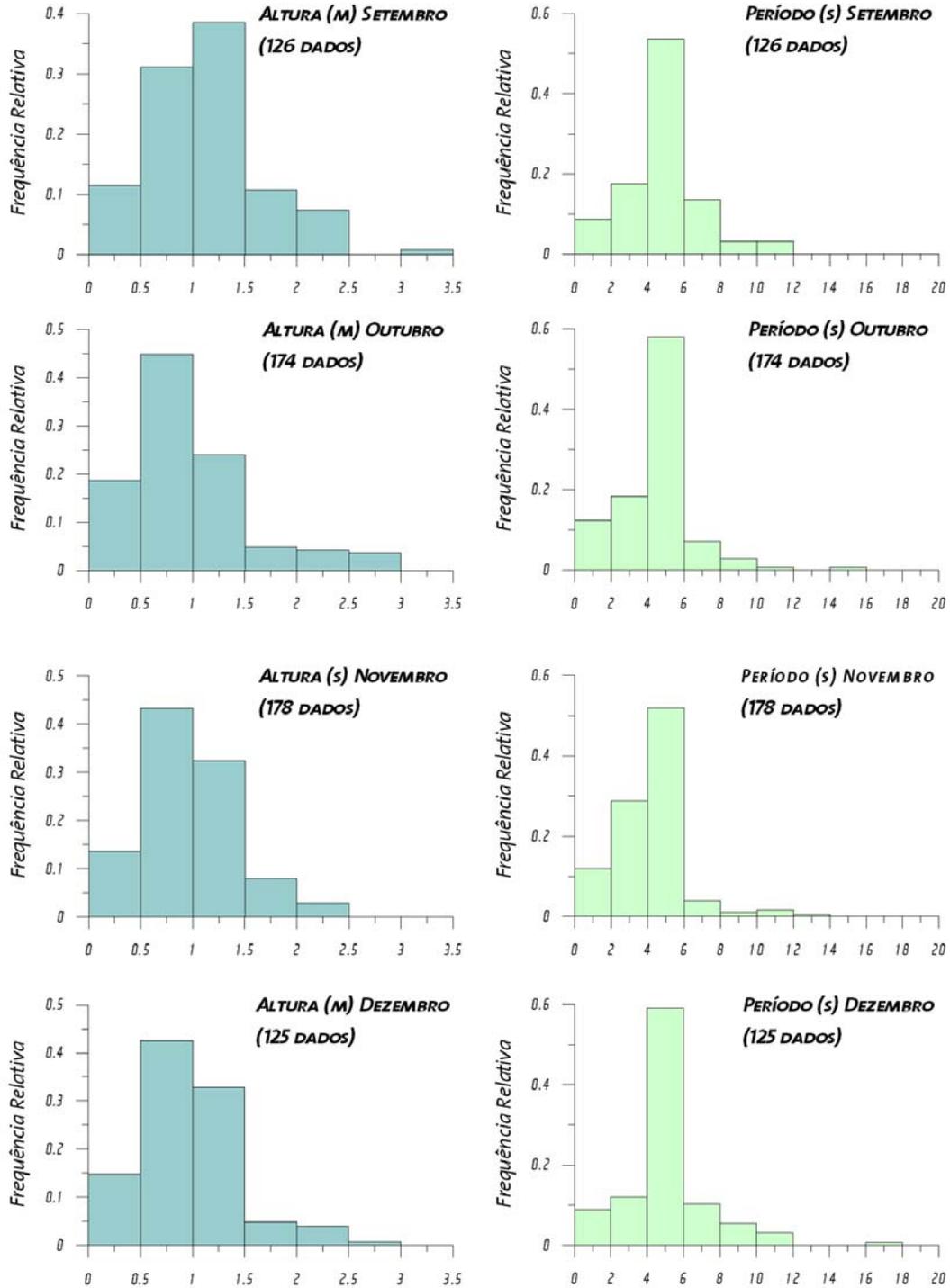


Figura 6: Histogramas de altura e período de ondas, para os meses de setembro a dezembro, elaborados com os dados do BND0.

Observa-se que a classe de altura mais freqüente é a de 0,5 a 1 m, enquanto que a de período é a de 4 a 6 s. Nota-se, no entanto a presença de ondulações maiores, chegando a 3,5 m de altura e 18 s de período. Essas ondas estão associadas a situações de *swell*, gerados por tempestades no Atlântico Norte.

Para as simulações foram utilizados os valores de maior ocorrência.

IV. ESTRATÉGIA DE MODELAGEM

IV.1. Modelo Adotado

O modelo escolhido para este trabalho é conhecido pelo nome OOC (Offshore Operators Committee) e foi desenvolvido especialmente para simulações de descarte de efluentes de plataformas de petróleo.

O modelo OOC simula o comportamento de uma pluma de efluente desde o momento de descarte até um instante e distância determinados pelo usuário. Para tanto, o modelo trabalha em três módulos distintos, encarregados, cada um, de uma diferente fase da pluma.

O primeiro módulo cuida da diluição inicial da pluma, representada por um modelo integral. Este módulo acompanha a evolução do efluente do momento em que este deixa a fonte até que ele encontre uma superfície horizontal (fundo ou superfície do mar) ou até que se estabilize no nível de flutuação neutra. Esta fase, também conhecida como fase de jato, ocorre enquanto o efluente possui movimento próprio, dado pela diferença de densidade com o meio ou pela velocidade de saída da fonte.

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 com 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. Neste momento tem início a última fase, denominada de fase de dispersão passiva, onde o efluente, a não ser pela velocidade vertical associada a cada constituinte particulado, não possui movimento próprio e segue apenas a dinâmica local. O OOC aplica a dispersão passiva separadamente para cada constituinte do efluente.

Uma descrição detalhada do modelo é encontrada em Brandsma & Smith (1999).

IV.2. Descrição das Grades

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 ocorrentes junto à superfície. Por outro lado, o material descartado da superfície (com *riser*) irá percorrer uma grande distância sofrendo influência das forçantes locais e cobrindo uma área maior quando depositado.

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 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.

É proposto, como solução neste trabalho, o uso de duas diferentes grades. A primeira (grade 1), voltada para a estimativa da área total de deposição, possui um espaçamento de 8,5 m e uma área de 720.000 m² (~0,72 km²). A segunda (grade 2), projetada para a região de maior acúmulo de sedimentos, possui uma resolução espacial de 2,5 m e cobre uma área de 62.500 m² (0,0625 km²).

A comparação das duas grades projetadas e seus pontos de lançamento podem ser observados na Figura 7.

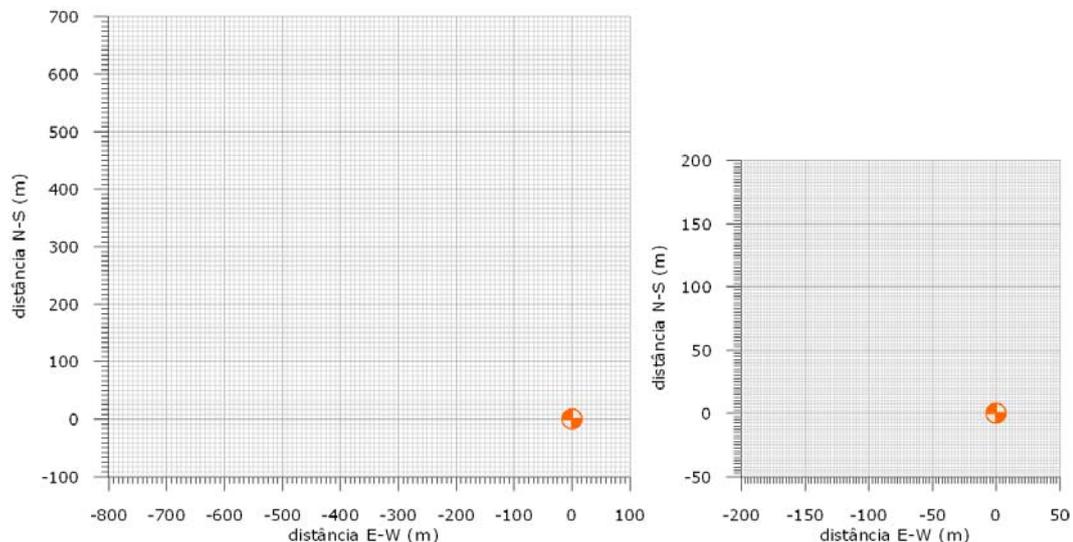


Figura 7: Comparação entre as duas grades projetadas para o estudo. A marcação em laranja representa a posição do ponto de lançamento em cada grade.

IV.3. Descrição dos Descartes

Na Tabela 4 são apresentadas as simulações realizadas e os códigos a elas associados neste estudo.

Tabela 4: Relação das simulações realizadas no estudo.

simulação	tipo de descarte	seção
SOL_SEC1	cascalhos e fluido aderido	1
SOL_SEC2	cascalhos e fluido aderido	2
SOL_SEC3	cascalhos e fluido aderido	3
SOL_SEC4	cascalhos e fluido aderido	4
SOL_SEC5	cascalhos e fluido aderido	5
FLU_SEC5	fluido excedente	5

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

- vazão;
- raio da fonte;
- profundidade de descarte;
- inclinação vertical;
- direção;
- duração do descarte;
- densidade dos componentes sólidos;
- densidade do efluente.

A densidade do efluente nos descartes de cascalho e fluido aderido é calculada por uma média ponderada entre os volumes V e densidades ρ .

$$\rho_{\text{efluente}} = \rho_{\text{fluido}} \left(\frac{V_{\text{fluido}}}{V_{\text{fluido}} + V_{\text{cascalho}}} \right) + \rho_{\text{cascalho}} \left(\frac{V_{\text{cascalho}}}{V_{\text{fluido}} + V_{\text{cascalho}}} \right)$$

Utilizando a seção 1 como exemplo, consideramos $V_{\text{fluido}}=219,9 \text{ m}^3$, $V_{\text{cascalho}}=81,27 \text{ m}^3$, $\rho_{\text{fluido}}=1054,52 \text{ Kg/m}^3$, $\rho_{\text{cascalho}} =2200 \text{ Kg/m}^3$. Considerando a equação acima, chega-se a uma densidade do efluente $\rho_{\text{efluente}}=1363,60 \text{ Kg/m}^3$ para a descarga de cascalhos e fluido aderido.

Os valores obtidos para todos os descartes de cascalho e fluido aderido podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores usados na descrição da densidade média dos efluentes.

Parâmetro	unidade	seção 1	seção 2	seção 3	seção 4	seção 5
V_{total}	m^3	301,18	902,99	495,88	113,24	81,04
$V_{cascalho}$	m^3	81,27	156,20	198,35	45,30	32,42
V_{fluido}	m^3	219,9	746,8	297,5	67,9	48,6
$f_{cascalho}$	%	26,98%	17,30%	40,00%	40,00%	40,00%
f_{fluido}	%	73,02%	82,70%	60,00%	60,00%	60,00%
ρ_{casc}	kg/m^3	2200	2200	2400	2500	2600
ρ_{fluido}	kg/m^3	1054,52	1085,90	1138,41	1318,15	1677,65
$\rho_{efluente}$	kg/m^3	1363,60	1278,61	1643,04	1790,89	2046,59

O modelo OOC é mais bem adaptado à representação de descartes de curta duração. Entretanto, para o cálculo das pilhas de deposição no assoalho marinho, é possível representar descartes de longa duração através de um fator de escala aplicado a um descarte curto.

Ao utilizar-se um perfil estacionário de correntes (que não varia no tempo) e uma vazão constante considera-se que partículas idênticas lançadas nos primeiros e últimos instantes do descarte terão o mesmo comportamento ao longo da coluna d'água. Logo, irão depositar-se na mesma posição.

Assim sendo, é plausível considerar que um descarte de 6 horas formará exatamente a mesma pilha que 6 descartes de 1 hora. Ou seja, é possível representar um descarte de longa duração através de um fator de escala:

$$\gamma = \frac{t}{t_{simulado}}$$

Onde t é o tempo esperado na operação e $t_{simulado}$ a duração do descarte usada nas simulações. Como as simulações foram efetuadas com 1 hora de descarte o fator de escala é igual ao tempo apresentado na Tabela 1.

Além destes parâmetros, é necessário que se conheça o comportamento das partículas sólidas lançadas em cada descarte. Em virtude das incertezas a respeito do material resultante da perfuração de um poço exploratório, optou-se por usar distribuições genéricas de velocidades de queda baseadas em Brandsma e Smith (1999). Estas distribuições foram obtidas a partir de uma quantidade representativa de experimentos e são aconselhadas no manual do modelo para quando os dados locais são desconhecidos (Tabela 6 e Tabela 7).

Tabela 6: Densidade, fração de volume e velocidade de queda dos sólidos de fluido de base aquosa.

Classe	Fração de volume	velocidade de queda (m/s)
1	0,0100	0,011217
2	0,0400	0,003170
3	0,1924	0,000823
4	0,1924	0,000640
5	0,1326	0,000512
6	0,1326	0,000436
7	0,1000	0,000300
8	0,0500	0,000148
9	0,0799	0,000061
10	0,0701	0,000027

Tabela 7: Densidade, fração de volume e velocidade de queda para os descartes de cascalhos e sólidos de fluido de base aquosa.

Classe	Fração de volume	velocidade de queda (m/s)
1	0,2500	0,259751
2	0,1500	0,135179
3	0,1600	0,097963
4	0,1800	0,040112
5	0,0200	0,014472
6	0,0300	0,002328
7	0,0700	0,000218
8	0,0600	0,000017
9	0,0800	0,000001

A distribuição obtida para a mistura de cascalhos e sólidos de fluido de base aquosa foi estimada a partir da análise granulométrica do material. Este tipo de estimativa subestima a velocidade de queda dos menores grãos uma vez que não contempla o agrupamento destes em partículas maiores e, por conseqüência, com maiores velocidades de queda. Para corrigir este efeito, usa-se no modelo um coeficiente de ajuste, cujo valor indicado no manual (Brandsma & Smith, 1999) para estas ocasiões é de 28.

IV.4. Construção das Matrizes de Sólidos.

Primeiramente é necessário estimar a fração de sólidos presente em cada descarte. Nos descartes de cascalho e fluido aderido, esta fração é dada pela soma das contribuições do cascalho (f_{casc}) e dos sólidos presentes no fluido (f_{solflu}).

$$f_{soltot} = f_{casc} + f_{solflu}$$

A fração de cascalhos e de sólidos do fluido é extraída diretamente da relação entre o volume de sólidos e o volume total de cada descarte.

Apesar de apresentar uma densidade média nos dados teóricos, o modelo OOC permite que seja atribuída uma densidade específica para cada classe de velocidade de queda descrita. Entretanto, pela falta de conhecimento do material descartado, optou-se por trabalhar com um valor médio de densidade para os sólidos descartados, que são fornecidos pela empresa fabricante do fluido.

Assim, a fração de cada classe de velocidade de queda foi recalculada para adaptar-se aos descartes a serem realizados através da equação:

$$f_{\text{OOC}} = f_{\text{Brandsma \& Smith}} \times f_{\text{estimado}}$$

As matrizes calculadas para cada descarte são apresentadas da Tabela 8 à Tabela 13.

Tabela 8: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte SOL_SEC1. Nesta simulação foi usado o coeficiente ASFM=28.

sólido	dens (g/cm ³)	f _{ooc}	vel queda (pés/s)
sol1	2,2347	0,073952	0,8522000
sol2	2,2347	0,044371	0,4435000
sol3	2,2347	0,047329	0,3214000
sol4	2,2347	0,053245	0,1316000
sol5	2,2347	0,005916	0,0474800
sol6	2,2347	0,008874	0,0076380
sol7	2,2347	0,020707	0,0007160
sol8	2,2347	0,017748	0,0000553
sol9	2,2347	0,023665	0,0000044

Tabela 9: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte SOL_SEC2. Nesta simulação foi usado o coeficiente ASFM=28.

sólido	dens (g/cm ³)	f _{ooc}	vel queda (pés/s)
sol1	2,2911	0,053509	0,8522000
sol2	2,2911	0,032105	0,4435000
sol3	2,2911	0,034245	0,3214000
sol4	2,2911	0,038526	0,1316000
sol5	2,2911	0,004281	0,0474800
sol6	2,2911	0,006421	0,0076380
sol7	2,2911	0,014982	0,0007160
sol8	2,2911	0,012842	0,0000553
sol9	2,2911	0,017123	0,0000044

Tabela 10: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte SOL_SEC3. Nesta simulação foi usado o coeficiente ASFM=28.

sólido	dens (g/cm ³)	f _{ooc}	vel queda (pés/s)
sol1	2,3722	0,115256	0,8522000
sol2	2,3722	0,069153	0,4435000
sol3	2,3722	0,073764	0,3214000
sol4	2,3722	0,082984	0,1316000
sol5	2,3722	0,009220	0,0474800
sol6	2,3722	0,013831	0,0076380
sol7	2,3722	0,032272	0,0007160
sol8	2,3722	0,027661	0,0000553
sol9	2,3722	0,036882	0,0000044

Tabela 11: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte SOL_SEC4. Nesta simulação foi usado o coeficiente ASFM=28.

sólido	dens (g/cm ³)	f _{ooc}	vel queda (pés/s)
sol1	2,5388	0,126090	0,8522000
sol2	2,5388	0,075654	0,4435000
sol3	2,5388	0,080698	0,3214000
sol4	2,5388	0,090785	0,1316000
sol5	2,5388	0,010087	0,0474800
sol6	2,5388	0,015131	0,0076380
sol7	2,5388	0,035305	0,0007160
sol8	2,5388	0,030262	0,0000553
sol9	2,5388	0,040349	0,0000044

Tabela 12: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte SOL_SEC5. Nesta simulação foi usado o coeficiente ASFM=28.

sólido	dens (g/cm ³)	f _{ooc}	vel queda (pés/s)
sol1	2,7994	0,142673	0,8522000
sol2	2,7994	0,085604	0,4435000
sol3	2,7994	0,091311	0,3214000
sol4	2,7994	0,102725	0,1316000
sol5	2,7994	0,011414	0,0474800
sol6	2,7994	0,017121	0,0076380
sol7	2,7994	0,039948	0,0007160
sol8	2,7994	0,034242	0,0000553
sol9	2,7994	0,045655	0,0000044

Tabela 13: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte FLU_SEC5.

sólido	dens (g/cm ³)	f _{ooc}	vel queda (pés/s)
sol1	3,2667	0,002856	0,0368000
sol2	3,2667	0,011369	0,0104000
sol3	3,2667	0,054742	0,0027000
sol4	3,2667	0,054742	0,0021000
sol5	3,2667	0,037716	0,0016800
sol6	3,2667	0,037716	0,0014300
sol7	3,2667	0,028449	0,0009850
sol8	3,2667	0,014224	0,0004850
sol9	3,2667	0,022737	0,0002000
sol10	3,2667	0,019936	0,0000900

IV.5. Tempo de Descarte

O modelo OOC é melhor adaptado à representação de descartes de curta duração. Entretanto, conhecendo-se as características do meio e do descarte, é possível representar descartes de longa duração com este modelo. Os métodos são usados de acordo com o tipo de impacto que busca-se analisar: a pilha de deposição final no assoalho marinho ou a pluma de sólidos em suspensão na coluna d'água.

IV.5.1. Pilhas de Deposição

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 simplesmente pela divisão da camada a ser percorrida e a velocidade de queda de cada classe de grão.

Os tempos obtidos para cada descarte são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Tempo de queda estimado (em horas) para cada classe de sólido nos descartes a serem realizados.

classe	SOL_SEC1	SOL_SEC3	FLU_SEC5
	SOL_SEC2	SOL_SEC4	
		SOL_SEC5	
1	0,01	0,10	1,50
2	0,01	0,10	5,30
3	0,02	0,20	20,60
4	0,05	0,40	26,50
5	0,13	1,20	33,10
6	0,84	7,30	38,90
7	8,91	77,60	56,40
8	115,36	1005,30	114,60
9	1440,05	12549,00	278,00
10			617,70

A representação gráfica dos tempos de queda estimados, para cada classe de grão com seu respectivo volume percentual, pode ser observada na Figura 8.

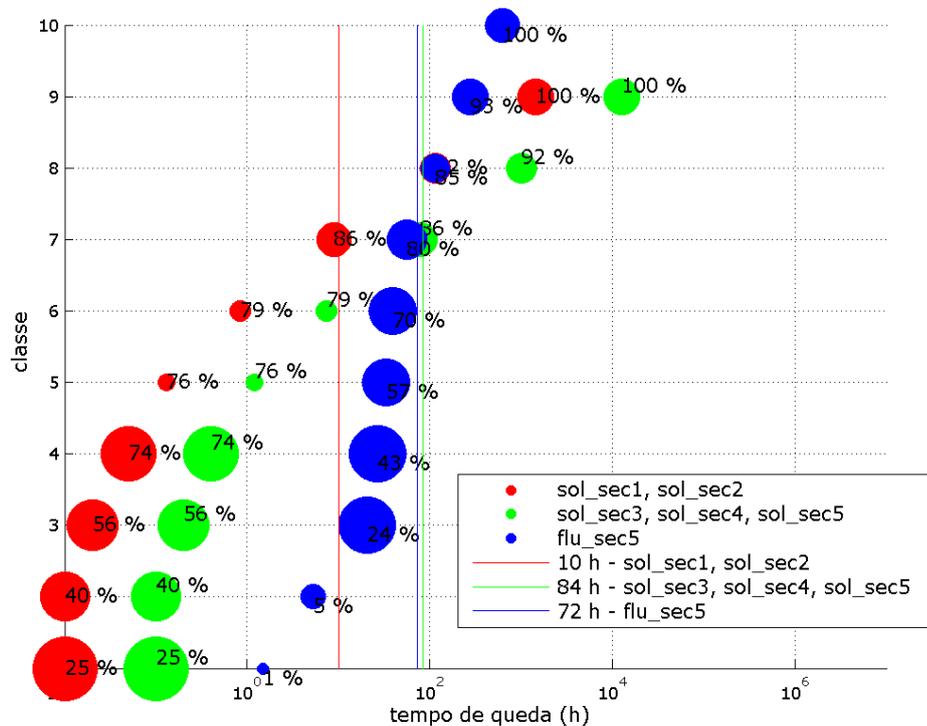


Figura 8: Tempo de queda das partículas de acordo com a classe granulométrica de cada tipo de descarte. O tamanho dos círculos é proporcional à fração de volume que cada classe representa, os rótulos em cada círculo representam a soma cumulativa das frações. As linhas em vermelho, verde e azul representam a duração das simulações realizadas.

Nos descartes das seções 1 e 2, uma grande fração (74%) do material deposita-se em tempos inferiores a 6 minutos (10^{-1} h), entretanto, mesmo com a proximidade do fundo, 8% do material deposita-se apenas após 1000 h. Já nos descartes com *riser* das seções 3, 4 e 5, essa mesma fração (74%) de material é depositada em menos de 1 hora (10^0 h), porém, estima-se que todo o volume (100%) só será totalmente depositado após 10000h. Para a distribuição granulométrica do fluido excedente (FLU_SEC5), 80% deposita-se antes de 72 horas. Desta forma, visando otimizar o custo computacional e quantidade de material depositado, foi definido um tempo de simulação de 10 horas para as estimativas das pilhas de deposição dos descartes SOL_SEC1 e SOL_SEC2, um tempo de 84 horas para os descartes SOL_SEC3, SOL_SEC4 e SOL_SEC5, e um de 72 horas para FLU_SEC5.

IV.5.2. Plumaz de Sólidos em Suspensão

Para os sólidos em suspensão, como objetiva-se monitorar um impacto transiente, é preciso conhecer antes os tempos em que a pluma assume um caráter estacionário ao longo da coluna d'água. Este tempo irá depender da intensidade da corrente local, da duração do descarte e da distância de interesse.

O método proposto por Brandsma e Smith (1999) foi utilizado para estimar o momento em que a pluma entra em condição estacionária ($t_{inicial}$) e o momento em que a pluma deixa essa condição, a uma determinada distância da fonte (t_{final}):

$$t_{inicial} = \frac{X + 4\sigma}{u} \quad \text{e} \quad t_{final} = \frac{X - 4\sigma}{u} + t_{simulado}$$

onde $\sigma = \sigma_0 \left[1 + 4^{4/3} \frac{2}{3} \left(\frac{A_L \Delta t}{\sigma_0^{2/3}} \right) \right]$, X é a distância da fonte, u velocidade média da corrente

local, A_L um parâmetro de dissipação e σ_0 tamanho inicial da pluma, estimado na ordem de grandeza do tubo de descarte.

Para o cálculo das plumas de sólidos em suspensão foi usado um tempo de descarte de 2 horas e, baseado na equação acima, foram estimados os tempos para as estimativas em cada distância da fonte, conforme apresentado na Tabela 15 (descartes sem *riser*) e Tabela 16 (descartes com *riser*).

Tabela 15: Tempo, final e inicial, calculado para determinar a estacionariedade da pluma e tempo estimado para observação da pluma formada pelos descartes sem *riser*.

distância da fonte (m)	$t_{início}$	t_{final}	$t_{estimativa}$
10	0,01	2,01	1,00
50	0,05	2,05	1,00
100	0,09	2,09	1,00
200	0,19	2,18	1,00
300	0,28	2,28	1,00
400	0,37	2,37	1,00
500	0,46	2,46	1,00
600	0,56	2,55	2,00
700	0,65	2,65	2,00

Tabela 16: Tempo, final e inicial, calculado para determinar a estacionariedade da pluma e tempo estimado para observação da pluma formada pelos descartes com *riser*.

distância da fonte (m)	$t_{início}$	t_{final}	$t_{estimativa}$
10	0,01	2,01	1,00
50	0,03	2,03	1,00
100	0,07	2,07	1,00
200	0,13	2,13	1,00
300	0,20	2,20	1,00
400	0,27	2,26	1,00
500	0,33	2,33	1,00
600	0,40	2,40	1,00
700	0,46	2,46	1,00
800	0,53	2,53	2,00
900	0,60	2,59	2,00
1000	0,66	2,66	2,00
1100	0,73	2,73	2,00
1200	0,80	2,79	2,00
1300	0,86	2,86	2,00
1400	0,93	2,92	2,00
1500	0,99	2,99	2,00
2000	1,33	3,32	2,00
2500	1,66	3,65	3,00
3000	1,99	3,98	3,00
3500	2,32	4,31	3,00
4000	2,65	4,64	4,00

V. RESULTADOS

A seguir serão apresentadas as pilhas de deposição no assoalho marinho e plumas de sólidos em suspensão na coluna d'água estimadas pelas simulações realizadas.

As pilhas de deposição serão apresentadas por descarte e integradas, visando considerar o efeito conjunto dos descartes.

Por ocorrerem de forma sequencial e possuírem uma curta expectativa de permanência na coluna d'água, não será apresentada integração para as plumas de sólidos em suspensão.

As plumas são representadas aqui por perfis radiais ao poço (situado no ponto [0,0]), extraídos de forma a identificar a região de maior concentração de sólidos em suspensão.

V.1. Pilhas de Deposição

De acordo com as análises realizadas em função da velocidade de queda e estimativa da distância percorrida por cada classe granulométrica (conforme apresentado na Figura 8 e Tabela 14), os tempos escolhidos para cada simulação foram:

10 h – descartes de cascalho e fluido aderido das seções sem *riser*.

84 h – descartes de cascalho e fluido aderido das seções com *riser*.

72 h – descarte de fluido excedente da seção 5.

V.1.1. Grade 1

As pilhas formadas por cada simulação podem ser observadas da Figura 9 à Figura 13 e a integração dos resultados na Figura 14. Observa-se que tanto as pilhas formadas nas seções sem *riser* quanto as das seções com *riser* apresentam orientação NW.

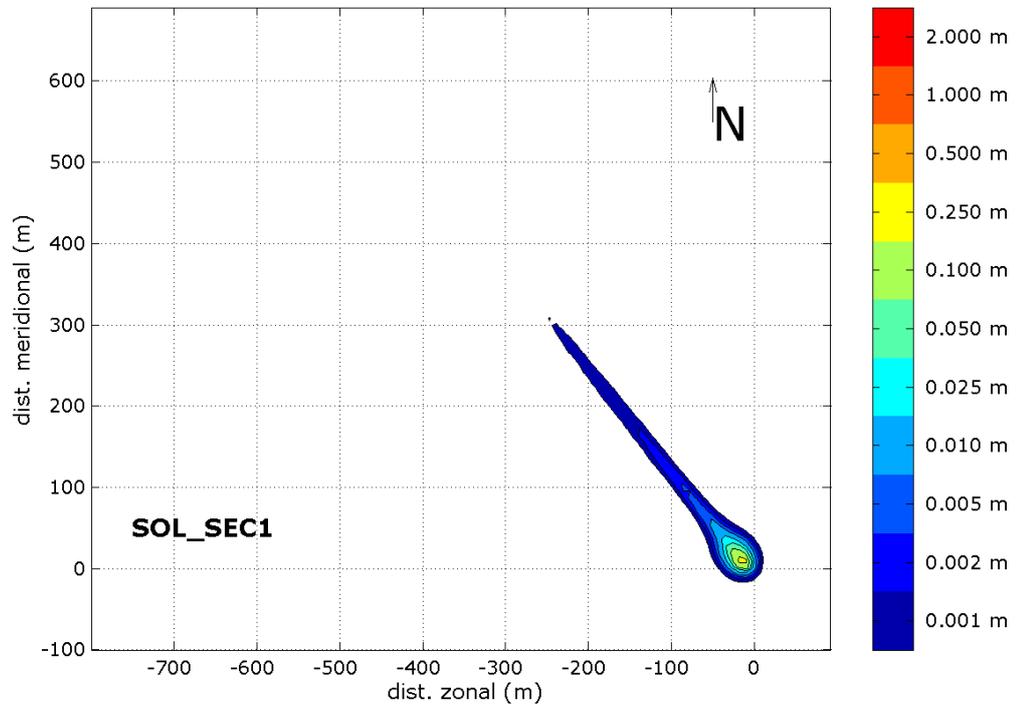


Figura 9: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC1 realizado com a grade 1.

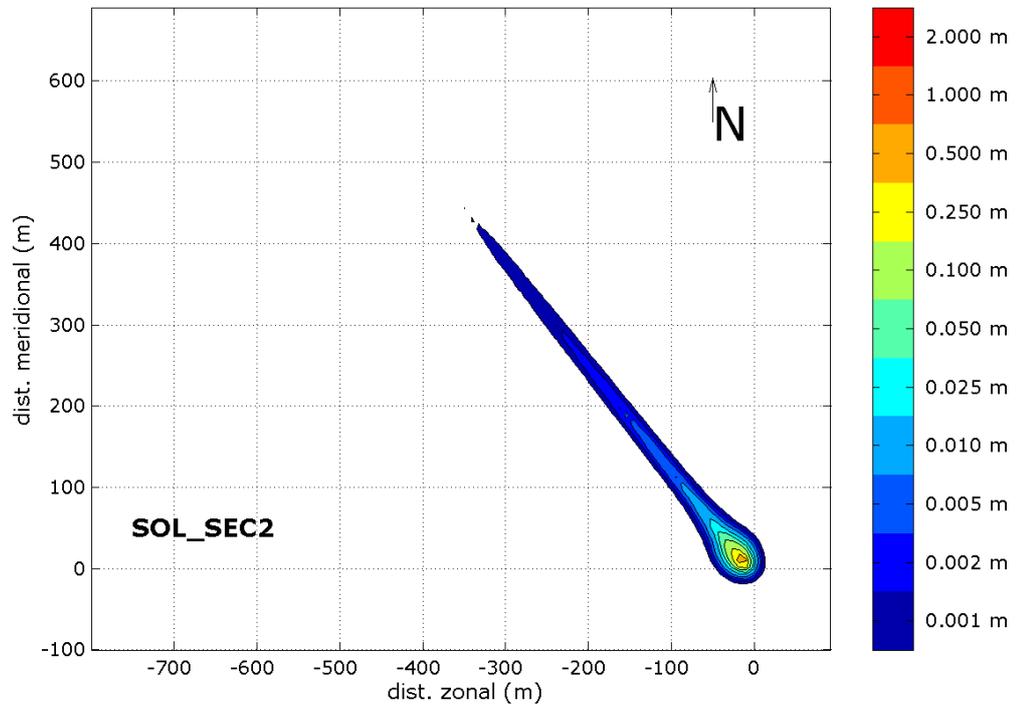


Figura 10: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC2 realizado com a grade 1.

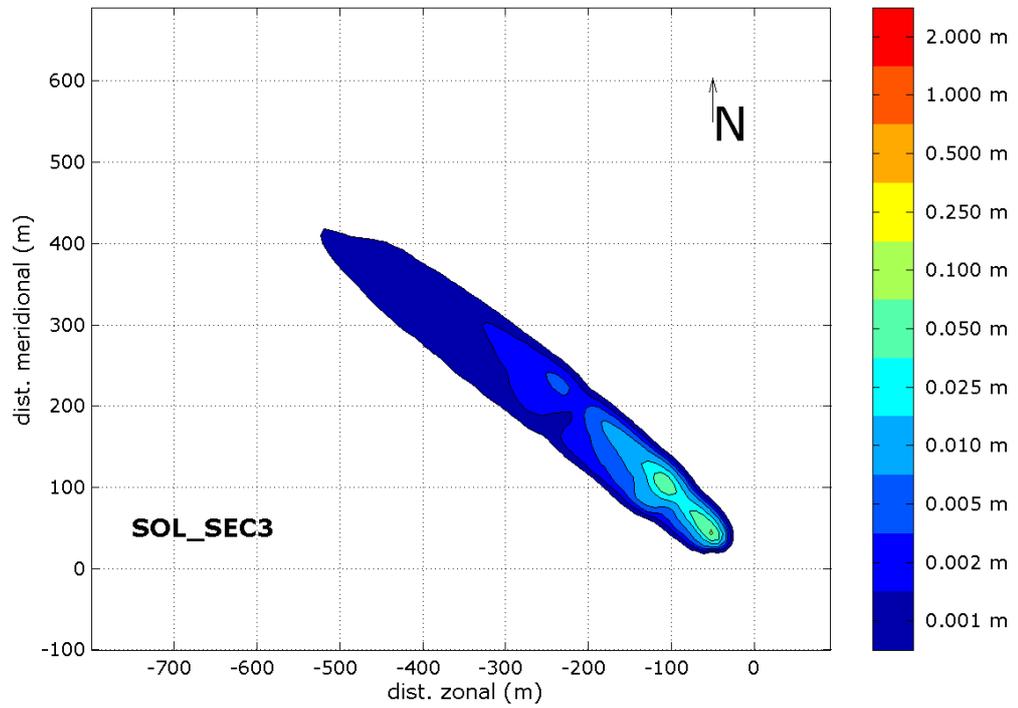


Figura 11: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC3 realizado com a grade 1.

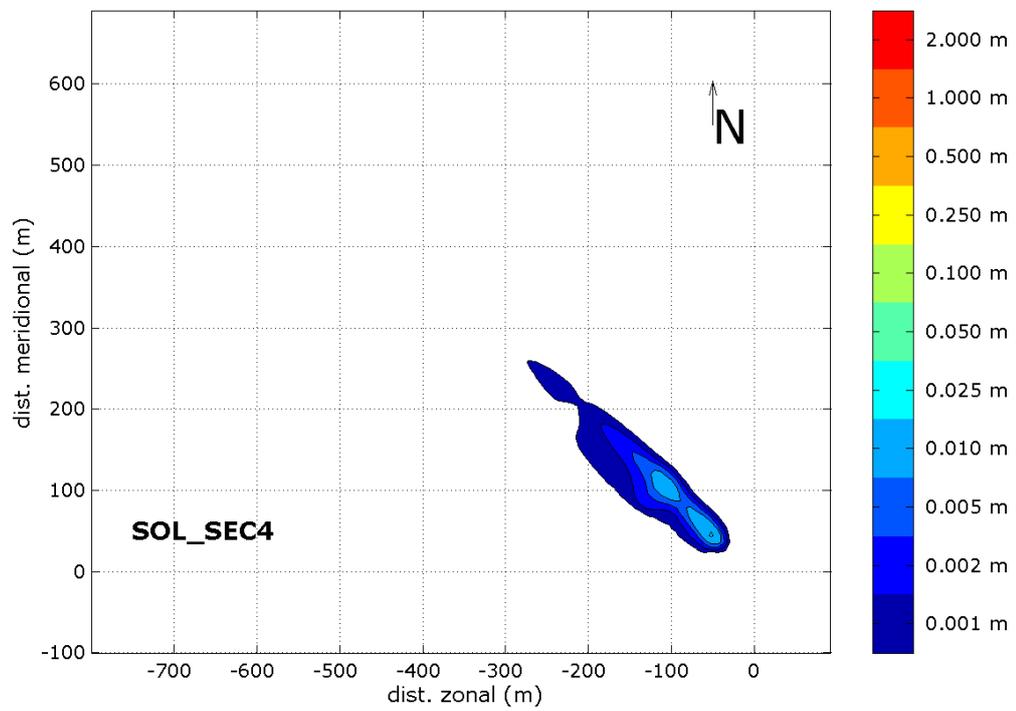


Figura 12: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC4 realizado com a grade 1.

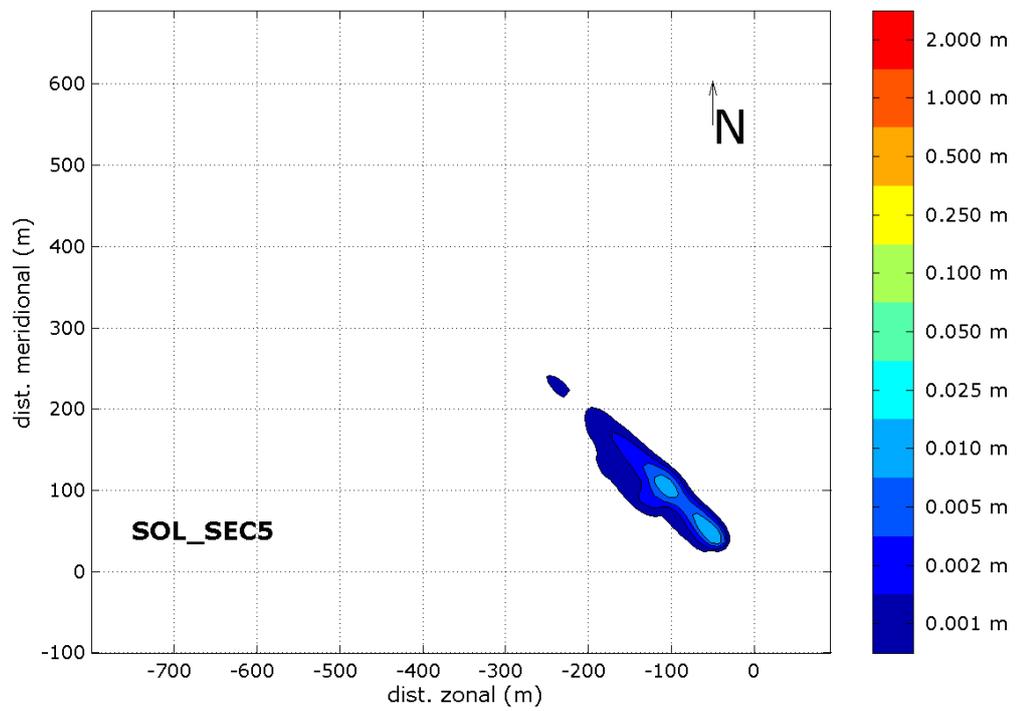


Figura 13: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC5 realizado com a grade 1.

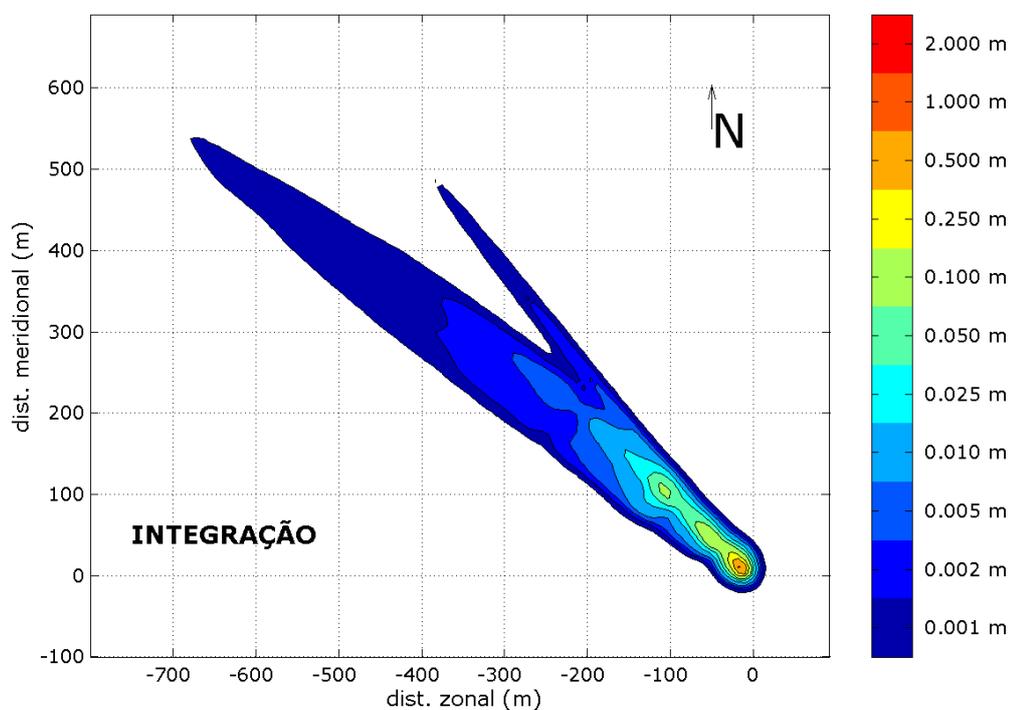


Figura 14: Pilha resultante da integração de todos os descartes realizados com a grade 1.

Um resumo dos resultados obtidos para a deposição de sólidos é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Resumo dos resultados obtidos para as pilhas de deposição

simulação	esp. máxima (m)	área (m ²)	fração do volume capturado
SOL_SEC1	0,341	10042,65	94,5%
SOL_SEC2	0,742	15316,85	93,2%
SOL_SEC3	0,115	46889,78	74,7%
SOL_SEC4	0,029	14955,60	75,4%
SOL_SEC5	0,024	12137,88	74,5%
FLU_SEC5	0,00002	-	0,2%
INTEGRAÇÃO	1,08	75356,00	-

O descarte responsável pela maior espessura é o da seção 2. O descarte da seção 3 forma a maior área (46889,78 m²). O descarte FLU_SEC5 não formou uma pilha com espessuras maiores que 1mm.

A pilha final cobre uma área de 75.356 m².

V.1.2. Grade 2

As maiores espessuras podem ser subestimadas pela utilização de grandes espaçamentos de grade. De forma a evitar este efeito, um novo grupo de simulações foi realizado, usando-se desta vez uma grade cuja resolução espacial é superior à da *Grade 1*. Espera-se, desta forma, uma correta estimativa das espessuras máximas formadas nestes descartes.

As pilhas de deposição dos descartes que foram obtidas com a grade 2 são apresentadas da Figura 15 a Figura 19. A integração dos resultados é apresentada na Figura 20.

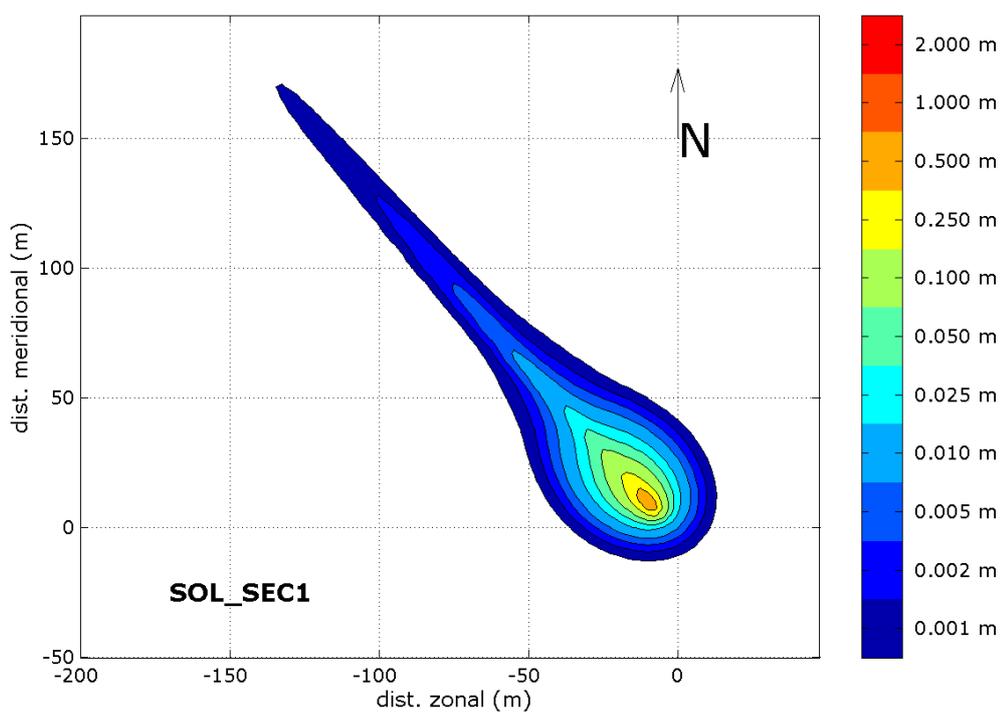


Figura 15: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC1 realizado com a grade 2.

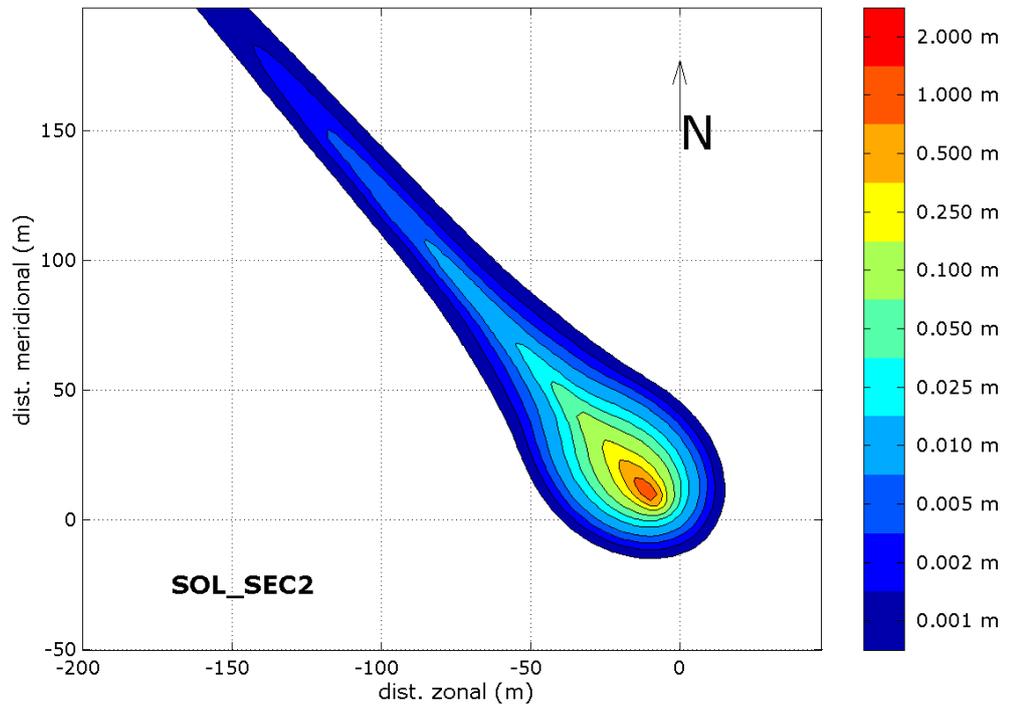


Figura 16: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC2 realizado com a grade 2.

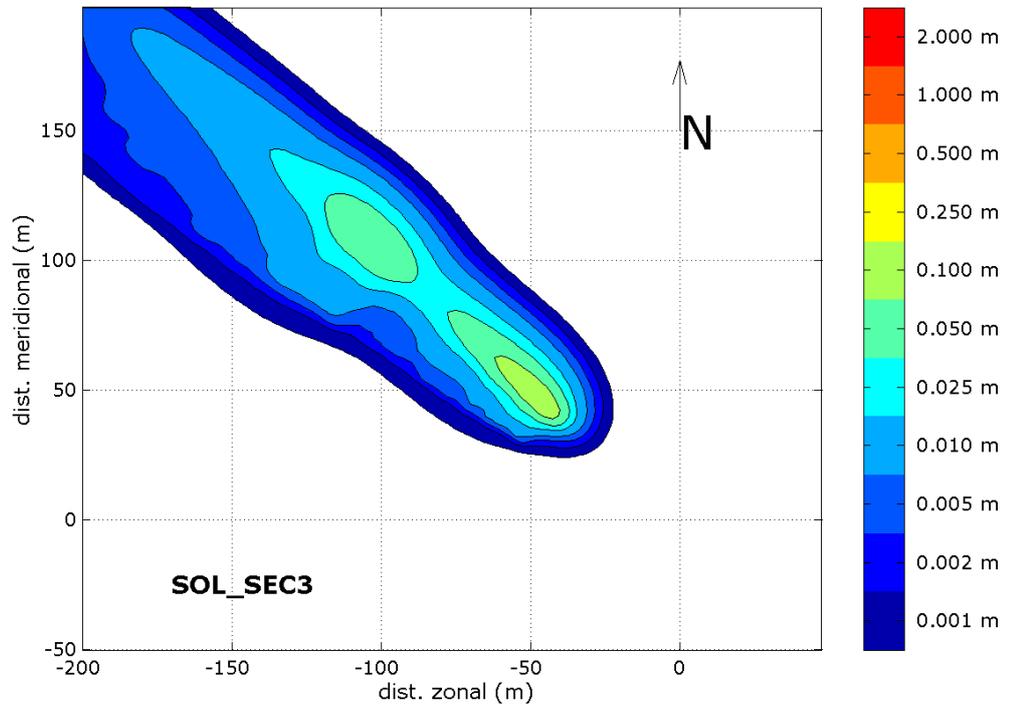


Figura 17: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC3 realizado com a grade 2.

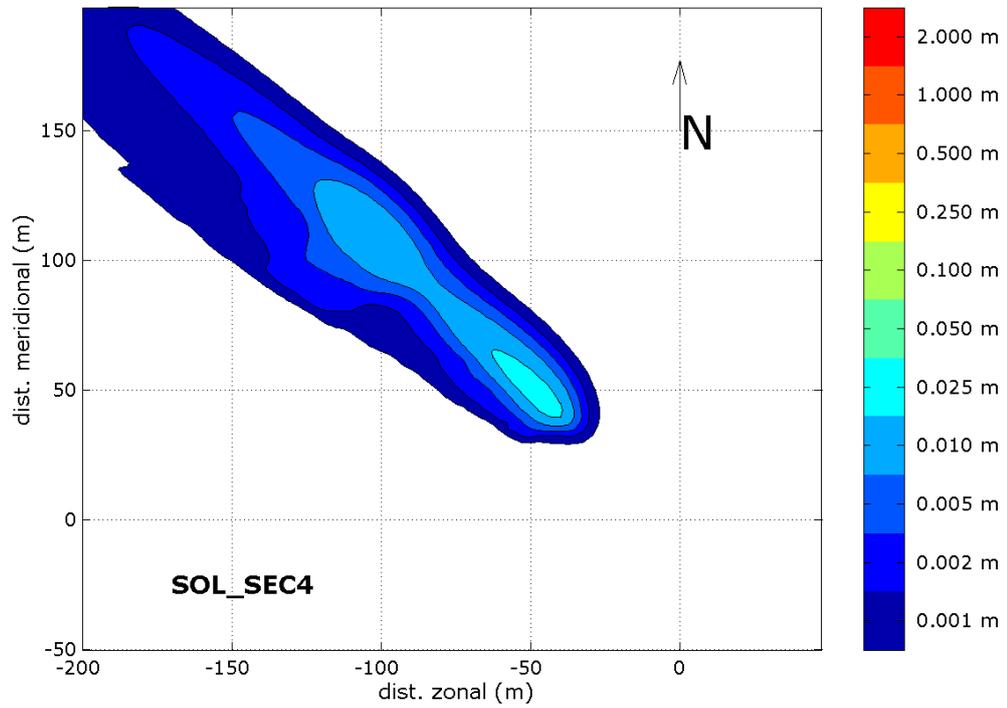


Figura 18: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC4 realizado com a grade 2.

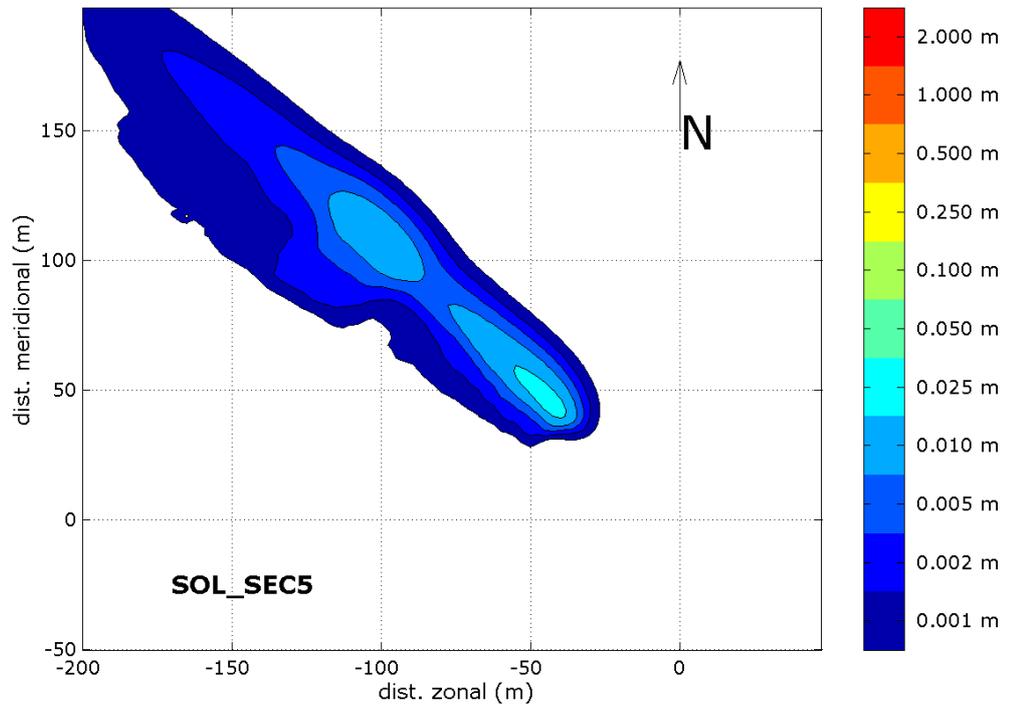


Figura 19: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC5 realizado com a grade 2.

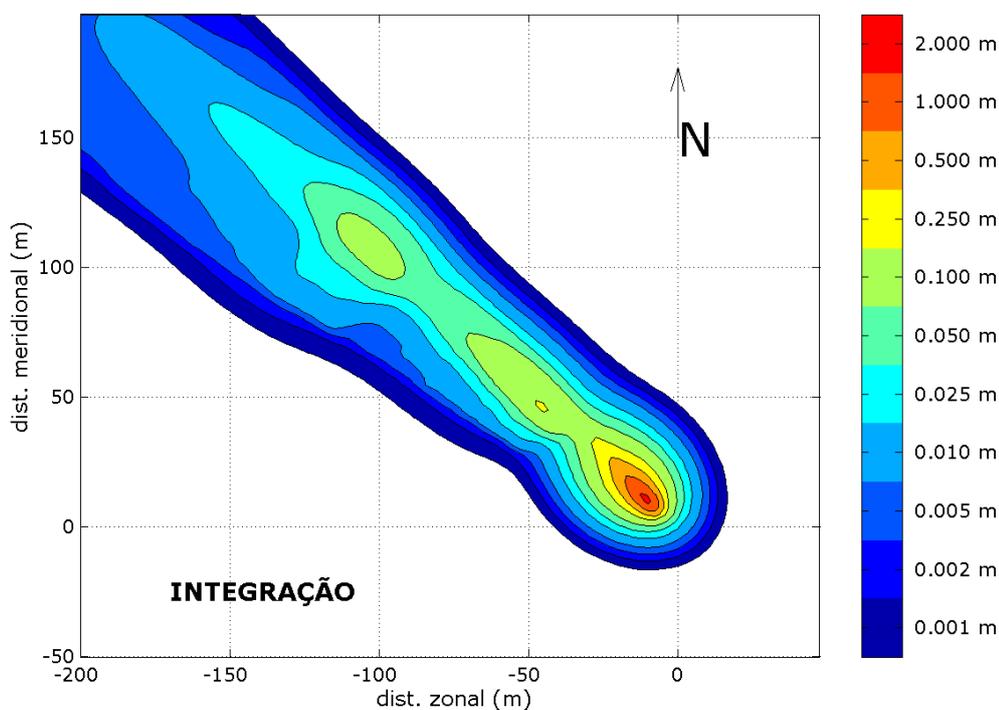


Figura 20: Pilha resultante da integração de todos os descartes realizados com a grade 2.

As espessuras máximas encontradas com a grade 2, para cada seção, são apresentadas na Tabela 18. Conforme esperado, a maior contribuição se deve ao descarte da seção 2, por ser, dentre os descartes de cascalhos e fluido aderido, o de maior volume.

Tabela 18: Espessuras máximas obtidas com a grade 2.

simulação	esp. máxima (m)	fração do volume capturado
SOL_SEC1	0,801	84,7%
SOL_SEC2	1,522	85,0%
SOL_SEC3	0,159	55,1%
SOL_SEC4	0,042	55,1%
SOL_SEC5	0,038	55,0%
FLU_SEC5	-	-
INTEGRAÇÃO	2,323	-

A pilha resultante apresentou uma espessura máxima de 2,32 m a menos de 10 da fonte, sentido noroeste.

V.2. Plumas de Sólidos em Suspensão

As plumas de sólidos em suspensão formadas pelos descartes foram monitoradas através de seções radiais verticais na coluna d'água, posicionadas a distâncias específicas da fonte. A posição da radial em profundidade foi escolhida de acordo com a localização da pluma. Uma representação esquemática das radiais escolhidas pode ser observada na Figura 21 (sem *riser*), Figura 22 (com *riser* até 1500m da fonte) e Figura 23 (com *riser*, de 2000m a 3500m da fonte).

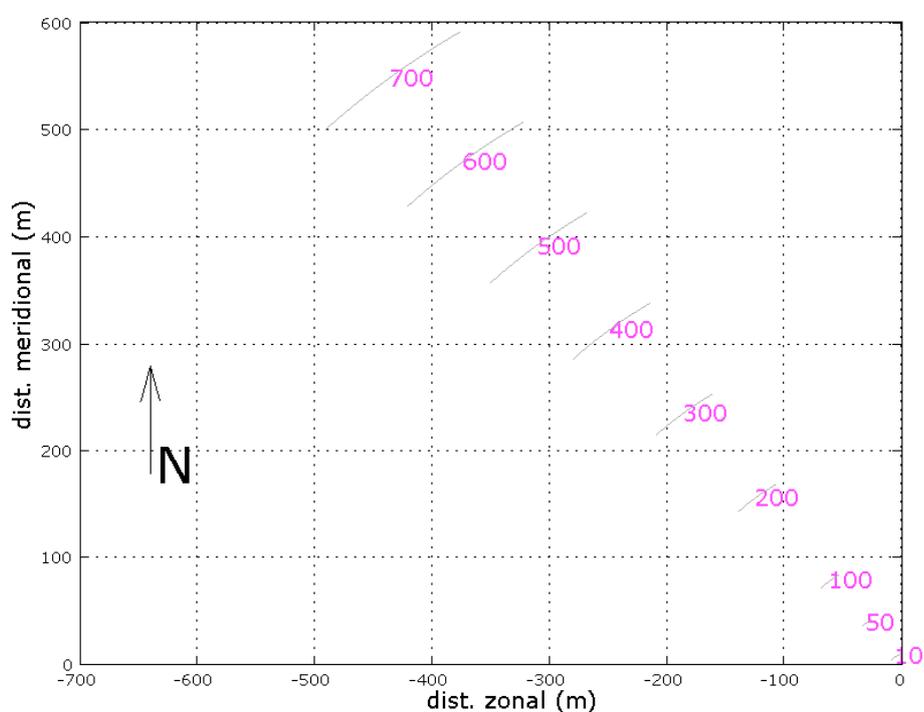


Figura 21: Posição das radiais usadas para monitoramento da pluma de sólidos em suspensão nos descartes sem *riser*. A seta indica o norte.

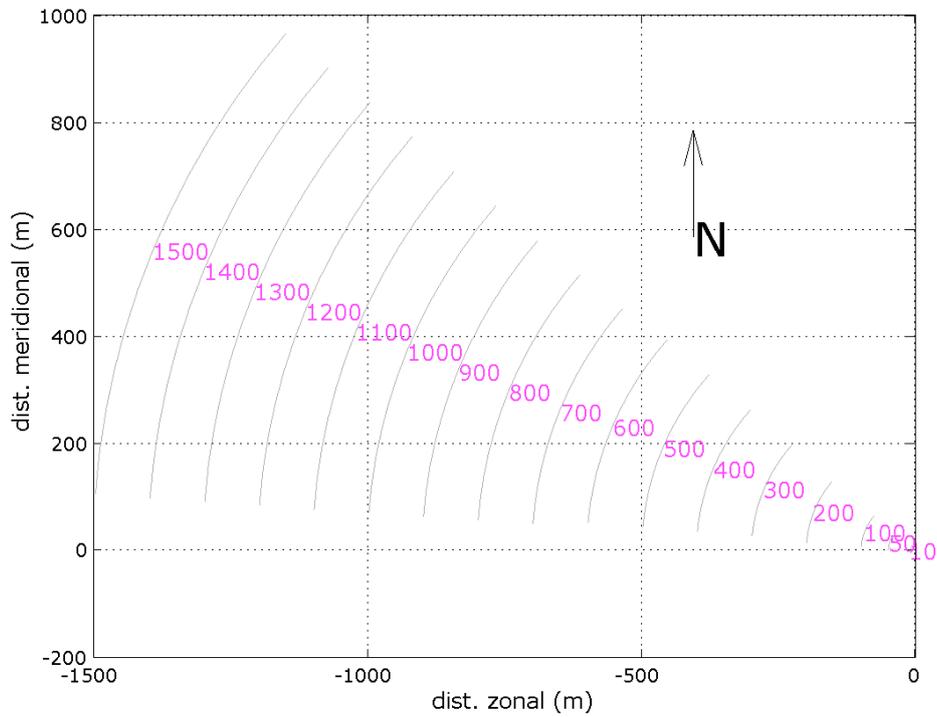


Figura 22: Posição das radiais usadas para monitoramento da pluma de sólidos em suspensão nos descartes com *riser* até a distância de 1500m. A seta indica o norte.

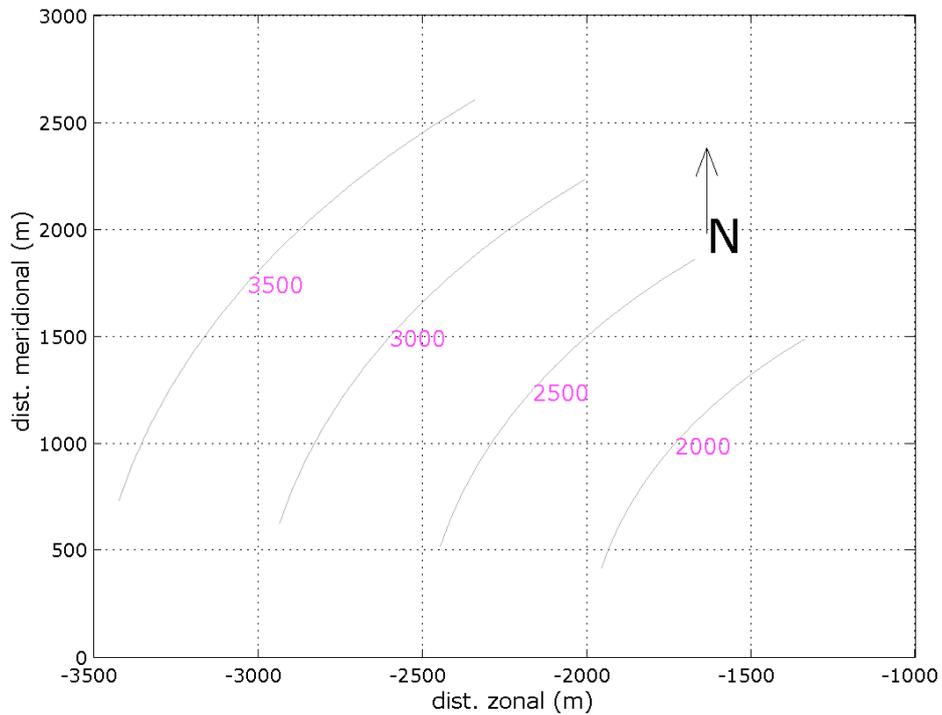


Figura 23: Posição das radiais usadas para monitoramento da pluma de sólidos em suspensão nos descartes com *riser* de 2000m a 3500m do ponto de descarte. A seta indica o norte.

As plumas obtidas para os descartes sem *riser* são apresentadas na Figura 24 e Figura 25, para os descartes SOL_SEC1 e, na Figura 26 e Figura 27, para os descartes SOL_SEC2.

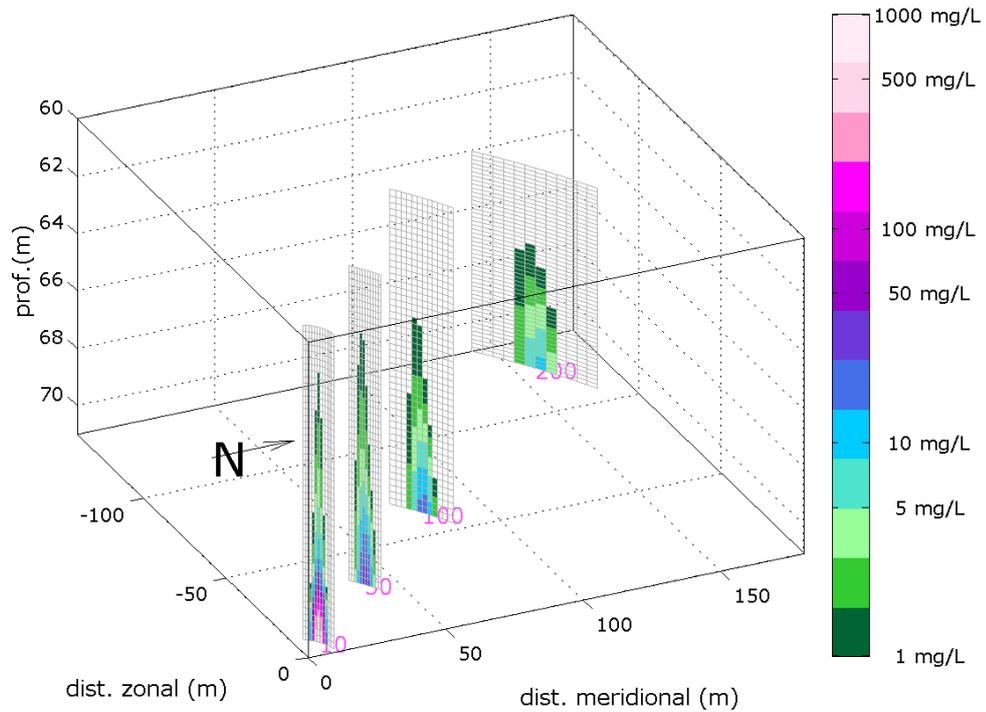


Figura 24: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte SOL_SEC1 até 200m da fonte.

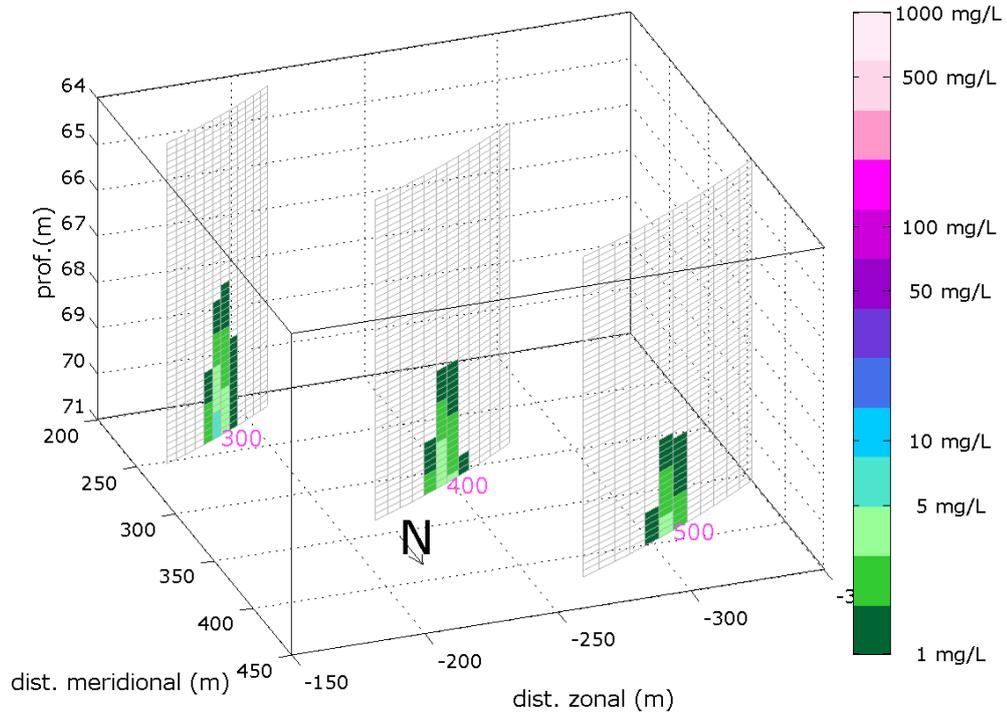


Figura 25: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte SOL_SEC1, de 300m a 500m da fonte.

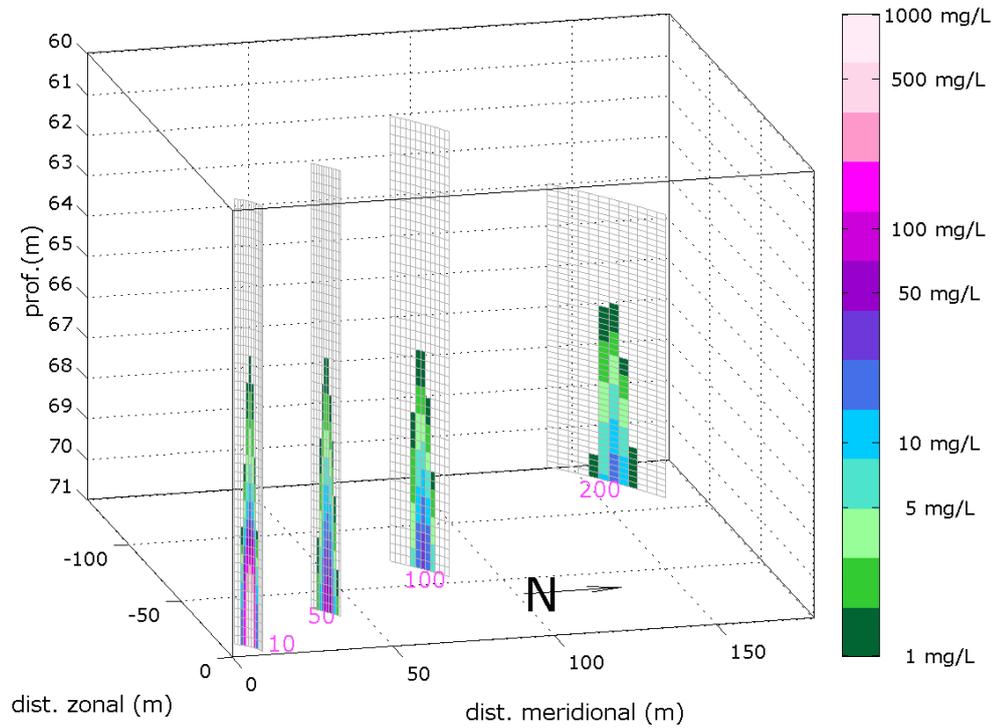


Figura 26: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte SOL_SEC2 até 200m da fonte.

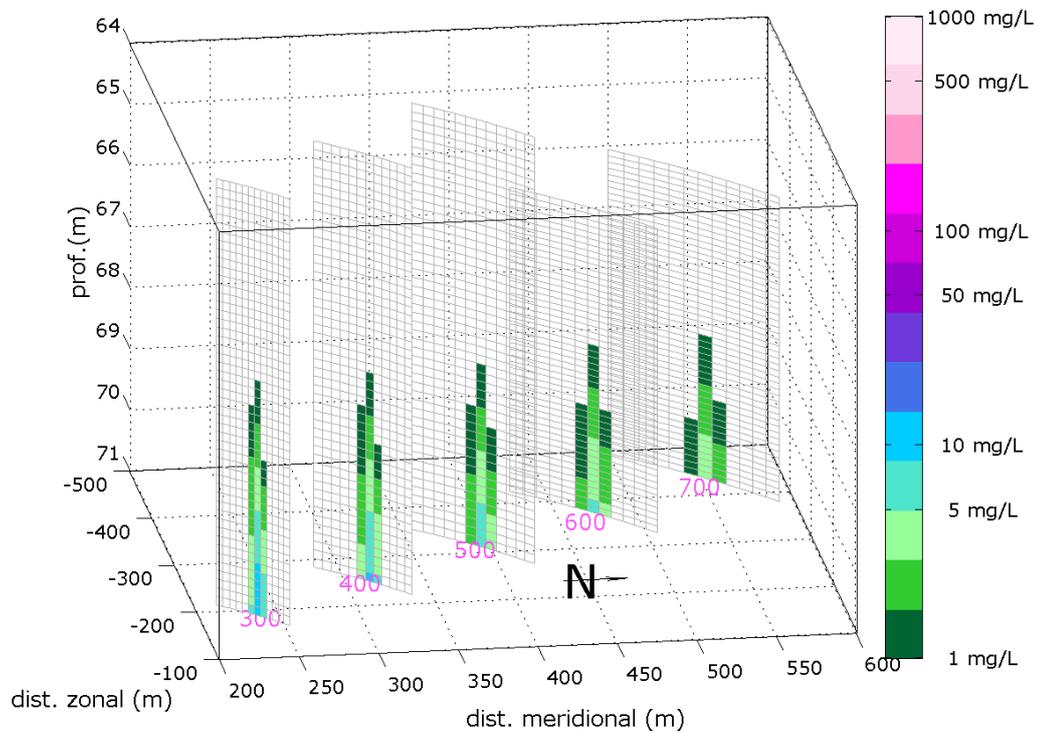


Figura 27: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte SOL_SEC2, de 300m a 700m da fonte.

Nota-se que ambas as plumas apresentam o mesmo comportamento, quanto ao posicionamento na coluna d'água. As plumas formadas restringem-se aos últimos 9m de profundidade. O descarte SOL_SEC2 além de apresentar valores superiores, alcança ainda uma maior distância da fonte (600m) com concentrações acima do limiar monitorado (5mg/L). Este fato pode ser associado ao maior volume descartado nesta seção.

As concentrações máximas obtidas em cada radial para as plumas dos descartes sem *riser* são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19: Concentração máxima (mg/L) de sólidos em suspensão em cada radial para todos os descartes.

distância da fonte (m)	SOL_SEC1	SOL_SEC2
10	791,75	917,09
50	42,38	89,54
100	22,71	38,96
200	11,40	20,08
300	7,11	12,80
400	5,29	9,17
500	3,82	6,87
600		5,41
700		4,01

As plumas formadas nos descartes das seções com riser são apresentadas da Figura 28 à Figura 34.

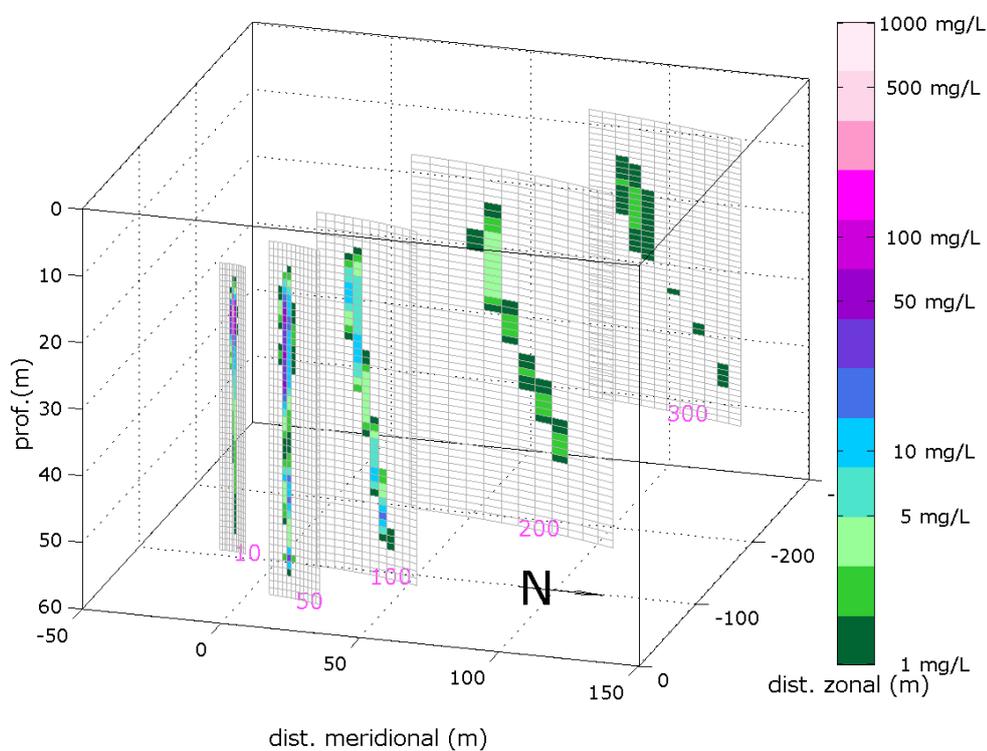


Figura 28: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte SOL_SEC3.

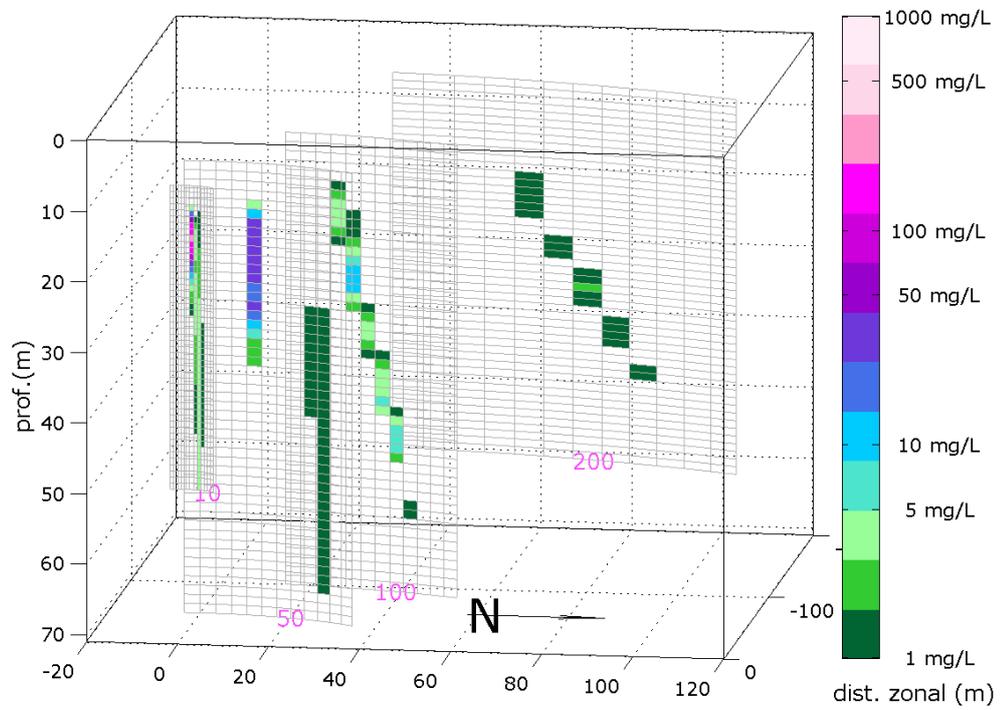


Figura 29: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte SOL_SEC4.

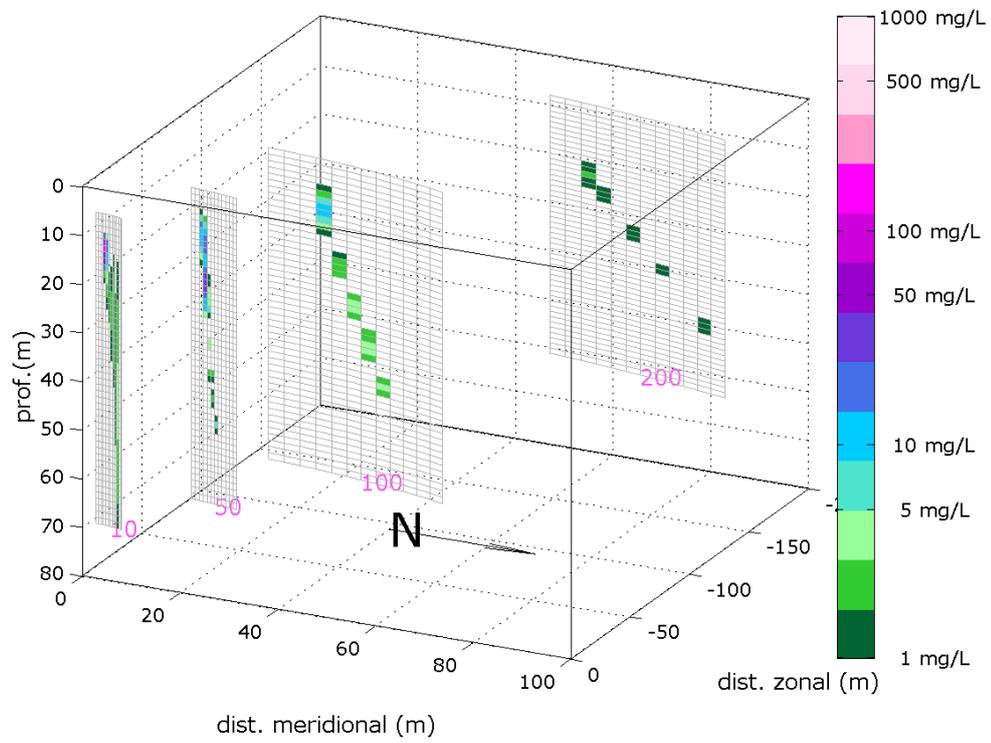


Figura 30: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte SOL_SEC5.

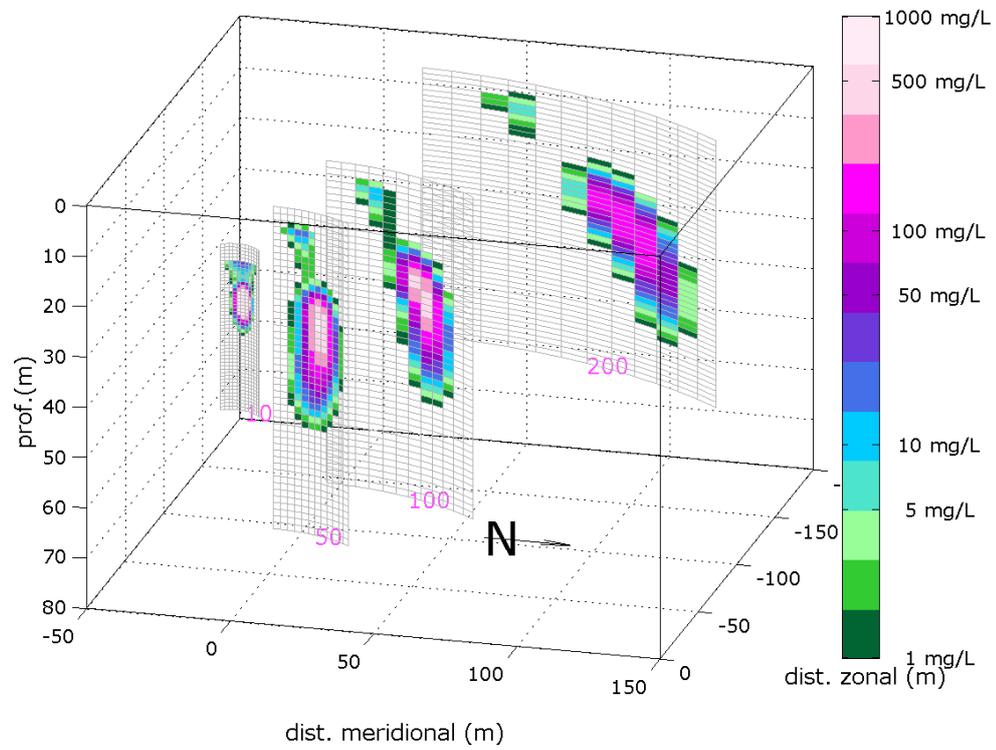


Figura 31: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte FLU_SEC5 até 200m da fonte.

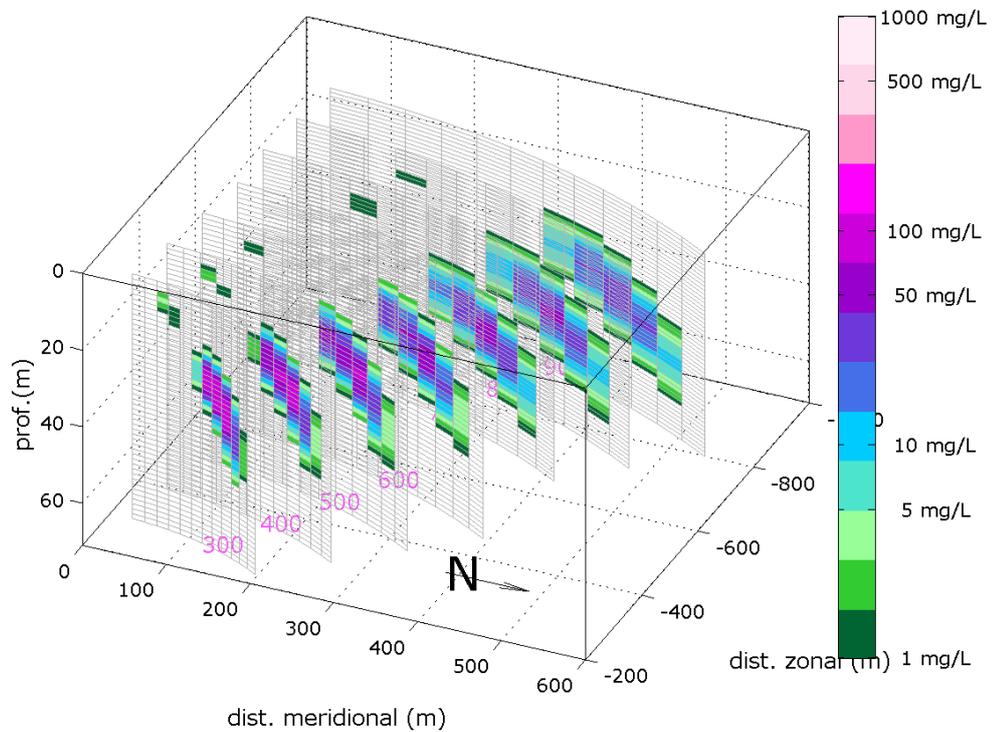


Figura 32: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte FLU_SEC5, de 300m a 900m da fonte.

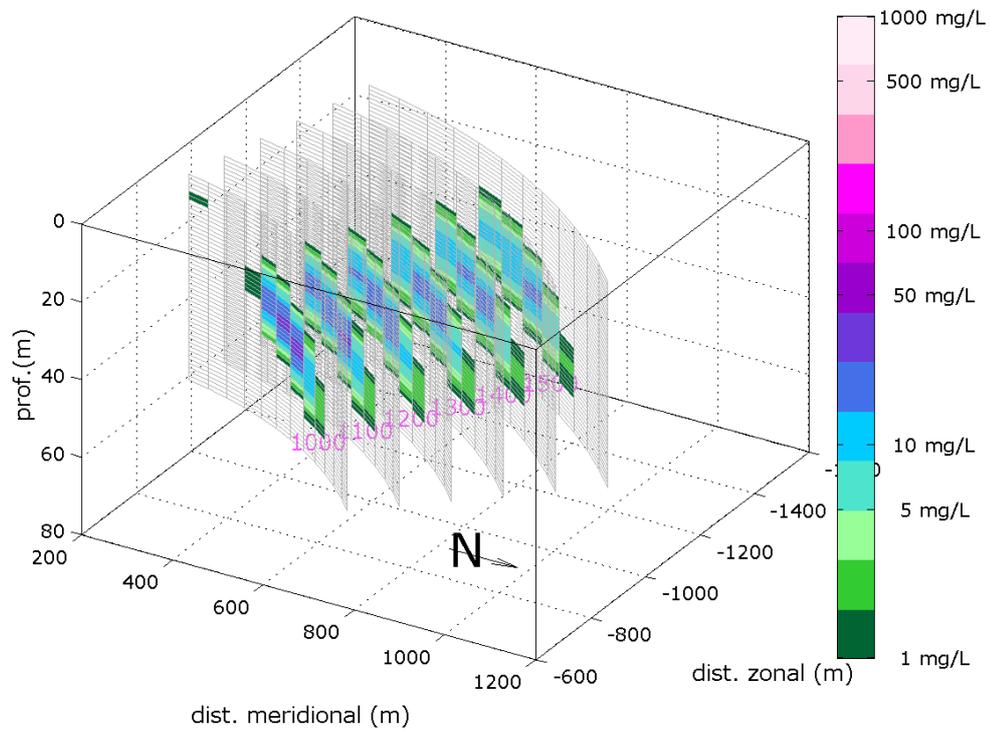


Figura 33: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte FLU_SEC5, de 1000m a 1500m da área fonte.

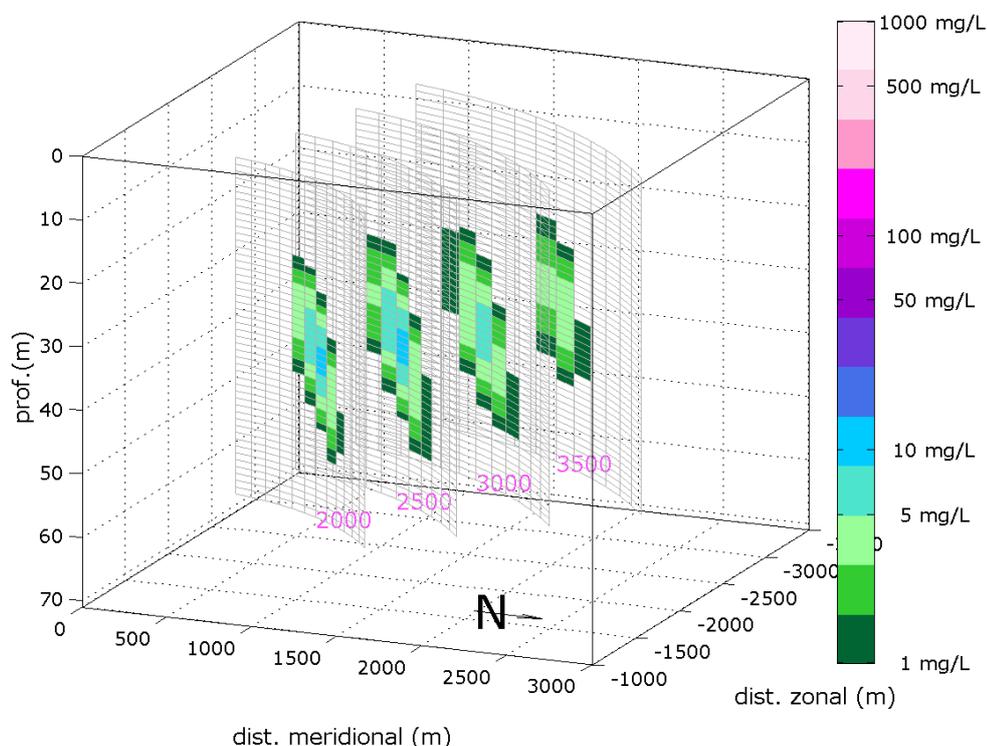


Figura 34: Pluma de sólidos em suspensão formada no descarte FLU_SEC5, de 2000m até 3500m da fonte.

As plumas formadas nos descartes de cascalho e fluido aderido nas seções com *riser* apresentam um comportamento semelhante. Ao atingir maiores profundidades, as plumas são influenciadas pela hidrodinâmica da região. Os níveis de sólidos em suspensão do descarte SOL_SEC5 são inferiores aos demais na região próxima à fonte. No entanto, na distância de 200m, os três descartes possuem valores abaixo de 5mg/L.

Como esperado, o descarte FLU_SEC5 é o responsável pelo maior impacto. Até 300m da fonte, a pluma ainda retém 100mg/L de sólidos. A esta distância, todos os descartes de cascalho e fluido aderido já estão abaixo do limiar monitorado. Valores próximos a 5mg/L são observados somente após os 3500m da fonte.

Tabela 20: Concentração máxima (mg/L) de sólidos em suspensão em cada radial para todos os descartes.

distância da fonte (m)	SOL_SEC3	SOL_SEC4	SOL_SEC5	FLU_SEC5
10	248,65	205,42	132,45	3760,25
50	50,81	35,25	31,08	644,27
100	18,61	11,16	9,65	432,13
200	4,64	1,77	1,73	196,69
300	1,94			119,00
400				93,68
500				75,35
600				60,89
700				51,98
800				46,39
900				39,12
1000				33,56
1100				29,12
1200				25,48
1300				22,50
1400				19,64
1500				17,01
2000				8,90
2500				8,66
3000				6,00
3500				4,20

VI. CONCLUSÕES

Sete simulações numéricas foram realizadas para determinar o comportamento do material a ser descartado no mar pela atividade de perfuração do poço Tapereba 01, no bloco BM-PAMA-16, na Bacia do Pará-Maranhão.

Foram feitas estimativas tanto para o número de sólidos em suspensão na coluna d'água, quanto para o acúmulo destes no leito marinho. Os acúmulos no leito marinho foram calculados em duas diferentes grades, de forma a bem avaliar tanto a região de maior espessura (grade 2) quanto a área total da deposição (grade 1).

O cenário ambiental utilizado nas modelagens procurou reproduzir as principais características oceanográficas da região do bloco. O acúmulo do material das seções com e sem *riser* apresentou orientação noroeste concordando com a hidrodinâmica simulada para a região e com a encontrada na literatura.

A espessura máxima obtida, calculada pela grade 2, foi de 2,32m e a área coberta pela pilha, estimada com a grade 1, abrange 75.356m². O descarte que mais contribuiu para a espessura resultante foi de cascalho e fluido aderido da seção 2 (1,52m) e para área, o descarte da seção 3 (46889,78m²).

Quanto às plumas de sólidos em suspensão, o descarte de fluido excedente da seção 5 é responsável pelo maior impacto, com concentrações próximas a 4mg/L a 4000 m da fonte.

VII. BIBLIOGRAFIA

BRANDSMA, M., & SMITH, J., 1999. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model Report and User Guide. *ExxonMobil Upstream Research Co.*

CHASSIGNET, E. P., SMITH, L. T., HALLIWEL, G. R., 2003, "North Atlantic Simulations with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): Impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and termobaricity", *Journal Physical Oceanography*, v. 33, n. 12, pp. 2504-2526.

GABIOUX, M. 2008. Estudo numérico dos meandros e vórtices da corrente do Brasil entre 22°S e 30°S [Rio de Janeiro] 2008 XVII, 138 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2008) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

HYCOM. 2008. Assimilative Global Simulation (10/2008 to 11/2008), [online] Disponível via WWW. URL: http://hycom.coaps.fsu.edu/data/glb_simulation.html.

INNOCENTINI, V.; CUNHA PRADO, S.C.S.; PEREIRA, C.S.; OLIVEIRA ARANTES, F.; BRANDÃO, I.N. Marulhos no litoral norte do Brasil gerados por furacões: caso de 24 de outubro de 1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: SBMET, 2000. 128 p