

## **II.6.1.2 - MODELAGEM NUMÉRICA DA DISPERSÃO DA PLUMA DE ÁGUA PRODUZIDA**



---

## **ÍNDICE GERAL**

II.6.1.2 - Modelagem Numérica da Dispersão da Pluma de Água Produzida.....	1/35
-------------------------------------------------------------------------------	------



## TABELAS E QUADROS

Tabela II.6.1.2-1 - Variância explicada pelo Primeiro Modo da EOF para os dados de corrente, temperatura e salinidade.....	11/35
Tabela II.6.1.2-2 - Componentes u e v, e respectiva intensidade da corrente no cenário de verão. ....	13/35
Tabela II.6.1.2-3 - Componentes u e v, e respectiva intensidade da corrente no cenário de inverno.....	13/35
Tabela II.6.1.2-4 - Dados de temperatura e salinidade com a profundidade (cenário de verão). ....	15/35
Tabela II.6.1.2-5 - Dados de temperatura e salinidade com a profundidade (cenário de inverno). ....	15/35
Tabela II.6.1.2-6 - Distribuição das ocorrências de cada classe de altura para Hs, swell e wind sea. ....	17/35
Tabela II.6.1.2-7 - Altura significativa (Hs) e período de pico (T). ....	18/35
Tabela II.6.1.2-8 - Estatística mensal dos ventos no BM-S-40 para o período de 1978 a 2007. ....	18/35
Tabela II.6.1.2-9 - Valores de temperatura do ar e velocidade do vento.....	20/35
Tabela II.6.1.2-10 - Características do efluente descartado.....	21/35
Tabela II.6.1.2-11 - Tempo inicial, final e de simulação (em horas) para cada cenário em relação à distância da fonte.....	23/35
Tabela II.6.1.2-12 - Resultados obtidos na fase dinâmica. ....	28/35
Tabela II.6.1.2-13 - Valores de concentração e diluição desejados e os valores obtidos ao término da fase dinâmica.....	29/35
Tabela II.6.1.2-14 - Variação da concentração máxima (%) e da diluição mínima da pluma com a distância da fonte.....	34/35



## FIGURAS

Figura II.6.1.2-1 - Localização do FPSO Cidade de Itajaí (vermelho), dentro do bloco BM-S-40 (amarelo) na Bacia de Santos (polígono branco). .....	2/35
Figura II.6.1.2-2 - Localização dos pontos de grade do HYCOM e do NCEP, utilizados no estudo, em relação à localização do FPSO Cidade de Itajaí. ....	3/35
Figura II.6.1.2-3 - Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de janeiro de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura.....	5/35
Figura II.6.1.2-4 - Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de julho de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura. ....	5/35
Figura II.6.1.2-5 - Histograma direcional de correntes nas profundidades de 0, 50 e 125m para os resultados do HYCOM no cenário de verão e inverno. ....	10/35
Figura II.6.1.2-6 - Perfil de correntes utilizado para as simulações (cenário de verão). Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado. ....	12/35
Figura II.6.1.2-7 - Perfil de correntes utilizado para as simulações (cenário de inverno). Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado.....	12/35
Figura II.6.1.2-8 - Perfis sintéticos de temperatura obtidos pelo HYCOM (linhas escuras) e o resultante do primeiro modo da EOF (nas cores mais claras) usado nas simulações para o cenário de verão.....	14/35
Figura II.6.1.2-9 - Perfis sintéticos de temperatura obtidos pelo HYCOM (linhas escuras) e o resultante do primeiro modo da EOF (nas cores mais claras) usado nas simulações para o cenário de inverno. ....	14/35
Figura II.6.1.2-10 - Localização do ponto para o qual foram utilizados os resultados do modelo WaveWatch III neste relatório. ....	16/35
Figura II.6.1.2-11 - Distribuição de alturas para altura significativa (a), swell (b) e wind sea (c), em classes de 0,5 m. ....	17/35
Figura II.6.1.2-12 - Temperatura média do ar (°C) na região da Bacia de Santos no período de verão. ....	19/35
Figura II.6.1.2-13 - Temperatura média do ar (°C) na região da Bacia de Santos no período de inverno. ....	19/35

Figura II.6.1.2-14 - Perfil longitudinal (A) e em planta (B) obtido na fase dinâmica da pluma, durante o período de verão.....	24/35
Figura II.6.1.2-15 - Perfil longitudinal (A) e em planta (B) obtido na fase dinâmica da pluma, durante o período de inverno. ....	25/35
Figura II.6.1.2-16 - Concentração máxima da pluma com a distância da fonte durante a fase dinâmica, nos cenários de verão (vermelho) e inverno (azul)..	26/35
Figura II.6.1.2-17 - Diluição mínima com a distância da fonte durante a fase dinâmica, nos cenários de verão (vermelho) e inverno (azul).....	26/35
Figura II.6.1.2-18 - Variação da temperatura com a distância da fonte durante a fase dinâmica, durante o verão (vermelho) e o inverno (azul). ....	27/35
Figura II.6.1.2-19 - Variação da salinidade com a distância da fonte durante a fase dinâmica, durante o verão (vermelho) e o inverno (azul).....	28/35
Figura II.6.1.2-20 - Localização dos perfis transversais da pluma para o período de verão.....	30/35
Figura II.6.1.2-21 - Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte da água de produção no período de verão, até a distância de 200 m. ....	30/35
Figura II.6.1.2-22 - Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte da água de produção no período de verão, de 250 a 400 m de distância. ....	31/35
Figura II.6.1.2-23 - Localização dos perfis transversais da pluma para o período de inverno. ....	32/35
Figura II.6.1.2-24 - Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte da água de produção no período de inverno. ....	32/35
Figura II.6.1.2-25 - Concentração máxima da pluma com a distância da fonte, nos cenários de verão (vermelho) e inverno (azul).....	33/35
Figura II.6.1.2-26 - Diluição mínima com a distância da fonte, nos cenários de verão (vermelho) e inverno (azul). ....	33/35



## ***II.6.1.2 - Modelagem Numérica da Dispersão da Pluma de Água Produzida***

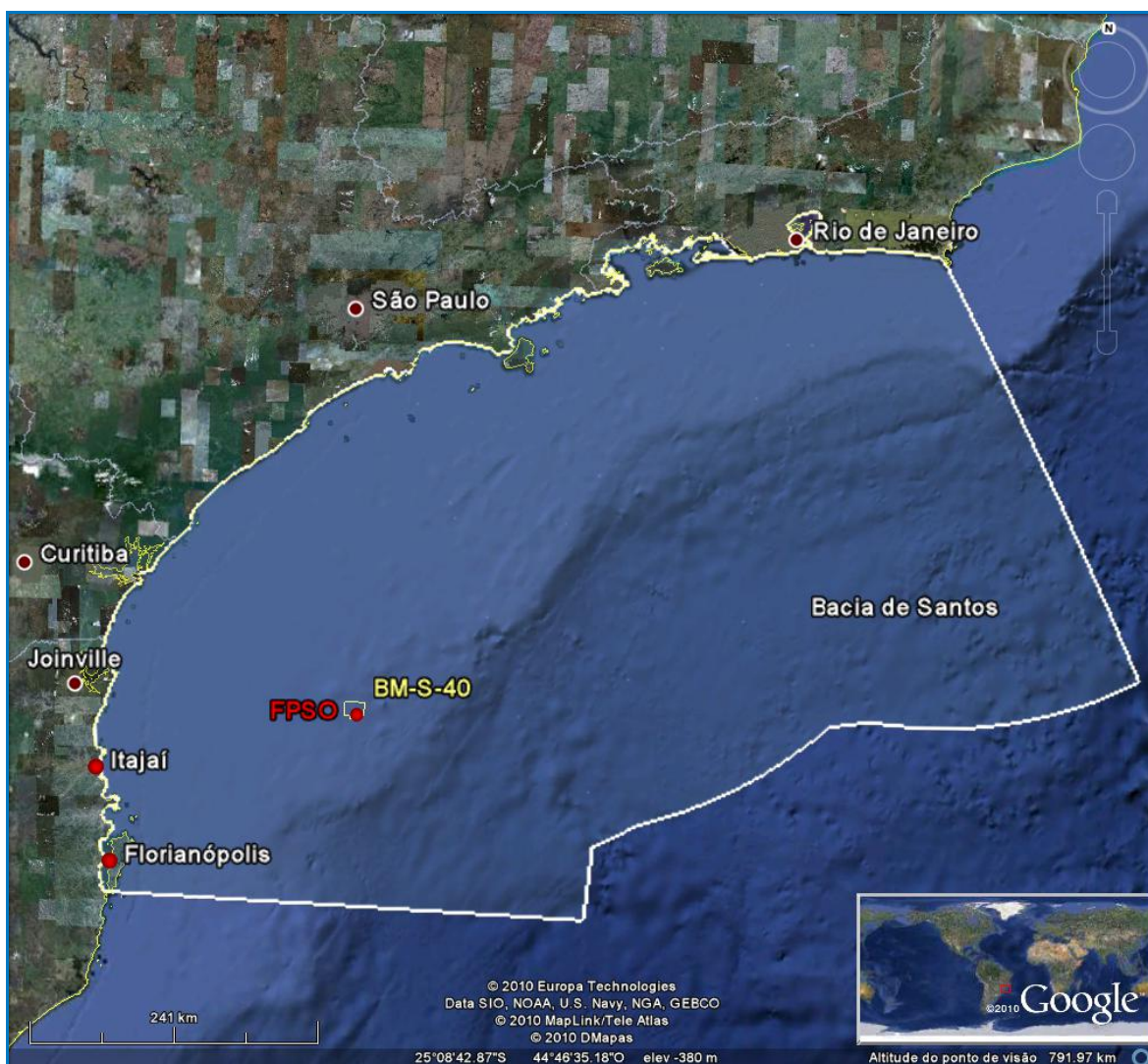
### ***II.6.1.2.1 - Introdução***

Este documento apresenta o estudo de modelagem numérica da dispersão da pluma de água produzida do FPSO Cidade de Itajaí. A operação ocorrerá na região do bloco BM-S-40 na região da Bacia de Santos.

O relatório visa atender às especificações da Resolução CONAMA n° 393/07. Serão aqui apresentados os dados da operação relevantes ao comportamento da pluma no mar, as forçantes ambientais utilizadas bem como detalhes da metodologia escolhida. Os resultados são descritos em função da variação da concentração do fluido com a distância da fonte visando identificar a área de influência do descarte nos cenários sazonais escolhidos.

### ***II.6.1.2.2 - Caracterização Meteo-oceanográfica da Área de Estudo***

O FPSO Cidade de Itajaí, de onde está previsto o descarte da água produzida, localizar-se-á na Bacia de Santos nas coordenadas de 26° 27' 51,4" S e 46° 31' 14,45" W. Este ponto possui uma distância aproximada de 234 Km da cidade de Joinville (Figura II.6.1.2-1).



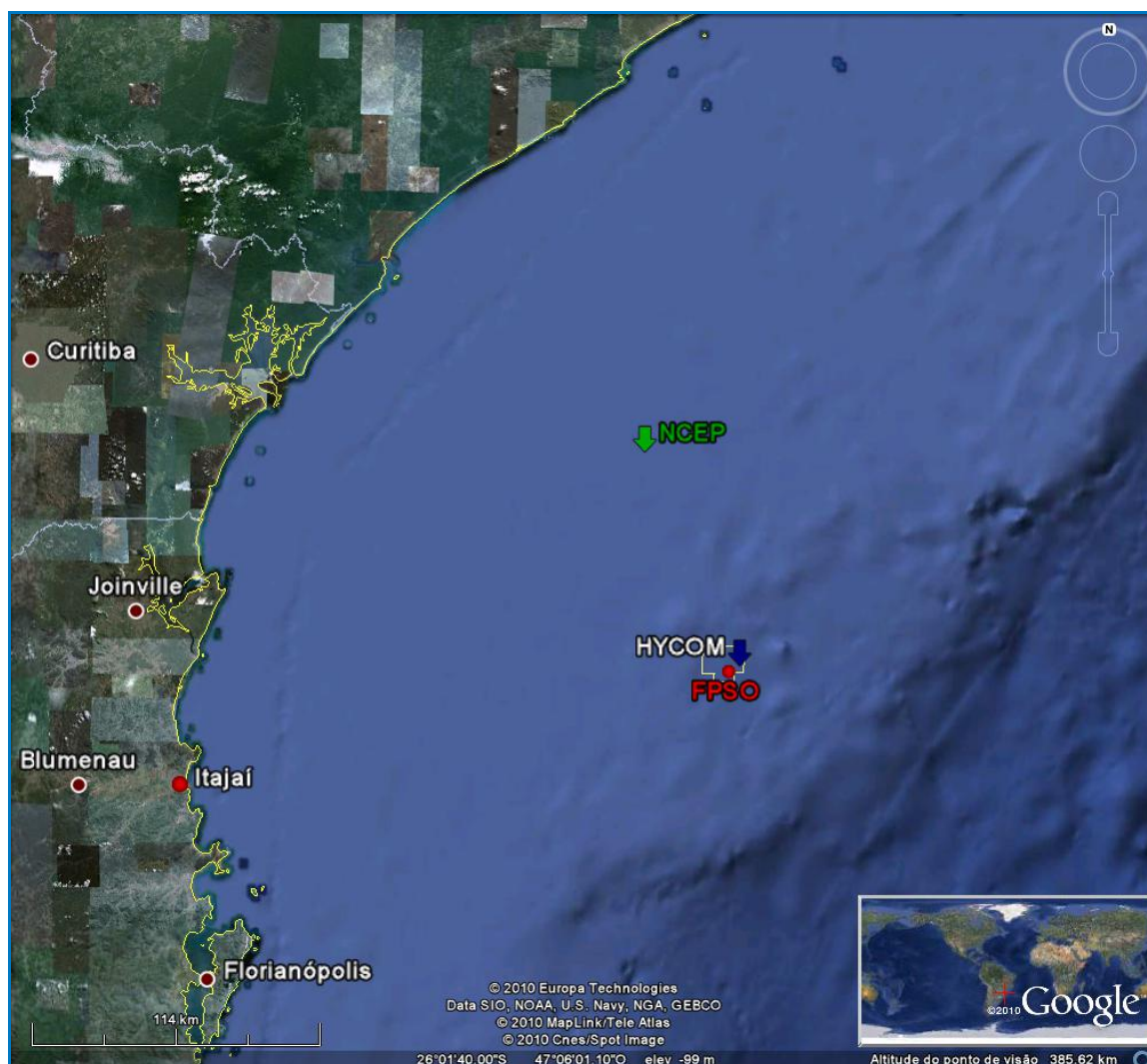
**Figura II.6.1.2-1** - Localização do FPSO Cidade de Itajaí (vermelho), dentro do bloco BM-S-40 (amarelo) na Bacia de Santos (polígono branco).

Para a caracterização oceanográfica da região foram utilizados dados de parâmetros oceanográficos de variadas fontes:

- Dados de corrente, temperatura e salinidade do HYCOM Consortium disponíveis em: <http://hycom.rsmas.miami.edu/dataserver/>. Acessado em agosto de 2009.
- Dados de vento e temperatura do ar das reanálises do NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for

Atmospheric Research), disponíveis em: <http://www.cdc.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml>. Acessado em agosto de 2009.

A localização dos pontos de onde foram extraídos os dados para o estudo estão apresentados na Figura II.6.1.2-2.



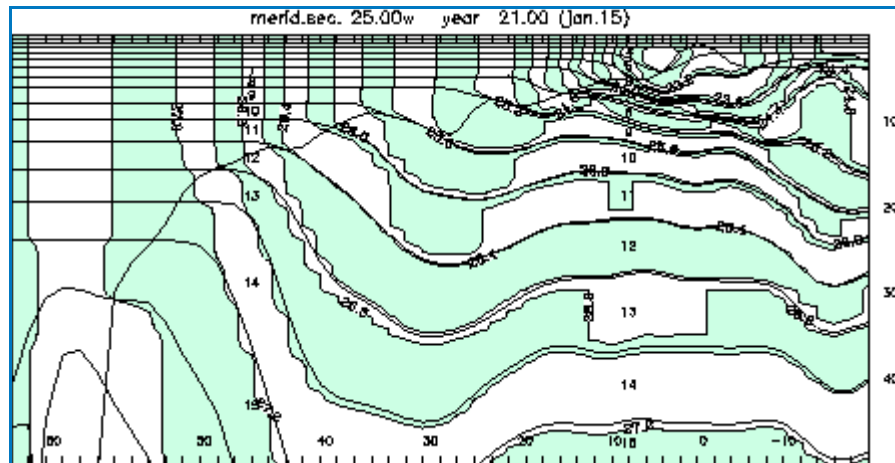
**Figura II.6.1.2-2** - Localização dos pontos de grade do HYCOM e do NCEP, utilizados no estudo, em relação à localização do FPSO Cidade de Itajaí.

Os dados de ambas as bases foram divididos em 2 cenários sazonais: *verão* (meses de setembro a fevereiro) e *inverno* (março a agosto).

## **1) Base Hidrodinâmica Utilizada**

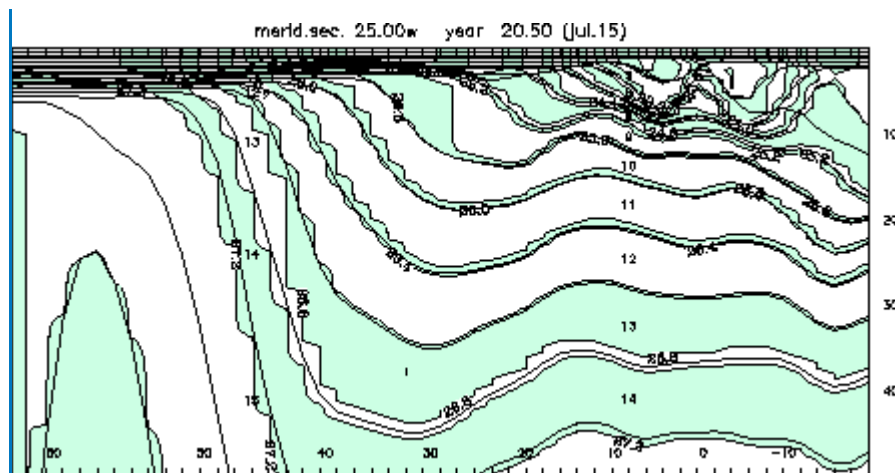
### **1.1) Descrição do Modelo**

O HYCOM é um modelo de circulação oceânica global, que utiliza discretização horizontal em diferenças finitas (GABIOUX, 2008), e tem como principal característica a utilização de um sistema de coordenadas verticais híbridas, isto é, utiliza o sistema de coordenadas isopicnais para as áreas de oceano aberto e estratificado, coordenadas z (cartesianas) para a camada de mistura e regiões pouco estratificadas, e coordenadas sigma para regiões com menores profundidades e topografia de fundo variável (zonas costeiras). Utilizando esses três sistemas de coordenadas, o modelo pode conservar as características das massas d'água por longos períodos de tempo em regiões oceânicas (coordenada isopicnal), obter alta resolução na camada de mistura ou em regiões com pouca estratificação (coordenada z), e resolver melhor a topografia de fundo em áreas costeiras ou sobre a plataforma continental (coordenada sigma). Desta forma, o HYCOM é basicamente um modelo em camadas isopicnais, que pode realizar uma transição suave para os sistemas de coordenadas z e sigma próximo aos contornos superiores e inferiores, ou quando a resolução vertical é inadequada (GABIOUX, 2008). Assim, o HYCOM combina as vantagens dos diferentes sistemas de coordenadas, simulando de forma otimizada as características da circulação oceânica e costeira, sendo atribuída ao usuário a determinação das zonas de transição entre os sistemas de coordenadas (CHASSIGNET et al., 2003). A Figura II.6.1.2-3 e a Figura II.6.1.2-4 ilustram a estrutura híbrida do modelo.



**Figura II.6.1.2-3** - Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de janeiro de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura.

Fonte: <http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html>. Acessado em agosto de 2009



**Figura II.6.1.2-4** - Seção meridional do HYCOM na longitude de 25° W, na porção leste do Atlântico Norte no dia 15 de julho de 2002. Área sombreada: densidade. Linhas finas: interfaces das camadas. Linha grossa: profundidade da camada de mistura.

Fonte: <http://hycom.rsmas.miami.edu/hycom-model/overview.html>. Acessado em agosto de 2009.

## 1.2) Equações Governantes

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

$$\begin{aligned} \frac{\Delta v}{\Delta t_s} + \nabla_s \frac{v^2}{2} + (\zeta + f)k \times v + \left( \nabla \frac{\partial p}{\partial s} \right) \frac{\partial v}{\partial p} + \nabla_s M - p \nabla_s \alpha \\ = -g \frac{\partial \tau}{\partial p} + \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right)^{-1} \nabla_s \cdot \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s v \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \nabla_s \cdot \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left( s \frac{\partial p}{\partial s} \right) = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \nabla_s \cdot \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left( s \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right) = \nabla_s \cdot \left( v \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s \theta \right) + H_\theta \quad (2.3)$$

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

Após integração vertical sobre uma camada coordenada, limitada pelas duas superfícies  $S_{sup}$  e  $S_{inf}$  (superfície, fundo do mar e todos os limites de camadas são superfícies  $S$ ), a equação de continuidade (2.2) se torna equação prognóstica para o peso da camada por unidade de área,  $\Delta p = p_{inf} - p_{sup}$  (BLECK, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \Delta p + \nabla_s \cdot (v \Delta p) + \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{inf} - \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right)_{sup} = 0 \quad (2.4)$$

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

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

$$\frac{g}{\Delta p} (\tau_{sup} - \tau_{inf}) \quad (2.5)$$

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

$$(\Delta p)^{-1} \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s v) \quad (2.6)$$

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

A equação (2.4) expressa em camadas integradas é da forma de:

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \theta \Delta p + \nabla_s \cdot (v \theta \Delta p) + \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{inf} - \left( \dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \theta \right)_{sup} = \nabla_s \cdot (v \Delta p \nabla_s \theta) + H_\theta \quad (2.7)$$

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

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

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

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

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

## **2) Corrente, Temperatura e Salinidade**

Para esta caracterização foram utilizados dados disponíveis do *HYCOM Consortium*, acessados em agosto de 2009. Os resultados do *hindcast* que contempla a região do poço encontram-se disponíveis para utilização na página <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.

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 como resultado uma descrição resumida da variabilidade espacial e temporal do fenômeno associada a cada modo normal estatístico. 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 a moda deste dado, de forma a representar a situação mais frequente.



Os dados utilizados foram obtidos até a profundidade de 150m. Por se tratar de um descarte efetuado em superfície e pelo efluente possuir uma densidade inferior à água do mar, espera-se que a pluma resultante restrinja-se às camadas superficiais do oceano.

Na Figura II.6.1.2-5 são apresentados histogramas de velocidade e direção das correntes estimadas pelo HYCOM para período analisado nas profundidades de 0m, 20m e 125 m. Observa-se uma concentração do fluxo na SW e maior intensidade na superfície (com máximas de 1 m/s). Um comportamento bastante semelhante é observado para o cenário de inverno, entretanto, as intensidades máximas observadas neste cenário estão na classe de 0,5 a 0,6 cm/s. Para ambos os cenários, em todas as profundidades, nota-se uma predominância dos valores entre 0,1 e 0,3 m/s. Entretanto, para o cenário de verão em superfície, há um predomínio de valores entre 0,3 e 0,5 m/s.

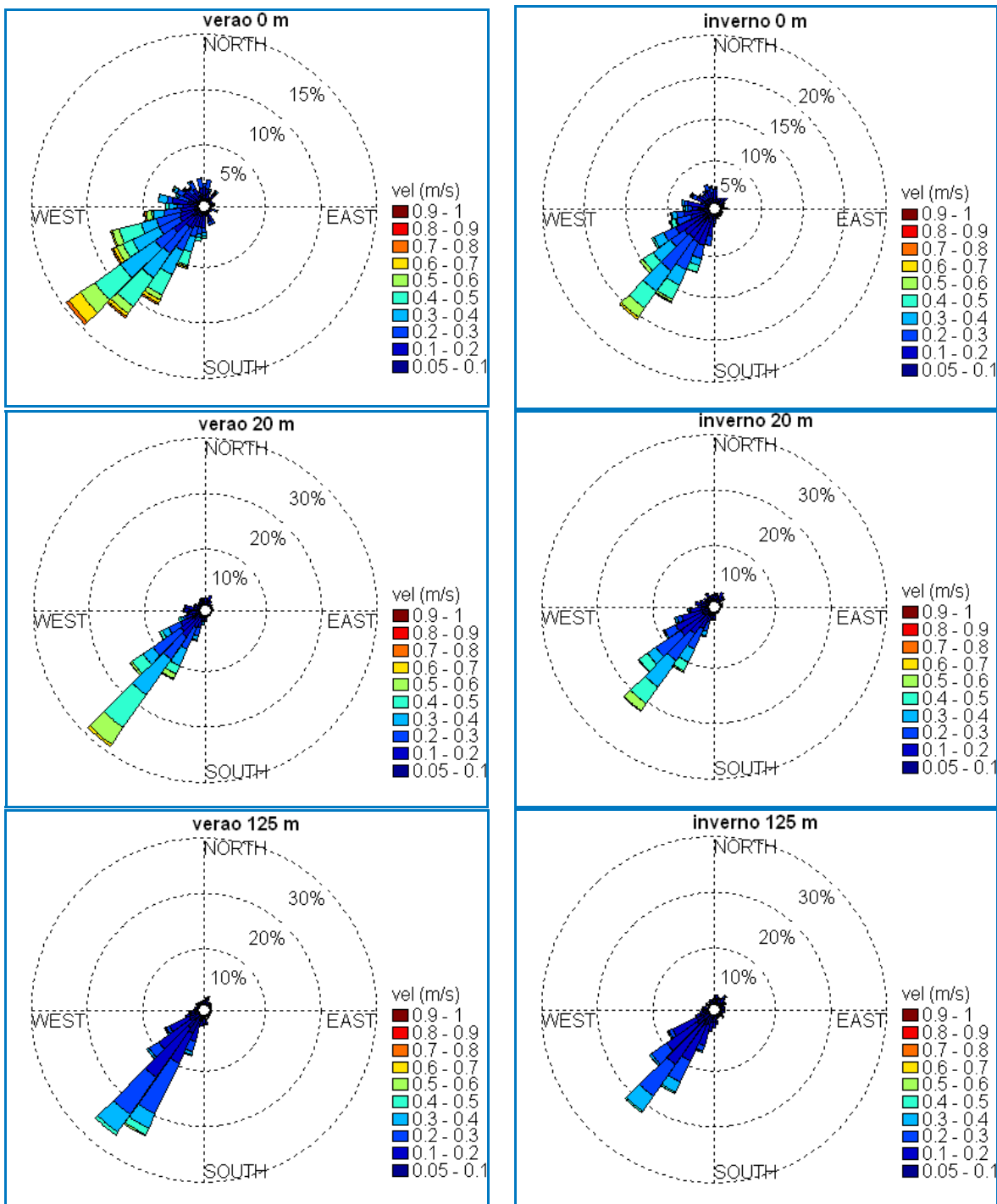


Figura II.6.1.2-5 - Histograma direcional de correntes nas profundidades de 0, 50 e 125m para os resultados do HYCOM no cenário de verão e inverno.

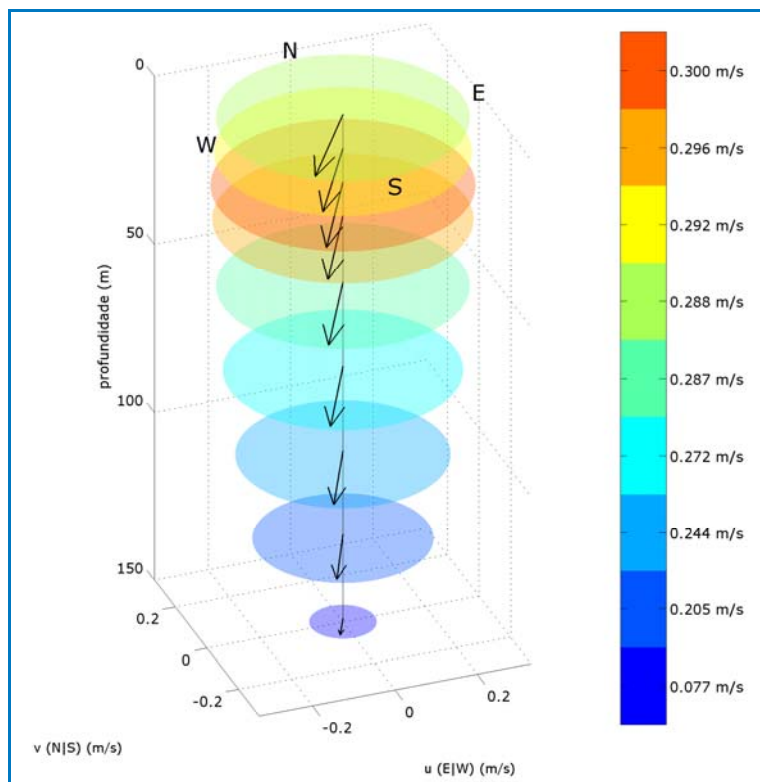
Em superfície, as correntes apresentam uma maior variabilidade em direção, fruto provavelmente da ação dos ventos. Nas demais profundidades, a corrente possui menor variabilidade em direção, com predominância de SW.

A Tabela II.6.1.2-1 apresenta a variância explicada pelo primeiro modo da EOF, calculada para as componentes  $u$  e  $v$  da corrente, para a temperatura e salinidade no período de verão e inverno.

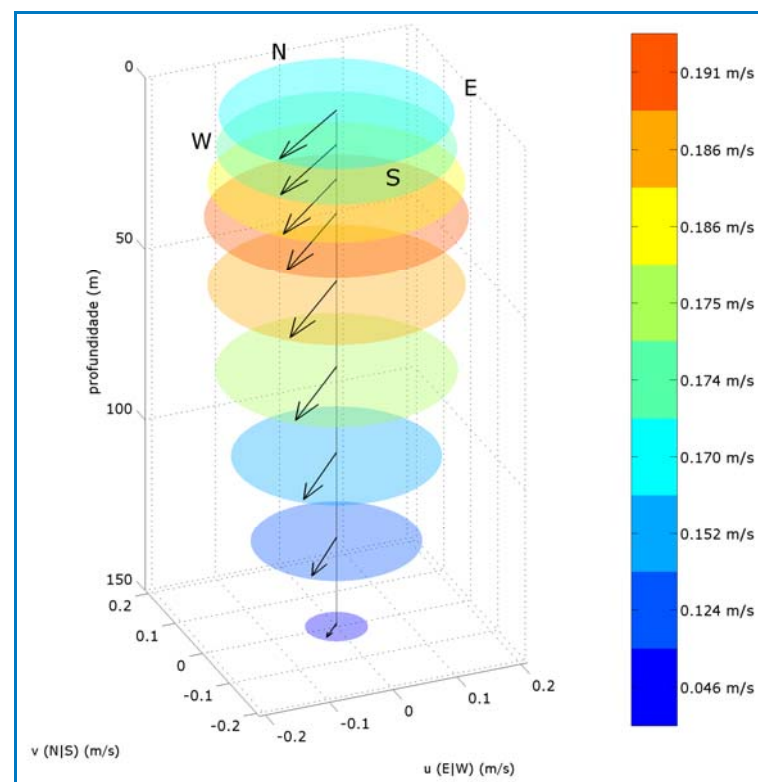
**Tabela II.6.1.2-1 - Variância explicada pelo Primeiro Modo da EOF para os dados de corrente, temperatura e salinidade.**

Parâmetro	verão	inverno
Componente $u$	71%	78%
Componente $v$	85%	88%
Temperatura	51%	53%
Salinidade	76%	55%

Os perfis sintéticos de corrente resultantes da análise EOF para o período de verão e inverno, são apresentados, respectivamente, na Figura II.6.1.2-6 e na Figura II.6.1.2-7.



**Figura II.6.1.2-6** - Perfil de correntes utilizado para as simulações (cenário de verão). Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado.



**Figura II.6.1.2-7** - Perfil de correntes utilizado para as simulações (cenário de inverno). 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 II.6.1.2-2 (verão) e na Tabela II.6.1.2-3 (inverno).

**Tabela II.6.1.2-2** - Componentes u e v, e respectiva intensidade da corrente no cenário de verão.

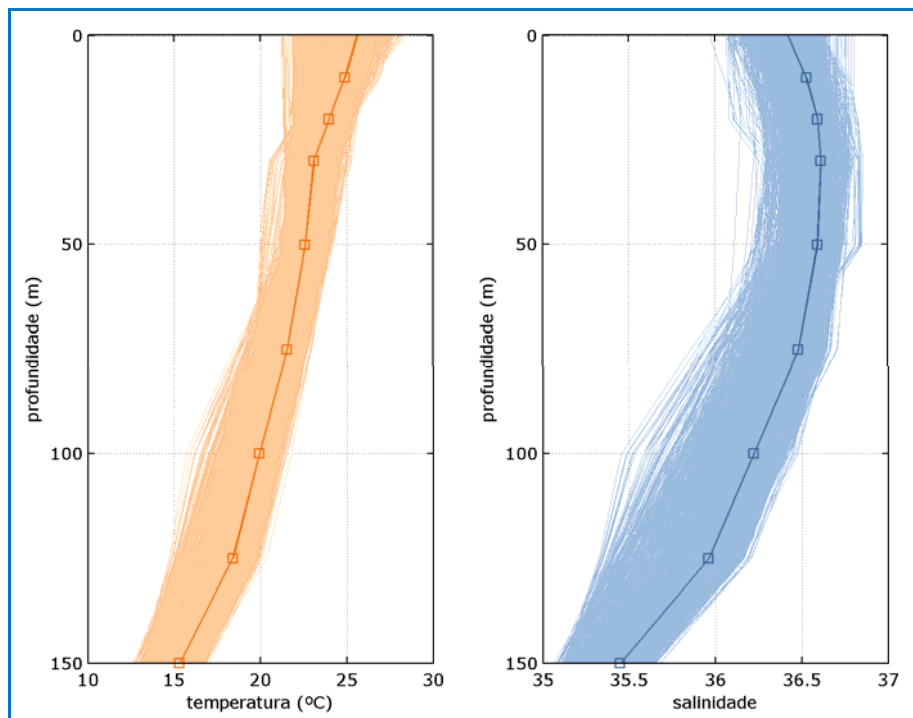
profundidade (m)	componente u (m/s)	componente v (m/s)	intensidade (m/s)
0	-0,159	-0,240	0,288
10	-0,146	-0,253	0,292
20	-0,142	-0,265	0,300
30	-0,137	-0,263	0,296
50	-0,133	-0,255	0,287
75	-0,123	-0,243	0,272
100	-0,107	-0,220	0,244
125	-0,086	-0,187	0,205
150	-0,033	-0,069	0,077

**Tabela II.6.1.2-3** - Componentes u e v, e respectiva intensidade da corrente no cenário de inverno.

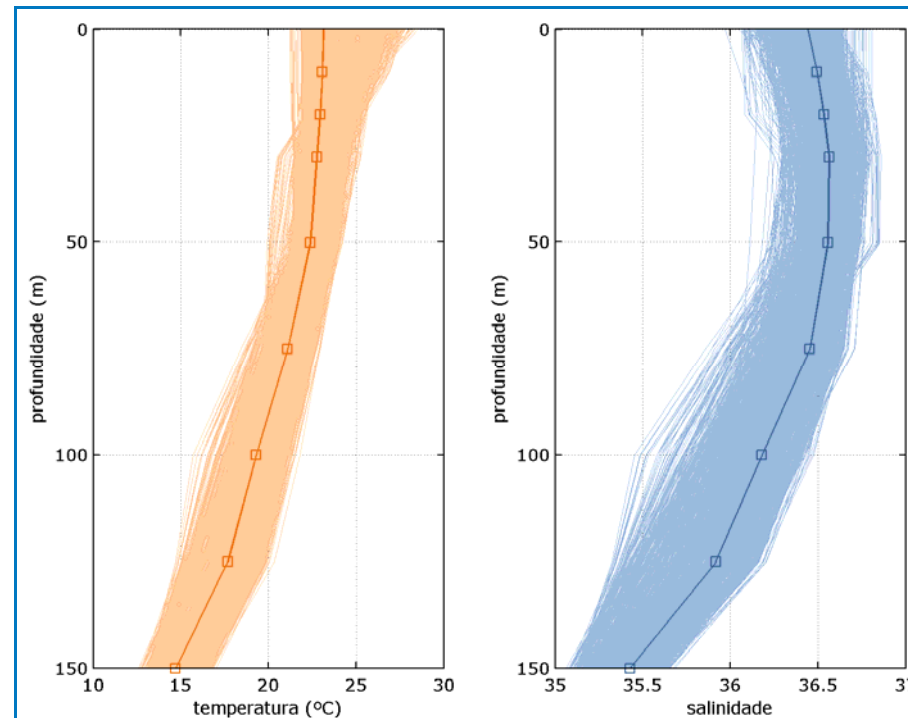
profundidade (m)	componente u (m/s)	componente v (m/s)	intensidade (m/s)
0	-0,134	-0,105	0,170
10	-0,135	-0,110	0,174
20	-0,137	-0,126	0,186
30	-0,135	-0,135	0,191
50	-0,129	-0,134	0,186
75	-0,119	-0,129	0,175
100	-0,100	-0,115	0,152
125	-0,079	-0,095	0,124
150	-0,030	-0,034	0,046

Os dados de temperatura e salinidade para o cenário de verão e inverno, utilizados nas simulações são apresentados nas Figura II.6.1.2-8 e Figura II.6.1.2-9 e nas Tabela II.6.1.2-4 e Tabela II.6.1.2-5.

Os perfis apresentam uma variabilidade semelhante para ambos os cenários, sendo a temperatura em superfície mais quente durante o verão.



**Figura II.6.1.2-8** - Perfis sintéticos de temperatura obtidos pelo HYCOM (linhas escuras) e o resultante do primeiro modo da EOF (nas cores mais claras) usado nas simulações para o cenário de verão.



**Figura II.6.1.2-9** - Perfis sintéticos de temperatura obtidos pelo HYCOM (linhas escuras) e o resultante do primeiro modo da EOF (nas cores mais claras) usado nas simulações para o cenário de inverno.

**Tabela II.6.1.2-4 - Dados de temperatura e salinidade com a profundidade (cenário de verão).**

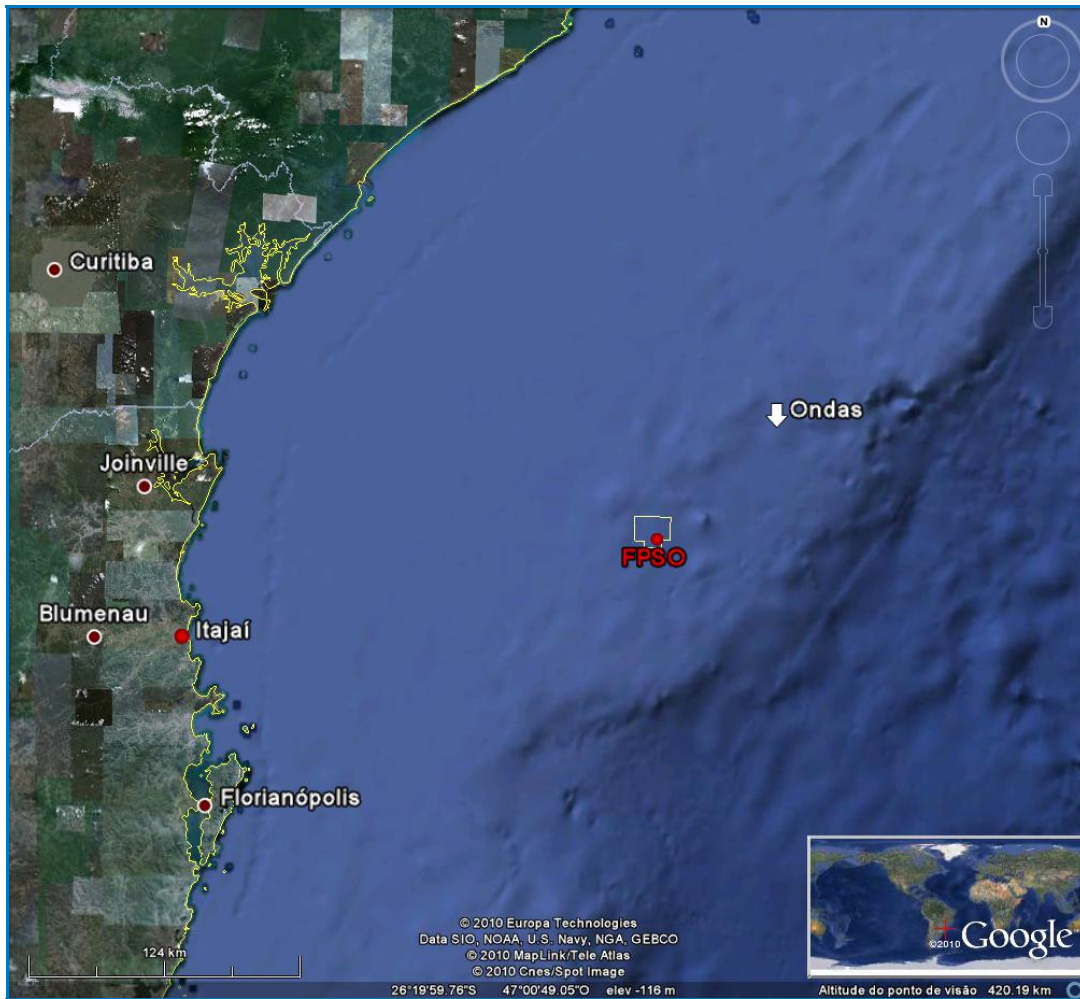
profundidade (m)	temperatura (°C)	salinidade
0	25,61	36,42
10	24,89	36,53
20	23,98	36,60
30	23,09	36,61
50	22,59	36,59
75	21,54	36,48
100	19,94	36,22
125	18,39	35,96
150	15,30	35,45

**Tabela II.6.1.2-5 - Dados de temperatura e salinidade com a profundidade (cenário de inverno).**

profundidade (m)	temperatura (°C)	salinidade
0	23,14	36,44
10	23,07	36,49
20	22,94	36,53
30	22,76	36,56
50	22,38	36,56
75	21,10	36,45
100	19,30	36,18
125	17,67	35,92
150	14,69	35,43

### 3) Ondas

Para se estimar os valores de onda empregados na modelagem, foi utilizada a reconstituição da agitação marítima realizada com o modelo de ondas *WaveWatch III*, em escala global, resolução de 1° em longitude e latitude, forçado por ventos oriundos da Reanálise da NOAA/NCEP, para o período de 01 de janeiro de 1997 a 31 de dezembro de 2006, com resultados gravados a cada 3 horas. Os dados acessados para análise estão disponíveis na página <http://www.cdc.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml> (consultados em agosto de 2009). O ponto escolhido tem coordenadas 26°S; 046°W, cuja localização pode ver vista na Figura II.6.1.2-10, e é o mais próximo da posição do FPSO.

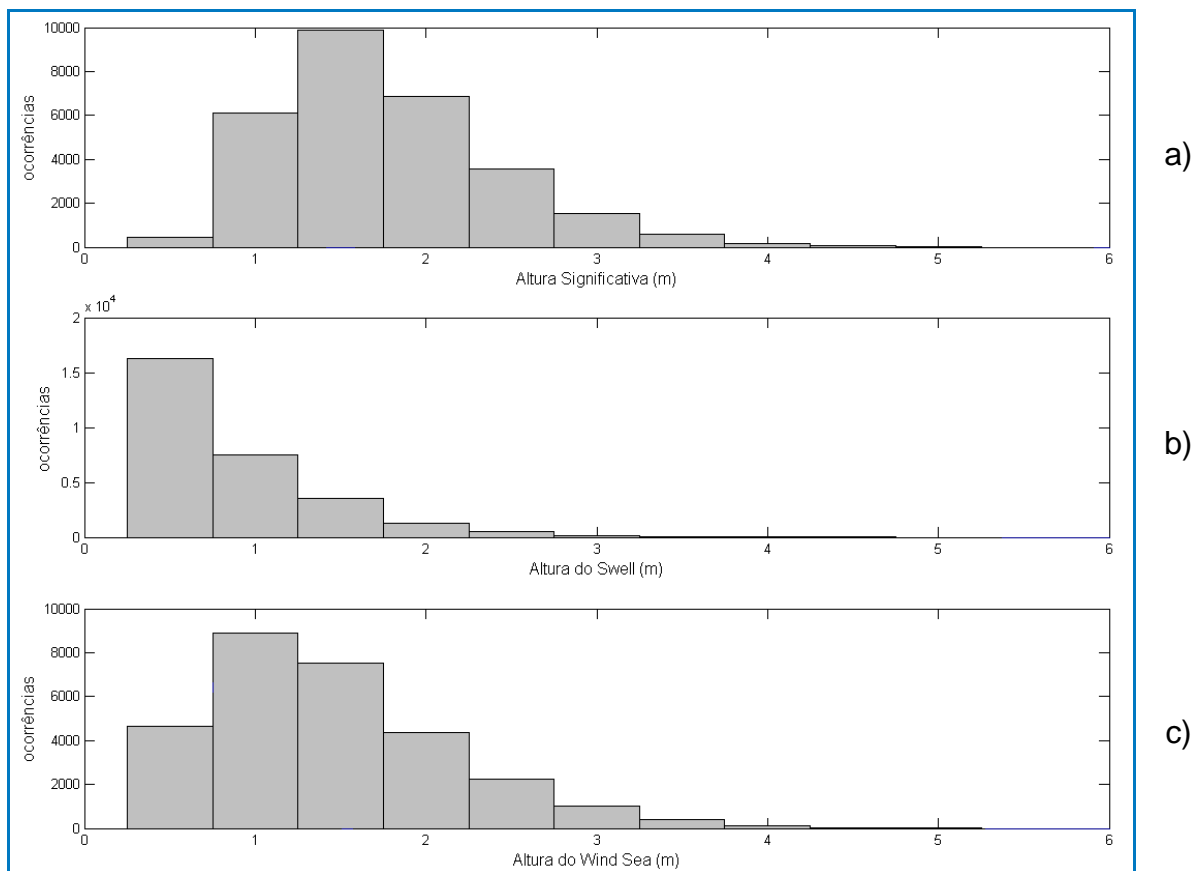


**Figura II.6.1.2-10** - Localização do ponto para o qual foram utilizados os resultados do modelo WaveWatch III neste relatório.

O histograma de altura significativa (Figura II.6.1.2-11-a) indica que o valor típico desse parâmetro é 1,5 m, mas alturas de até 3,5 m são observáveis com frequência. Seja em medições, seja em modelagem, valores de  $H_s$  inferiores a 1,0 são bastante raros, como indicado no gráfico. Grande parte do *swell* (Figura II.6.1.2-11-b) possui altura bastante pequena, entre 0,5 e 1,0 m. Já para o *wind sea* (Figura II.6.1.2-11-c), as maiores ocorrências são para as classes centradas em 1,0 e 1,5 m.

Na Figura II.6.1.2-11 e na Tabela II.6.1.2-6, estão assinaladas o número de ocorrências para as principais classes, para altura significativa, *swell* e *wind sea*.





**Figura II.6.1.2-11** - Distribuição de alturas para altura significativa (a), swell (b) e wind sea (c), em classes de 0,5 m.

**Tabela II.6.1.2-6** - Distribuição das ocorrências de cada classe de altura para Hs, swell e wind sea.

altura	altura significativa			swell			wind sea		
	ocorr.	%	% acum.	ocorr.	%	% acum.	ocorr.	%	% acum.
0,5	464	1,5	1,5	16274	55,7	55,7	4631	15,9	15,9
1	6091	20,8	22,3	7476	25,6	81,3	8876	30,4	46,3
1,5	9896	33,9	56,2	3576	12,3	93,6	7518	25,7	72
2	6885	23,6	79,8	1265	4,3	97,9	4357	14,9	90
2,5	3582	12,3	92,1	485	1,7	99,6	2251	7,7	94,6
3	1527	5,2	97,3	109	0,3	99,9	1029	3,5	98,1
3,5	567	1,9	99,2	28	0,1	100	397	1,4	99,5
4	147	0,5	99,7	2	-	-	113	0,3	99,8
4,5	52	0,2	99,9	1	-	-	43	0,1	99,9
5	5	-	100	0	-	-	1	-	100
total	29216	100	100	29216	100	100	29216	100	100

A partir desses resultados, os valores adotados para a modelagem são apresentados na Tabela II.6.1.2-7.

**Tabela II.6.1.2-7 - Altura significativa (Hs)  
e período de pico (T).**

Hs (m)	T (s)
1,5	7,0

#### 4) Vento e Temperatura do Ar

Para caracterização dos ventos e temperatura do ar na região, foram utilizados 30 anos (1978 a 2007) de dados das reanálises do *NCEP/NCAR* (*National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research*). A estatística mensal apresentada na Tabela II.6.1.2-8 ajuda a identificar a variabilidade apresentada pelo vento ao longo do ano.

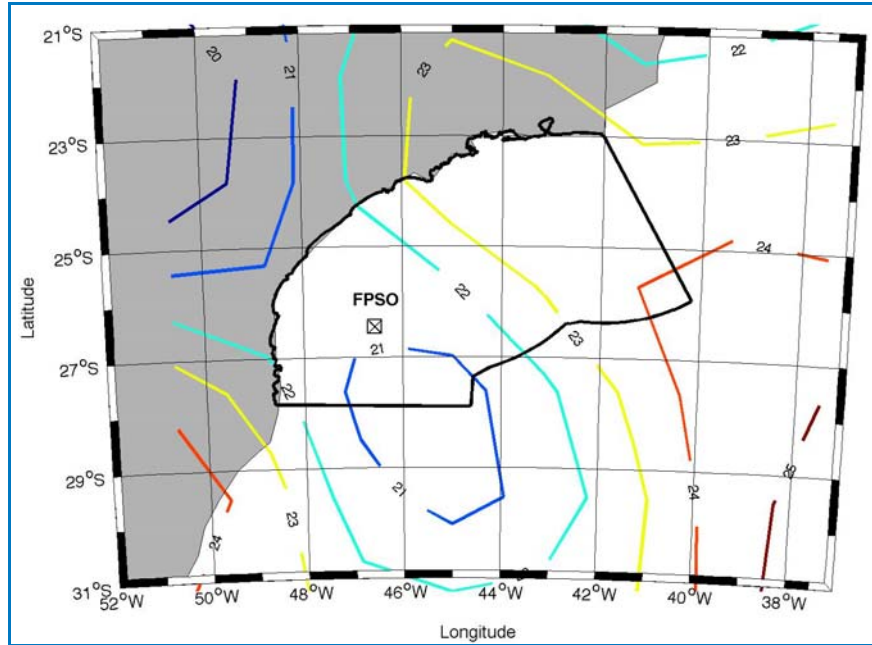
**Tabela II.6.1.2-8 - Estatística mensal dos ventos no BM-S-40 para o período de 1978 a 2007.**

Meses	Direção (°)	Intensidade (m/s)	Desvio Padrão	Máxima Absoluta (m/s)	Média das Máximas (m/s)	Desvio Padrão
Jan	E	4,09	1,84	11,04	8,80	1,13
Fev	E	3,88	1,80	10,58	8,63	1,12
Mar	E	3,90	1,81	11,01	8,61	1,07
Abr	SE	4,10	1,87	12,62	9,55	1,30
Mai	SE	4,23	2,09	13,40	10,24	1,71
Jun	E	4,19	2,06	15,21	10,19	1,75
Jul	E	4,40	2,03	14,29	10,61	1,44
Ago	E	4,43	1,96	12,09	10,02	1,05
Set	E	5,01	2,09	13,46	10,51	1,28
Out	E	4,79	2,08	12,96	10,13	1,18
Nov	E	4,72	2,07	13,77	10,38	1,46
Dez	E	4,39	1,96	12,20	9,54	1,18

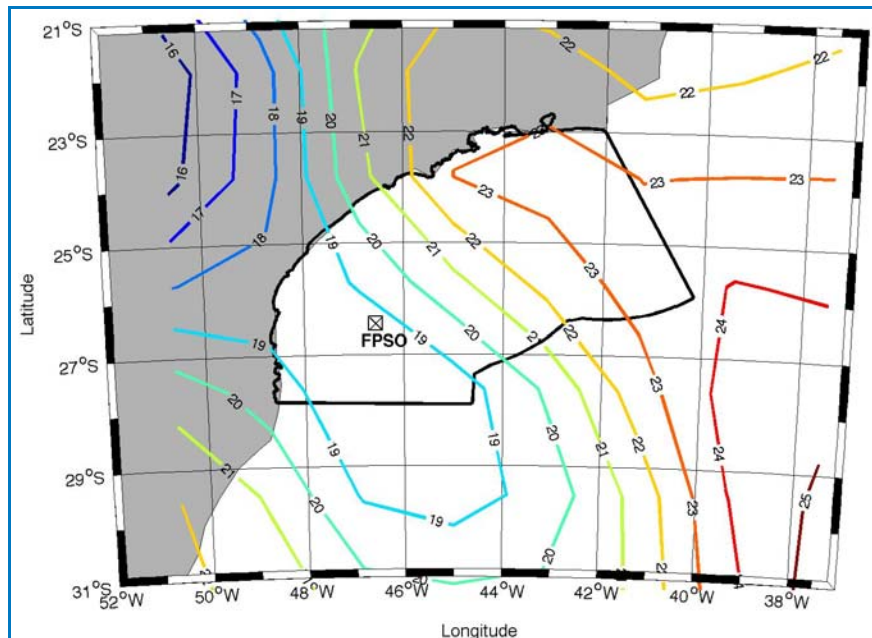
Para avaliação dos valores sazonais da temperatura do ar na região da Bacia de Santos, são apresentadas, na Figura II.6.1.2-12 e na Figura II.6.1.2-13, médias sazonais dos dados de temperatura do ar a 2 metros de altitude, obtidos a partir das reanálises do NCEP.

Como poderá ser verificado nas figuras apresentadas a seguir, tanto para o período de verão (Figura II.6.1.2-12) quanto para o período de inverno (Figura II.6.1.2-13), há um aumento da temperatura em direção ao oceano. No período de

inverno, este gradiente fica mais acentuado, com temperaturas mais baixas avançando em direção ao norte e ao oceano.



**Figura II.6.1.2-12** - Temperatura média do ar (°C) na região da Bacia de Santos no período de verão.



**Figura II.6.1.2-13** - Temperatura média do ar (°C) na região da Bacia de Santos no período de inverno.

Com base nos resultados apresentados, os valores de vento e temperatura do ar escolhidos para modelagem estão apresentados na Tabela II.6.1.2-9.

**Tabela II.6.1.2-9 - Valores de temperatura do ar e velocidade do vento.**

Período	Temperatura do ar (°C)	Velocidade do vento (m/s)
Verão	21,2	4,0
Inverno	18,8	4,5

### II.6.1.2.3 - Metodologia

#### 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).

## 2) Descrição da Atividade

De acordo com as informações fornecidas pela PETROBRAS, o efluente será descartado no mar a uma vazão de aproximadamente 0,5 m<sup>3</sup>/h (~120 m<sup>3</sup>/dia). O descarte será realizado na superfície com uma temperatura de 45°C e salinidade de 102,5, representando uma densidade de 1066,7 kg/m<sup>3</sup>.

Um resumo das características do descarte é apresentado na Tabela II.6.1.2-10.

**Tabela II.6.1.2-10 - Características do efluente descartado.**

Parâmetro	Unidade	Valor	Unidade	Valor
latitude	graus	26° 27' 51,4" S	-	-
longitude	graus	46° 31' 14,45" W	-	-
profundidade de descarte	M	superfície	ft	-
vazão	m <sup>3</sup> /h	0,50	bbh/h	3,17
fluxo do volume descartado	m/s	27,63	-	-
raio da tubulação de descarga	m	0,08	ft	0,25
ângulo vertical do duto de descarte	°	90	-	-
duração do descarte	s	contínuo	-	-
temperatura do efluente	° C	45,0	-	-
salinidade do efluente	-	102,5	-	-
densidade efluente	kg/m <sup>3</sup>	1066,7	g/cm <sup>3</sup>	1,0667

## 3) Estratégias de Modelagem

### 3.1) Concentração e Fator de Diluição

As plumas aqui estudadas serão monitoradas em função da concentração e da diluição.

O limiar de diluição utilizado foi de 10.000 vezes a concentração inicial do descarte. Para conhecer o percentual de concentração em que o efluente atinge este fator de diluição foi realizado o seguinte cálculo:

$$\text{limiar de diluição} = \frac{\text{concentração inicial}}{\text{limiar de concentração}} = \frac{100\%}{\text{limiar de concentração}} = 10000x$$

limiar de concentração = 0,01% da concentração inicial

### 3.2) Representação de Descartes Contínuos

Por considerarmos uma taxa de descarte constante e condições ambientais estacionárias (que não variam no tempo), durante a emissão do efluente, a concentração atinge um estado quase-estacionário até uma determinada distância da fonte. Desta forma, mesmo que o tempo de descarte dure mais que o tempo necessário para a pluma atingir este estado, os níveis de concentração não mudarão ao longo do tempo nesta região, por mais duradoura que seja esta emissão.

O método proposto por BRANDSMA & 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 ( $t_{final}$ ):

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

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 é a velocidade média da corrente local,  $A_L$  um parâmetro de dissipação e  $\sigma_0$  tamanho inicial da pluma, estimado na ordem de grandeza do tubo de descarte.

Neste estudo foi considerado um vazamento de 2 h de duração.

Os tempos iniciais e finais da condição estacionária da pluma foram calculados, para os dois cenários, para distâncias específicas da fonte (Tabela II.6.1.2-11).

**Tabela II.6.1.2-11 - Tempo inicial, final e de simulação (em horas) para cada cenário em relação à distância da fonte.**

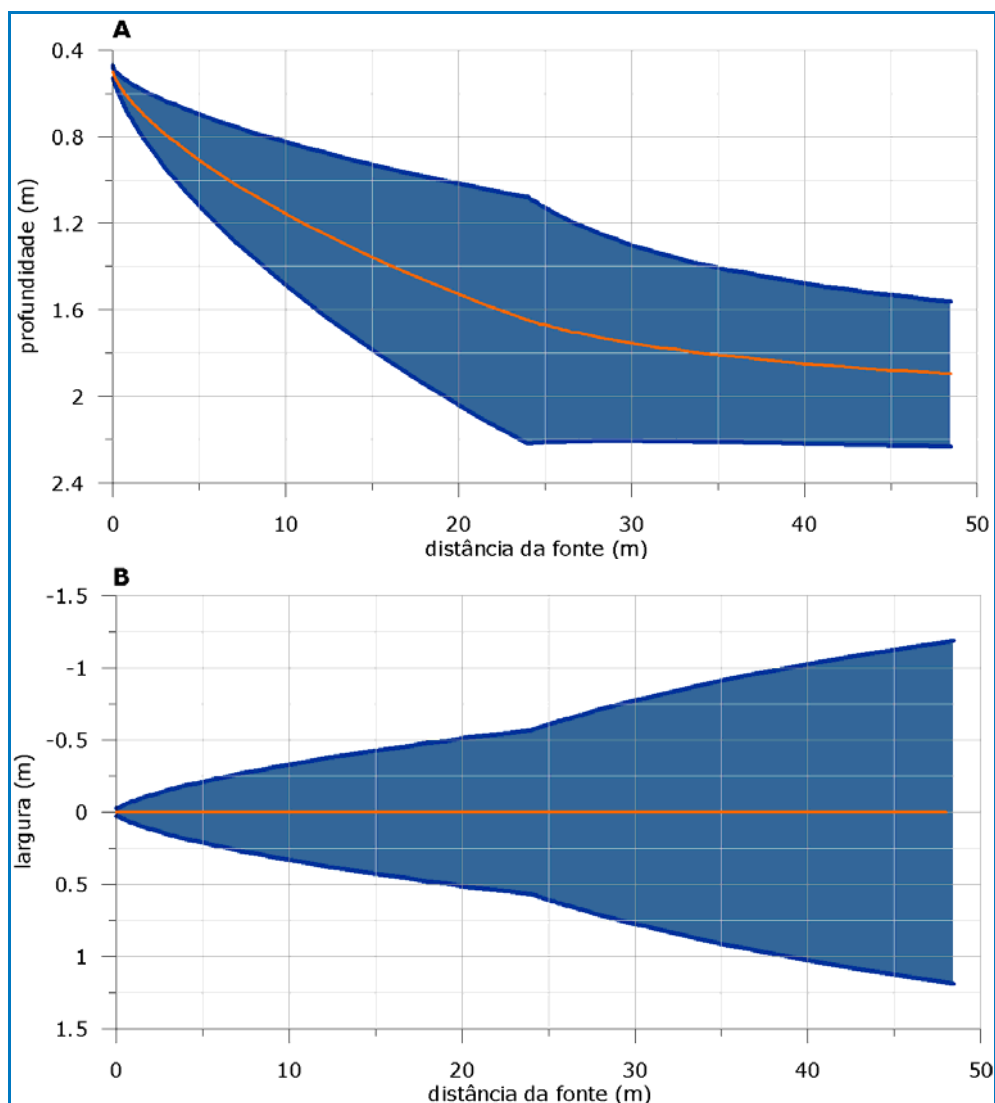
distância da fonte (m)	verão			inverno		
	t <sub>início</sub> (h)	t <sub>final</sub> (h)	t <sub>simulação</sub> (h)	t <sub>início</sub> (h)	t <sub>final</sub> (h)	t <sub>simulação</sub> (h)
50	0,05	2,05	1	0,08	2,08	1
100	0,10	2,10	1	0,16	2,16	1
150	0,15	2,14	1	0,25	2,24	1
200	0,19	2,19	1	0,33	2,33	1
250	0,24	2,24	1	0,41	2,41	1
300	0,29	2,29	1	0,49	2,49	1
350	0,34	2,34	1	-	-	-
400	0,39	2,38	1	-	-	-
450	0,44	2,43	1	-	-	-
500	0,48	2,48	1	-	-	-

#### II.6.1.2.4 - Resultados

Os resultados apresentados a seguir apresentam, primeiramente, o comportamento da pluma na fase dinâmica, caracterizando o seu posicionamento na coluna d'água, concentração, diluição, temperatura e salinidade. Posteriormente, é analisada a fase passiva, onde são analisados perfis radiais de concentração decorrentes do descarte.

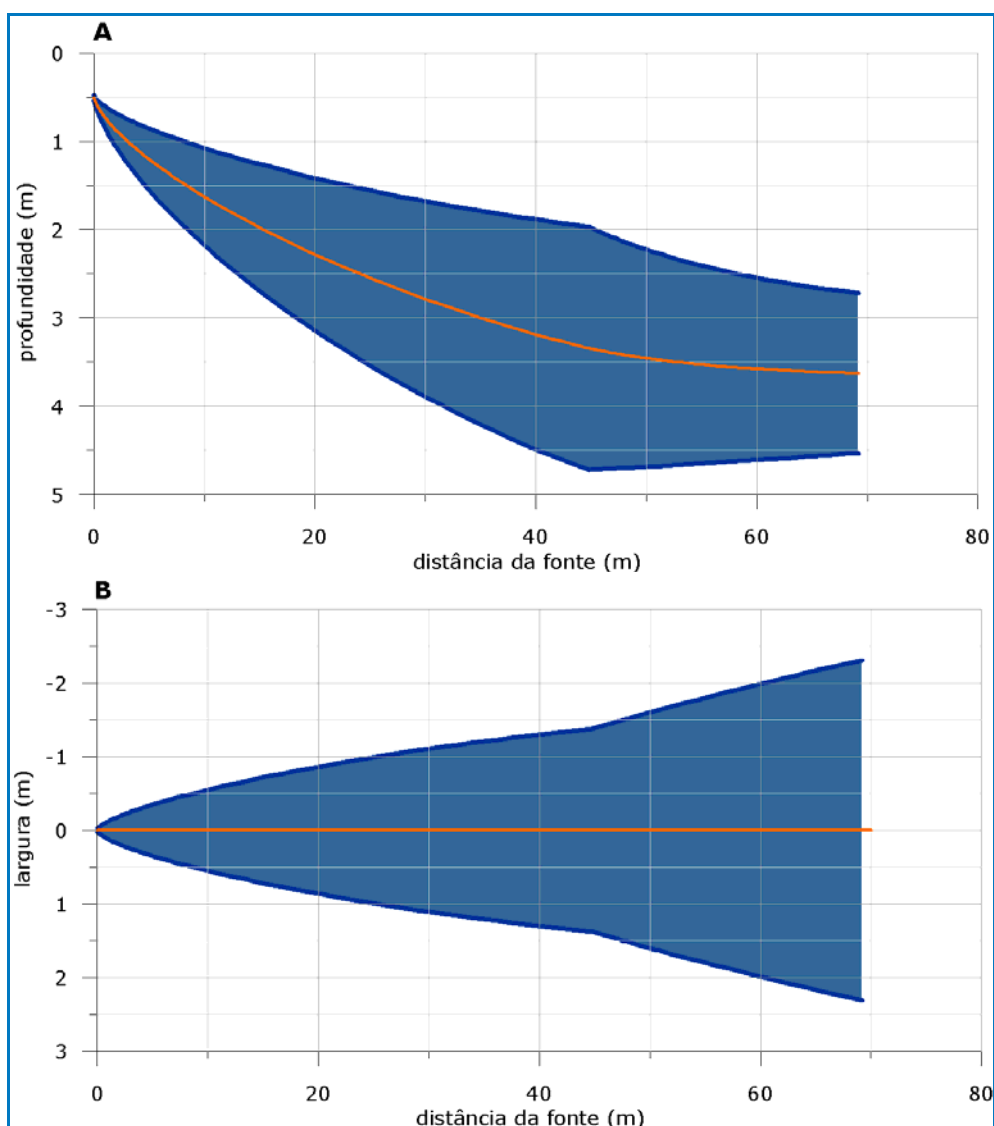
#### 4) Posicionamento da pluma

Na Figura II.6.1.2-14 e na Figura II.6.1.2-15, são apresentados os perfis longitudinais e em planta das plumas formadas no período de verão e de inverno, respectivamente.



**Figura II.6.1.2-14** - Perfil longitudinal (A) e em planta (B) obtido na fase dinâmica da pluma, durante o período de verão.



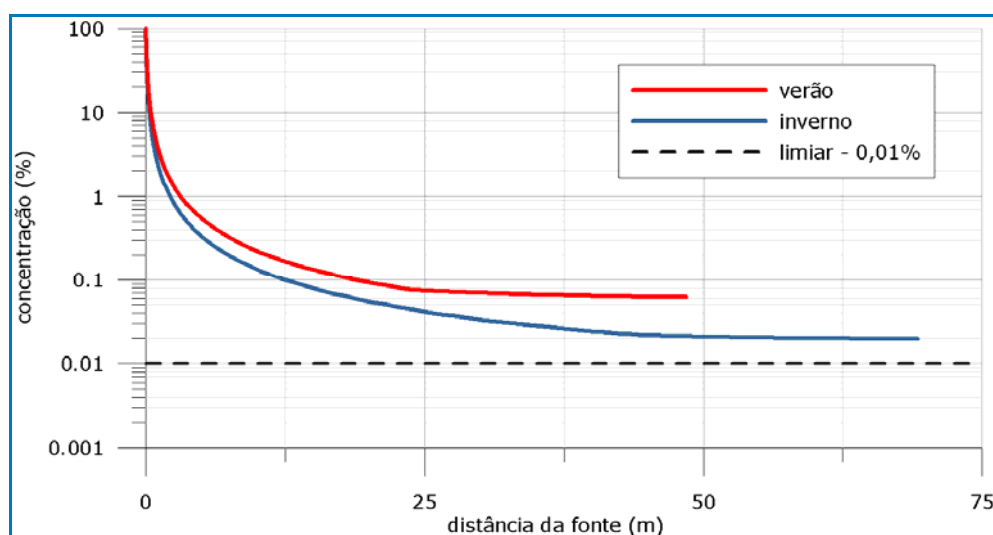


**Figura II.6.1.2-15 - Perfil longitudinal (A) e em planta (B) obtido na fase dinâmica da pluma, durante o período de inverno.**

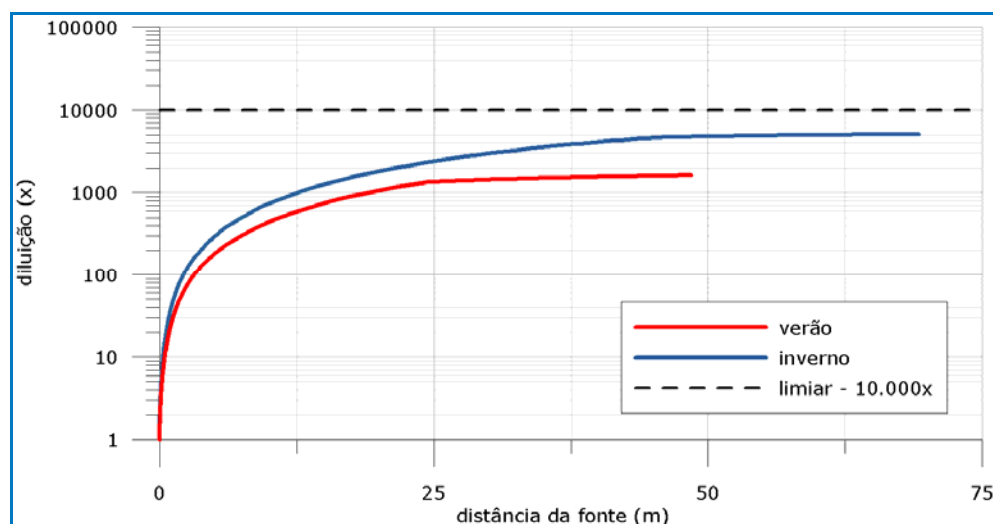
Durante o verão, nota-se que, primeiramente, a pluma apresenta um movimento descendente e sua base alcança a profundidade máxima de 2,2 m. Em seguida, a pluma encontra um nível de flutuação neutra com o centro de massa próximo aos 1,9 m de profundidade. O término da fase ocorre próximo aos 48 m de distância da fonte com uma largura de 2,4 m. Já, para o inverno, a base da pluma alcança os 4,7 m de profundidade na fase de jato. Após o colapso dinâmico, o centro de massa encontra-se a aproximadamente 3,6 m abaixo da superfície do mar. A largura máxima é observada no final da fase dinâmica, a cerca de 69 m da fonte, com um valor de 4,6 m.

## 5) Concentração e Diluição

As curvas de concentração máxima e diluição mínima obtidas durante a fase dinâmica são apresentadas na Figura II.6.1.2-16 e na Figura II.6.1.2-17, respectivamente.



**Figura II.6.1.2-16** - Concentração máxima da pluma com a distância da fonte durante a fase dinâmica, nos cenários de verão (vermelho) e inverno (azul).

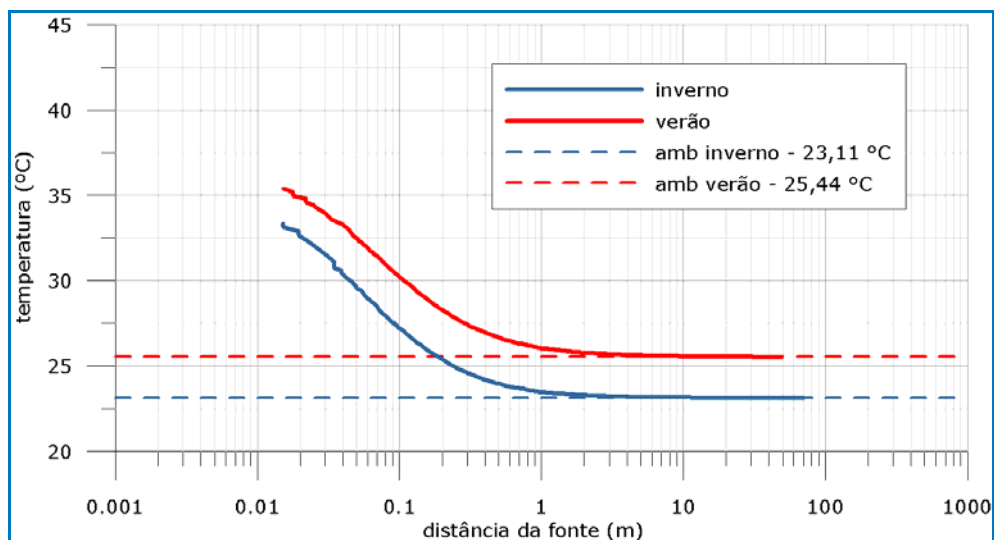


**Figura II.6.1.2-17** - Diluição mínima com a distância da fonte durante a fase dinâmica, nos cenários de verão (vermelho) e inverno (azul).

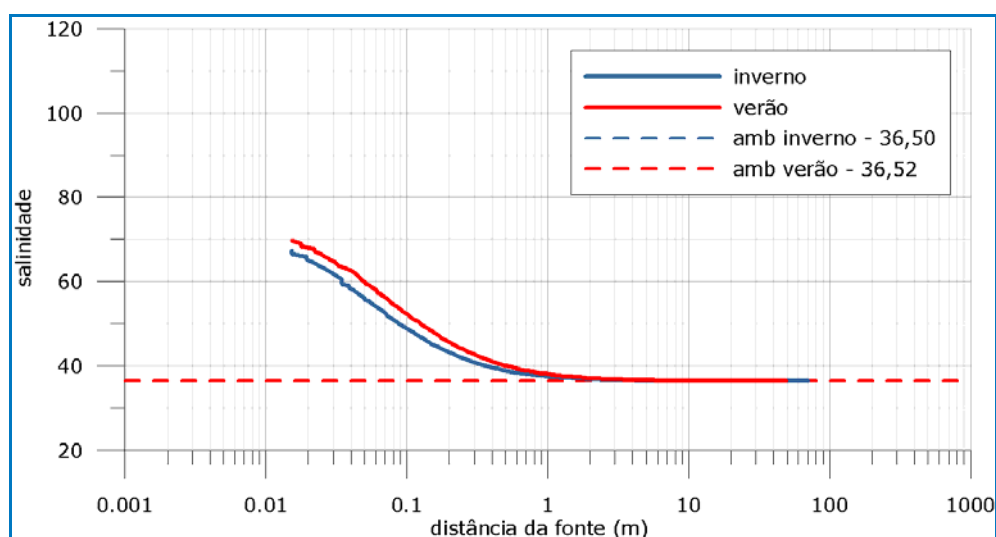
Ao término da fase dinâmica, a concentração do centro de massa da pluma corresponde a 0,06% da concentração inicial no cenário de verão e 0,02% no cenário de inverno. Esses valores correspondem a uma diluição mínima de cerca de 1600x e 5100x, nesta ordem.

## 6) Temperatura e Salinidade

As variações de temperatura e salinidade do centro de massa da pluma são apresentadas na Figura II.6.1.2-18 e Figura II.6.1.2-19, respectivamente. Nestas figuras, os valores de temperatura e salinidade do ambiente são representados pelas linhas pontilhadas.



**Figura II.6.1.2-18** - Variação da temperatura com a distância da fonte durante a fase dinâmica, durante o verão (vermelho) e o inverno (azul).



**Figura II.6.1.2-19** - Variação da salinidade com a distância da fonte durante a fase dinâmica, durante o verão (vermelho) e o inverno (azul).

A partir da fase dinâmica, a pluma mantém características de salinidade e temperatura semelhantes às do ambiente. Como esperado, a variação da temperatura da pluma no cenário de verão é maior em relação ao inverno, já a salinidade apresenta o mesmo padrão comportamental para ambos os cenários, com uma diferença absoluta inferior a 0,5 entre verão e inverno, próximo ao ponto de descarte.

Um resumo dos resultados obtidos na fase dinâmica pode ser observado na Tabela II.6.1.2-12.

**Tabela II.6.1.2-12** - Resultados obtidos na fase dinâmica.

Parâmetros da pluma	Unidade	Verão	Inverno
<b>Durante a fase</b>			
Largura máxima da pluma	m	2,4	4,6
Profundidade máxima do centro de massa	m	1,9	3,6
Profundidade máxima da base	m	2,2	4,7
<b>Ao término da fase</b>			
Distância da fonte	m	48,4	69,2
Largura da pluma	m	2,4	4,6
Profundidade do centro de massa	m	1,9	3,6
Profundidade da base	m	2,2	4,5
Concentração máxima	%	0,06	0,02
Diluição mínima	vezes	1624,4	5107,3
Temperatura	°C	25,5	23,1
Salinidade	-	36,5	36,5

A pluma atinge uma maior distância da fonte (70 m) e uma largura maior (4,6 m) durante o cenário de inverno, assim como a profundidade máxima da base (4,7 m). Entretanto, para o verão, a concentração de 0,1% é alcançada a cerca de 14 m da fonte, já para o inverno esse valor é alcançado a 10 m.

Durante a fase dinâmica, os valores de temperatura e salinidade estão nivelados com o ambiente, não havendo a necessidade da modelagem para essas variáveis na fase passiva.

### 7) Fase Passiva

Durante a fase dinâmica, o limiar de 0,01% da concentração inicial não é atingido, como pode ser visualizado na Tabela II.6.1.2-13.

**Tabela II.6.1.2-13** - Valores de concentração e diluição desejados e os valores obtidos ao término da fase dinâmica.

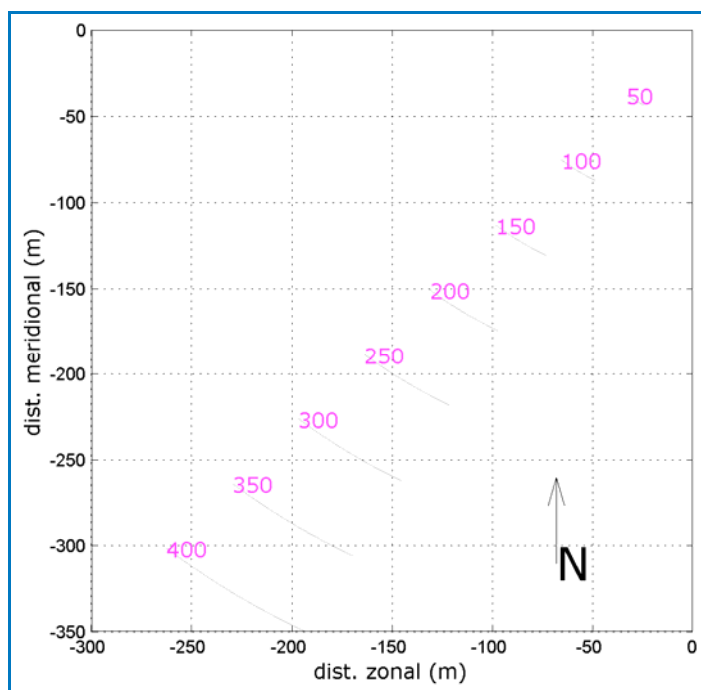
	Valores desejados	Valores obtidos ao término da fase dinâmica	
		Verão	Inverno
Concentração	0,01%	0,06%	0,02%
Diluição	10.000x	1.624,4x	5.107,3x

Desta forma, a fase passiva da pluma também foi monitorada.

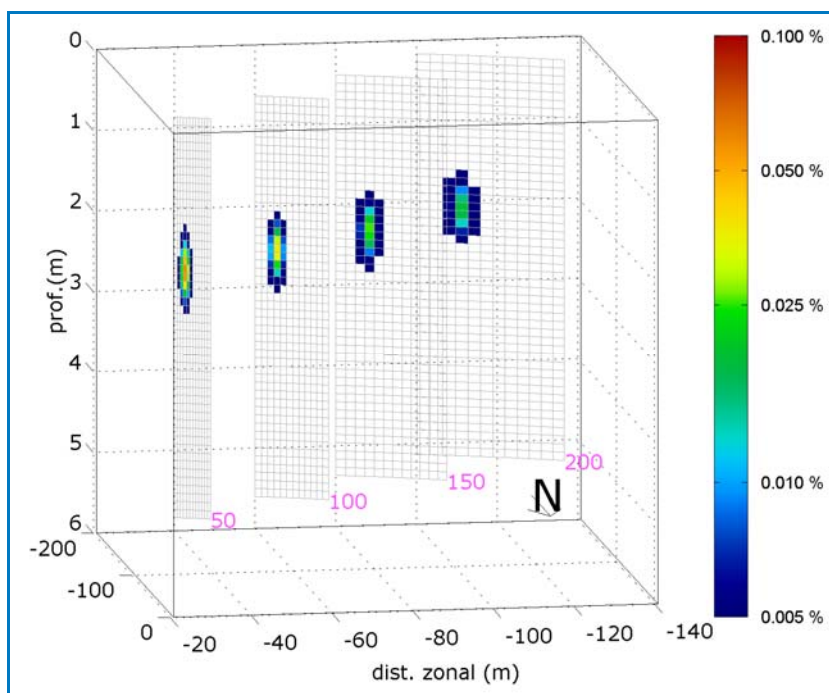
Nesta fase, as concentrações foram calculadas em perfis radiais verticais na coluna d'água, posicionadas a distâncias específicas da fonte. A posição das radiais foi escolhida a fim de melhor representar a localização da pluma. Cada perfil é composto de 650 pontos de grade (50 linhas x 13 colunas) cuja resolução nominal varia de acordo com a distância da fonte.

Para melhor análise dos perfis de concentração no cenário de verão, foram consideradas radiais de 50 a 400 m com intervalos de 50 m entre cada uma. Para o inverno, foram consideradas apenas as radiais de 100 e de 150 m.

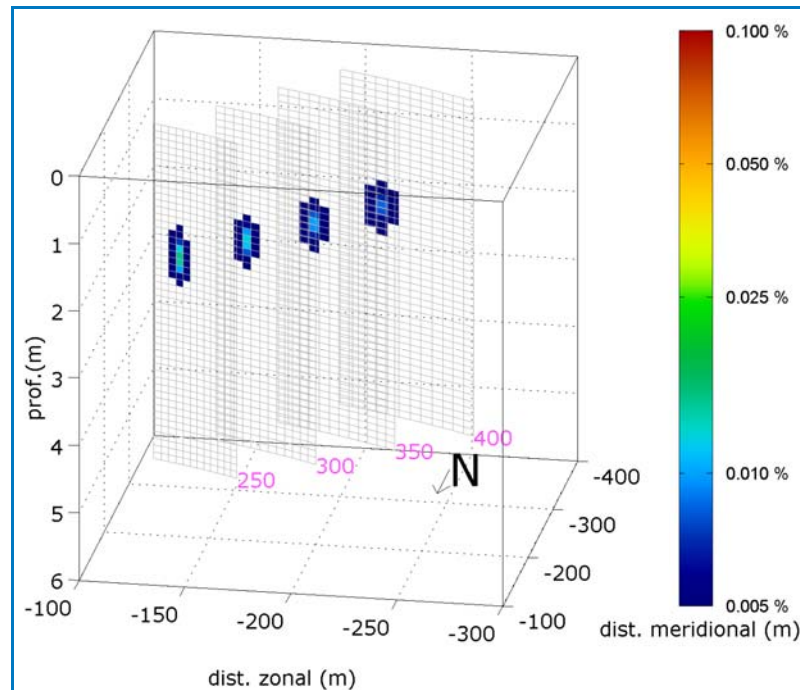
A disposição das radiais de concentração no verão é apresentada na Figura II.6.1.2-20. Os perfis de concentração nestas radiais encontram-se na Figura II.6.1.2-21 e na Figura II.6.1.2-22.



**Figura II.6.1.2-20** - Localização dos perfis transversais da pluma para o período de verão.



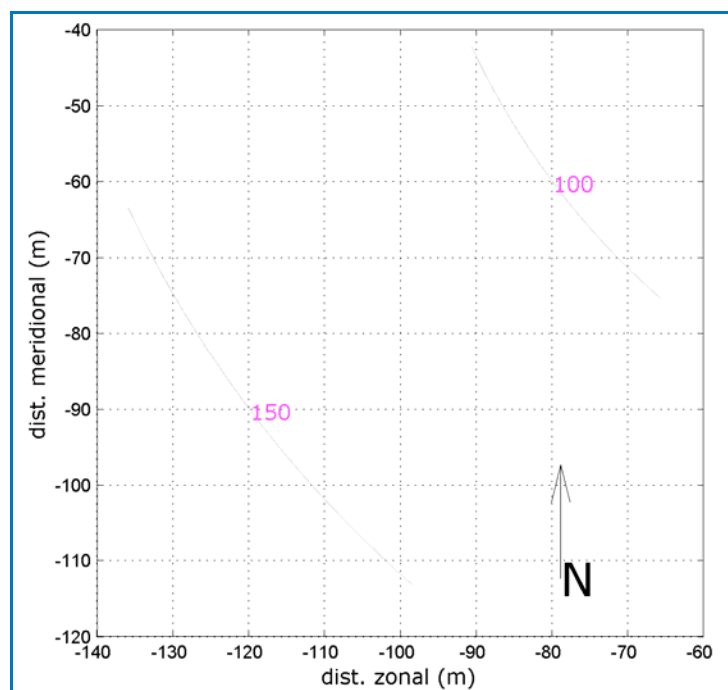
**Figura II.6.1.2-21** - Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte da água de produção no período de verão, até a distância de 200 m.



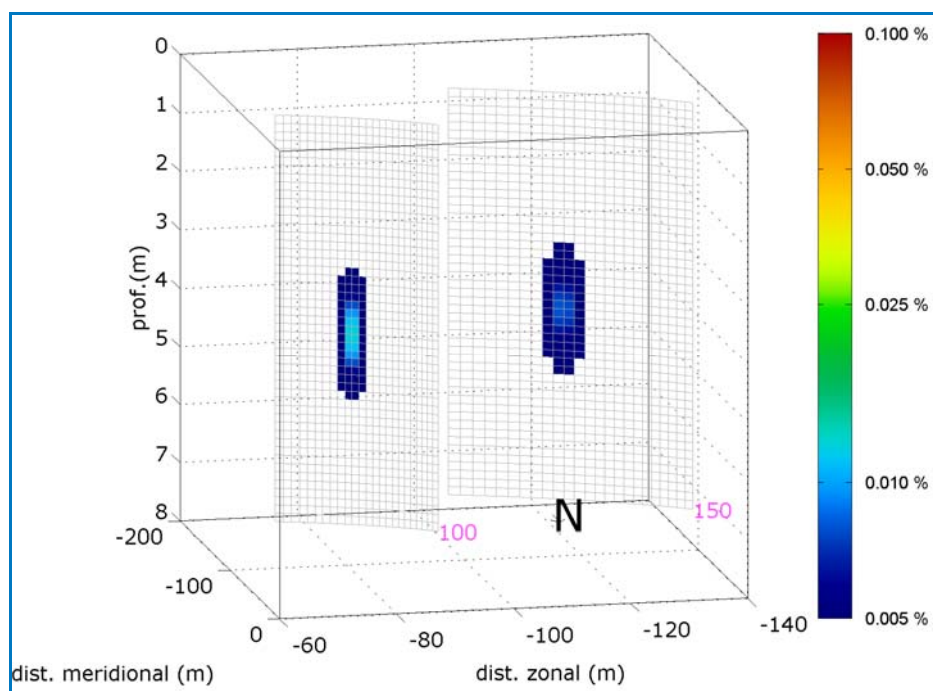
**Figura II.6.1.2-22** - Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte da água de produção no período de verão, de 250 a 400 m de distância.

Para o cenário de verão, até a distância de 200 m da fonte, ainda há a ocorrência de concentrações maiores a 0,02%. A partir de 350 m, a concentração da pluma mantém-se menor que 0,01%. Em toda sua extensão, a pluma encontra-se entre 1 a 3 m de profundidade.

A mesma análise foi realizada para o cenário de inverno. As radiais projetadas para este cenário são apresentadas na Figura II.6.1.2-23 e os perfis de concentração extraídos na Figura II.6.1.2-24.



**Figura II.6.1.2-23** - Localização dos perfis transversais da pluma para o período de inverno.

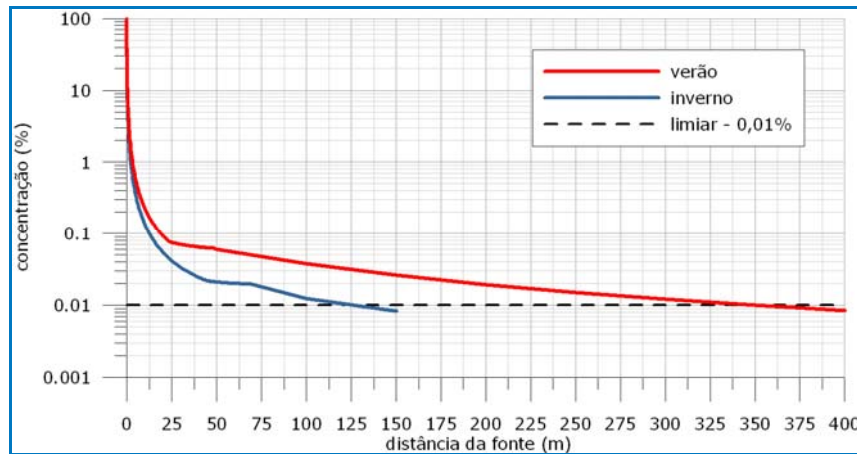


**Figura II.6.1.2-24** - Perfis radiais de concentração decorrentes do descarte da água de produção no período de inverno.

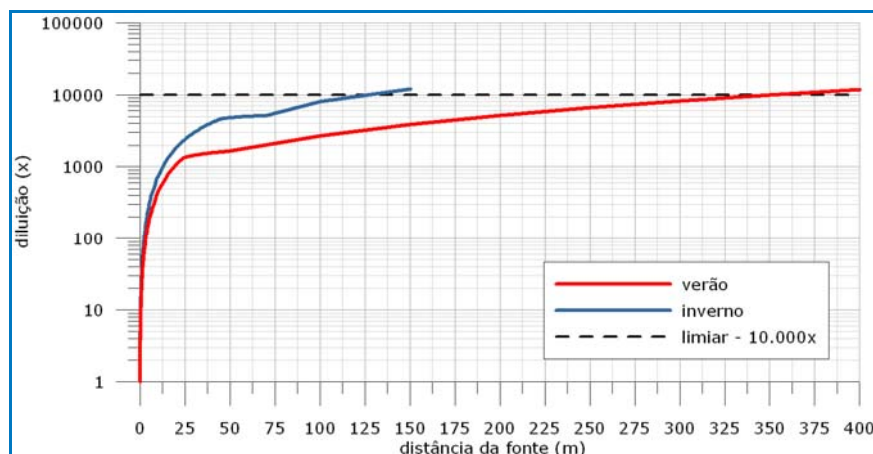


Para o cenário de inverno, até a distância de 50 m da fonte, ainda há a ocorrência de concentrações maiores a 0,02%. A partir de 150 m, a concentração da pluma mantém-se menor que 0,01%. A pluma, nesses casos, ocupa a faixa entre 3 e 6 m de profundidade na coluna d'água.

De forma a resumir os resultados obtidos nas duas fases apresentadas (dinâmica e passiva), é apresentada na Figura II.6.1.2-25 e na Figura II.6.1.2-26 a variação da concentração máxima e a diluição mínima da pluma com a distância da fonte. Os valores de concentração e diluição com a distância da fonte encontram-se na Tabela II.6.1.2-14.



**Figura II.6.1.2-25** - Concentração máxima da pluma com a distância da fonte, nos cenários de verão (vermelho) e inverno (azul).



**Figura II.6.1.2-26** - Diluição mínima com a distância da fonte, nos cenários de verão (vermelho) e inverno (azul).

**Tabela II.6.1.2-14 - Variação da concentração máxima (%) e da diluição mínima da pluma com a distância da fonte.**

distância da fonte (m)	concentração		diluição	
	verão	inverno	verão	inverno
50	0,060	0,019	1667	5164
100	0,037	0,012	2671	8041
150	0,026	0,008	3849	12122
200	0,019	-	5175	-
250	0,015	-	6635	-
300	0,012	-	8220	-
350	0,010	-	9924	-
400	0,009	-	11743	-

Nota-se que a diluição de 10.000x é atingida a 350 m da fonte para o verão e a menos de 150 m para o inverno.

### **II.6.1.2.5 - Conclusões**

Neste relatório foi analisado o comportamento da pluma de água produzida a ser lançada ao mar pelo FPSO Cidade de Itajaí. Foi observada especificamente a variação da concentração do fluido em relação à distância da fonte, verificando-se as distâncias da fonte nas quais é alcançado o limiar de 0,01% da concentração inicial.

Para comparar a variabilidade sazonal do comportamento do efluente, foram escolhidos dois cenários distintos, o de verão (meses de setembro a fevereiro) e inverno (março a agosto).

Ao final da fase ativa, a pluma já apresenta características termohalinas similares às do ambiente, encontrando a profundidade de equilíbrio em aproximadamente 48 m de distância da fonte (verão) e 69 m (inverno). A base da pluma atinge os 2,2 m no verão e 4,5 m no inverno.

Quanto à dispersão da pluma, ao término da fase ativa, a concentração é de 0,06% (~1600x) do valor inicial para o verão e de 0,02% (~5000x) para o inverno. Estes dois valores são superiores ao limiar desejado de 0,01% da concentração inicial. Desta forma, a pluma continuou sendo monitorada durante a fase passiva de dispersão.

Durante a fase passiva, o limiar é obtido a 350 m de distância da fonte para o verão e a 150 m para o inverno. A pluma mantém o seu deslocamento a profundidade de 3 a 6 m no inverno e de 1 a 3 m no verão. Apesar de a pluma deslocar-se a maiores profundidades no inverno, é nesse cenário que ela obtém uma diluição mais eficiente.

#### **II.6.1.2.6 - Bibliografia**

BLECK, R., 2002. An Oceanic General Circulation Model Framed in Hybrid Isopycnic-Cartesian Coordinates. *Ocean Modelling*, v. 37, pp. 55-88.

BRANDSMA, M., SMITH, J., 1999. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model Report and User Guide. Report and User Guide. Exxon Production Research Company.

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. Tese de Doutorado em Ciências, Área de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

HYCOM, 2008. Assimilative Global Simulation, [online] Disponível via WWW. URL: <http://hycom.rsmas.miami.edu/dataserver/>. Acessado em agosto de 2009

NCEP, 2009. REANÁLISES II. [online] Disponível via WWW. URL: <http://www.cdc.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml> Acessando em agosto de 2009.

PETERSON, R. G., STRAMMA, L., 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, v.26 (1), pp 1-73.