

**Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Oceanografia
Programa de Pós-graduação em Oceanografia**

*Modelagem matemática do transporte e dispersão de uma pluma de
hidrocarbonetos na região costeira de Suape – PE, Brasil*

Marcus André Silva

**Recife – PE
2004**

Marcus André Silva

Modelagem matemática do transporte e dispersão de uma pluma de hidrocarbonetos na região costeira de Suape – PE, Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências, na área de Oceanografia Física.

Orientador: Moacyr Cunha de Araújo Filho

**Recife – PE
2004**

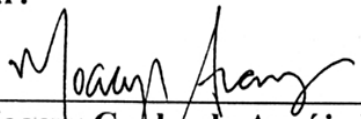
Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Oceanografia
Programa de Pós-graduação em Oceanografia

Modelagem matemática do transporte e dispersão de uma pluma de hidrocarbonetos na região costeira de Suape – PE, Brasil

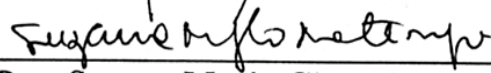
por
Marcus André Silva

Dissertação defendida e aprovada pela comissão examinadora abaixo assinada:

Titular:



Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho



Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro

Dra. Helenice Vital



Dr. Emerson Alexandre de Oliveira Lima

Suplente:

Dra. Carmen Medeiros de Queiroz

Dr. Venerando Eustáquio Amaro

Recife, 27 de fevereiro de 2004.

Pasta Atual: **Entrada**

Desconectar

Escrever Endereços Pastas Opções Procurar Ajuda Calendário

UFPE

Lista de Mensagens | Apagar | Anterior | Próxima | Encaminhar | Encaminhar como anexo | Responder | Responder a todos

Assunto: Fw: dissertação Marcus André

De: Moacyr Araújo <moa@ufpe.br>

Data: Tue, Maio 4, 2004 5:41 pm

Para: marcus@ufpe.br

Prioridade: Normal

Opções: Ver cabeçalho completo | Ver Versão para Impressão

Helenice mandou agora, diretamente para Myrna.

Moacyr ARAUJO

Laboratório de Oceanografia Física Estuarina e Costeira - LOFEC

Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Av. Arquitetura, s/n

50740-550 - Cidade Universitária

Recife - PE Brasil

phone/fax : + 558121268225

e.mail : moa@ufpe.br

----- Original Message -----

From: "helenice" <helenice@geologia.ufrn.br>

To: <myrna.lins@ufpe.br>; <moa@ufpe.br>

Sent: Tuesday, May 04, 2004 5:25 PM

Subject: dissertação Marcus André

>
> À Coordenação do Curso de Pós-graduação em Oceanografia da Universidade
> Federal de Pernambuco
>
> Da Profa. Helenice Vital
>
> Informo a esta coordenação que recebi do mestrando Marcus André Silva a
> dissertação intitulada, Modelagem matemática do transporte e dispersão de
> uma pluma de hidrocarbonetos na região costeira de Suape - PE, Brasil;
> com as devidas sugestões solicitadas no momento da defesa (27/02/2004), as
> quais encontram-se aprovadas por mim.

> Atenciosamente

>
> Profª. Helenice Vital
> Universidade Federal do Rio Grande do Norte
> Departamento de Geologia
> Campus, C.P.1596 Natal-RN
> 59072-970, tel; 084 2153808
>
>
>
>
>
>
>

Dedico este trabalho a Deus e em seguida a meus pais, que como tais só tenho a agradecer pela orientação e princípios que me passaram até aqui e por terem abdicado de tantas coisa em suas vidas por causa dos filhos.

AGRADECIMENTOS

Quando decidi dedicar o conhecimento adquirido num curso de engenharia mecânica ao mar nunca imaginei que seria tão prazeroso estudá-lo. Descobrir alguns dos seus mistérios nos deixa de alguma forma, um pouco mais próximos dele. Este trabalho é apenas uma pequena contribuição comparada à imensidão do mar.

Gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos:

- Ao orientador, Dr. Moacyr “Moa” Araújo, que pela amizade formada neste período de estudo, me faz considerá-lo acima de tudo como um grande amigo.
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Ensino Superior – CAPES, por conceder subsídios para minha formação de pesquisador.
- Ao CNPq, por conceder subsídios para financiar o projeto.
- Aos meus tios Moisés e Miriam, que tanto têm me apoiado em todos os desafios que tenho enfrentado.
- À Dra. Carmen Medeiros, e demais professores do DOCEAN. Sempre dispostos a nos ensinar.
- À minha querida Renata, pela amizade e companheirismo.
- Aos amigos “LOFEQUIANOS”: Vidal Freitas, Marcelo Rollnic, Alex Costa, Isaac Freitas, Fábio Geber, Pedro Lins, Josafat Falcão, estendendo ainda o meu muito obrigado aos demais colegas do DOCEAN.
- Às amigas M. Christina, Stella, Carlinha, Hélida, Paty e Fabiana Vieira, pelo companheirismo e força em todos os momentos difíceis deste curso.
- E, finalmente, àqueles que minha memória não deixou lembrar, mas que a gratidão não é menor das que foram mencionadas, muito obrigado a todos.

Recife, 27-02-2004

Marcus A. Silva

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XIII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVO	3
3 – MATERIAL E MÉTODOS	4
<i>3.1 – Caracterização experimental.....</i>	<i>4</i>
3.1.1 – Descrição da área.....	4
3.1.2 – Obtenção dos dados.....	6
3.1.3 – Forçantes interfaciais (U^*).....	10
<i>3.2 – O modelo matemático Princeton Ocean Model - POM.....</i>	<i>12</i>
3.2.1 – Generalidades	12
3.2.2 – Equações básicas do modelo	13
3.2.3 – Malhas horizontal e vertical	17
3.2.4 – Cenários de simulação	19
3.2.5 – Condições de contorno	21
3.2.6 – Modelo de dispersão de constituintes	25
3.2.7 – Configuração computacional.....	25
3.2.8 – Calibração, Condições iniciais e de lançamento de poluentes	26
<i>3.3 - Índice de Hierarquização de Impactos (IHI).....</i>	<i>28</i>
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
<i>4.1 – Simulações numéricas</i>	<i>32</i>
4.1.1 – Estabelecimento das condições semi-permanentes	32
4.1.2 – Comparação com os dados experimentais.....	36
4.1.3 – Estrutura cinemática horizontal.....	41

<i>4.2 – Lançamento das plumas de poluentes</i>	<i>43</i>
<i>4.3 – Mapas de Hierarquização de Impactos</i>	<i>46</i>
5 – SUMÁRIO DOS RESULTADOS	49
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	51
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
ANEXO A	60
ANEXO B	68
B.1 – Plumas lançadas no verão quadratura	69
B.2 – Plumas lançadas no verão sizígia.....	77
B.3 – Plumas lançadas no inverno quadratura.....	85
B.4 – Plumas lançadas no inverno sizígia	94
APÊNDICE 1	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do Porto de Suape (Gov. PE, 2000).	4
Figura 2. Vista aérea do CIPS (Gov. PE, 2001).	5
Figura 3. Distribuição espacial das estações de coleta na área da RCS.	7
Figura 4. Batimetria construída a partir da Carta Náutica nº 906 (DHN, 1988).	9
Figura 5. Coordenadas sigma.	12
Figura 6. Malha Arakawa C.	17
Figura 7. Grade de discretização horizontal da região costeira de Suape (domínio de integração).	18
Figura 8. Vista tridimensional da malha numérica utilizada nas simulações.	19
Figura 9. Definição dos pontos de lançamento da pluma de poluentes para análise dos diferentes cenários de simulação.	28
Figura 10. Representação dos valores de IL para cada trecho de praia dentro da RCS.	30
Figura 11. Energia Cinética Total para o período de Verão/Quadratura.	33
Figura 12. Energia Cinética Total para o período de Verão/Sizígia.	33
Figura 13. Energia Cinética Total para o período de Inverno/Quadratura.	34
Figura 14. Energia Cinética Total para o período de Inverno/Sizígia.	34
Figura 15. Elevação da superfície - Quadratura.	35
Figura 16. Elevação da superfície - sizígia.	35
Figura 17. Perfis verticais de velocidade na Estação SP1 – Verão/Quadratura. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).	36
Figura 18. Perfis verticais de velocidade na Estação SP4 – Verão/Sizígia. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).	37
Figura 19. Perfis verticais de difusividade turbulenta vertical na Estação SP3 – Verão/Quadratura/Baixa-mar. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).	38
Figura 20. Perfis verticais de difusividade vertical turbulenta na Estação SP3 – Verão/Quadratura/Enchente. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).	39
Figura 21. Perfis verticais de difusividade vertical turbulenta na Estação SP3 – Verão/Quadratura/Preamar. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).	39
Figura 22. Perfis verticais de difusividade vertical turbulenta na Estação SP3 – Verão/Quadratura/Vazante. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).	40
Figura 23. Campos de velocidade horizontal na RCS – Verão/Quadratura/Enchente.	41
Figura 24. Campos de velocidade horizontal na RCS- Inverno/Sizígia/Enchente.	41
Figura 25. Plumas lançadas em 4B : (a) Verão/Quadratura -1 hora depois do lançamento (b) Verão/Quadratura - no instante de chegada à costa. (c) Verão/Sizígia - 1 hora depois do lançamento e (d) Verão/Sizígia - no instante de chegada à costa.	44
Figura 26. Plumas lançadas em 4B : (a) Inverno/Quadratura -1 hora depois do lançamento (b) Inverno/Quadratura - no instante de chegada à costa. (c) Inverno/Sizígia - 1 hora depois do lançamento e (d) Inverno/Sizígia - no instante de chegada à costa.	45
Figura 27. Mapa de Hierarquização de Impacto –Verão/Quadratura	46
Figura 28. Mapa de Hierarquização de Impacto –Verão/Sizígia.	47
Figura 29. Mapa de Hierarquização de Impacto –Inverno/Quadratura.	47

Figura 30. Mapa de Hierarquização de Impacto –Inverno/Sizígia.....	48
Figura 31. Sub-região/Polígono de derramamentos acidentais potencialmente mais críticos – Inverno/Sizígia.....	53
Figura 32. Sub-região/Polígono de derramamentos acidentais potencialmente mais críticos – Verão/Sizígia.	53
Figura 33. Sub-região/Polígono de derramamentos acidentais potencialmente mais críticos – Verão/Quadratura.	54
Figura A1: Fluxograma simplificado do modelo POM (fonte: POM Users Guide 1998).....	65
Figura B1. Plumas lançadas em : (a) 1C - 1 hora depois do lançamento e (b) 1C – no instante de chegada à costa.....	69
Figura B2. Plumas lançadas em : (a) 1D -1 hora depois do lançamento e (b) 1D - no instante de chegada à costa. (c) 2B - 1 hora depois do lançamento e (d) 2B - no instante de chegada à costa.....	70
Figura B3. Plumas lançadas em : (a) 2C -1 hora depois do lançamento e (b) 2C - no instante de chegada à costa. (c) 2D - 1 hora depois do lançamento e (d) 2D - no instante de chegada à costa.....	71
Figura B4. Plumas lançadas em : (a) 3B -1 hora depois do lançamento e (b) 3B - no instante de chegada à costa. (c) 3C - 1 hora depois do lançamento e (d) 3C - no instante de chegada à costa.....	72
Figura B5. Plumas lançadas em : (a) 3D -1 hora depois do lançamento e (b) 3D - no instante de chegada à costa.	73
Figura B6. Plumas lançadas em : (a) 4C - 1 hora depois do lançamento e (b) 4C - no instante de chegada à costa.	73
Figura B7. Plumas lançadas em : (a) 4D -1 hora depois do lançamento e (b) 4D - no instante de chegada à costa. (c) 5B - 1 hora depois do lançamento e (d) 5C -1 hora depois do lançamento.	74
Figura B8. Plumas lançadas em : (a) 5D -1 hora depois do lançamento e (b) 5D - no instante de chegada à costa.	75
Figura B9. Plumas lançadas em : (a) 6B -1 hora depois do lançamento e (b) 6B - no instante de chegada à costa.	75
Figura B10. Plumas lançadas em : (a) 6D -1 hora depois do lançamento e (b) 6D - no instante de chegada à costa.....	76
Figura B11. Plumas lançadas em : (a) 1C - 1 hora depois do lançamento e (b) 1C - no instante de chegada à costa.....	77
Figura B12. Plumas lançadas em : (a) 1D -1 hora depois do lançamento e (b) 1D - no instante de chegada à costa. (c) 2B - 1 hora depois do lançamento e (d) 2B - no instante de chegada à costa.	78
Figura B13. Plumas lançadas em : (a) 2C -1 hora depois do lançamento e (b) 2C - no instante de chegada à costa. (c) 2D - 1 hora depois do lançamento e (d) 2D - no instante de chegada à costa.	79
Figura B14. Plumas lançadas em : (a) 3B -1 hora depois do lançamento e (b) 3B - no instante de chegada à costa. (c) 3D - 1 hora depois do lançamento e (d) 3D - no instante de chegada à costa.	80
Figura B15. Plumas lançadas em : (a) 4C - 1 hora depois do lançamento e (b) 4C - no instante de chegada à costa.....	81
Figura B16. Plumas lançadas em : (a) 4D -1 hora depois do lançamento e (b) 4D - no instante de chegada à costa.....	81

Figura B17. Plumas lançadas em : (a) 5C -1 hora depois do lançamento e (b) 5C - no instante de chegada à costa. (c) 5D - 1 hora depois do lançamento e (d) 5D - no instante de chegada à costa.	82
Figura B18. Plumas lançadas em : (a) 6A -1 hora depois do lançamento e (b) 6A - no instante de chegada à costa. (c) 6B - 1 hora depois do lançamento e (d) 6B - no instante de chegada à costa.	83
Figura B19. Plumas lançadas em : (a) 6C -1 hora depois do lançamento e (b) 6D - 1 hora depois do lançamento e (d) 6D - no instante de chegada à costa.	84
Figura B20. Plumas lançadas em : (a) 1B -1 hora depois do lançamento e (b) 1B - no instante de chegada à costa. (c) 1C - 1 hora depois do lançamento e (d) 1C - no instante de chegada à costa.	85
Figura B21. Plumas lançadas em : (a) 1D -1 hora depois do lançamento e (b) 1D - no instante de chegada à costa. (c) 2B - 1 hora depois do lançamento e (d) 2B - no instante de chegada à costa.	86
Figura B22. Plumas lançadas em : (a) 2C -1 hora depois do lançamento e (b) 2C - no instante de chegada à costa. (c) 2D - 1 hora depois do lançamento e (d) 2D - no instante de chegada à costa.	87
Figura B23. Plumas lançadas em : (a) 3B -1 hora depois do lançamento e (b) 3B - no instante de chegada à costa. (c) 3C - 1 hora depois do lançamento e (d) 3C - no instante de chegada à costa.	88
Figura B24. Plumas lançadas em : (a) 3D -1 hora depois do lançamento e (b) 3D - no instante de chegada à costa.	89
Figura B25. Plumas lançadas em : (a) 4C - 1 hora depois do lançamento e (B) 4C - no instante de chegada à costa.	89
Figura B26. Plumas lançadas em : (a) 4D -1 hora depois do lançamento e (b) 4D - no instante de chegada à costa. (c) 5B - 1 hora depois do lançamento e (d) 5B - no instante de chegada à costa.	90
Figura B27. Plumas lançadas em : (a) 5C -1 hora depois do lançamento e (b) 5C - no instante de chegada à costa. (c) 5D - 1 hora depois do lançamento e (d) 5D - no instante de chegada à costa.	91
Figura B28. Plumas lançadas em : (a) 6A -1 hora depois do lançamento e (b) 6A - no instante de chegada à costa. (c) 6B - 1 hora depois do lançamento e (d) 6B - no instante de chegada à costa.	92
Figura B29. Plumas lançadas em : (a) 6C -1 hora depois do lançamento e (b) 6C - no instante de chegada à costa. (c) 6D - 1 hora depois do lançamento e (d) 6D - no instante de chegada à costa.	93
Figura B30. Plumas lançadas em : (a) 1C - 1 hora depois do lançamento e (b) 1C - no instante de chegada à costa.	94
Figura B31. Plumas lançadas em : (a) 1D -1 hora depois do lançamento e (b) 1D - no instante de chegada à costa. (c) 2B - 1 hora depois do lançamento e (d) 2B - no instante de chegada à costa.	95
Figura B32. Plumas lançadas em : (a) 2C -1 hora depois do lançamento e (b) 2C - no instante de chegada à costa. (c) 2D - 1 hora depois do lançamento e (d) 2D - no instante de chegada à costa.	96
Figura B33. Plumas lançadas em : (a) 3B -1 hora depois do lançamento e (b) 3B - no instante de chegada à costa. (c) 3C - 1 hora depois do lançamento e (d) 3C - no instante de chegada à costa.	97

Figura B34. <i>Plumas lançadas em : (a) 4C -1 hora depois do lançamento e (b) 4C - no instante de chegada à costa. (c) 4D - 1 hora depois do lançamento e (d) 4D - no instante de chegada à costa.</i>	98
Figura B35. <i>Plumas lançadas em : (a) 5D -1 hora depois do lançamento e (b) 5D - no instante de chegada à costa. (c) 6A - 1 hora depois do lançamento e (d) 6A - no instante de chegada à costa.</i>	99
Figura B36. <i>Plumas lançadas em : (a) 6B -1 hora depois do lançamento e (b) 6B - no instante de chegada à costa. (c) 6C - 1 hora depois do lançamento e (d) 6C - no instante de chegada à costa.</i>	100
Figura B37. <i>Plumas lançadas em : (a) 6D -1 hora depois do lançamento e (b) 6D - 1 hora depois do lançamento.</i>	101

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1.</i> Descrição dos parâmetros coletados e analisados.....	6
<i>Tabela 2.</i> Cenários cinemáticos de simulação.....	20
<i>Tabela 3.</i> Descrição das condições utilizadas nos contornos horizontais abertos (Norte, Sul e Leste) nas simulações da RCS.....	22
<i>Tabela 4.</i> Condições de evolução da pluma de poluente para um lançamento acidental na posição 4B.	43

RESUMO

Fugindo dos grandes centros urbanos, cada vez mais portos e refinarias estão sendo construídos em áreas pouco urbanizadas ou em áreas de preservação ambiental, procurando sempre se afastar das grandes cidades. Por outro lado o Poder Público exige uma atenção cada vez maior da população e das empresas na proteção do meio-ambiente. O presente trabalho foi realizado sob apoio do projeto “Modelagem matemática do transporte e dispersão de hidrocarbonetos e de uma pluma térmica em regiões costeiras tropicais do Brasil - uma ferramenta de gerenciamento emergencial e de contingência” (CNPq/CTPetro 461160/00-5). Este estudo foi proposto com o objetivo de desenvolver uma metodologia capaz de analisar quantitativamente os efeitos potenciais de derramamento acidental de plumas de poluentes (hidrocarbonetos e seus derivados) em regiões costeiras do Brasil. Para tal utilizou-se como área-piloto a região costeira adjacente ao CIPS - Complexo Industrial Portuário de Suape, Pernambuco, Brasil. O modelo matemático de circulação oceânica POM (Princeton Ocean Model) foi utilizado para analisar o fenômeno de dispersão de uma pluma hidrodinamicamente passiva na região costeira do Complexo Industrial Portuário de Suape, Pernambuco, Brasil. Diferentes hipóteses de simulação foram definidas com base na combinação de variantes hidrológicas (estações seca e chuvosa) e astronômicas (marés de sizígia e quadratura). Os resultados numéricos apresentaram-se em concordância com resultados experimentais obtidos *in situ*. Variáveis termodinâmicas, cinemáticas e medidas de difusividade foram satisfatoriamente reproduzidas numericamente. Mapas de Hierarquização de Impactos foram elaborados, a partir da simulação de lançamentos de plumas acidentais em diferentes coordenadas da região costeira adjacente ao CIPS. Estes mapas foram elaborados a partir do Índice de Hierarquização de Impactos – IHI ($0 \leq \text{IHI} \leq 100$) que combina a sensibilidade da costa ao contato com o óleo, o tempo de trajeto da pluma entre as coordenadas do lançamento até sua chegada, e a concentração da pluma quando esta afeta a linha de costa. Os resultados possibilitaram identificar sub-regiões da área de estudo potencialmente mais críticas à ocorrência de derrames acidentais. Estas sub-regiões estão situadas ao Sul do *pier* externo principal do Porto de Suape, para onde foram observados valores IHI superiores a 60, sobretudo para os cenários de verão e sizígia.

ABSTRACT

This work is one of the academic products derived from the project "Modelagem matemática do transporte e dispersão de hidrocarbonetos e de uma pluma térmica em regiões costeiras tropicais do Brasil - uma ferramenta de gerenciamento emergencial e de contingência", under CNPq/CTPetro grant no. 461160/00-5. Princeton Ocean Model (POM) was used to analyse the dispersion phenomena of a constituent plume at the coastal region of Suape Harbor, Pernambuco, Brazil. Different simulation scenarios were taken into account for hydrological and tidal variants. A first set of tests was used for determining spatial grid sizes and the integration time steps. After that, additional hydrodynamical simulations allowed to establish the kinematic fields for each forcing combination. These fields had been similar a real data sets. Impacts Arrangement Maps were constructed with informations obtained of accidental plumes simulated at the coastal region of Suape Harbor.

1 - INTRODUÇÃO

A região do Porto de Suape (Pernambuco) foi escolhida como área piloto, podendo esta metodologia ser aplicada em outras regiões tropicais do Brasil. A opção pela região costeira de Suape levou em consideração a presença de um Complexo Portuário (CIPS) numa área extremamente rica de diversidade e ecossistemas marinhos com uma economia já atrelada ao potencial turístico desta região. O Porto de Suape está situado próximo a praias nacionalmente conhecidas (Praia de Calhetas, Porto de Galinhas, Cupê, Muro Alto, Gaibú, etc.) que possuem um alto número de veranistas e onde já se instalaram grandes redes hoteleiras; e próximo a grandes áreas de mangue presentes nos estuários dos rios Massangana, Tatuoca e Ipojuca.

Nas últimas décadas a mecânica dos fluidos computacional aplicada a sistemas geofísicos deu um grande salto de qualidade. Isto deve-se principalmente ao grande avanço tecnológico que ocorreu nos últimos dez anos, permitindo que computadores pessoais (PCs) domésticos realizassem, com muito mais rapidez um volume de cálculo só possível de realizar até então em computadores de grande porte. Esta facilidade possibilitou o desenvolvimento de modelos matemáticos mais realísticos, contendo em suas rotinas muito mais conhecimento físico do que empirismo. Pela facilidade em desenvolvê-las e pela grande utilidade, estas ferramentas tornaram-se de domínio público, o que permite que qualquer pessoa adquira seu código e adapte-o à medida de sua necessidade. Entretanto, desafios ainda precisam ser vencidos quando se trata do caso específico de modelagem matemática tridimensional de ambientes costeiros ou estuarinos, que exige condições extremas de refinamento de malha e de condições de contorno bem resolvidas (Mellor, 1998). Sub-modelos de fechamento turbulento, por exemplo, que são trazidos por estes modelos tridimensionais (k- ϵ ou Mellor-Yamada 2.5) necessitam de uma boa dose de cuidado quando utilizados com malhas refinadas. Isto porque nestes casos, estas aproximações assumem papel importante na transferência de energia entre a macro e a micro-escala do movimento (James, 2002). Ao mesmo tempo, malhas com refinamento excessivo apresentam dificuldades na resolução do modo baroclínico de escoamento (Blumberg & Oey, 1985), e as soluções para resolver tais problemas nos dias de hoje ainda são relativamente polêmicas (Annan, 1999; Wheless & Valle-Levinson, 1996).

Sem a pretensão de resolver todos estes problemas evidenciados nos parágrafos anteriores, este trabalho propõe a utilização da modelagem matemática como uma das etapas

de uma metodologia de análise dos impactos ambientais causados por derramamentos acidentais de compostos hidrocarbonetos em sistemas costeiros do Brasil.

2 - OBJETIVO

Os objetivos desse estudo são:

Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia capaz de avaliar quantitativa e qualitativamente, os níveis de impacto resultantes do derramamento acidental de poluentes dinamicamente passivos em função das características geomorfológicas, oceanográficas e meteorológicas de regiões costeiras do Brasil.

Objetivos específicos

- Adaptar e aplicar um modelo matemático numérico tridimensional visando representar campos cinemáticos típicos na região costeira de Suape, Pernambuco - Brasil.
- Uma vez obtidos os campos cinemáticos característicos da região em estudo, elaborar mapas de hierarquização de impactos para a Região Costeira de Suape - RCS, identificando as áreas potencialmente mais críticas aos efeitos de derramamentos acidentais de poluentes.

3 – MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Caracterização experimental

3.1.1 – Descrição da área

O Complexo Industrial Portuário de Suape (CIPS) está situado na região Nordeste do Brasil, próximo à latitude $8^{\circ}17'S$ e longitude $35^{\circ}15' W$ (Figura 1), cerca de 50 km ao sul da cidade do Recife. A implantação do porto nas últimas décadas transformou essa área num tipo de porto de distribuição para a América do Sul, mantendo um fluxo superior a 40 navios por mês (Gov. PE, 2000).



Figura 1. Localização do Porto de Suape (Gov. PE, 2000).

Durante a construção do porto, foram destruídas grandes extensões de vegetação nativa. Estas extensões vêm sendo progressivamente recompostas por áreas destinadas à preservação da Mata Atlântica; os chamados Corredores Ecológicos de Integração Remanescente de Mata Atlântica. Além disso, dos quatro rios (Massangana, Tatuoca, Ipojuca e Merepe) que convergiam para a Baía de Suape, um estuário parcialmente isolado do oceano por uma extensa linha de recifes, apenas os rios Massangana e Tatuoca ainda desembocam diretamente dentro da Baía, enquanto que os rios Ipojuca e Merepe tiveram sua comunicação com a baía interrompida por intervenções artificiais feitas para a instalação do porto.

Conforme dito anteriormente esta área é objeto de muita atenção. Isso se dá, de um lado, pelo fato do porto está muito próximo a praias com grande potencial para o turismo (Praias de Porto de Galinhas, Muro Alto, Gaibú, Calhetas, etc.), e por outro lado, a região apresenta uma grande diversidade de ecossistemas, com grandes áreas de manguezais e elevada biodiversidade marinha, que cercam os recifes costeiros da região. A Figura 2 a seguir apresenta uma vista aérea do CIPS.



Figura 2. Vista aérea do CIPS (Gov. PE, 2001).

O clima na região é quente e úmido. A temperatura média anual é cerca de 25°C , possuindo uma variação média de $2,9^{\circ}\text{C}$ e um índice pluviométrico médio de 1500 mm.ano^{-1} , e uma taxa de evaporação de 1200 mm.ano^{-1} (Luna, 2001). A região experimenta duas estações climáticas bem definidas: a estação seca, que se estende de fins de setembro a fevereiro, quando a média mensal de chuvas é menor que 60 mm, e a evaporação excede a precipitação; e a estação chuvosa que se estende de março a fins de agosto, quando o balanço hidrológico é fortemente positivo (Gov. PE, 2000).

O vento pode ser considerado um dos principais contribuintes de energia na interface ar-água e participa ativamente na geração de turbulência e conseqüente dispersão de plumas (James, 2002). As condições de vento característico da Região Costeira de Suape (RCS) são ao longo do ano, preponderantemente de sudeste (alíseos de SE) com rajadas de nordeste no período da estação seca. Para efeito de simulação foram considerados dois regimes de ventos característicos: ventos vindos de sudeste no período chuvoso com intensidade de $2,4 \text{ m.s}^{-1}$ e ventos de nordeste mais brandos, com intensidade de $2,0 \text{ m.s}^{-1}$, para o período seco. Estas condições estão de acordo com trabalhos anteriores realizados na região (Luna, 2001; Lins 2001). Para representar o período de verão, trabalhou-se, portanto com vento constante NE, e para o período chuvoso considerou-se um vento constante de SE.

3.1.2 – *Obtenção dos dados*

Os dados físicos e dinâmicos capazes de influenciar a circulação na RCS foram coligidos ao longo de 6 estações de coleta. A Tabela 1 traz um resumo dos dados que foram obtidos em campo. A distribuição espacial das estações de coleta (Figura 3) foi baseada nas características dinâmicas do sistema. Uma preocupação maior com a área mais próxima ao Porto e, sobretudo, próxima aos principais estuários da região, influenciou a definição da malha amostral.

Tabela 1. Descrição dos parâmetros coletados e analisados.

Tipo	Estação	Frequência	Variável	Local coleta
Temperatura Salinidade Densidade	SP1 a SP4	Verão Sizíg./Quad. BM/EN/PM/VZ ^(a)	θ ($^{\circ}\text{C}$) S (psu) ρ (kg.m^{-3})	Coluna d'água
Correntes	SP1 a SP4; M12 e M34	Verão Sizíg./Quad. BM/EN/PM/VZ	Intens. (m.s^{-1}) Direção (Az)	Coluna d'água Sup./meio/fun. (no mínimo)
Nível do mar	M12 e M34	Verão Sizíg./Quad. BM/EN/PM/VZ	Variação do nível do mar (m)	Fundo

Microestrutura turbulenta	SP1 a SP4	Verão Sizíg./Quad. BM/EN/PM/VZ	$N \text{ (s}^{-1}\text{)}^{(b)}$ $\epsilon \text{ (m}^2\text{.s}^{-3}\text{)}$ $\nu_t \text{ (m}^2\text{.s}^{-1}\text{), etc.}$	Coluna d'água
------------------------------	-----------	--------------------------------------	--	---------------

(a) Estágios de maré : Baixa-mar (BM)/Enchente (EN)/Preamar (PM)/Vazante (VZ);

(b) N = Frequência de Brunt-Väisälä; ϵ = taxa de dissipação de energia cinética turbulenta ; ν_t = viscosidade cinemática turbulenta.

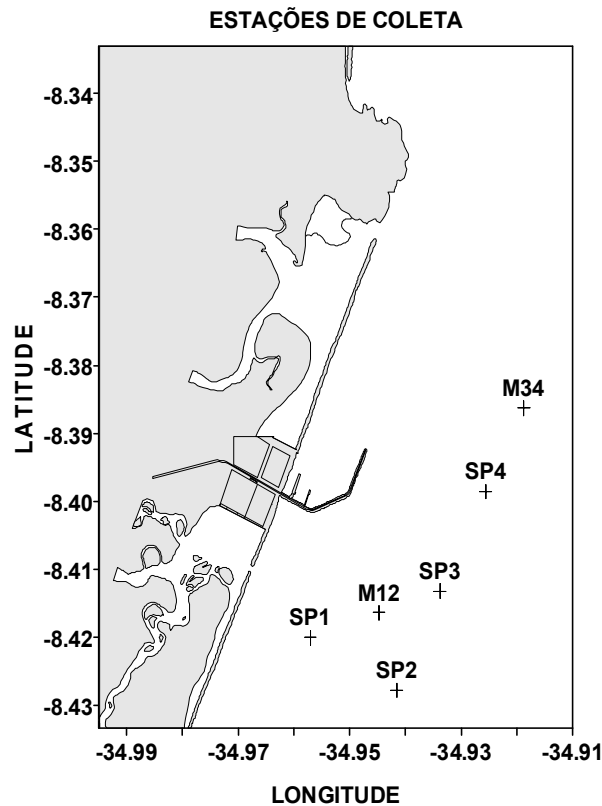


Figura 3. Distribuição espacial das estações de coleta na área da RCS.

As coletas ocorreram entre os dias 16 e 29 de março de 2001. Esta coleta foi considerada ainda dentro do período seco, definido anteriormente entre setembro e fevereiro, porque as chuvas ainda não tinham começado. Neste período foram realizadas coletas em marés de sizígia e quadratura. Não foram realizadas coletas de inverno para este trabalho, sendo os resultados de verão/sizígia e verão/quadratura utilizados para validação e calibração do modelo, utilizando-o no período de inverno já calibrado e validado. Nas coletas e análises dos dados foram utilizados os equipamentos e instalações existentes/adquiridos no Laboratório de Oceanografia Física Estuarina e Costeira - LOFEC do Departamento de Oceanografia de Universidade Federal de Pernambuco - DOCEAN/UFPE.

Cada dia de coleta correspondeu a cerca de 15 horas de trabalho no campo (cerca de 12,5 hs. para os quatro estágios de maré semi-diurna). O horário de trabalho foi ditado pelo horário das marés, e em geral começava por volta das 2:30 AM, para viabilizar as coletas iniciais na primeira estação por volta das 6:00 AM. Além disso, procurou-se aproveitar a iluminação natural durante a realização das atividades, que poderiam se tornar mais difíceis durante a noite. Foi utilizado um barco de pesca, alugado, com aproximadamente 10 m de comprimento suficiente para transporte e realização das medições de campo. Nestes dias, todo o material foi previamente transportado do Campus da UFPE para a RCS, e, após cada campanha, transportado de volta, da RCS para o Campus. Maiores detalhes sobre a metodologia de coleta podem ser encontradas em Luna (2001).

Nas determinações de SST (*Sea Surface Temperature*), condutividade (e posterior valor de salinidade) e temperatura, foi utilizado CTD *Sea Bird Electronics, mod. Sea cat SBE-16*. Neste caso, muitas vezes optou-se por *descarregar* periodicamente os dados do CTD ainda em campo. Este procedimento visou, sobretudo, a garantia da salvaguarda dos dados progressivamente coletados. Os perfis de SST, condutividade (e posterior valor de salinidade) e temperatura foram determinados em cada estação de coleta a partir dos registros de CTD com uma frequência temporal de 2 Hz de leitura. A determinação da intensidade e direção das correntes (e também temperatura) foi feita a partir da leitura direta dos registros de dois correntômetros *Sensordata a/s Bergen mod. SD-6000* (estacionário, nas estações M12 e M34) e *mod. SD-30* (perfilador, nas estações SP1 a SP4). Nas estações de coleta (SP1 a SP4), foram registrados os perfis verticais de velocidade a (praticamente) cada metro da coluna d'água;

Com um marégrafo do tipo *Sea Bird Electronics SeaGauge SBE-26*, foram obtidos os dados relativos à variação da maré durante o período que estávamos no mar (estações M12 e M34);

As características da turbulência foram obtidas com a utilização da sonda *SCAMP (Self Contained Autonomous Micro-Profiler)* nas estações SP (SP1 a SP4). A *SCAMP* é um equipamento perfilador portátil e leve, concebido para medir, numa escala extremamente pequena (da ordem de 1 mm), flutuações da condutividade elétrica, de temperatura e de concentração de oxigênio, etc., em sistemas geofísicos superficiais. Os dados coletados foram utilizados principalmente para inferir os níveis de dissipação de energia cinética turbulenta (ϵ) e de viscosidade turbulenta vertical (ν_t).

A batimetria foi obtida com a leitura direta da carta náutica (DHN,1988) e digitação da coordenadas locais e suas referidas profundidades em metros e pontos intermediários

interpolados linearmente, utilizando programas computacionais específicos pra este fim. A batimetria obtida pode ser vista na Figura 4.

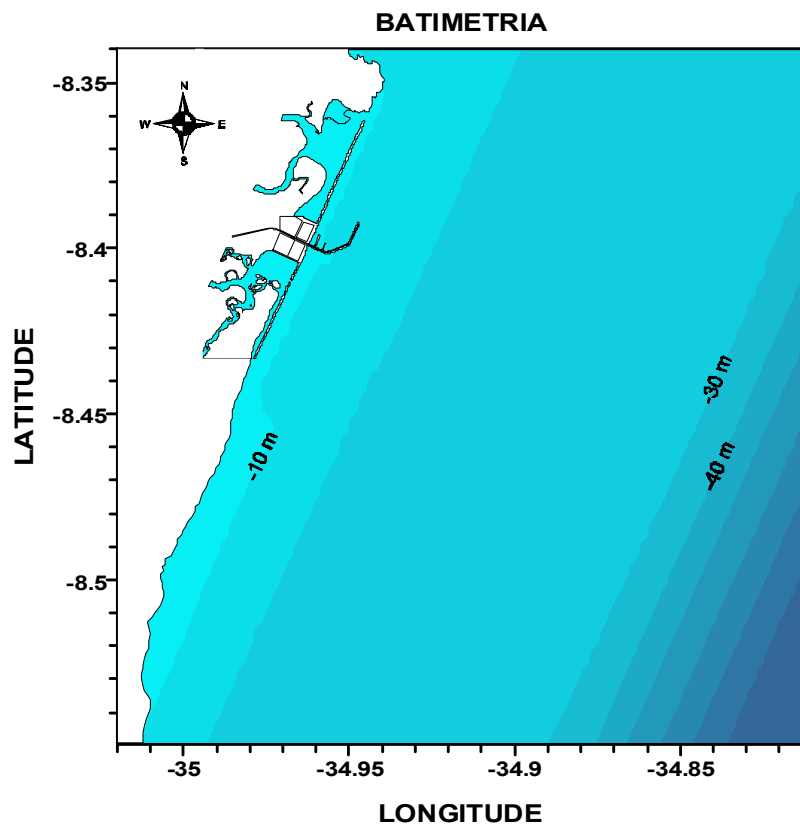


Figura 4. Batimetria construída a partir da Carta Náutica n° 906 (DHN,1988)

3.1.3 – Forçantes interfaciais (U^*)

A ação do vento na interface oceano-atmosfera provoca cisalhamento no fluido que pode ser estimado levando-se em conta expressões semi-empíricas clássicas do tipo coeficiente de arrasto (C_D) (ex: Pond & Pickard, 1983), como descrito a seguir:

$$\tau_\eta = C_D \cdot \rho_{\text{air}} \cdot V^2 \quad (4)$$

onde:

τ_η – tensão de cisalhamento devida à ação do vento (Pa);

C_D – coeficiente de arrasto (adimensional);

ρ_{air} – densidade média do ar ($\cong 1,17 \text{ kg m}^{-3}$);

V – velocidade do vento (m s^{-1}).

Com:

$$C_D = 2(a + bV) \quad (5)$$

onde:

$$a = 7,75 \times 10^{-4};$$

$$b = 6,6 \times 10^{-5}.$$

Utilizou-se os dois coeficientes adimensionais, a e b , para obter o coeficiente de arrasto (Advíncula, 2000).

No cálculo da velocidade de fricção no meio líquido foi admitida a continuidade do cisalhamento interfacial, quando se obtém:

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_\eta}{\rho_{\text{água}}}} \quad (6)$$

onde:

U^* – velocidade de fricção no meio líquido (m s^{-1});

$\rho_{\text{água}}$ – densidade superficial da água do mar (kg m^{-3}).

Os valores de U^* calculados a partir de informações das intensidades de vento, referentes às duas estações do ano, são os principais forçantes interfaciais de cisalhamento *alimentados* no modelo matemático de circulação que foi utilizado neste estudo.

3.2 – O modelo matemático Princeton Ocean Model - POM

3.2.1 – Generalidades

Dentre os modelos numéricos hidrodinâmicos adequados para aplicações costeiras ou que impliquem fortes gradientes batimétricos, um dos mais testados e utilizados pela comunidade científica é o *Princeton Ocean Model (POM)*. Exemplos de aplicações e de sua versatilidade em podem ser encontrados em Kourafalou (2001); Wheless & Valle-Levinson (1996); Cummins & Oey (1996). Trata-se de um modelo baseado nas equações primitivas de quantidade de movimento de um fluido newtoniano. O código do *POM*, hoje pertencente ao domínio público, foi desenvolvido na década de 80 por Blumberg & Mellor (1987), no Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (GFDL) da Universidade de Princeton. No Brasil, o *POM* tem sido utilizado por um grupo cada vez maior de usuários, incluindo o Laboratório de Oceanografia Física Estuarina e Costeira – LOFEC da UFPE.

Em sua forma completa, o POM é um modelo tridimensional que integra o sistema de Reynolds, discretizado pelo método das diferenças finitas. Horizontalmente as equações são integradas temporalmente de forma explícita, enquanto que a integração vertical se processa de forma implícita. Essas equações, tanto servem para representar campos de velocidades, como distribuições espaciais de temperatura e salinidade. Uma característica fundamental do *POM* é a utilização da coordenada vertical “sigma” (fração da profundidade local), o que permite considerar tanto as camadas do fluido como o fundo, como superfícies curvilíneas na horizontal (Figura 5). A utilização de uma resolução mais fina nas camadas limite de superfície e de fundo torna o modelo particularmente adequado para o uso em sistemas naturais com forte gradiente batimétrico, como o caso de regiões costeiras. Maiores detalhes sobre o código numérico podem ser encontrados em Mellor (1998), entre outros.

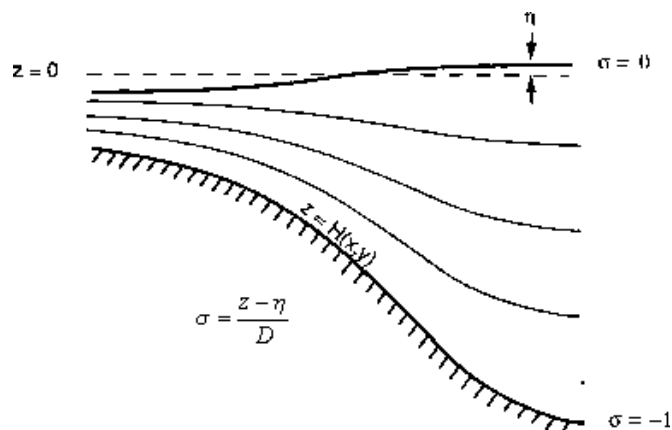


Figura 5. Coordenadas sigma do Princeton Ocean Model.

O sistema de coordenadas sigma é dado por:

$$x^* = x; \quad y^* = y; \quad \sigma = \frac{z - \eta}{D}; \quad t^* = t \quad (1)$$

onde:

x, y, z – coordenadas cartesianas;

t – tempo;

D – profundidade local;

η – elevação da superfície.

3.2.2 – Equações básicas do modelo

Neste estudo, o eixo x é considerado perpendicular à costa e em direção Nordeste; o eixo y é paralelo a linha de costa e em direção Noroeste, enquanto que o eixo vertical z se encontra perpendicular à superfície média da área de estudo.

As principais equações que compõem o modelo *POM* são apresentadas a seguir:

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial U}{\partial x^*} + \frac{\partial V}{\partial y^*} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

- Conservação de quantidade de movimento

$$\frac{\partial U}{\partial t^*} + U \frac{\partial U}{\partial x^*} + V \frac{\partial U}{\partial y^*} + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + F_{x^*} \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t^*} + U \frac{\partial V}{\partial x^*} + V \frac{\partial V}{\partial y^*} + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y^*} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) + F_{y^*} \quad (4)$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (5)$$

- Equação de estado

$$\rho = \rho(S, \theta, P) \quad (6)$$

- Conservação da temperatura potencial

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + U \frac{\partial \theta}{\partial x^*} + V \frac{\partial \theta}{\partial y^*} + W \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + F_{\theta^*} \quad (7)$$

- Conservação da salinidade

$$\frac{\partial S}{\partial t^*} + U \frac{\partial S}{\partial x^*} + V \frac{\partial S}{\partial y^*} + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_{S^*} \quad (8)$$

sendo:

U, V - velocidades horizontais (m s^{-1});

W - velocidade vertical (m s^{-1});

f - parâmetro de Coriolis (s^{-1});

ρ_0 - densidade de referência (kg m^{-3});

ρ - densidade *in situ* (kg m^{-3});

P - pressão (N m^{-2});

K_M - coeficiente de viscosidade turbulenta vertical ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

K_H - coeficiente de difusividade turbulenta vertical de calor e sal ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

g - aceleração da gravidade (m s^{-2});

θ - temperatura potencial ($^{\circ}\text{C}$);

S - salinidade (ups).

Os movimentos que ocorrem em escalas menores que o espaçamento da malha de resolução, são determinados pelos termos:

$$F_{x^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(2A_M \frac{\partial U}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y^*} + \frac{\partial V}{\partial x^*} \right) \right] \quad (9)$$

$$F_{y^*} = \frac{\partial U}{\partial x^*} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y^*} + \frac{\partial V}{\partial x^*} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(2A_M \frac{\partial V}{\partial y^*} \right) \quad (10)$$

$$F_{\theta^*, S^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left[A_H \frac{\partial}{\partial x^*} (\theta, S) \right] + \frac{\partial}{\partial y^*} \left[A_H \frac{\partial}{\partial y^*} (\theta, S) \right] \quad (11)$$

onde:

A_M - coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

A_H - coeficiente de difusão turbulenta horizontal de calor e sal ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Definidos pela formulação de *Smagorinsky*:

$$A_M = C_{SMA} \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$A_M = \frac{A_H}{\sigma_M} \quad (13)$$

onde:

$C_{SMA} \cong 0,05$ - constante de difusividade de *Smagorinsky*;

Δx e Δy - dimensões horizontais da célula de integração numérica;

σ_M - número de *Prandtl* turbulento.

Quando transformadas para o sistema de coordenadas sigma as equações anteriores tomam a seguinte forma:

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial}{\partial x}(DU) + \frac{\partial}{\partial y}(DV) + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

- Conservação da quantidade de movimento

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(UD) + \frac{\partial}{\partial x}(U^2 D) + \frac{\partial}{\partial y}(UVD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(U\omega) - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \left(\frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right) \right] d\sigma' + F_x \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(VD) + \frac{\partial}{\partial x}(UVD) + \frac{\partial}{\partial y}(V^2 D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(V\omega) + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \left(\frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right) \right] d\sigma' + F_y \end{aligned} \quad (16)$$

- Conservação da temperatura potencial

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta D) + \frac{\partial}{\partial x}(\theta UD) + \frac{\partial}{\partial y}(\theta VD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(\theta \omega) = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right) + F_{\theta} \quad (17)$$

- Conservação da salinidade

$$\frac{\partial}{\partial t}(SD) + \frac{\partial}{\partial x}(SUD) + \frac{\partial}{\partial y}(SVD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(S\omega) = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + F_s \quad (18)$$

e as novas contribuições difusivas definidas como:

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M D \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M D \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (19)$$

$$F_y = \frac{\partial U}{\partial x} \left[A_M D \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (20)$$

$$F_{\theta,s} = \frac{\partial}{\partial x} \left[DA_H \frac{\partial}{\partial x} (\theta, S) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[DA_H \frac{\partial}{\partial y} (\theta, S) \right] \quad (21)$$

Neste novo sistema, ω corresponde a velocidade perpendicular a superfície sigma, definido por:

$$\omega = W - U\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} - V\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} - \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) \quad (22)$$

O modelo *POM* também contém um sub-modelo de fechamento turbulento, que tem por objetivo representar, de uma forma mais realista, as camadas de fundo e superfície. Dessa forma tem-se:

- Equação da energia cinética turbulenta

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(q^2 D) + \frac{\partial}{\partial x}(Uq^2 D) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq^2 D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(\omega q^2) &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) \\ + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + F_{q^2} \end{aligned} \quad (23)$$

- Equação da turbulência em macro escala

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(q^2 l D) + \frac{\partial}{\partial x}(Uq^2 l D) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq^2 l D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(\omega q^2 l) &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (q^2 l) \right] \\ + l E_1 \left\{ \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right\} - \frac{Dq^3}{B_1 l} \tilde{W} + F_{q^2 l} \end{aligned} \quad (24)$$

considerando:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \equiv D \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (25)$$

c_s = velocidade de propagação do som na água (m s^{-1}), e

$$F_{q^2, q^2 l} = \frac{\partial}{\partial x} \left[DA_H \frac{\partial}{\partial x} (q^2, q^2 l) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[DA_H \frac{\partial}{\partial y} (q^2, q^2 l) \right] \quad (26)$$

$$(L)^{-1} \equiv (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1} \quad (27)$$

$$\tilde{W} \equiv 1 + E_2 \left(\frac{l}{\kappa L} \right)^2 \quad (28)$$

onde:

q^2 - energia cinética turbulenta ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

l - escala de comprimento turbulento (m);

$\tilde{W}$ - função proximidade do contorno;

κ - constante de von Karman ($\kappa=0,4$);

$F_{q^2, q^2 l}$ = termos horizontais de mistura para q^2 e $q^2 l$ ($\text{m}^3 \text{s}^{-3}$).

3.2.3 – Malhas horizontal e vertical

Para a malha horizontal, o modelo resolve as equações do movimento tridimensionais em uma malha do tipo Arakawa – C (Arakawa & Lamb, 1977) (Figura 6), conservando as quantidades linear e quadrática de massa e energia. A integração do tempo é dividida dentro de um modulo externo, barotrópico e bidimensional , com pequenos intervalos de tempo de integração, e um módulo interno, baroclínico e tridimensional, com intervalos de tempo de integração superiores.

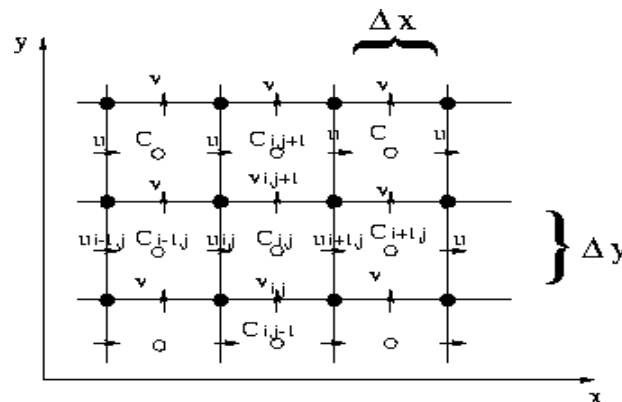


Figura 6. Malha Arakawa C.

As coordenadas geográficas com suas respectivas profundidades da malha foram retiradas a partir da carta náutica, número 906 (DHN, 1988). A distribuição da malha partiu do centro às laterais com espaçamento variado entre os nós. A dimensão total da malha foi de 10 km na direção paralela à costa (eixo y) e de 8 km na direção perpendicular ao continente (eixo x), perfazendo uma área total de 80 km^2 . A grade de simulação tem sua origem no ponto da linha de costa situada a 2800 metros ao sul do *pier* de Suape (Figura 7). Conforme já definido, o eixo x aponta mar adentro sendo perpendicular à linha de costa. O eixo y aponta para Norte e é paralelo à linha de costa. A resolução espacial da malha varia exponencialmente da costa para o mar no eixo x . No eixo y paralelo à linha de costa, a malha mais fina encontra-se mais próxima do porto e é espaçada à medida que se afasta do quebra-mar do porto (Figura 6). Na determinação da malha vertical as camadas sigma foram distribuídas de modo exponencial, da superfície ao fundo. Esse tipo de distribuição permite refinar os resultados na camada vertical, em especial próximo da camada limite de superfície, caracterizada pela presença de gradientes mais importantes. A representação tridimensional pode ser vista na Figura 8.

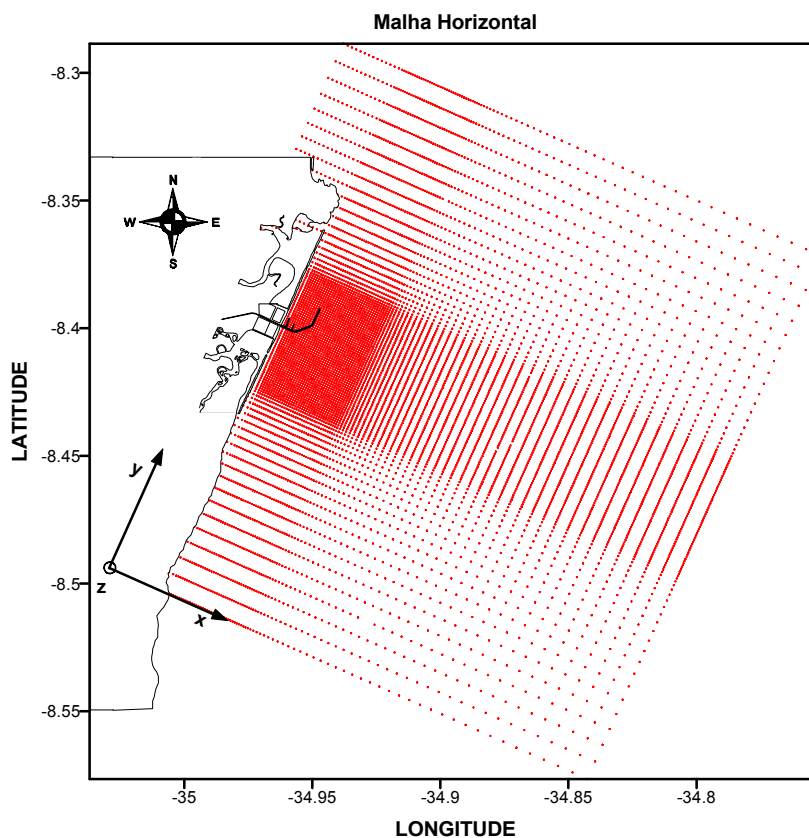


Figura 7. Grade de discretização horizontal da região costeira de Suape (domínio de integração).

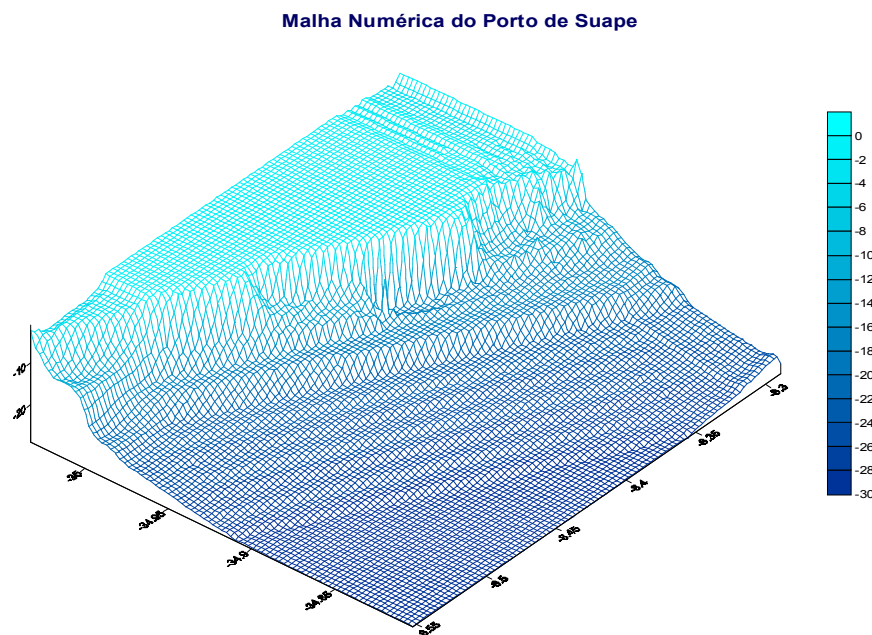


Figura 8. Vista tridimensional da malha numérica utilizada nas simulações

3.2.4 – Cenários de simulação

As informações meteorológicas e descritivas da dinâmica da interface ar-líquido, associadas à topografia, condições de maré e à distribuição de temperatura e de salinidade da água, obtidas ao longo das campanhas de campo, serviram de base para o estabelecimento dos cenários de simulação. Nesse caso, uma análise preliminar dos dados permitiu verificar que as informações relativas à estação chuvosa (março a agosto), apesar das coletas realizadas em março terem sido ainda consideradas dentro do período seco do ano 2001(conforme justificativa na pág.20) poderiam ser agrupadas num único cenário, referenciado a seguir por inverno. Analogamente, os dados relativos aos períodos de primavera e verão (entre setembro e fevereiro) foram agrupados para a representação numérica do cenário seco, chamando-se a seguir por verão. Em seguida para cada período do ano duas situações características de maré foram consideradas, a partir de informações coletadas pelo marégrafo nas estações M12 e M34, totalizando um conjunto de quatro cenários cinemáticos de simulação, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2. Cenários cinemáticos de simulação.

Variantes hidrológicas (sazonalidade)	Variantes astronômicas (marés)
Verão	Sizígia
	Quadratura
Inverno	Sizígia
	Quadratura

3.2.5 – Condições de contorno

É importante registrar que todas as informações utilizadas neste estudo passaram por um processo de pré-tratamento visando sua adequação aos arquivos de dados de entrada do código numérico. Com o intuito de fornecer uma visão geral do modelo, foi desenvolvido um esquema detalhando as etapas de processamento do mesmo (Apêndice 1).

As condições de contorno utilizadas no *POM* foram escolhidas e testadas de forma a representar situações características dos períodos chuvoso e seco, e as forçantes astronômicas traduzidas pelas forças e maré de sizígia e quadratura. Em todos os casos considerou-se uma grade de integração com seus limites Sul, Norte, e Leste abertos. Nesses limites foi induzida uma maré semi-diurna com amplitude e fase calculada a partir dos registros de maré coligidos em campo. As condições aplicadas seguem os tratamentos desenvolvidos progressivamente por Silva (2001), de acordo com Chapman (1985). A Tabela 3 a seguir traz a descrição das condições utilizadas nos contornos horizontais abertos (Norte, Sul e Leste) nas simulações da RCS.

Tabela 3. Descrição das condições utilizadas nos contornos horizontais abertos (Norte, Sul e Leste) nas simulações da RCS.

Modo	Limites horizontais abertos		
	Norte	Sul	Leste
Externo	- Elevação forçada (a) : $\eta = a * \sin\left[\left(\frac{2\pi}{T}\right) * t\right]$ - Fluxo normal e veloc. tangencial nulos : $\frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad ; \quad U = 0$	- Elevação forçada : $\eta = a * \sin\left[\left(\frac{2\pi}{T}\right) * t\right]$ - Fluxo normal e veloc. tangencial nulos : $\frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad ; \quad U = 0$	- Radiação : $\frac{\partial \eta}{\partial t} + c_e \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial U}{\partial t} + c_e \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad ; \quad c_e = \sqrt{gh}$ - Veloc. tangencial nula : $V = 0$
Interno (implícito)	- Radiação : $\frac{\partial V}{\partial t} \pm c_i \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad ; \quad c_i = \sqrt{gh}$ - Fluxo turbulento: $q^2 = (0,1 \cdot V)^2 \quad ;$ $\varepsilon = \frac{q^{2^{3/2}} \cdot C_\mu^{3/4}}{\chi \cdot L} \quad ;$ $L = O(0,1 \cdot H)$	- Radiação : $\frac{\partial V}{\partial t} \pm c_i \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad ; \quad c_i = \sqrt{gh}$ - Fluxo turbulento: $q^2 = (0,1 \cdot V)^2 \quad ;$ $\varepsilon = \frac{q^{2^{3/2}} \cdot C_\mu^{3/4}}{\chi \cdot L} \quad ;$ $L = O(0,1 \cdot H)$	- Radiação : $\frac{\partial U}{\partial t} + c_i \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad ; \quad c_i = \sqrt{gh}$ - Fluxo turbulento: $q^2 = (0,1 \cdot U)^2 \quad ;$ $\varepsilon = \frac{q^{2^{3/2}} \cdot C_\mu^{3/4}}{\chi \cdot L} \quad ;$ $L = O(0,1 \cdot H)$
Geral	- Advecção montante (<i>Upstream advection</i>) $\frac{\partial \theta}{\partial t} + V \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$ $\frac{\partial S}{\partial t} + V \frac{\partial S}{\partial y} = 0$ $\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial y} = 0$ - Camada amortecim. (b) (<i>Sponge layer</i>) $C_d = \varepsilon_M (y_b \pm y) + C_d$	- Advecção montante (<i>Upstream advection</i>) $\frac{\partial \theta}{\partial t} + V \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$ $\frac{\partial S}{\partial t} + V \frac{\partial S}{\partial y} = 0$ $\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial y} = 0$ - Camada amortecim. (<i>Sponge layer</i>) $C_d = \varepsilon_M (y_b \pm y) + C_d$	- Advecção montante (<i>Upstream advection</i>) $\frac{\partial \theta}{\partial t} + V \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial S}{\partial t} + V \frac{\partial S}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial x} = 0$ - Camada amortecim. (<i>Sponge layer</i>) $C_d = \varepsilon_M (x_b \pm x) + C_d$

a = amplitude de oscilação do nível do mar (Sizígia/Quadratura) (m)

T = período característico da maré semi-diurna na RCS (s)

C_d = coeficiente de arraste de fundo no interior do domínioε_M = constante de amortecimentox_b, y_b = coordenadas do contorno (m)x, y = coordenadas do ponto onde inicia o incremento de C_d (m)q² = energia cinética turbulenta (m²s⁻²)ε = taxa de dissipação de q² (m²s⁻³)C_μ = coeficiente de difusividade (≅ 0,09)χ = constante de *von Karman* (≅ 0,4)

L = comprimento de mistura (m)

H = altura da lâmina d'água (m)

O limite Oeste é considerado fechado para representar a linha de costa e o *pier* adjacente. Nesse caso, as condições aos limites são relacionadas inicialmente a uma velocidade normal nula e a um fluxo nulo de temperatura, sal e de concentração de poluente (*von Newmann*), ou seja :

$$U = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (29)$$

Para as velocidades V e W , entretanto, as condições ao limite destas regiões serão função do tipo de fechamento adotado para o fluxo turbulento. Neste caso, ter-se-á :

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial V}{\partial n}, \frac{\partial W}{\partial n} \right) = C_d [V^2 + W^2]^{1/2} (V, W) \quad (30)$$

$$C_d = \max \left\{ \frac{k^2}{\left[\ln \left[(1 + \sigma_{kb-1}) H / z_0 \right] \right]^2} \quad ; \quad 0,0025 \right\} \quad (31)$$

onde C_d é o coeficiente de arraste, k é uma constante de difusividade e z_0 a rugosidade característica da parede. As grandezas turbulentas na parede são impostas considerando-se um equilíbrio entre a produção e a dissipação de energia cinética turbulenta dentro da região logarítmica da camada-limite lateral. Neste caso tem-se:

$$q^2 = V^{*2} \cdot C_\mu^{-1/2} \quad (32)$$

$$\varepsilon = \frac{V^{*3}}{\chi \cdot x_b} \quad (33)$$

Condições análogas foram impostas ao fundo do domínio de integração ($\sigma = -1$), quando se teve :

$$W = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (34)$$

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = C_d [U^2 + V^2]^{1/2} (U, V) \quad (35)$$

$$q^2 = (U^{*2}, V^{*2}) \cdot C_\mu^{-1/2} \quad (36)$$

$$\varepsilon = \frac{(U^{*3}, V^{*3})}{\chi \cdot H \cdot (\sigma - 1)} \quad (37)$$

No que se refere aos contornos de superfície ($\sigma = 0$), o cisalhamento eólico é considerado através de termos fonte de quantidade de movimento horizontal, cujas intensidades variam em função basicamente da sazonalidade (inverno ou verão). Neste caso têm-se:

$$W = 0 \quad (38)$$

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = C_d [U_w^2 + V_w^2]^{1/2} (U_w^2, V_w^2) \quad (39)$$

$$q^2 = (U^{*2}, V^{*2}) \cdot C_\mu^{-1/2} \quad (40)$$

$$\varepsilon = - \frac{(U^{*3}, V^{*3})}{\chi \cdot H \cdot \sigma} \quad (41)$$

onde U_w^2 e V_w^2 são as componentes da velocidade do vento agindo na superfície do mar. Em todas as simulações, foram considerados, na interface ar-água, um fluxo vertical nulo (*von Neumann*) de sal e de concentração C , ou seja :

$$\frac{\partial S}{\partial \sigma} = \frac{\partial C}{\partial \sigma} = 0 \quad (42)$$

As condições iniciais de temperatura e salinidade foram definidas a partir das leituras de CTD realizadas em campo e foram consideradas constantes ao longo da simulação. Esta simplificação é mais adotada devido à facilidade de aplicar as condições de contorno do modelo (Chapman, 1985) e por ser o sistema marinho costeiro em estudo verticalmente bem misturado (Luna, 2001). Neste caso, a modelagem de ambientes costeiros considera como principal aspecto a propagação de ondas barotrópicas, de gravidade, no interior da malha. Para a temperatura inicial de verão considerou-se $T_{sup} = 28^\circ\text{C}$ e para inverno $T_{sup} = 27^\circ\text{C}$ com um pequeno decaimento exponencial, na profundidade, para considerar variações verticais próximo do limite leste da malha. A salinidade tanto no verão como no inverno é dada por $S = 35,7$ psu. Para o fechamento turbulento, condições de contorno laterais do tipo *Dirichlet* foram consideradas, similares àquelas propostas por Fukushima & Watanabe (1990). Um

maior detalhamento das condições de contorno de turbulência pode ser encontrado em Araújo *et al.* (1998)

3.2.6 – Modelo de dispersão de constituintes

O modelo *POM* não contempla em seu código original uma rotina que simule a dispersão de plumas. Por esse motivo, foi adicionado ao modelo hidrodinâmico uma sub-rotina destinada ao cálculo de dispersão baseada na equação de transporte advectivo-difusivo de poluentes, desenvolvido no LABMON-IOUSP (Campos, 1999), e descrito pela equação :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}}_I C + \underbrace{\bar{v} \cdot \nabla C}_{II} = \underbrace{Q(x_0, y_0, t)}_{III} + \underbrace{K_H \nabla^2 C}_{IV} \quad (43)$$

onde :

I → taxa de variação temporal local da concentração C ($[C].s^{-1}$)

II → variação advectiva ($[C].s^{-1}$)

III → vazão do emissário, concentrada no ponto (x_0, y_0) ($[C].s^{-1}$)

IV → difusão turbulenta horizontal, variação por movimentos de sub-escala ($[C].s^{-1}$)

Resolvendo a equação diferencial acima chega-se a :

$$C(x, y, t) = C(x, y, t_0) + \int_{t_0}^t u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} dt' + \int Q(x_0, y_0, t') + K_H \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) C dt' \quad (44)$$

Uma vez estabelecida a circulação na região de estudo, promove-se uma nova simulação, injetando-se continuamente o constituinte C nas coordenadas (x_0, y_0) , a uma taxa (normalizada) de $1,0 [C].s^{-1}$.

3.2.7 – Configuração computacional

Os sistemas operacionais que são utilizados para compilação e execução do código do *POM* são derivados do UNIX™. Estes sistemas são atualmente estáveis e robustos, além de apresentarem pacotes de programas que facilitam o trabalho do usuário e do programador. Em geral, funcionam em máquinas com processadores de arquitetura 64-bits.

Com o passar dos anos, os computadores pessoais domésticos tiveram sua capacidade de processamento aumentada e o código do modelo *POM* foi adaptado para esta arquitetura, em sua grande maioria composta por máquinas com processadores de 32-*bits*, estas máquinas utilizam sistemas operacionais UNIX *like* livremente distribuídos pela WEB™, sob licenças do tipo GPL™ (ex: freeBSD™ ou GNU/Linux™).

A versão do *POM* utilizada neste trabalho foi escrita em Fortran77™, recebendo atualizações das suas rotinas tanto em Fortran77™ como em Fortran90™.

O sistema operacional utilizado neste trabalho foi o Mandrake Linux 8.1™, com o compilador Fortran g77™ (GNU/Fortran™).

No Anexo A são apresentados os principais elementos do código computacional do *POM* quais sejam: principais variáveis, constantes e índices encontrados nas rotinas; bloco de *common*, arquivos de entrada, principais rotinas do código, arquivos de saída e impressão dos resultados gerados pelo programa.

3.2.8 – Calibração, Condições iniciais e de lançamento de poluentes

Antes de iniciar a utilização do *POM* como ferramenta adaptada a RCS e efetuar todos lançamentos propostos o modelo sofreu um processo de adequação/calibração onde os principais parâmetros trabalhados foram: os espaçamentos dos nós, número de nós nos eixos x (transversal à costa) e y (longitudinal à costa), o número de camadas verticais adotadas e os passos de tempo de integração dos modos barotrópico e baroclínico das equações de base. O objetivo maior desta etapa é fazer com que o modelo apresente dentro de dez anos numéricos uma estabilidade da energia cinética total do sistema. Por tratar-se de um problema costeiro sujeito à condição de maré a curva da energia deve apresentar um ciclo em igual frequência ao da oscilação de maré, o que não ocorre se tratarmos, com o *POM*, de um problema onde a maré não se apresenta como principal forçante (Ezer *et al.*, 2002). Um estudo de malhas foi realizado com o intuito de minimizar a propagação de ondas e vórtices dentro da malha discreta no final de 5 tentativas com diferentes disposições e quantidades de nós adotou-se a malha horizontal descrita na pág 19. O número de camadas verticais ficou associado a representatividade dos perfis verticais de difusividade e de velocidade em pequenas profundidades, próximos a superfície, uma vez que diferentes disposições e quantidades de camadas dentro da “faixa logarítmica” da superfície dê a capacidade ao modelo de dissipar

energia cinética turbulenta entre as camadas ou acumular dentro destas energia cinética proveniente do cisalhamento eólico e dos fluxos radiativos. Nos dois casos o número de camadas horizontal e vertical fica limitado a capacidade computacional, uma vez que quanto maior a quantidade de nós e de camadas melhor resultado numérico obtêm-se através da simulação, entretanto, por outro lado, aumenta-se o tempo de processamento computacional para cada dia numérico simulado. Para obtenção do intervalo de tempo de discretização das equações nos modos baroclínico e barotrópico aplica-se a condição de CFL (Mellor, 1998), uma vez conhecidas as distâncias mínimas horizontais, para obtenção de um intervalo de tempo máximo, caso contrário a condição de discretização numérica dada as equações de Reynolds é invalidada. E através de tentativa e erro, comparando as curvas de energia e as reflexões de ondas nos limites, calibra-se o modelo permitindo sua utilização como ferramenta confiável.

Em todos os casos, somente foram considerados os resultados das simulações posteriores ao sexto ciclo de maré consecutivo (a partir do 4º dia de simulação), quando foi observada a estabilização das periodicidades dos campos cinemáticos. Para todas os casos, o oceano foi inicialmente considerado em repouso (situação de estófo de baixa-mar), e foram utilizadas funções matemáticas simples (*ramp functions*) que permitiram a imposição progressiva das condições de contorno (ventos e marés) ao sistema.

No momento inicial de simulação, considerou-se uma condição de temperatura e salinidade médias obtidas a partir dos dados de campo (inverno/verão, sizígia/quadratura).

Uma vez estabilizado o caráter cíclico do escoamento, promoveu-se o lançamento contínuo da pluma de poluente (situação conservadora 1), ao longo dos 7 dias consecutivos de simulação (4º. ao 10º. dia). Em todos os cenários, o início de lançamento ocorreu no estágio de maré de baixa-mar, o que corresponderia a pior situação do ponto de vista de transporte da mancha para a região costeira (situação conservadora 2).

Visando ainda evitar a introdução de uma nova variável ao problema (vazão ou volume efluente), optou-se por considerar, em todas as simulações, o lançamento de uma concentração de poluente constante e normalizada $C/C_0 = 1,0$.

Para considerar a possibilidade de ocorrência de acidentes (lançamento de efluentes) em diferentes locais da RCS, a área costeira foi dividida em 24 quadrantes (1A, 1B, 1C, 1D, 2A, ... , 6D), conforme apresentado na Figura 9. Para cada quadrante definido, foram realizadas simulações envolvendo o lançamento da pluma (no ponto central do quadrante),

para as diferentes combinações de sazonalidade e de maré, perfazendo um total de : 2 (inverno/verão) x 2 (sizígia/quadratura) x 24 (24 quadrantes) = 96 cenários de simulação.

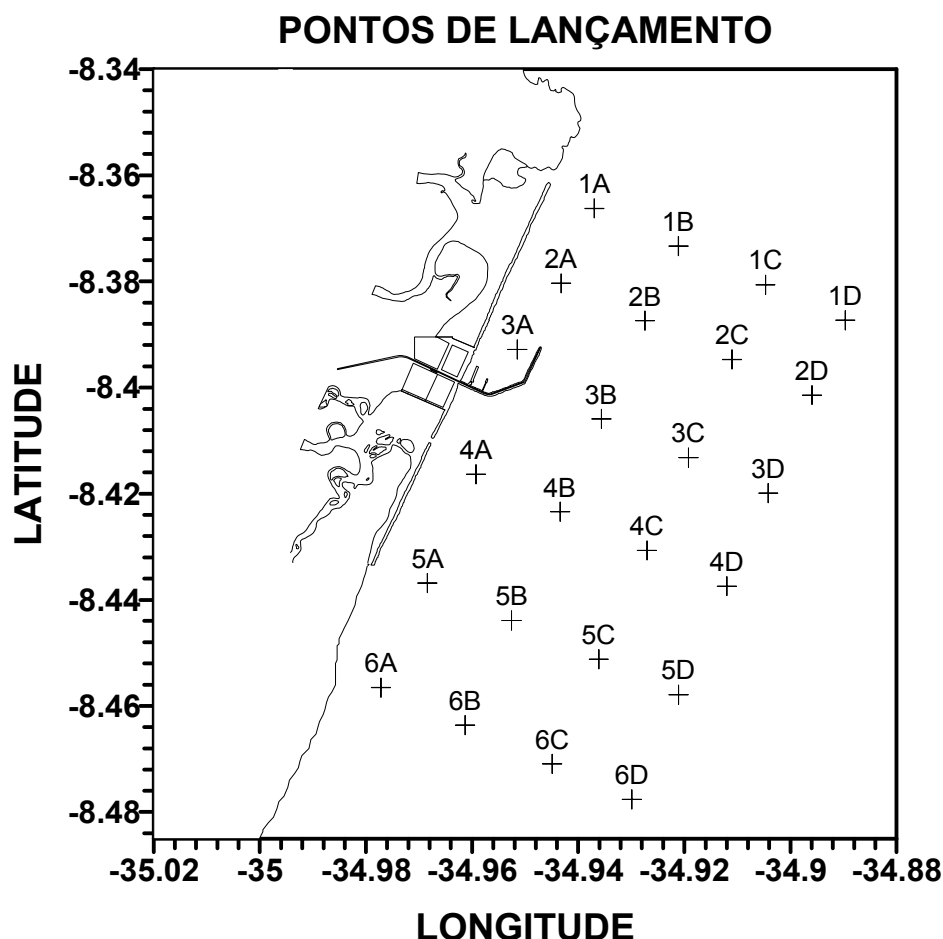


Figura 9. Definição dos pontos de lançamento da pluma de poluentes para análise dos diferentes cenários de simulação.

3.3 - Índice de Hierarquização de Impactos (IHI)

Os mapas de hierarquização de impactos foram elaborados a partir do cálculo do Índice de Hierarquização de Impactos (IHI). Para obtenção do IHI, foi simulada, para cada situação hidrológica (inverno/verão), e para cada forçante astronômica (marés de sizígia e quadratura), a evolução das plumas de poluentes lançados em cada uma das coordenadas centrais dos 24 quadrantes apresentados na Figura 9 (1A, 1B, 1C, 1D, 2A, ..., 6D).

O valor de IHI, em cada situação, foi calculado a partir da média aritmética de três sub-índices, quais sejam:

$$IHI = \frac{IC + IL + IT}{3} \quad (45)$$

onde:

IC = Índice de concentração (0-100)

IL = Índice de linha de costa (0-100)

IT = Índice de tempo de alcance (0-100)

O primeiro sub-índice representa o peso dos efeitos de concentração de poluente que efetivamente alcança a costa. Este é calculado pela seguinte expressão:

$$IC = C * 100 \quad (46)$$

Onde C é a concentração de poluente no momento que alcança a costa normalizada pela concentração C_0 de lançamento do poluente (considera-se o C mínimo como 1% de C_0).

A segunda parcela do IHI é responsável em contabilizar os impactos que podem ser mais ou menos importantes em função do nível de sensibilidade da costa eventualmente alcançada pela mancha de poluente. Nesse caso tem-se:

$$0 \leq IL \leq 100 \quad (47)$$

Dessa forma, um valor é atribuído para cada setor da costa correspondente a um trecho discreto da malha espacial inserida no modelo *POM* (Figura 10). Esta segunda parcela do IHI foi adaptada a partir de critérios atribuídos à linha de costa mediante impactos sofridos pelo contato com óleo e derivados, de acordo com a natureza da mesma (costão rochoso, areia fina, areia grossa, pedregosa, portuária ou construída, de manguezal ou pantanosa, etc). Os critérios aqui adotados foram derivados das escalas propostas pela agência *National Ocean and Atmosphere Agency – NOAA/USA*, que servem como um dos parâmetros básicos para

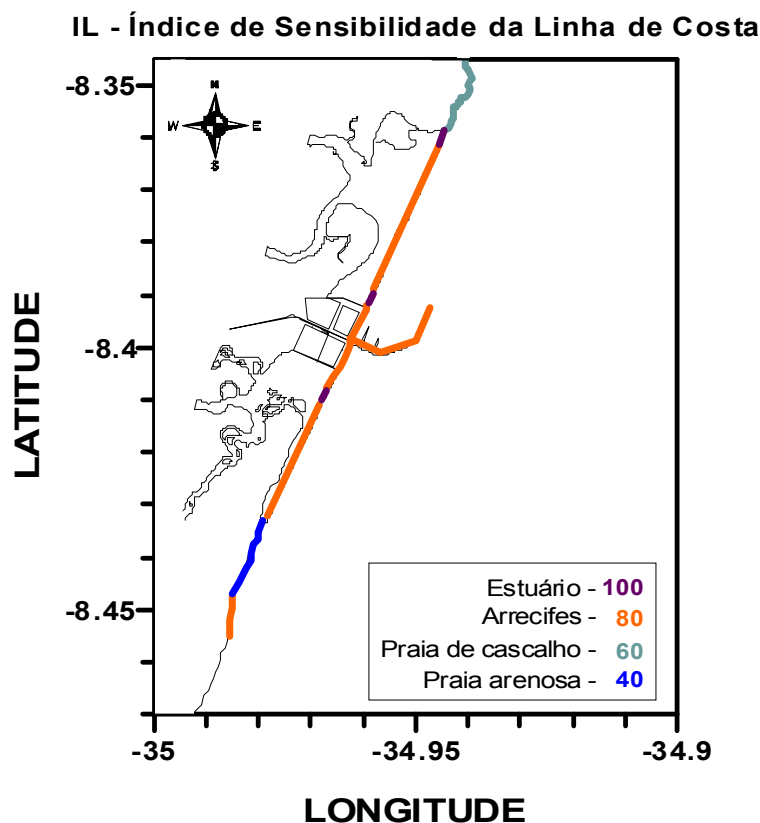


Figura 10. Representação dos valores de IL para cada trecho de praia dentro da RCS.

elaboração do índice *ESI - Environmental Sensitivity Index* (NOAA,2001). O parâmetro *ESI* é utilizado para avaliar riscos ambientais em várias regiões costeiras dos EUA, a partir de informações estáticas (não-dinâmicas). O índice da *NOAA* tem uma escala que varia de 0 a 10, indicando o quanto à costa é mais ou menos sensível a danos provocados pelo contato com o petróleo e/ou com seus derivados. No caso presente, foram atribuídos valores para cada trecho de praia, de acordo com as informações contidas nas cartas náuticas e em fotos aéreas recentes disponibilizadas pela administração do CIPS. Estes valores foram multiplicados por 10, para que fiquem dentro do intervalo preterido para esta parcela (Figura 10).

O terceiro parâmetro que contribui em igual proporção no cálculo do IHI é o eventual tempo de viagem desta mancha, lançada em diferentes pontos(Figura 9), até a costa de Suape. Ele assume valor o menor quanto mais tarde a pluma chega à costa e assume valores cada vez maiores o quanto mais rápido chega à costa.

$$0 \leq IT \leq 100 \quad (48)$$

Para isto, considerou-se que, o quanto mais rápido a mancha alcança a região costeira, maior será o valor que a parcela de tempo. O valor mínimo foi associado à(s) situação(ões) em que a mancha de poluente não alcança qualquer ponto da costa (ou demora mais de sete dias para alcançá-la). Em oposição, o valor de IT será máximo, $IT=100$, se a pluma alcançar quase que instantaneamente a costa após ter sido lançada, o que acontece com boa parte dos acidentes simulados próximos à linha de costa.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados finais do processo de calibração e validação do POM, alguns dos resultados numéricos dos lançamentos e os Mapas de Hierarquização de Impactos para as combinações de forçantes hidrológicas e astronômicas. Os dados experimentais foram analisados previamente e serviram de condições de contorno iniciais (temperatura, salinidade, e elevação da superfície do mar) e/ou como dados comparativos (velocidades) no processo de calibração do POM à RCS. Dados experimentais serão portanto apresentados então juntamente com as respostas obtidas através das simulações como forma de comparar os resultados obtidos em campo com os resultados do modelo matemático.

4.1 – Simulações numéricas

A seguir, serão apresentadas as análises dos resultados da simulação numérica da circulação na RCS.

4.1.1 – Estabelecimento das condições semi-permanentes

Antes de analisar os resultados das simulações, foi necessário estabelecer numericamente uma condição de energia cinética estável característica para cada uma das combinações de forçantes. As Figuras 11 a 14 apresentam as evoluções temporais da energia cinética total no domínio de integração do modelo. Para todos casos, partiu-se de uma situação de repouso, com velocidade inicial nula e, portanto, energia cinética nula. De modo geral, verificou-se que as simulações demoraram três dias numéricos para que as condições de estabilidade fossem atingidas, resultado sobretudo da baixa geostrofia característica da área em estudo.

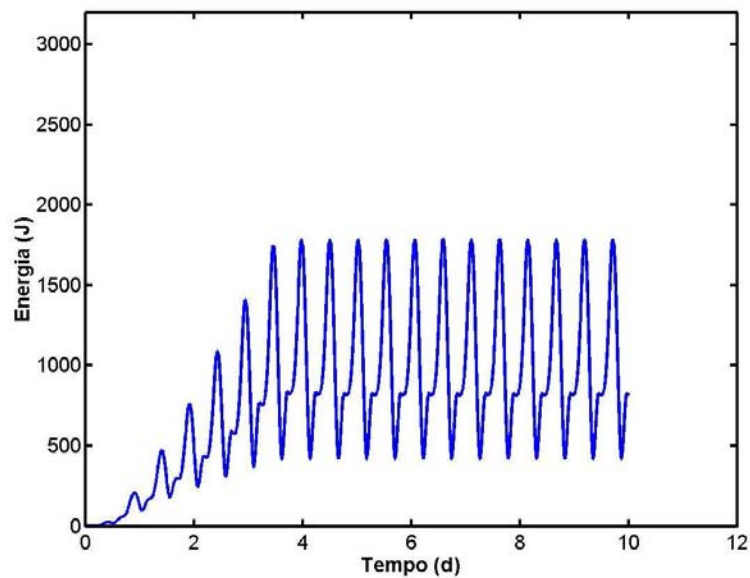


Figura 11. Energia Cinética Total para o período de Verão/Quadratura.

Tanto nas simulações de inverno como nas simulações de verão a energia estabilizou-se no 3º dia, com um máximo por volta de $1,8 \times 10^3$ J para a quadratura (Figuras 11 e 13), e de aproximadamente $3,0 \times 10^3$ J para a sizígia (Figuras 12 e 14). A energia na quadratura foi menor do que na sizígia devido a maior influência astronômica característica deste período.

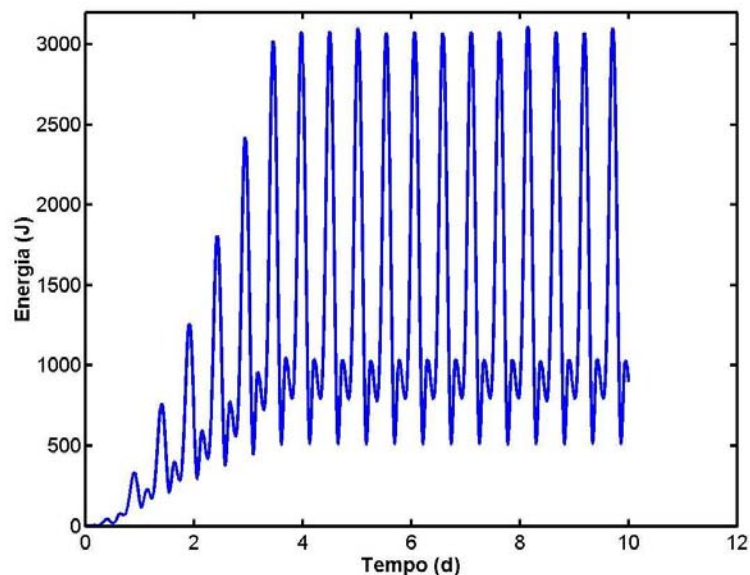


Figura 12. Energia Cinética Total para o período de Verão/Sizígia.

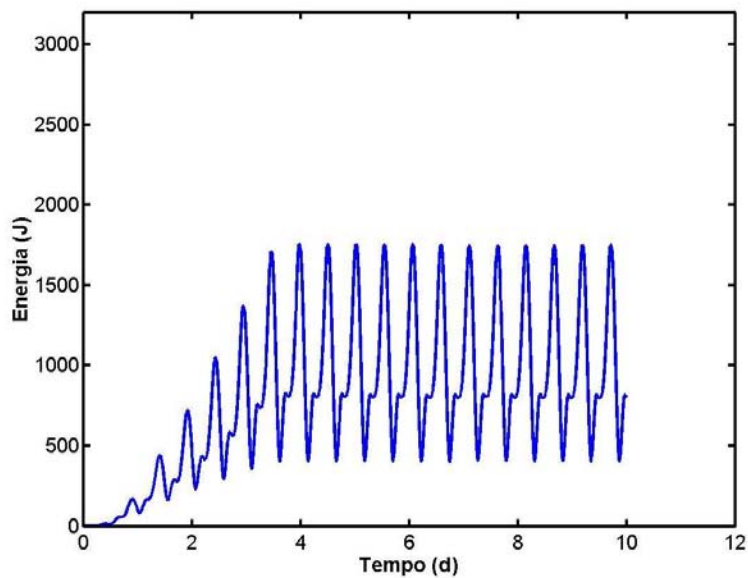


Figura 13. Energia Cinética Total para o período de Inverno/Quadratura.

Para as elevações da superfície o modelo apresentou resultados satisfatórios representando bem as marés registradas pelo marégrafo. Os registros coletados também estão de acordo com os dados fornecidos pela Marinha do Brasil através da Tábua das Marés (DHN, 2001). As Figuras 15 e 16 apresentam as respostas fornecidas pelo *POM* quanto à elevação da superfície do mar registrada no meio malha numérica.

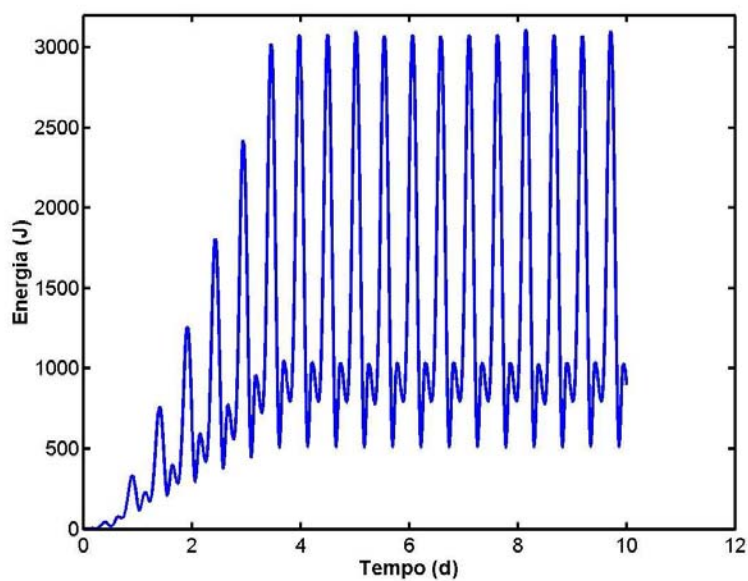


Figura 14. Energia Cinética Total para o período de Inverno/Sizígia.

O eixo das abcissas nestas figuras representa o tempo, em dias, e o eixo das ordenadas representa a variação da superfície com o zero associado à situação de maré média. Estes gráficos não foram comparados com resultados experimentais por se tratarem de marés numéricas com elevações constantes durante sete dias, o que não ocorre na realidade onde as elevações são sempre transientes, com as elevações máximas ocorrendo na sizígia e mínimas na maré de quadratura. A estabilidade da maré durante os últimos sete dias numéricos é dada por uma curva senoidal aproximada amortecida nos 3 (três) primeiros dias por uma *Ramp Function* conforme citada anteriormente (pág. 23, tabela 3).

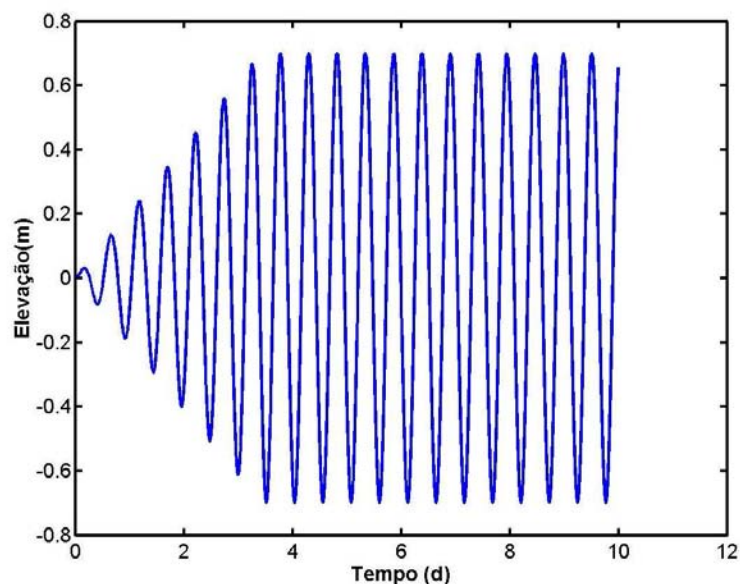


Figura 15. Elevação da superfície - Quadratura.

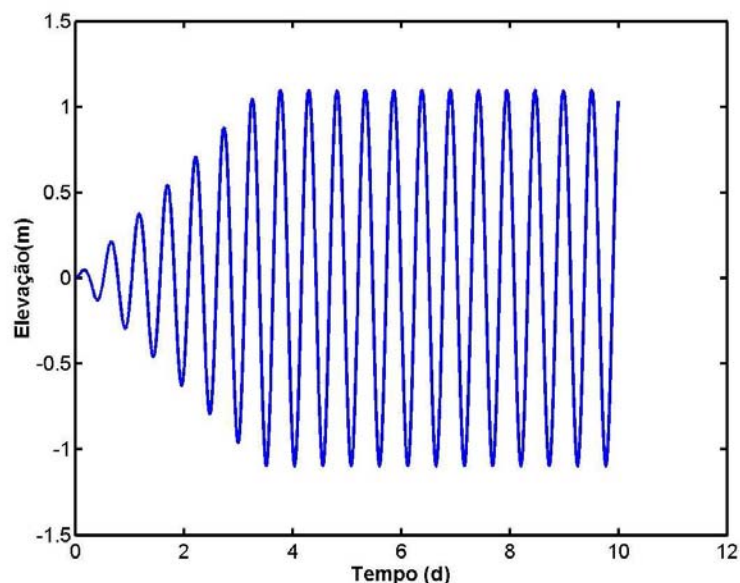


Figura 16. Elevação da superfície - sizígia.

4.1.2 – Comparação com os dados experimentais

As informações geradas a partir das campanhas de campo foram utilizadas para verificar a capacidade do modelo em reproduzir as informações medidas *in situ*. As Figura 17 e 18 trazem exemplos de comparação entre os perfis experimentais e numéricos de módulos das velocidades de algumas estações no período de verão. Em todas as figuras, a profundidade é apresentada em sua forma normalizada $0 \leq \sigma \leq 1$, de acordo com o tratamento adotado no modelo *POM*.

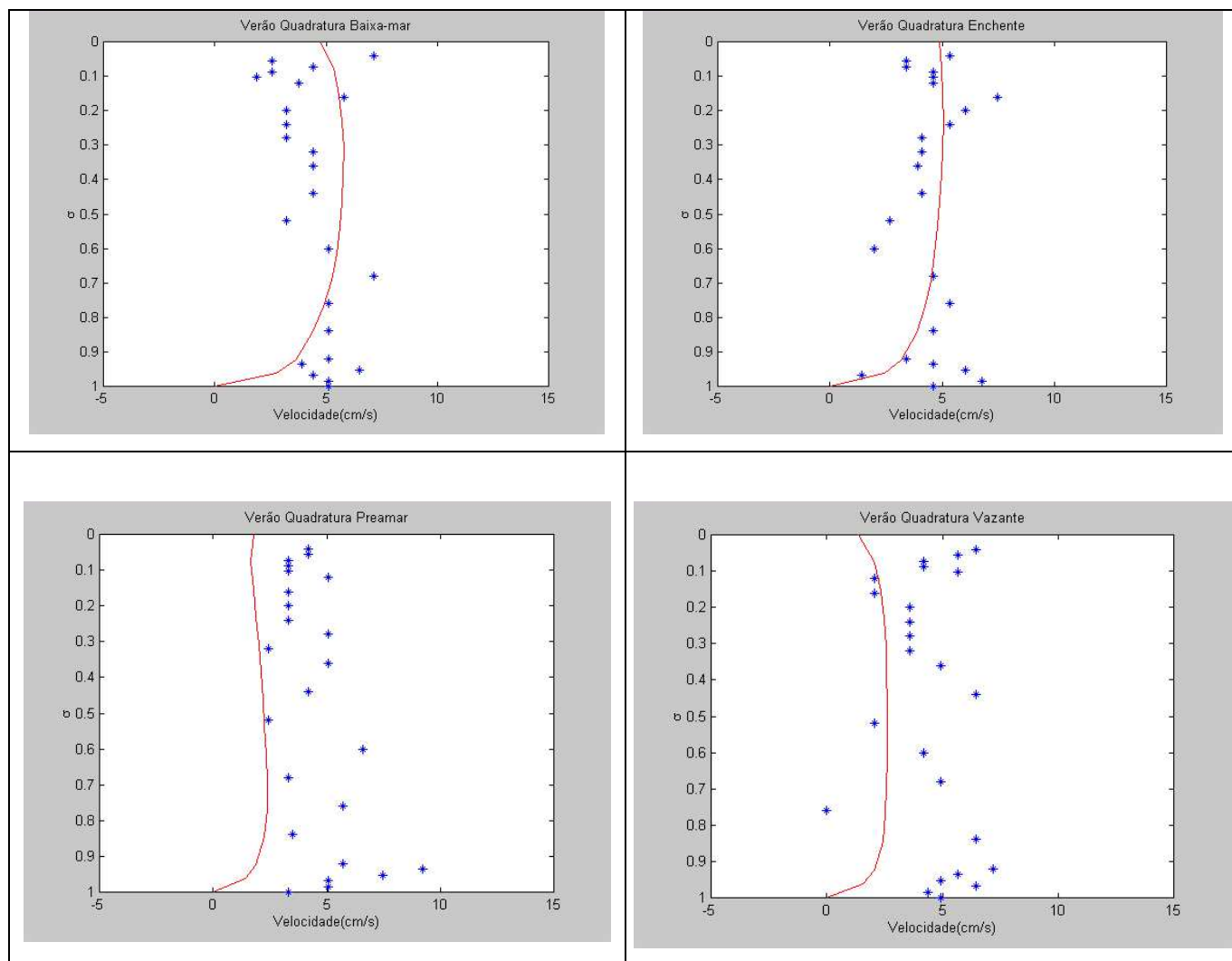


Figura 17. Perfis verticais de velocidade na Estação SPI – Verão/Quadratura. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).

As comparações entre os resultados experimentais e numéricos sugerem que a aproximação de modelagem aqui proposta fornece boas descrições das estruturas verticais. De modo geral, os dados de campo e os resultados numéricos apresentam-se de forma satisfatória não apenas com relação às ordens de grandeza das variáveis obtidas em campo, como também no que se refere às suas distribuições espaciais e temporais (sizígia e quadratura).

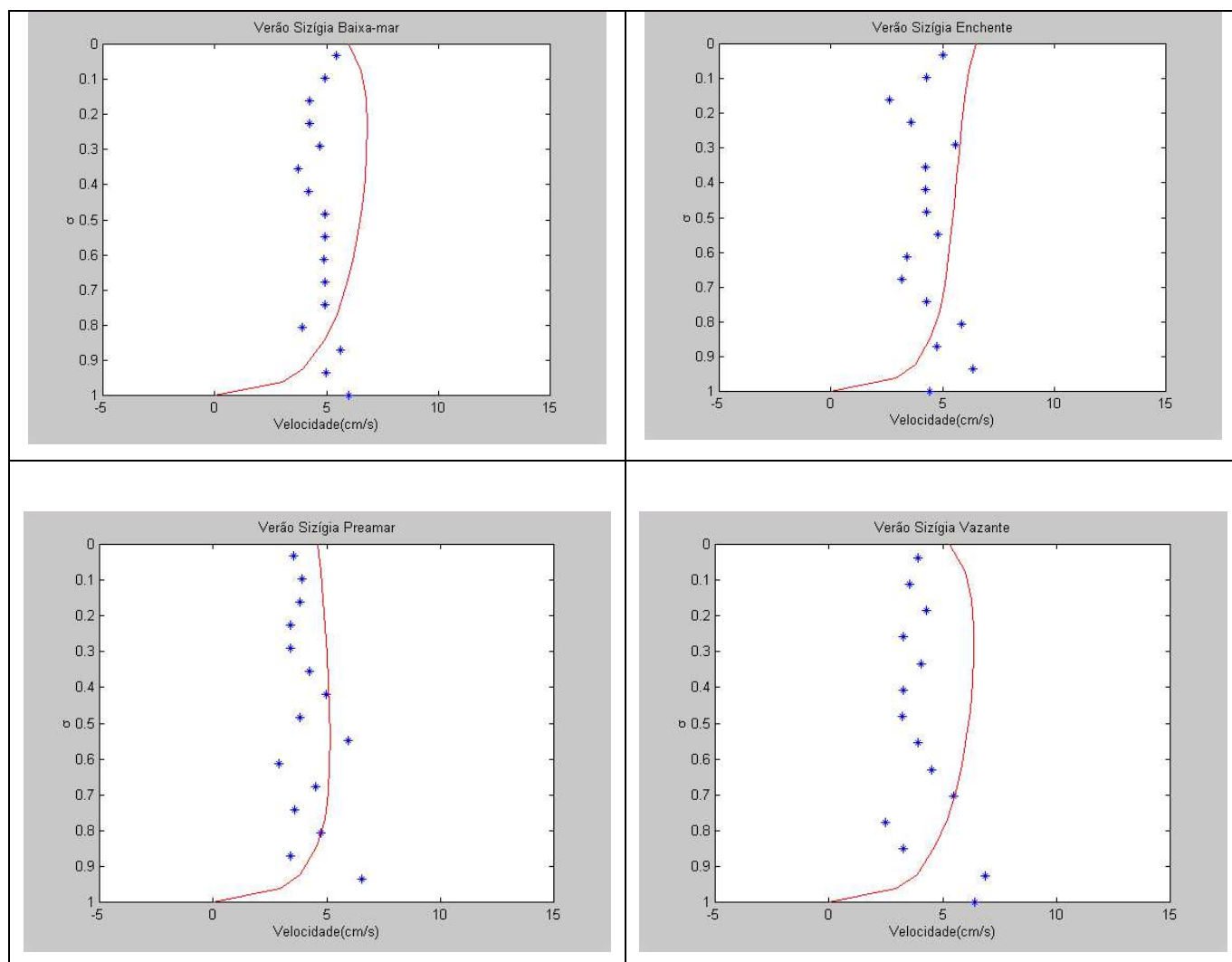


Figura 18. Perfis verticais de velocidade na Estação SP4 – Verão/Sizígia. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).

Entre os diversos estágios da maré, velocidades máximas foram encontrados na situação mais dinâmica de vazante, e uma melhor representatividade esteve sempre associada à forçante astronômica de sizígia.

A viscosidade turbulenta vertical experimental foi estimada a partir das medições realizadas pela sonda *SCAMP*, e comparada com resultados de viscosidade vertical turbulenta K_v calculados a partir do sub-modelo de fechamento turbulento $2^{1/2}$ de Mellor-Yamada (1998) utilizado no modelo *POM*. As figuras seguintes (Figuras 19 a 22) indicam que a aproximação numérica adotada se mostra capaz de reproduzir os níveis de difusividade turbulenta verificados em campo.

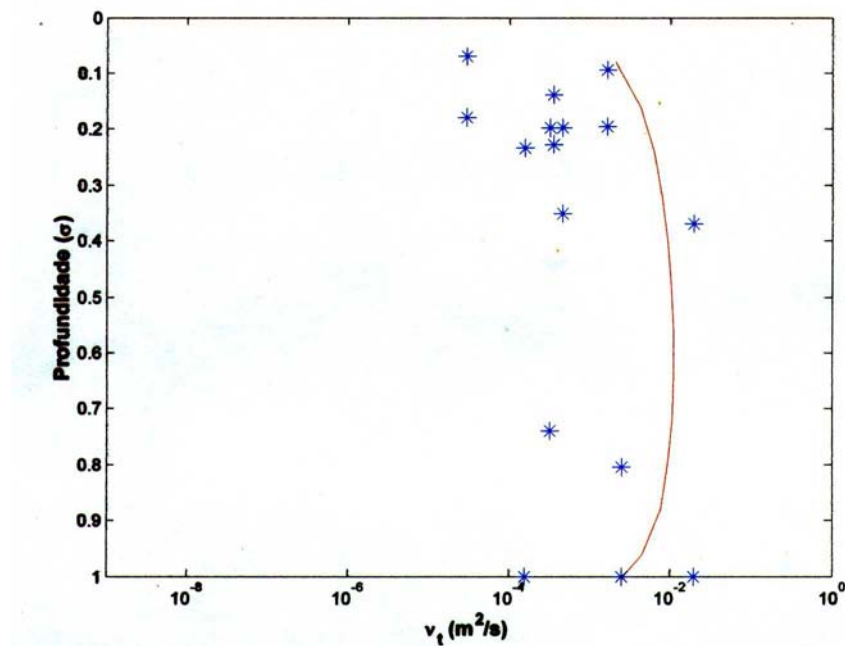


Figura 19. Perfis verticais de difusividade turbulenta vertical na Estação SP3 – Verão/Quadratura/Baixa-mar. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).

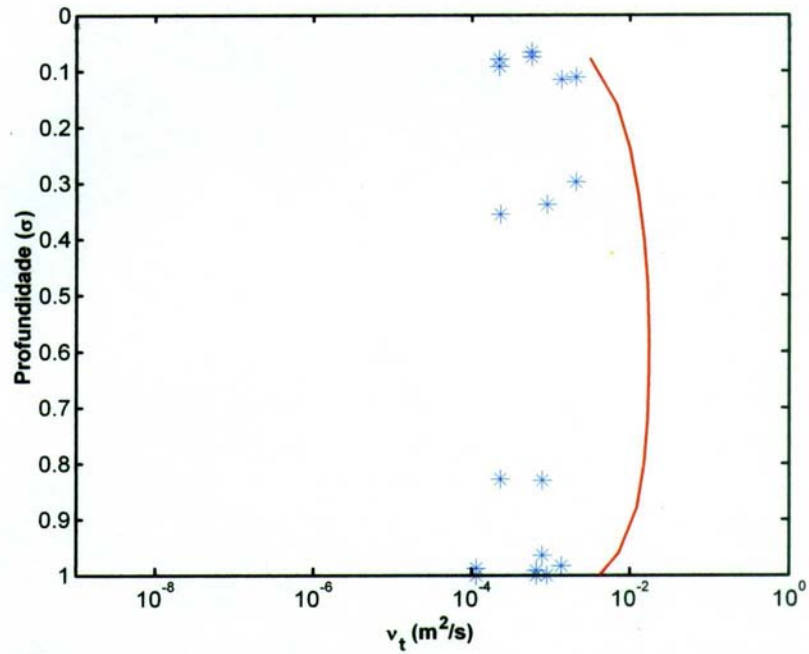


Figura 20. Perfis verticais de difusividade vertical turbulenta na Estação SP3 – Verão/Quadratura/Enchente. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).

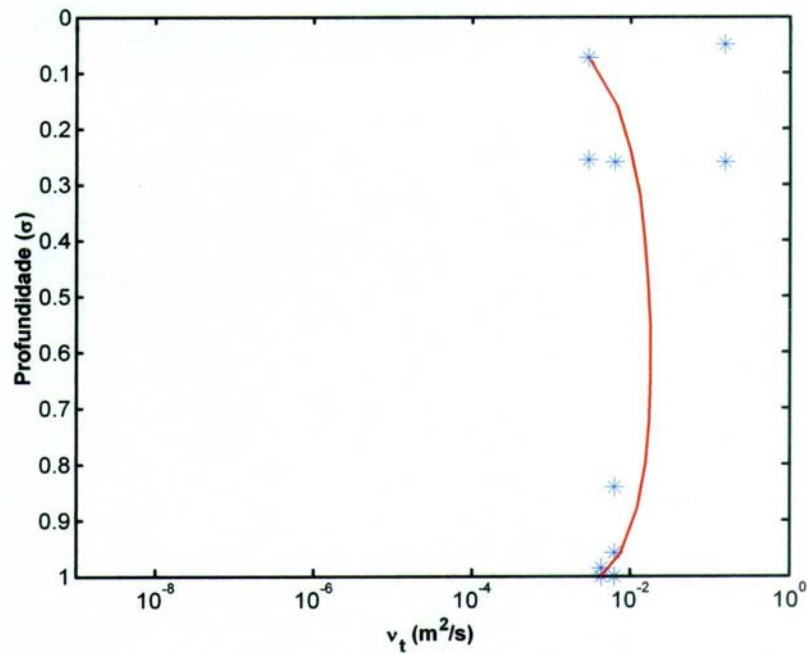


Figura 21. Perfis verticais de difusividade vertical turbulenta na Estação SP3 – Verão/Quadratura/Preamar. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).

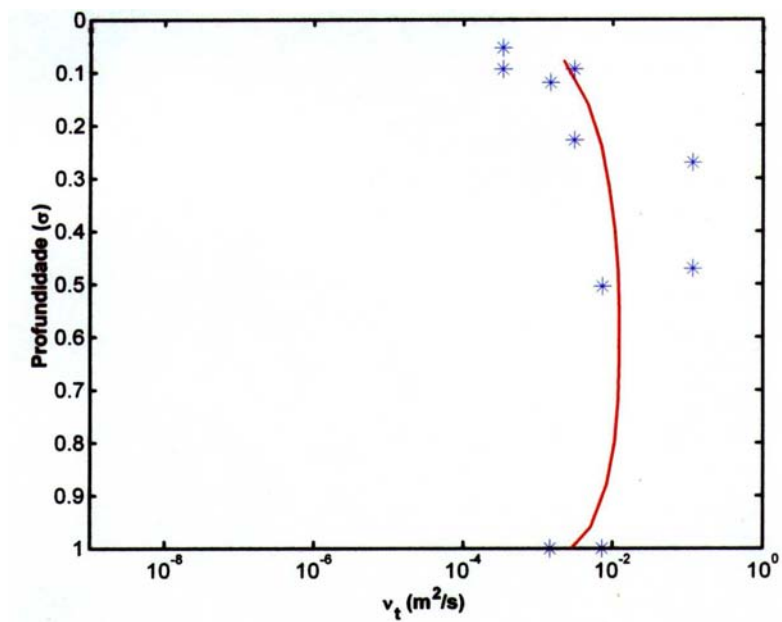


Figura 22. Perfis verticais de difusividade vertical turbulenta na Estação SP3 – Verão/Quadratura/Vazante. Comparação entre dados experimentais (*) e resultados numéricos (—).

4.1.3 – Estrutura cinemática horizontal

Com o objetivo de comparar exemplos de campos cinemáticos horizontais obtidos numericamente na área de estudo foram traçados vetores velocidade de corrente na superfície para as situações Verão/Quadratura/Enchente e Inverno/Sizígia/Enchente (Figuras 23 e 24, respectivamente).

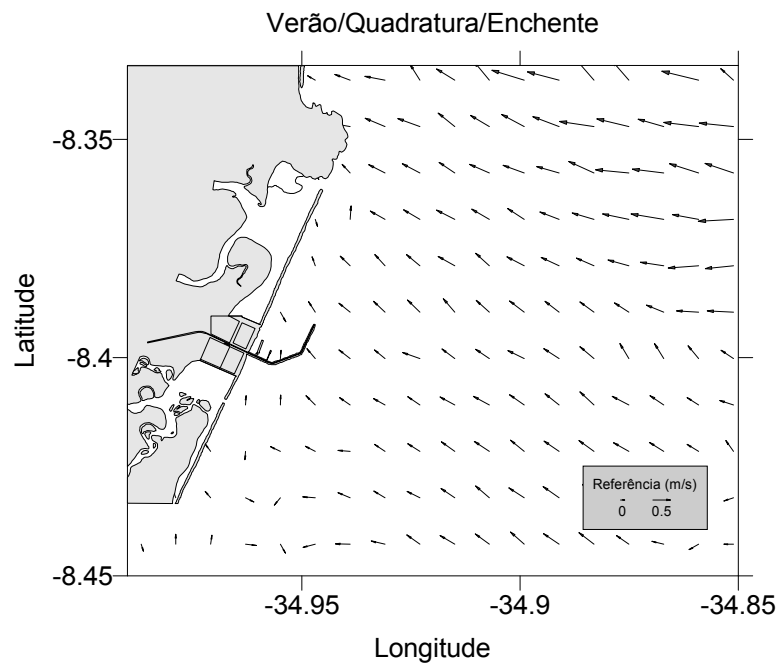


Figura 23. Campos de velocidade horizontal na RCS – Verão/Quadratura/Enchente.

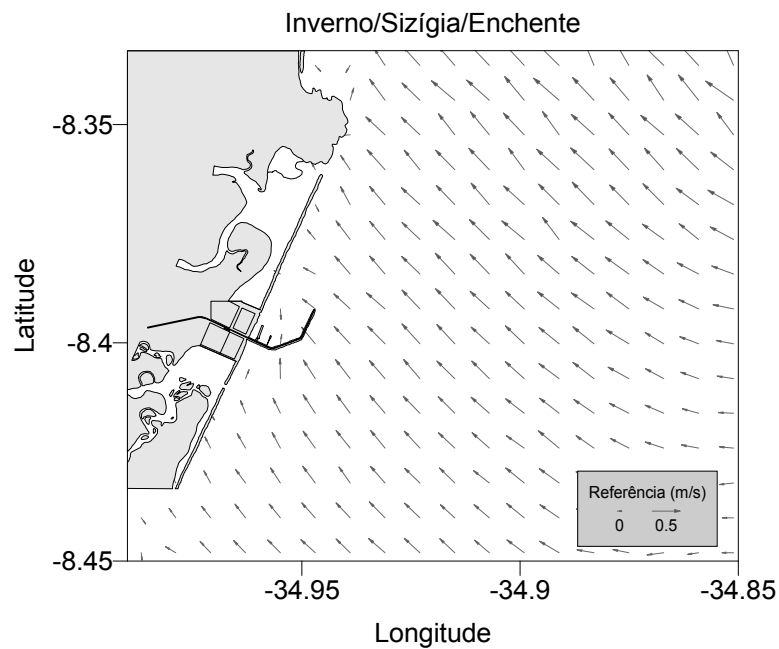


Figura 24. Campos de velocidade horizontal na RCS- Inverno/Sizígia/Enchente.

A comparação entre estes dois exemplos permite evidenciar os efeitos das diferentes condições de contorno adotadas nas simulações (condições de sazonalidades e de marés), sobre a circulação superficial na RCS. Inicialmente, observam-se, para a situação de Verão/Quadratura (Figura 23), valores absolutos de velocidade nitidamente inferiores aos verificados durante o Inverno/Sizígia (Figura 24). Este resultado pode ser explicado pelo menor fluxo de quantidade de movimento cedido ao sistema (menor cisalhamento eólico e menor gradiente de pressão horizontal induzido pela menor oscilação do nível do mar) na situação de Verão/Quadratura, quando comparado à situação de Inverno/Sizígia.

Uma outra diferença está associada à direção do vetor velocidade de corrente. Para a situação de Inverno/Sizígia (Figura 24), a preponderância de ventos de SE mais fortes induzem a um alinhamento mais nítido dos vetores velocidade nesta direção, que estão também sujeitos aos efeitos do estágio de maré enchente. Já durante o Verão/Quadratura (Figura 23), a ação de vento de NE, associada ao menor desnível do nível do mar, produzem uma situação menos homogênea no que se refere à direção das correntes. Neste caso, verificam-se, em muitos locais da área de estudo, vetores de velocidade na superfície que chegam a apontar para Sul, sobretudo nas regiões mais próximas da costa.

4.2 – Lançamento das plumas de poluentes

Com o intuito de comparar alguns exemplos de evolução da pluma de poluentes, as Figuras 25 e 26 apresentam os resultados das simulações para um derrame contínuo hipotético ocorrido na posição 4B (Figura 9, pág. 28). Para cada um dos quatro cenários cinemáticos (Verão/Quadratura, Verão/Sizígia, Inverno/Quadratura e Inverno/Sizígia), as figuras trazem a distribuição de concentração de poluente em dois instantes distintos : a $t = 1$ hora após o início do acidente; e no instante em que a pluma de poluente alcança a linha de costa.

Para a situação de Verão, observa-se a partir das Figuras 25a - d, que no caso de uma maré de Quadratura, a pluma demora cerca de 10 horas após o início do derrame, para alcançar a costa, enquanto que são necessárias apenas 4 horas para mesma pluma atingir a costa numa situação de maré de sizígia. Por outro lado, durante o Inverno (Figuras 26a - d), um eventual derrame na mesma coordenada 4B, sob a influência de uma maré de Quadratura, demoraria cerca de 1 dia (25 horas) para alcançar a costa, e apenas 7 horas caso o acidente ocorresse num período de maré de Sizígia.

A Tabela 4 a seguir traz um resumo das condições de evolução dos derrames no ponto 4B, associadas às figuras supracitadas, com os valores de concentração de poluente no instante em que o mesmo alcançou a linha de costa.

Tabela 4. Condições de evolução da pluma de poluente para um lançamento accidental na posição 4B.

Cenário	Tempo de chegada na costa (horas)	Concentração de chegada na costa (C/C_0)
Verão/Quadratura	10	0,050
Verão/Sizígia	4	0,052
Inverno/Quadratura	25	0,051
Inverno/Sizígia	7	0,050

O Anexo B traz alguns exemplos de evolução da pluma de poluente lançado continuamente em diferentes coordenadas da área de estudo.

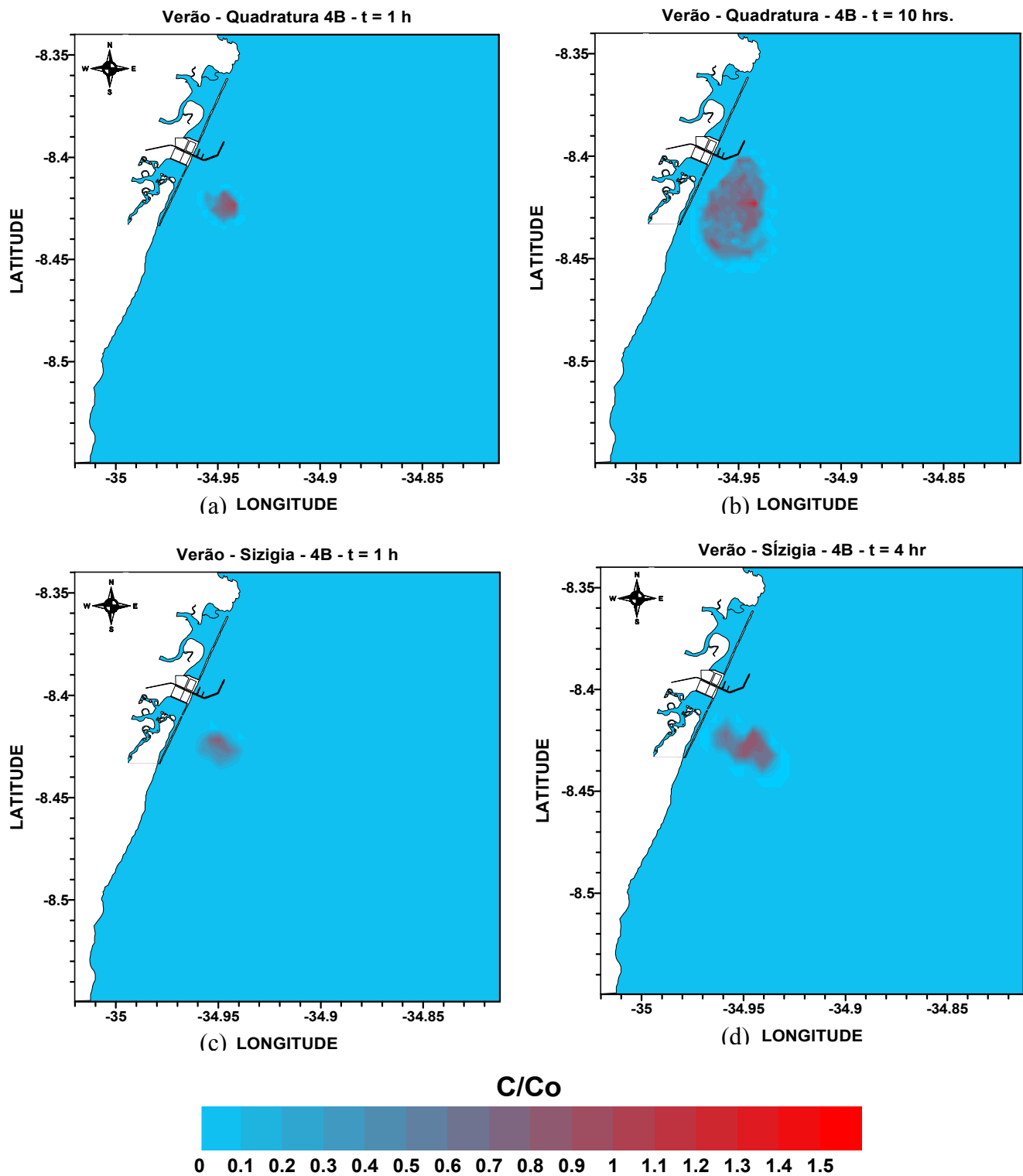


Figura 25. Plumas lançadas em 4B : (a) Verão/Quadratura -1 hora depois do lançamento (b) Verão/Quadratura - no instante de chegada à costa. (c) Verão/Sízigia - 1 hora depois do lançamento e (d) Verão/Sízigia - no instante de chegada à costa.

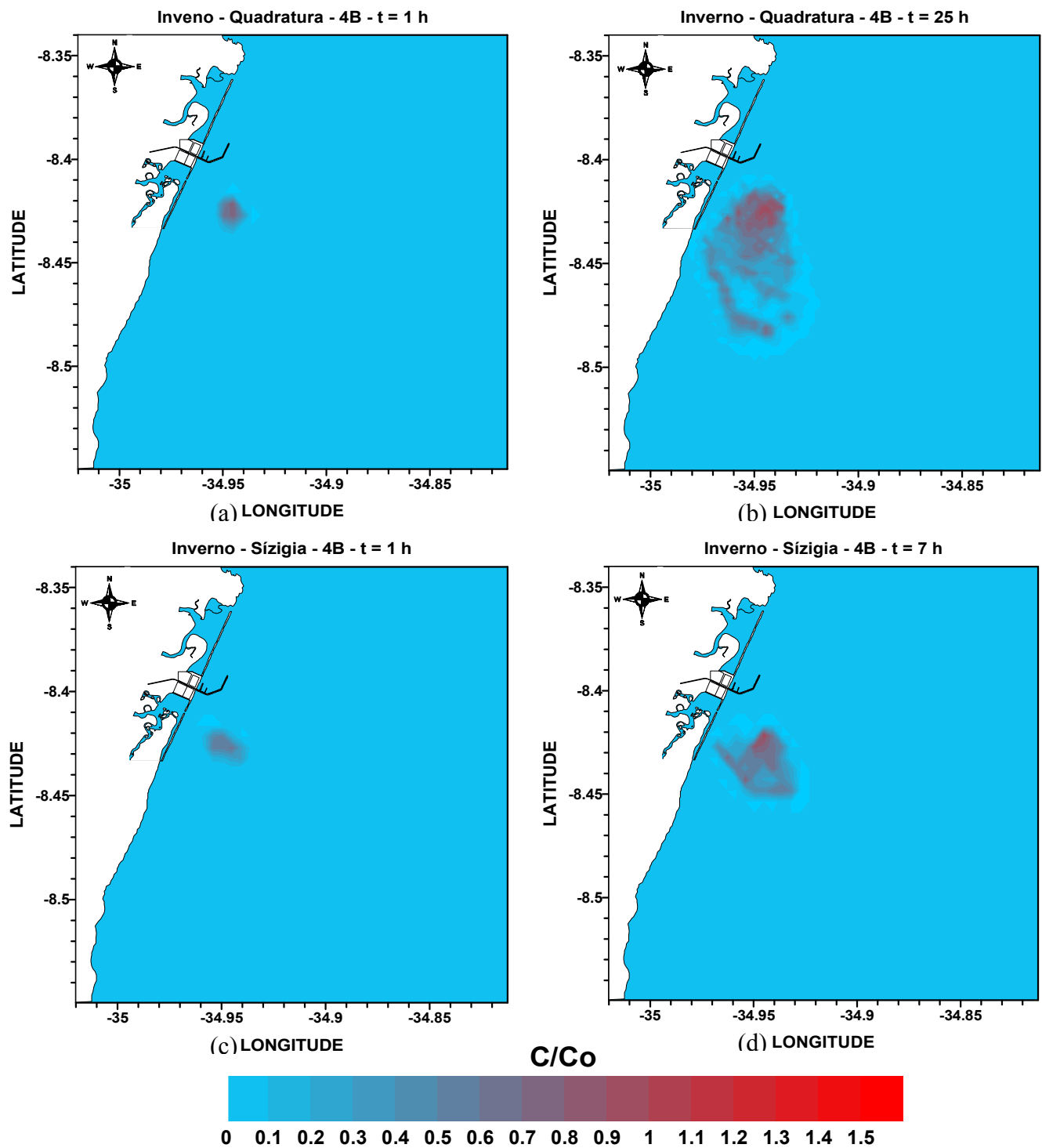


Figura 26. Plumas lançadas em 4B : (a) Inverno/Quadratura -1 hora depois do lançamento (b) Inverno/Quadratura - no instante de chegada à costa. (c) Inverno/Sízigia - 1 hora depois do lançamento e (d) Inverno/Sízigia - no instante de chegada à costa.

4.3 – Mapas de Hierarquização de Impactos

A seguir são apresentados os Mapas de Hierarquização de Impactos (Figura 27 a 30) resultantes da interpolação horizontal dos valores finais de IHI obtidos para as combinações de situações de hidrologia e marés. A comparação visual dos mapas de IHI entre os diferentes períodos do ano nas diferentes condições de maré apresenta condições de menores índices nas proximidades dos limites sul da grade, entretanto existe uma intrusão de valores elevados, também a sul do CIPS, com valores de IHI mais elevados, superiores a 60, que só não ocorre no mapa de IHI de inverno/quadratura. Esta intrusão é maior larga na condição de inverno/sizígia.

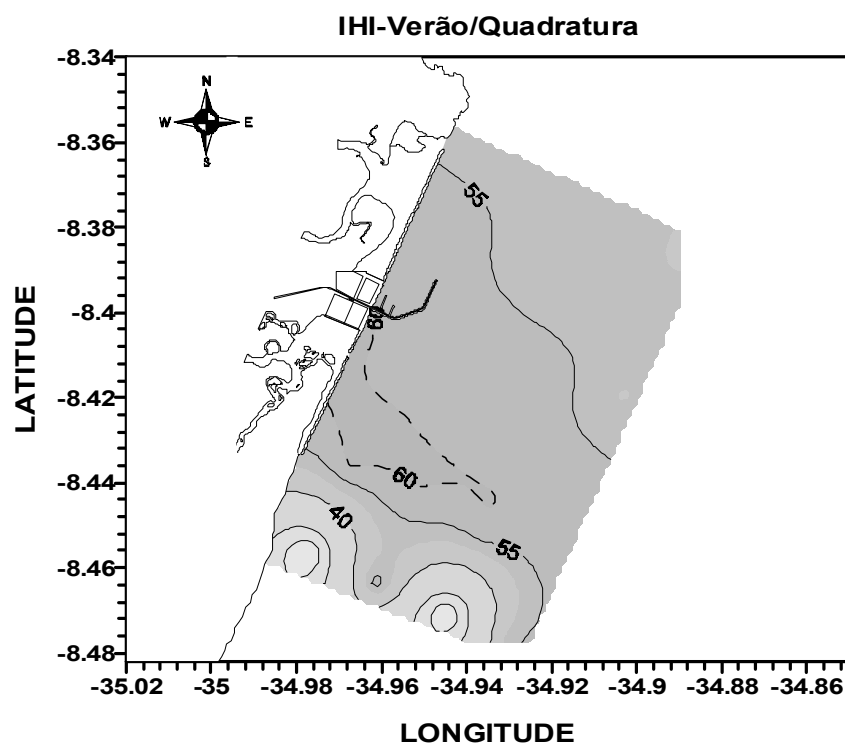


Figura 27. Mapa de Hierarquização de Impacto –Verão/Quadratura

No mapa de IHI de inverno quadratura (Figura 28), a isolinha de maior valor é a de 55 que se apresenta em todos os mapas de IHI com uma oscilação na sua área de cobertura menor que a curva de 60, considerando todos os quatro mapas de IHI (Figura 27 a 30).

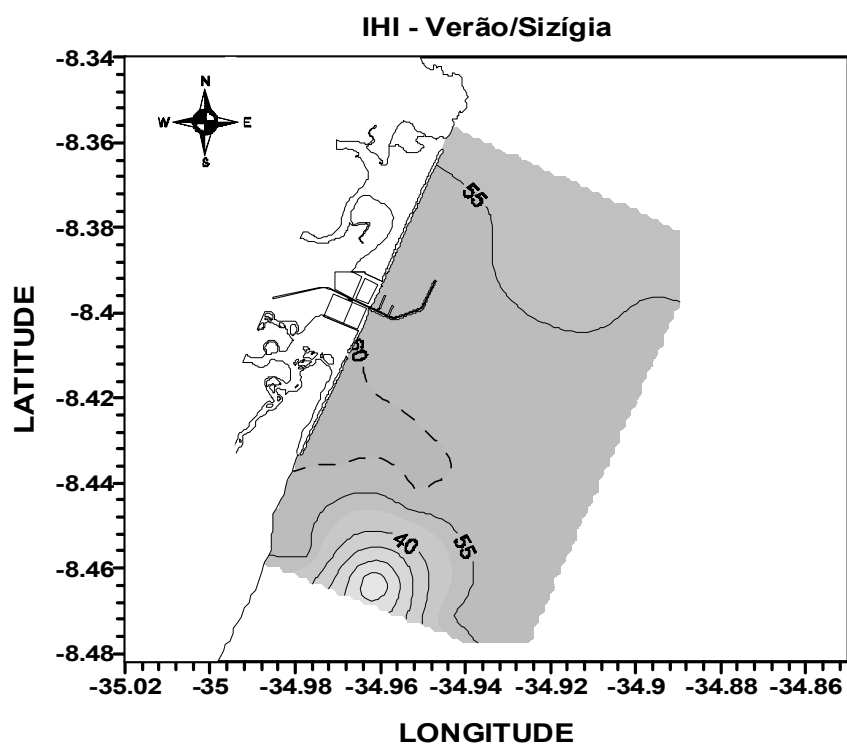


Figura 28. Mapa de Hierarquização de Impacto –Verão/Sizígia

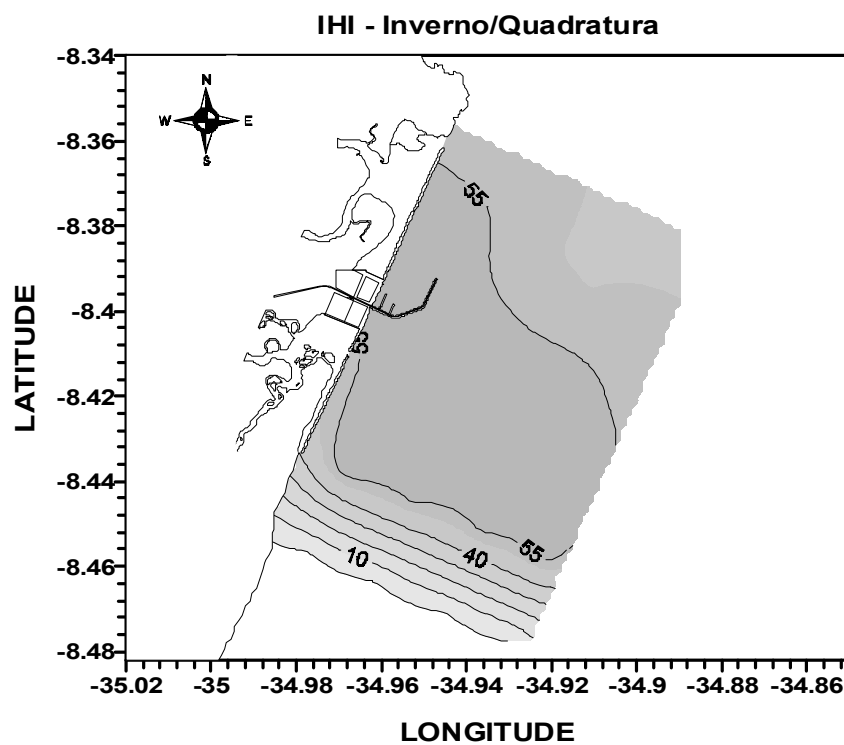


Figura 29. Mapa de Hierarquização de Impacto –Inverno/Quadratura

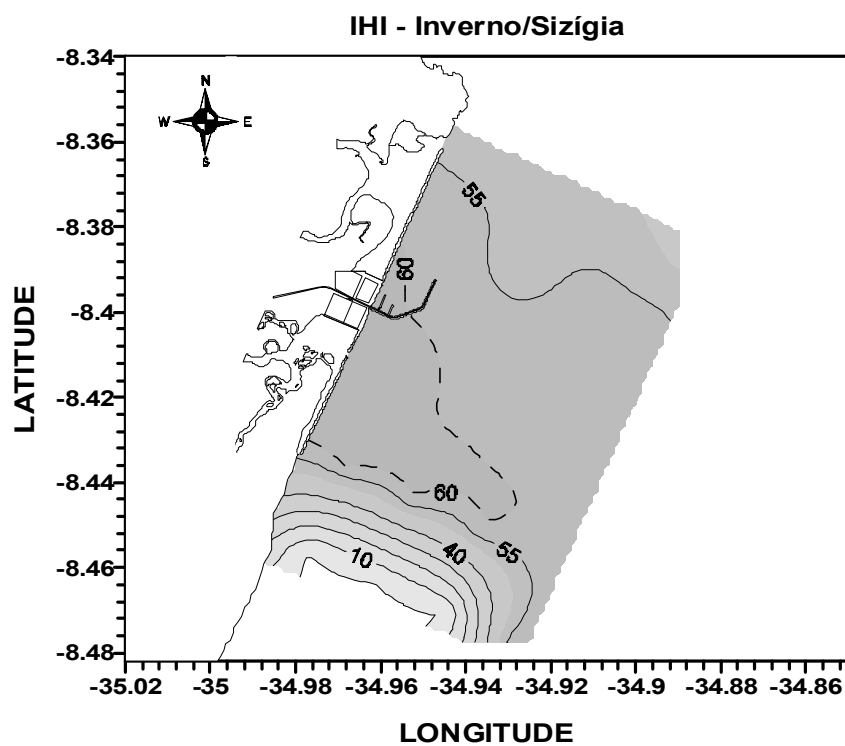


Figura 30. Mapa de Hierarquização de Impacto –Inverno/Sizígia

5 – SUMÁRIO DOS RESULTADOS

Os resultados desse trabalho permitiram identificar os mecanismos físicos preponderantes e influentes na circulação costeira da região costeira próxima ao Porto de Suape, PE. Para tal, dados obtidos em campo, informações extraídas de bibliografia e fornecidas pela administração do CIPS, foram utilizadas para reproduzir, através de modelagem matemática e simulação numérica, quatro cenários cinemáticos típicos envolvendo as variantes hidrológicas (verão e inverno) e astronômicas (sizígia e quadratura). Em seguida, foram construídos Mapas de Hierarquização de Impactos, através da simulação numérica de lançamentos acidentais em diferentes locais dentro da RCS.

No que se refere à caracterização físico-oceanográfica da área estudada, foi possível verificar que:

- de modo geral, o modelo se mostrou capaz de reproduzir as estruturas cinemáticas observadas *in situ*, tanto do ponto de vista de distribuição espacial do campo de velocidade, quanto no que se refere aos níveis de difusividade turbulenta;
- do ponto de vista dinâmico, os principais processos que estão potencialmente relacionados com os campos cinemáticos são: o cisalhamento eólico superficial e a propagação da onda maré;
- os resultados das simulações também apresentaram uma boa representação da variação da elevação da superfície (nível do mar) frente às diferentes condições astronômicas impostas, seja na Quadratura como na Sizígia;
- os resultados numéricos das simulações de Inverno e Verão indicaram uma nítida sensibilidade dos campos de velocidade horizontais superficiais à condição de cisalhamento imposta à superfície : os resultados representativos das situações de Inverno acusam fortes perturbações dos campos velocidade apontando para noroeste enquanto que para a situação representativa dos períodos de verão, foram observados vetores velocidade superficial direcionados para sudoeste, sobretudo nas regiões mais próximas da costa;
- os resultados das simulações de derrames acidentais na área de estudo possibilitaram identificar, para cada combinação de variantes hidrológicas e astronômicas, as sub-regiões costeiras mais críticas (sub-regiões com $IHI \geq 60$),

levando-se em conta, a concentração com que a pluma que chega à costa, o tempo de trânsito da pluma, do vazamento à praia e o local da costa a ser atingido pela pluma de poluentes.

6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho concentrou-se em desenvolver e aplicar uma metodologia para análise dos efeitos potenciais de derramamentos acidentais de poluentes (hidrocarbonetos e derivados) na região costeira adjacente ao Complexo Industrial Portuário de Suape, PE.

Com base nos resultados deste estudo, e visando a sua possível aplicação em outros sistemas costeiros do país, propõe-se a adoção das seguintes etapas metodológicas :

- Etapa I : Obtenção de dados em campo.

Nesta primeira etapa, deve-se planejar uma malha amostral que possibilite a caracterização da área de estudo, para cada situação típica de forçantes hidrológicas (Inverno e Verão) e astronômicas (Sizígia e Quadratura). Esta caracterização deve contemplar, no mínimo, os seguintes tópicos :

- (a) os campos termodinâmicos (Temperatura, Salinidade e Densidade), cinemáticos (Velocidades – intensidade e direção), e turbulentos (Difusividades);
- (b) os sistemas de vento característicos da área, agindo sobre a superfície do oceano (estimativa do cisalhamento eólico).

- Etapa II : Adaptação e aplicação da ferramenta numérica à área de estudo.

Uma vez levantadas as informações de campo, estas deverão ser utilizadas para calibrar e validar um modelo matemático de circulação costeira, aplicado à área de estudo. Esta ferramenta deverá ser capaz de reproduzir as principais características termodinâmicas, cinemáticas e turbulentas observadas *in situ*, e isso para cada combinação de variantes hidrológicas (Inverno e Verão) e astronômicas (Sizígia e Quadratura).

- Etapa III : Simulação dos derrames acidentais de poluentes.

Estando o modelo matemático adaptado ao sistema costeiro, devem ser realizadas novas simulações, desta vez promovendo a simulação numérica do lançamento de poluentes em diferentes locais da área de estudo, e para cada combinação de variantes hidrológicas (Inverno e Verão) e astronômicas (Sizígia e Quadratura).

- Etapa IV : Elaboração dos Mapas de Hierarquização de Impactos.

Os resultados da Etapa III devem ser utilizados para identificar as sub-regiões da área de estudo onde os derramamentos de poluentes produzirão efeitos potencialmente mais nocivos ao ambiente natural, e isso igualmente para cada combinação de variantes hidrológicas (Inverno e Verão) e astronômicas (Sizígia e Quadratura). Para tal, propõe-se a elaboração/adoção de um Índice de Impactos que leve em conta as características da evolução da pluma de poluentes, e os níveis de sensibilidade da linha de costas aos efeitos do contato com a poluição, caso ocorra. No caso deste trabalho, por exemplo, foi adotado um Índice de Hierarquização de Impacto – IHI, formado pela combinação linear de três parcelas, associadas ao tempo que a pluma de poluentes alcançava a costa, à concentração do mesmo quando isto ocorria, e ao nível de sensibilidade da costa aos efeitos da poluição.

A aplicação destas etapas metodológicas à região costeira de Suape possibilitou identificar, por exemplo, sub-regiões potencialmente mais críticas dentro da área de estudo, onde foram obtidos valores de IHI superiores a 60 (Figuras 31 a 33). Esta sub-região, ou polígono crítico foi maior na situação de Inverno/Sizígia, menor nas situações de Verão/Sizígia e Verão/Quadratura, e inexistente para a combinação Inverno/Quadratura (valor máximo IHI = 55).

Do ponto de vista da ferramenta numérica utilizada, verificou-se a partir da comparação entre os dados de campo e os resultados numéricos, que o modelo *POM* consegue representar de modo satisfatório não apenas às ordens de grandeza das variáveis de estado obtidas em campo, como também às suas distribuições espaciais (diferentes locais da RCS) e temporais (diferentes períodos do ano e estágios de maré). Alguns aspectos, entretanto, merecem ser aprofundados num trabalho futuro. Este trabalho de modelagem matemática inicial possibilitou identificar quatro principais vias que aparecem como perspectivas de sua continuidade, e que merecem ser exploradas. Estas estão relacionadas a :

- teste de novas formas de parametrizar o coeficiente de difusividade turbulenta da formulação de *Smagorinsky* (C_{SMA} , eq. 12), a princípio considerado constante pelas rotinas originais do modelo *POM*;

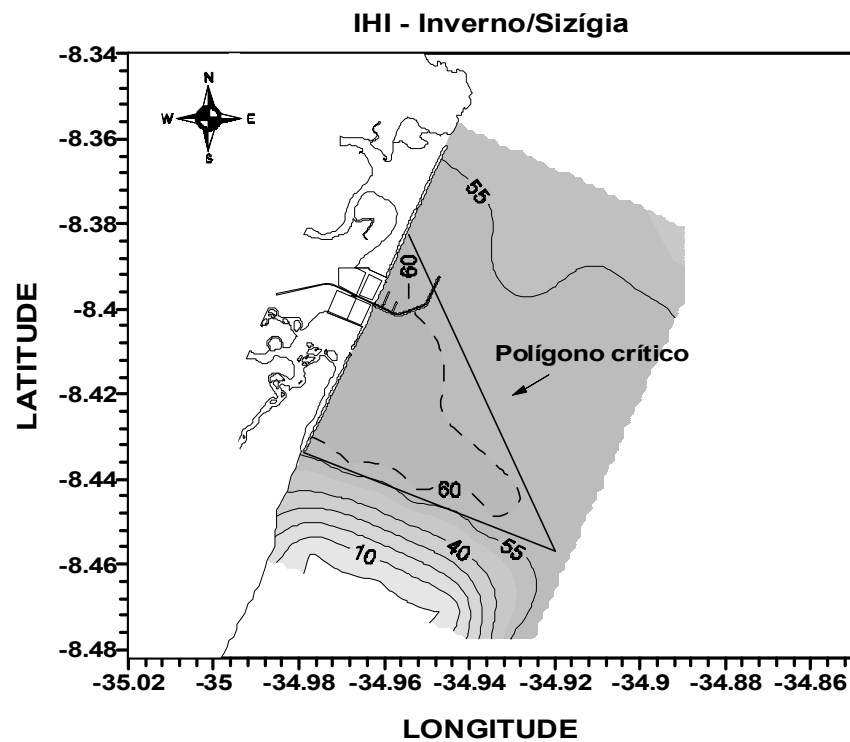


Figura 31. Sub-região/Polígono de derramamentos acidentais potencialmente mais críticos – Inverno/Sizígia.

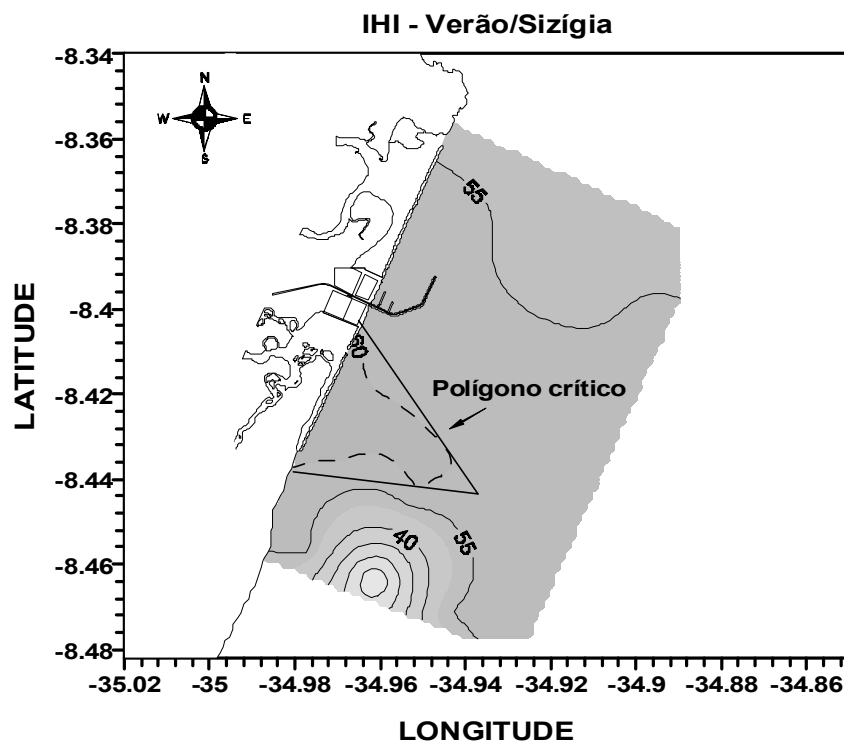


Figura 32. Sub-região/Polígono de derramamentos acidentais potencialmente mais críticos – Verão/Sizígia.

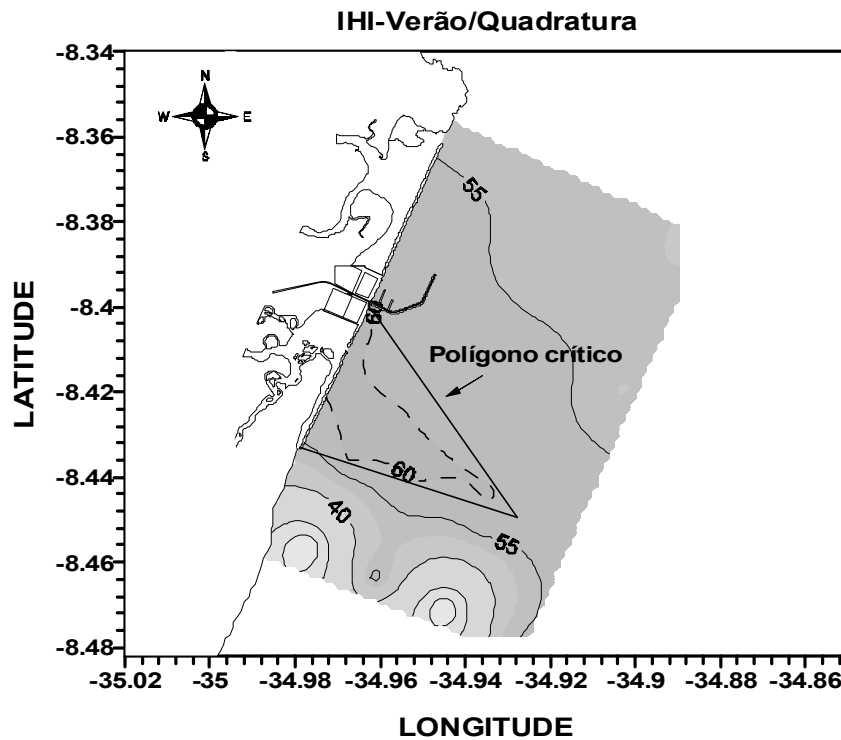


Figura 33. Sub-região/Polígono de derramamentos acidentais potencialmente mais críticos – Verão/Quadratura.

- investigação da possibilidade de se trabalhar com um modelo mais fiel para o fechamento da anisotropia turbulenta, inclusive com perspectiva de alteração de condições ao limite superficial (Burchard *et al.*, 1998; Araújo *et al.*, 2000; Smith & McWilliams, 2003);
- investigação da possibilidade de minimização dos erros numéricos resultantes do esquema de discretização, necessário à integração das equações de *Reynolds* em coordenadas σ (Huang & Spaulding, 1996, 2002);
- em sua versão atual, o modelo *POM* é capaz de simular o balanço de quantidade de movimento, temperatura e salinidade. O passo seguinte estaria, portanto, relacionado a possibilidade de acoplar novas rotinas biogeoquímicas e de qualidade da água (Bowie *et al.*, 1985; Reed *et al.*, 1999; Ribeiro & Araújo, 2002; James, 2002; entre outros), transformando-o assim numa ferramenta de gerenciamento ambiental mais completa.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Advincula, R. 2000. Elementos Micronutrientes na Camada Eufótica da Região Oceânica entre Recife (PE) e Salvador (BA): Distribuição Espacial e Mecanismo Físicos Influentes na Fertilização das Águas. Dissertação Mestrado do Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco. 129p.
- Annan, J. D. 1999, Numerical methods for the solution of the turbulence energy equations in the shelf seas, *Int. J. Num. Methods in Fluids*, 29: 191-206.
- Arakawa, A. & V. R. Lamb 1977, Computational design of the basic processes of the UCLA general circulation model, *Method. Comput. Phys.*, 17:174-265.
- Araújo, M., C. Medeiros, C. Ribeiro & I. Freitas 1998. Testing wind-wavy surface boundary conditions for turbulence modeling in tidal systems. In : *Proceedings of Workshop on Advances in Turbulence III*, 5-6 de feb. 1998, Barcelona, Spain, 16 p.
- Araujo, M., C. Medeiros, C. Ribeiro & I. Freitas 2000, Testing surface boundary conditions for turbulent modeling in tidal systems, In : Redondo, J. M. & A. Babiano, *Turbulent diffusion in the environment*, CIMNE, Barcelona, p. 25-38.
- Blumberg, A. F. & G. L. Mellor 1987, A description of a three-dimensional coastal ocean model, In : Heaps, N. S. (ed.), *Three-dimensional coastal ocean models*, AGU, 1-16.
- Blumberg, A. F. & Oey, L. Y. 1985, Modeling circulation and mixing in estuaries and coastal oceans, *Adv. Geophys.*, 28A:525-547.
- Bowie, W. B., W. B. Mills, D. B. Porcella, C. L. Campbell, J. R. Pegenkopf, G. L. Rupp, K. M. Johnson, P. W. H. Chen, S. Cherini & C. E Chamberlin 1985, Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling, U.S.EPA Report 600/3-85/040, 453p.

- Burchard, H., O. Petersen & T. P. Rippeth 1998, Comparing the performance of the Mellor-Yamada and $k-\epsilon$ two equation turbulence models, *J. Geophys. Res.*, 103:10543-10554.
- Campos, E. J. D. 1999, A modelagem matemática da dispersão de poluentes em regiões costeiras e estuarinas, LABMON/IOUSP, 8p.
- Chapman, D. C. 1985, Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model, *J. Phys. Ocean.*, 15:1060-1075.
- Craig, P. D., J. R. Hunter & B. L. Johnston 1993, The implications of linearly eddy viscosity for wind-driven current profiles, *Cont. Shelf Res.*, 13:1-24.
- Cummins, P. F. & Oey, L. Y. 1997, Simulation of barotropic and baroclinic tides off Northern British Columbia, *J. Phys. Ocean.*, 27:762-781.
- Davies, A. M. & J. E. Jones 1990, Application of a three-dimensional turbulence energy model to the determination of tidal currents on the northwest European shelf, *J. Geophys. Res.*, 95, 18143-18162.
- Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN 1988, Carta náutica no. 906. Brasil Costa Leste, Proximidades do Porto de Suape.
- Ezer, T., Arango, H., Schepetkin, A. F. 2002, Developments in terrain-following ocean models: intercomparisons of numerical aspects, *Ocean Model.*, 4:249-267.
- Fukushima & Watanabe, 1990. Numerical simulation of density underflow by the ($k-\epsilon$) turbulence model. *Journal Hydrosoc. Hydr. Eng.*, 8, 31-40.
- Governo de Pernambuco - Gov. PE 2000, Complexo Industrial Portuário de Suape - CIPS, (<http://www.suape.pe.gov.br/>).

- Governo de Pernambuco - Gov. PE 2001, Complexo Industrial Portuário de Suape - CIPS, (<http://www.suape.pe.gov.br/>).
- Huang, W. & M. L. Spaulding 1996, Modelling horizontal diffusion with sigma coordinate system, J. Hydraul. Eng., 122:349-352.
- Huang, W. & M. L. Spaulding 2002, Reducing horizontal diffusion errors in σ -coordinate coastal ocean models with a second-order Lagrangian-interpolation finite-difference scheme, Ocean Eng., 29:495-512.
- James, I. D. 2002, Modeling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal water : a review, Environm. Modelling & Software, 17: 363-385.
- Kourafalou, V. H. 2001, River plume development in semi-enclosed Mediterranean regions: North Adriatic Sea and Northwestern Aegean Sea, J. Mar. Sys., 30:181-205.
- Lheritier, D. 2001, An investigation of TKE distribution in the coastal area of Suape Harbor, Pernambuco, Brazil, Repport ENSEEIHT/INPT 14/2001, Toulouse, France, 42p.
- Lins, P. A. M., 2002, Hidrologia e Hidrodinâmica do Baixo Estuário do Rio Ipojuca , PE – Brasil, Dissertação Mestrado LOFEC/DOCEAN/UFPE, 101p.
- Luna, M. C. M. 2001, Dissipação interna e viscosidade turbulenta na região costeira do Porto de Suape, Pernambuco, Brasil, Dissertação Mestrado LOFEC/DOCEAN/UFPE, 112p.
- Maas, L. R. M. & J. J. M. van Haren 1987, Observations on the vertical structure of tidal and inertial currents in the central North Sea, J. Mar. Res., 45: 293-318.
- Mellor, G.L., 1998, Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model.

- Neumann, H., C. Medeiros, L. Parente, S. Newmann-Leitão & M. L. Koenig 1998, Hydrodynamism, sedimentology, geomorphology and plankton changes at Suape area (PE-Brazil) after a Port Complex implantation, *Anais Acad. Bras. Ci.*, 70:313-323.
- National Ocean and Atmosphere Agency- NOAA, 2001, ESI - Environmental Sensitivity Index, <http://response.restoration.noaa.gov/esi/esiintro.html>).
- Pond, S. & Pickard, G. L. (1983). *Introductory Dynamic Oceanography*. Oxford, Pergamon Press. 329p.
- Reed, M., O. Johansen, P. J. Brandvik, P. Daling, A. Lewis, R. Fiocco, D. Mackay & D. Prentki 1999, Oil spill modelling towards the close of the 20th. Century : an overview of the state of the art, *Spill Sci. and Technol. Bull.*, 5:3-16.
- Ribeiro, C. & M. Araujo 2002, Mathematical modelling as a management tool for water quality control of the tropical Beberibe estuary, NE Brazil, *Hydrobiologia*, 475:229-237.
- Silva, M. A. 2001, Modelagem matemática do transporte e dispersão de hidrocarbonetos e de uma pluma térmica na região costeira de Suape-PE : uma ferramenta de gerenciamento emergencial e de contingência. Monografia III Curso de Especialização em Gestão de Ambientes Costeiros Tropicais - GACT, DOCEAN/UFPE, 33p
- Smith, R. D. & J. C. McWilliams 2003, Anisotropic horizontal viscosity fpr ocean models, *Ocean Modelling*, 5:129-156.
- Spaulding, M. L., V. Kolluru, E. Anderson & E. Howlett 1994, Application of a three-dimensional oil spill model to hindcast the Braer spill, *Spill Sci. and Technol. Bull.*, 4:39-55.
- Wang, D.-P., D. Chen & T. J. Shernwing 1990, Coupling between mixing and advection in a shallow sea front, *Cont. Shelf Res.*, 10:123-136.

Water Resources Engineers – WRE 1969, Mathematical models for the prediction of thermal energy changes in impoundments, Project no. 16130ETX 12/69, U. S. Environmental Protection Agency.

Wheless, G.,H. & Valle-Levinson, A., 1996. A modeling study of tidally driven estuarine exchange through a narrow inlet onto a sloping shelf. J. Geoph. Res., 101:675-687.

Wilkin, J. & K. S. Hedström 1998, User's manual for an orthogonal curvilinear grid-generation package.

ANEXO A

Principais elementos do código computacional POM

Principais elementos do código computacional Fortran™ do POM:

Segue abaixo a lista das principais variáveis, constantes e índices encontrados nas rotinas do programa.

Índices

I,J (i,j) – índices da malha horizontal;

IM, JM – limites horizontais de I e J;

K(k) – índice da malha vertical; K=1 na superfície e K=KB no fundo;

IINT (n) – índice do modo interno;

IEXT – índice do modo externo;

Constantes e símbolos lógicos

DTE(Δt_E) – intervalo de tempo do modo externo (s);

DTI(Δt_I) – intervalo de tempo do modo interno (s);

EXTINC – coeficiente de extinção de ondas curtas (m^{-1});

HORCON(C) – coeficiente da formulação de difusividade de *Smagorinsky*;

IEND – quantidade final de passos internos realizados;

IPRINT – Intervalo de saída em que as variáveis são impressas;

ISPLIT – DTI/DTE;

MODE – MODE=2 torna o POM um modelo 2D, bi-direcional horizontal;

- MODE=3 torna o POM um modelo 3D;

- MODE=4 torna o POM modelo 3D, mas com saídas para diagnósticos;

RFE, RFW, RFN, RFS – 1 ou 0 nos quatro limites da malha;

SBIAS – valor de salinidade média usada na aproximação de *Boussinesq* (ups);

SMOTH (α) – parâmetro de amortecimento temporal;

TBIAS – valor de temperatura média usada na aproximação de *Boussinesq* (°C);

TPRNI (A_H/A_M) – inverso do número de *Prandtl*;

TR – coeficiente de transmissão superficial de ondas curtas;

UMOL – difusividade vertical intrínseca;

Vetores unidimensionais

$Z(\sigma)$ – coordenadas sigma das camadas verticais, $Z=0$ (superfície), $Z=-1$ (fundo);

ZZ – coordenadas sigma, intermediárias entre Z ;

$DZ(\delta\sigma) = Z(K)-Z(K+1)$;

$DZZ = ZZ(K)-ZZ(K+1)$;

Vetores bidimensionais

AAM2D – média vertical de AAM ($m^2 s^{-1}$);

ART, ARU, ARV – área das células da malha para T, U, V, respectivamente (m^2);

COR(f) – parâmetro de Coriolis (s^{-1});

DUM – máscara para u, componente de velocidade; 0 sobre terra e 1 sobre água;

DVM – máscara para v, componente de velocidade; 0 sobre terra e 1 sobre água;

FSM – máscara variáveis escalares 0 sobre terra e sobre água;

$DX(h_x$ ou $\delta x)$ – espaçamento da malha no eixo x (m);

$DY(h_y$ ou $\delta y)$ – espaçamento da malha no eixo y (m);

EL(η) – elevação da superfície usada no modo externo (m);

ET(η) – elevação da superfície usada no modo interno (m);

$D(D) = H+EL$ (m);

$DT(D) = H+ET$ (m);

$H(H)$ – profundidade local (m);

SWRAD – radiação de ondas curtas incidentes na superfície do oceano ($m s^{-1} K$);

UA,VA ($\bar{U}, \bar{V}$) – média vertical de U,V ($m s^{-1}$);

UT,VT ($\bar{U}, \bar{V}$) – média de UA,VA sobre o intervalo $DT=DTI$ ($m s^{-1}$);

WUSURF, WVSURF – ($\langle wu(0) \rangle, \langle wv(0) \rangle$) fluxos de quantidade de movimento na superfície ($m^2 s^{-2}$);

WUBOT, WVBOT – ($\langle wu(-1) \rangle, \langle wv(-1) \rangle$) fluxos de quantidade de movimento no fundo ($m^2 s^{-2}$);

WTSURF, WSSURF – ($\langle w\theta(0) \rangle, \langle ws(0) \rangle$) fluxos de temperatura e salinidade na superfície ($m s^{-1}$, $m s^{-1}$, ups);

Vetores tridimensionais

AAM (A_M) – viscosidade cinemática horizontal ($m^2 s^{-1}$);
 AAH(AH) – difusividade térmica horizontal =TPRNI * AAM;
 L(l) - escala característica da turbulência;
 KM(KM) - viscosidade cinemática vertical($m^2 s^{-1}$);
 KH(KH) - difusividade cinemática vertical($m^2 s^{-1}$);
 RAD(R) - fluxo de radiação de ondas curtas ($m s^{-1} K$) mesmo referencial de WTSURF;
 Q2(q2) - quadrado da energia cinética turbulenta ($m^2 s^{-2}$);
 Q2L(q2l) - Q2 x escala turbulenta característica ($m^3 s^{-2}$);
 T(T) - temperatura potencial ($^{\circ}C$);
 S(S) - salinidade (ups);
 RHO ($\rho - 1000.$)/rhoref density - densidade (adimensional);
 U,V(U,V) - velocidades horizontais ($m s^{-1}$);
 W(w) - velocidade vertical em coordenadas sigma ($m s^{-1}$);
 RMEAN - média do campo de densidades verticais.

- initcond

Este arquivo é um arquivo de entrada de dados. Alterações no corpo deste arquivo não força o usuário a realizar nova compilação do código.

Em sua leitura, a partir do programa principal, são definidas as seguintes variáveis:

- NREAD – pode assumir dois valores, 0 ou 1. Assume valor 0 se este é iniciado a partir do repouso ou valor 1 se o programa é reinicializado considerando uma condição inicial não-nula, carregando um arquivo binário contendo valores para todas as variáveis do programa;
- ISPLIT – é a relação entre DTI e DTE podendo variar de 16 a 30, de acordo com as características hidrodinâmicas e de discretização espaço-temporal do problema em questão;
- IDAYS – quantidade de dias que serão simulados a partir da inicialização do programa;

- MODE – pode assumir três valores, listados no item: Constantes e símbolos lógicos;
- PRTD1 – inverso do número de Prandtl;
- DTI – passo de tempo do modo interno, dado em segundos;
- HORCON – constante utilizada na formulação de Smagorinsky;

IPRTD1 –contendo respectivamente: Longitude, Latitude e Profundidade(m). Iniciando do ponto mais ao Sul e mais Oeste, e sempre se deslocando primeiramente para o Norte e depois para Leste.

- *dx dy.xy*

Arquivo que contém as dimensões dos elementos: I, J, DX, DY. Estes são organizados em quatro colunas, e arranjados um sobre o outro, da mesma maneira que no arquivo *depths.xyz*.

➤ Principais rotinas do código computacional POM

- *main.f*

Este é o principal programa do modelo POM, pois é este módulo que gerencia todas as sub-rotinas do modelo, além de todos os arquivos de entrada (*depths.xyz*; *dx dy.xy*; *initcond*) e de impressão de resultados ao longo das simulações. A Figura A1 traz um esquema simplificado relativo ao fluxograma do código.

Os dois principais laços de repetição têm índices 9000 e 8000. Estes dois laços, respectivamente, distinguem-se pelo fato de utilizarem intervalos de tempo de integração distintos. O primeiro intervalo de tempo é o DTI (associado ao laço 9000), utilizado na integração das componentes do modo interno, e o segundo intervalo é o DTE (associado ao laço 8000), o intervalo de tempo de integração do modo externo. Estes dois intervalos por sua vez estão associados ao tempo de resposta de determinados processos físicos envolvidos. O modo externo responde mais efetivamente aos processos barotrópicos, e o modo interno aos processos baroclínicos.

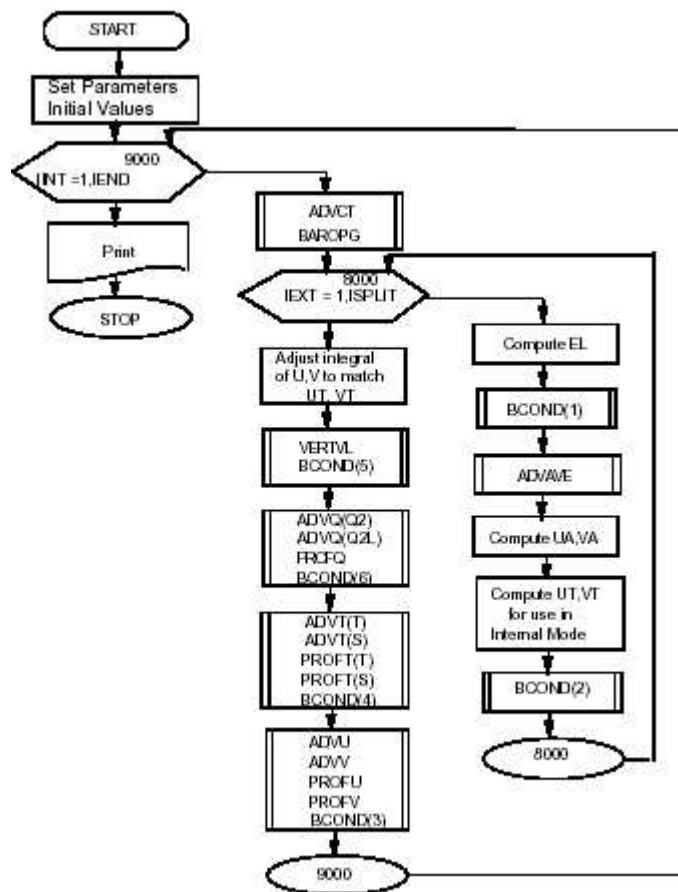


Figura A1: Fluxograma simplificado do modelo POM (fonte: POM Users Guide 1998)

O DTI e o DTE estão limitados pela condição de *Courant-Friedrichs-Levy* (CFL) para cada processo, quando se tem:

$$\text{- Modo Externo: } \Delta t_E \leq \frac{1}{C_t} \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right)$$

onde: $C_t = 2(gH)^{1/2} + U_{max}$, U_{max} é a velocidade máxima esperada. Recomenda-se utilizar 90% deste valor para as simulações.

$$\text{- Modo Interno: } \Delta t_I \leq \frac{1}{C_T} \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right)$$

onde: $C_T = 2C + U_{max}$, C_T é a máxima onda interna de gravidade e U_{max} é a velocidade máxima esperada.

As sub-rotinas que estão dentro do laço 8000 (modo externo) são integradas verticalmente em camadas sigma. Num processo de *feedback*, a elevação e as velocidades horizontais do modo externo são calculadas, a cada intervalo DTE, a partir de valores dos termos baroclínicos juntamente com a tensão de cisalhamento de fundo, tantas vezes até que se complete um DTI.

No laço 9000 (modo interno), as equações não são integradas na vertical, utilizando-se do método de discretização em diferenças finitas implícito (*leap frog*) para os termos de difusão vertical. Os termos advectivos e os termos de difusão horizontal são discretizados por método de diferenças finitas explícito.

- *bcond.f*

Trata-se do arquivo onde estão contidas as rotinas que definem as condições de contorno nos limites considerados abertos na definição do problema. É nele que são feitas as principais alterações até que se consiga uma condição ideal para todas as variáveis em questão nos limites abertos. São definidas, principalmente, condições de elevação (η) e de velocidades (U, V), para os modos interno e externo. Neste arquivo são definidas as condições ao limite para as variáveis T (temperatura), S (salinidade), W(velocidade vertical), q e q^2l (grandezas turbulentas)

➤ Arquivos de saída/impressão de resultados

Os arquivos de saída do modelo POM são em geral referenciados por:

- *uvelpxx.dat*

Estes arquivos são gerados a partir do início da simulação em intervalos de tempo definidos no arquivo *initcond* (IPRTD1). Aqui, a terminação xx indica os números que os ordenam de acordo com a sequência de simulação, ou seja, os arquivos gerados têm nome: *uvelp01.dat*, *uvelp02.dat*, *uvelp03.dat*, etc. Eles trazem as distribuições horizontais superficiais de U (m/s), V (m/s) e η (m), para toda a malha, arranjados em colunas, onde as duas primeiras colunas são as coordenadas geográficas (em graus) dos pontos da malha.

- *el.out*

Através desse arquivo pode-se acompanhar a evolução temporal da elevação do nível do mar ao longo de toda a simulação. Os dados estão alinhados em colunas: a primeira coluna indica o tempo de simulação (em dias), e as outras colunas trazem respectivamente evolução da elevação no limite Sul, no meio da malha e no limite Norte. O intervalo de tempo de escrita de uma linha para a outra é definido pelo tempo de integração externo DTE.

- *ek.out*

Esse arquivo de saída imprime a evolução temporal da energia cinética barotrópica total do sistema, ao longo de toda a simulação. Os dados estão alinhados em colunas: a primeira coluna indica o tempo de simulação (em dias), e a segunda coluna traz a evolução da energia cinética total no meio da malha.

O intervalo de tempo de escrita de uma linha para a outra é igualmente definido pelo DTE.

ANEXO B

Exemplos de evolução de plumas de poluentes

B.1 – Plumas lançadas no verão quadratura

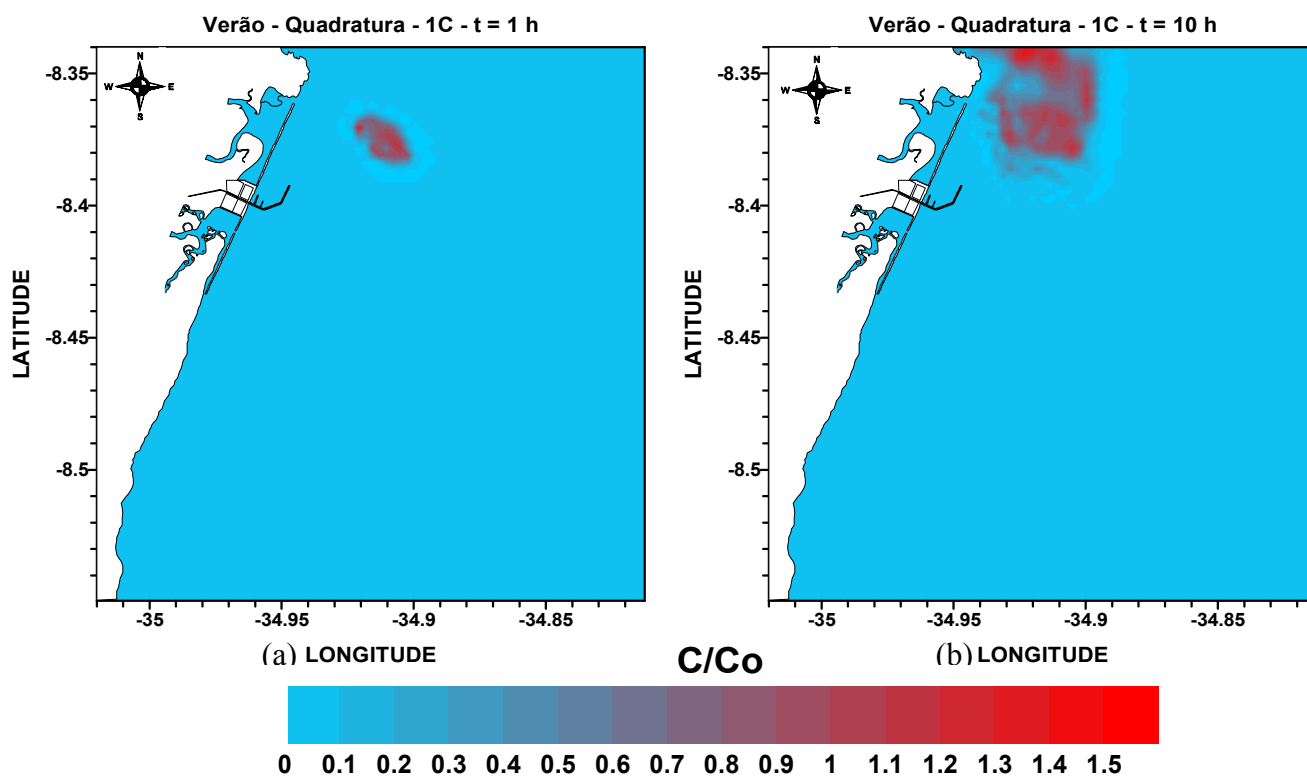


Figura B1. Plumas lançadas em : (a) 1C - 1 hora depois do lançamento e (b) 1C – no instante de chegada à costa.

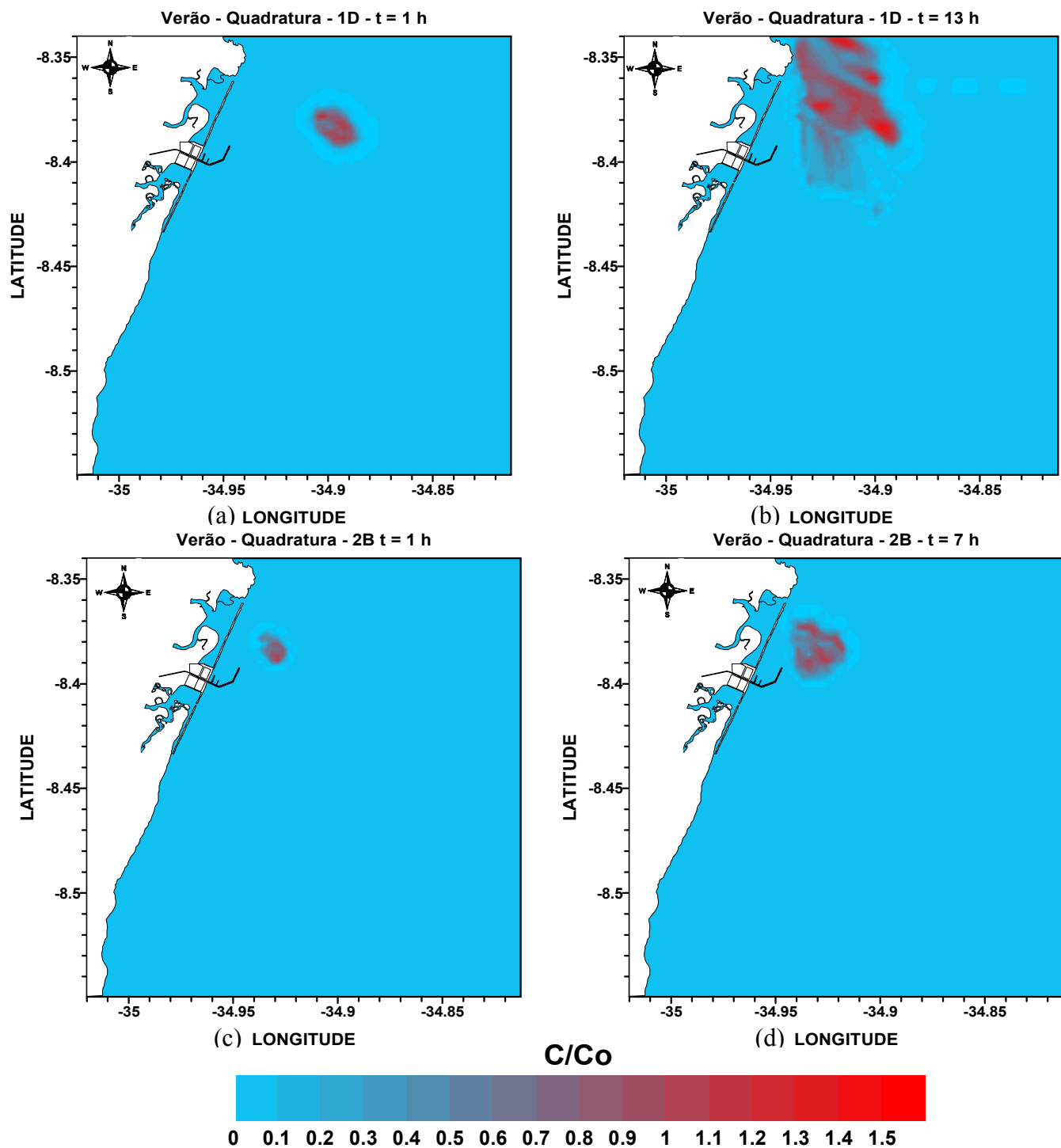


Figura B2. Plumas lançadas em : (a) 1D -1 hora depois do lançamento e (b) 1D - no instante de chegada à costa. (c) 2B - 1 hora depois do lançamento e (d) 2B - no instante de chegada à costa.

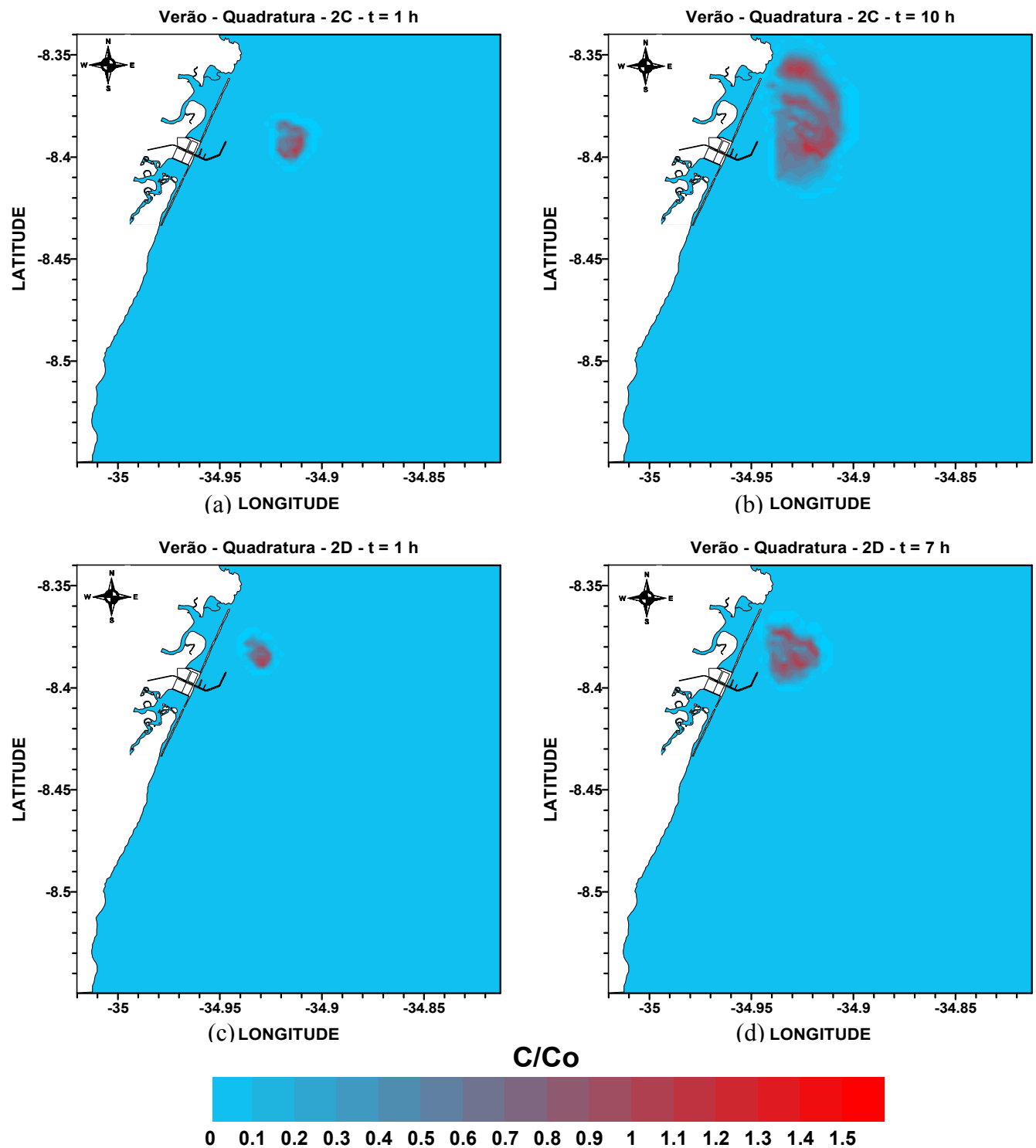


Figura B3. Plumas lançadas em : (a) 2C - 1 hora depois do lançamento e (b) 2C - no instante de chegada à costa. (c) 2D - 1 hora depois do lançamento e (d) 2D - no instante de chegada à costa.

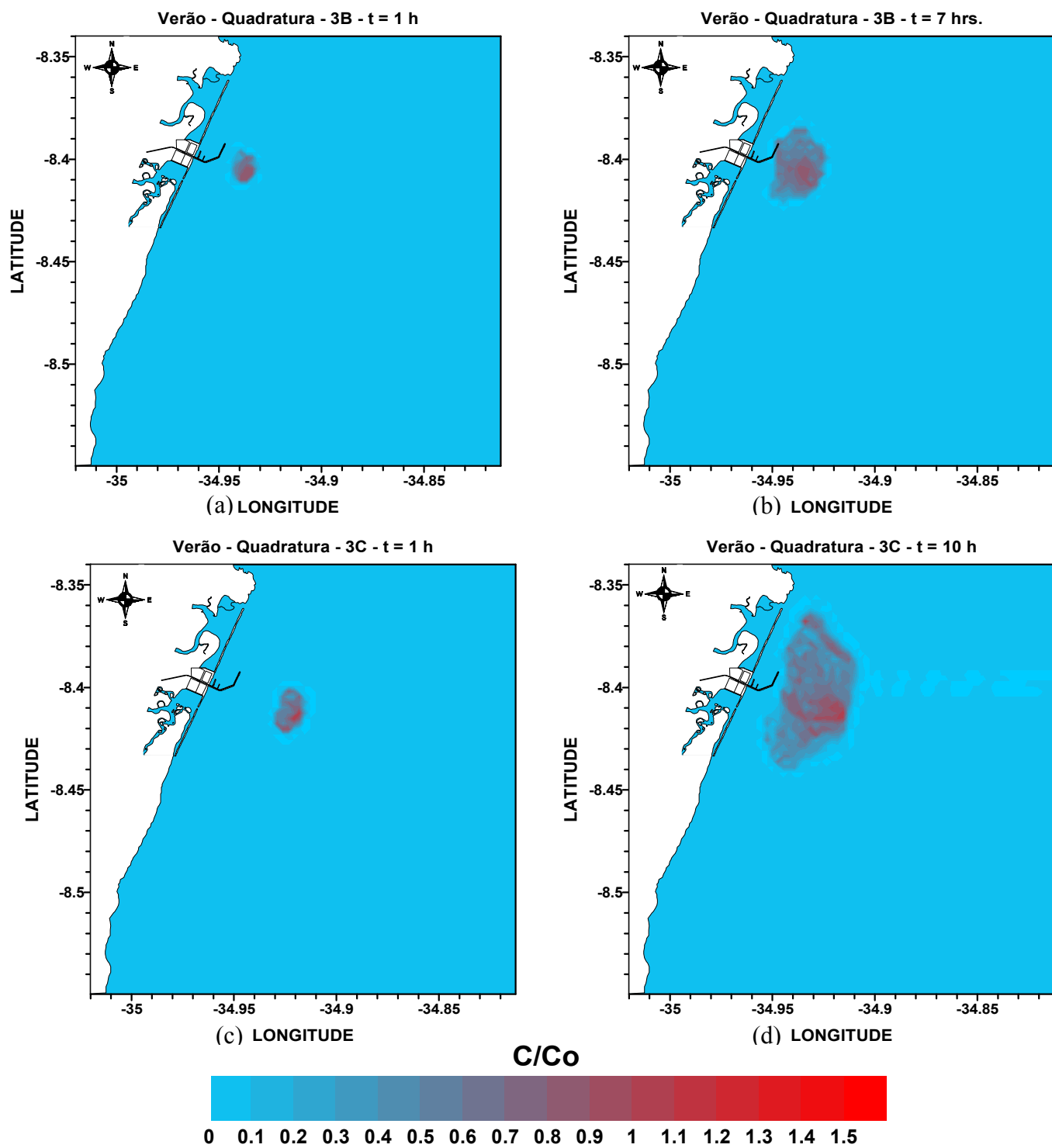


Figura B4. Plumas lançadas em : (a) 3B -1 hora depois do lançamento e (b) 3B - no instante de chegada à costa. (c) 3C - 1 hora depois do lançamento e (d) 3C - no instante de chegada à costa.

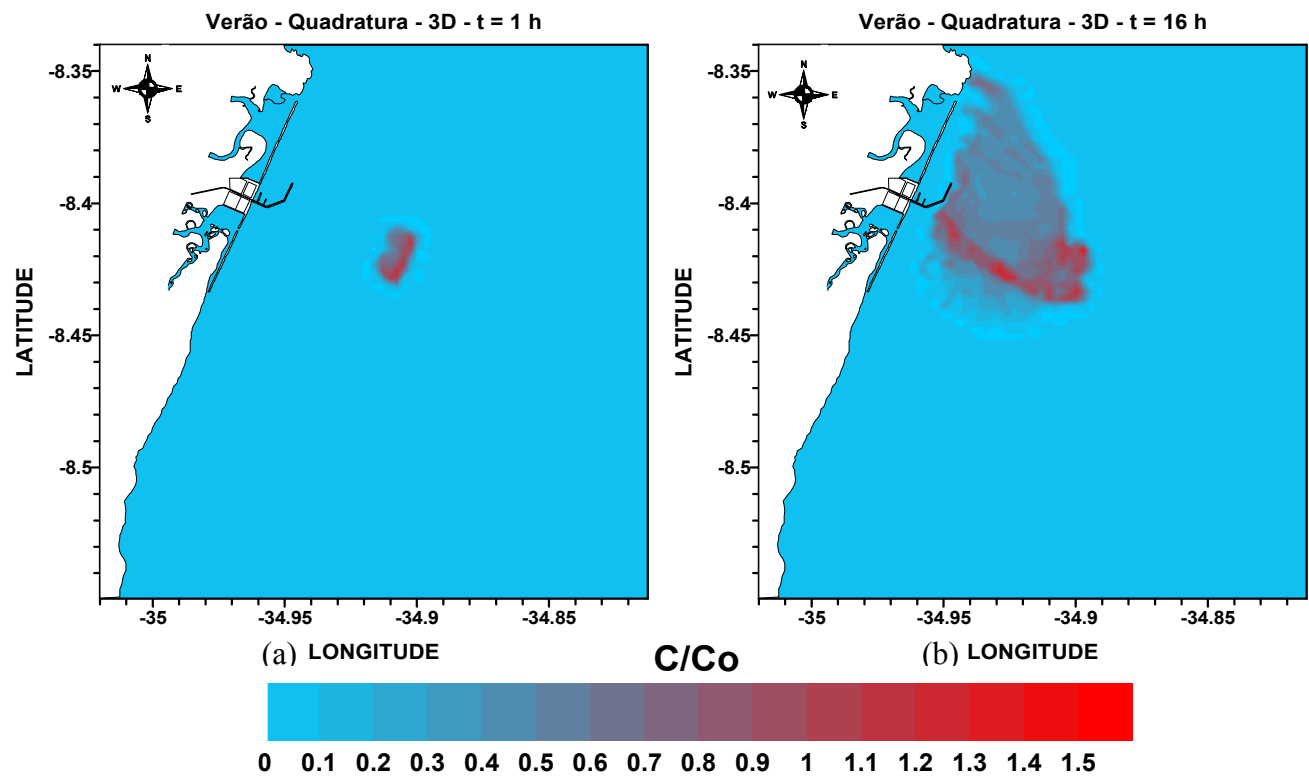


Figura B5. Plumas lançadas em : (a) 3D -1 hora depois do lançamento e (b) 3D - no instante de chegada à costa.

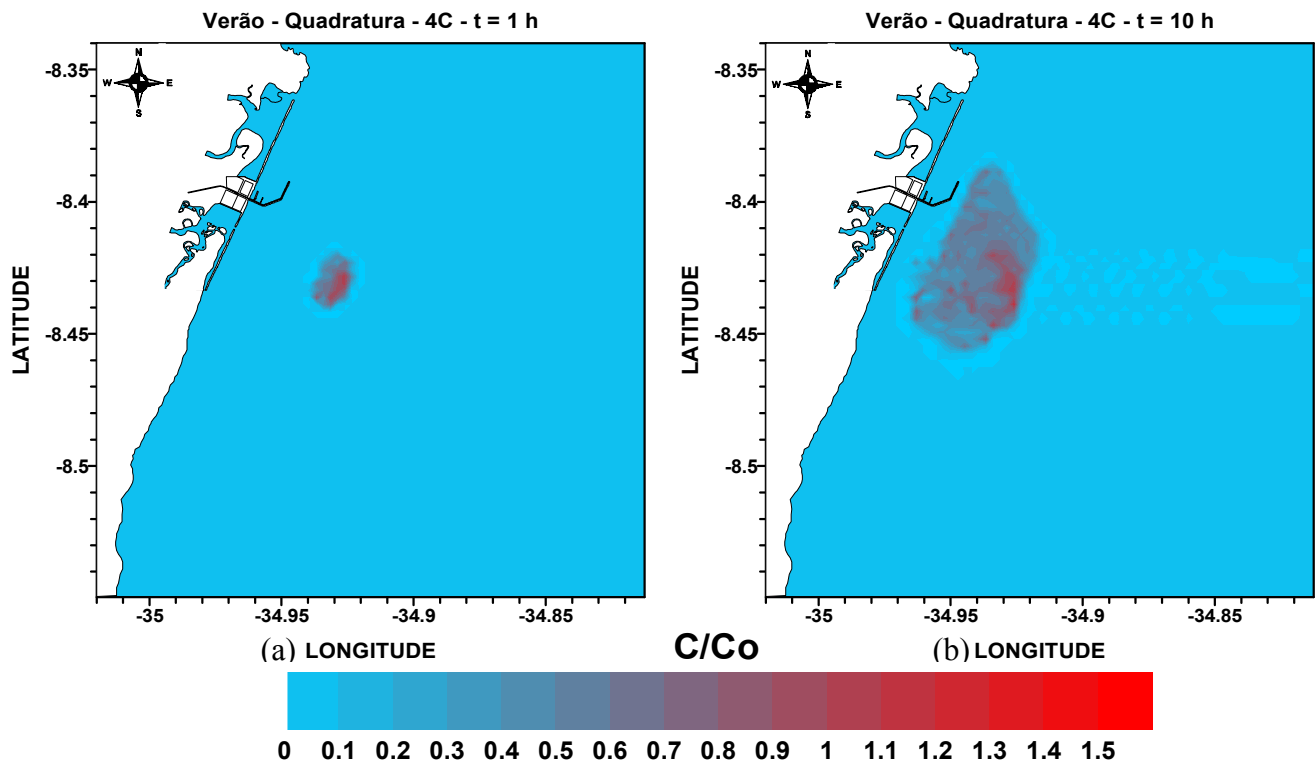


Figura B6. Plumas lançadas em : (a) 4C - 1 hora depois do lançamento e (b) 4C - no instante de chegada à costa.

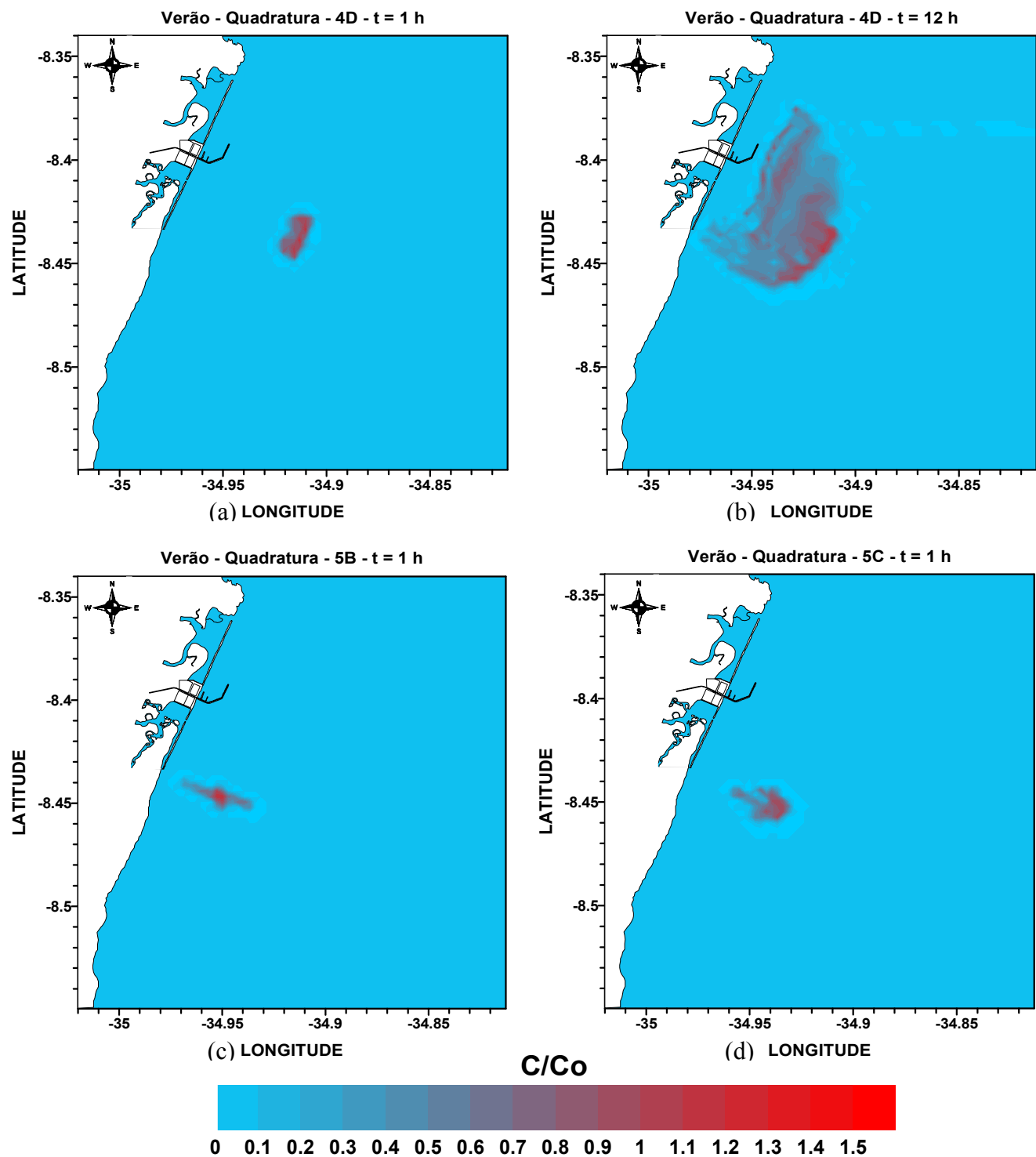


Figura B7. Plumas lançadas em : (a) 4D -1 hora depois do lançamento e (b) 4D - no instante de chegada à costa. (c) 5B - 1 hora depois do lançamento e (d) 5C -1 hora depois do lançamento.

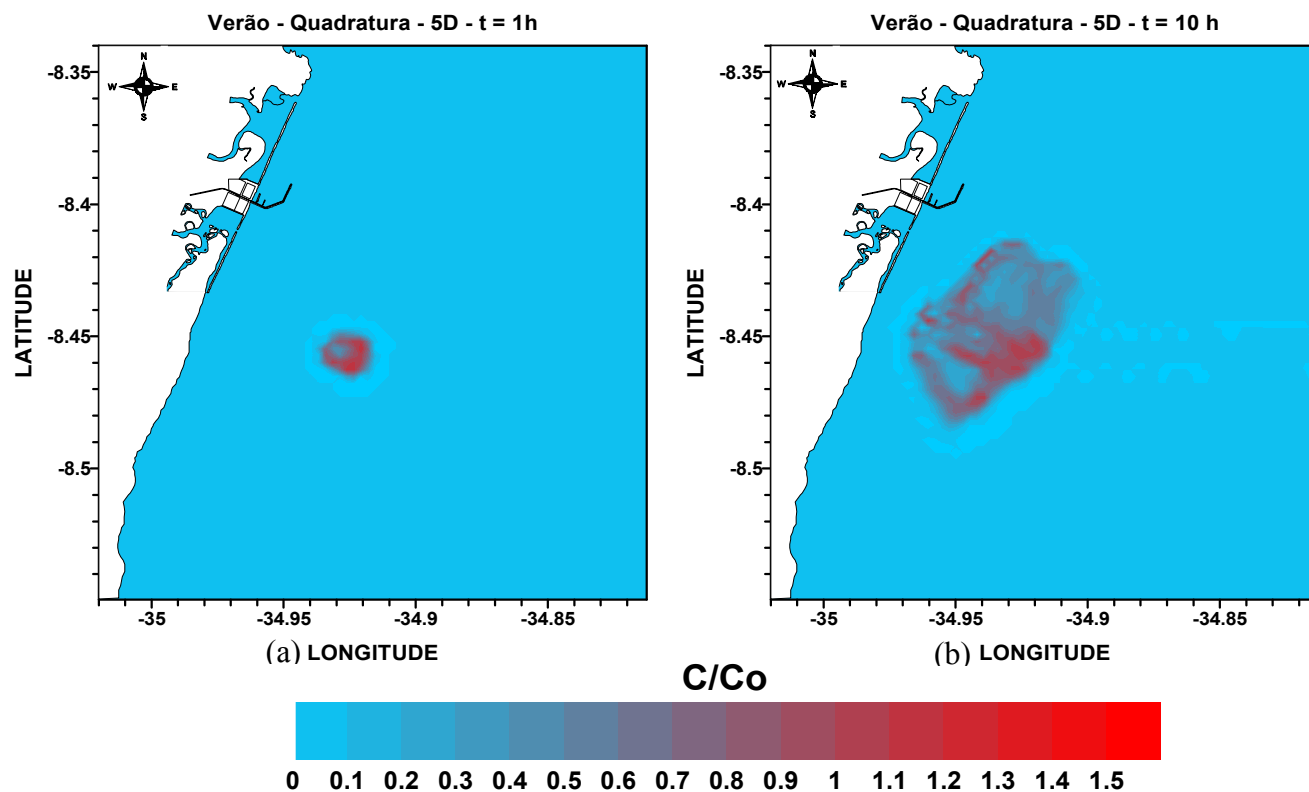


Figura B8. Plumas lançadas em : (a) 5D -1 hora depois do lançamento e (b) 5D - no instante de chegada à costa.

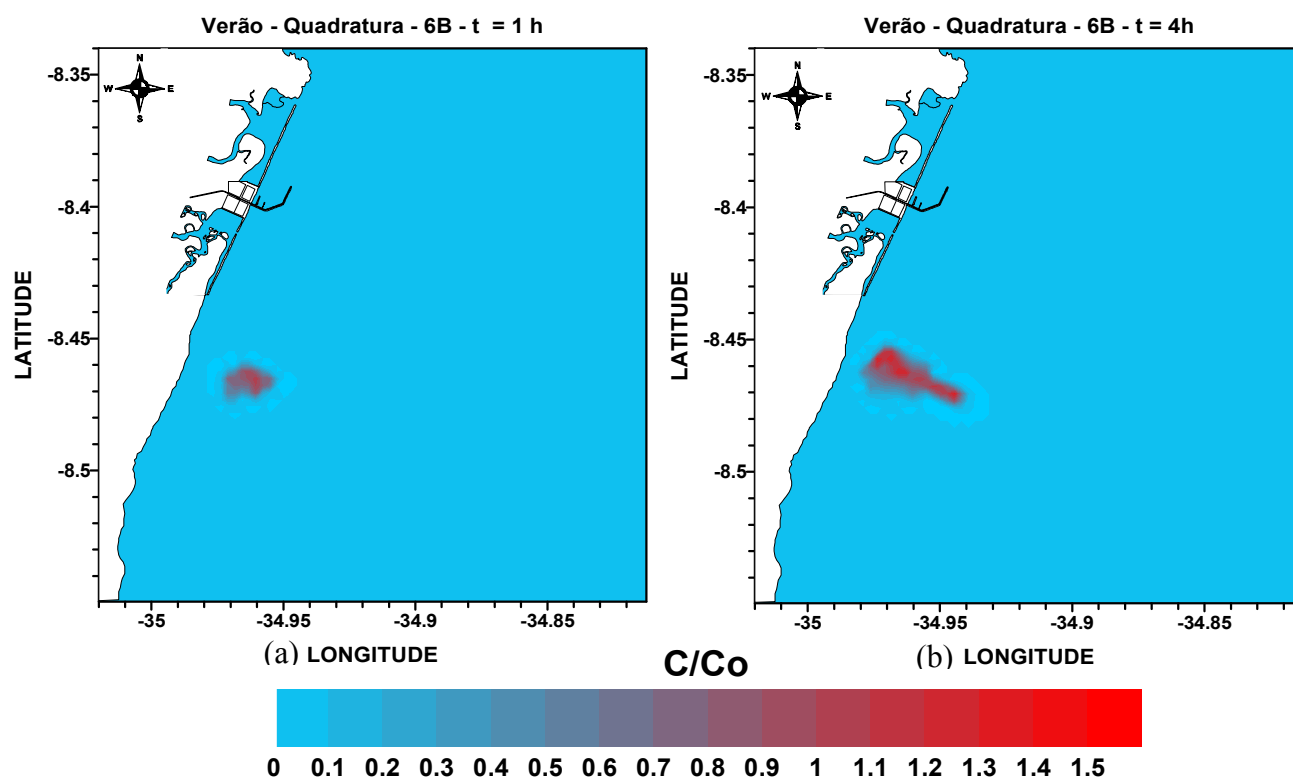


Figura B9. Plumas lançadas em : (a) 6B -1 hora depois do lançamento e (b) 6B - no instante de chegada à costa.

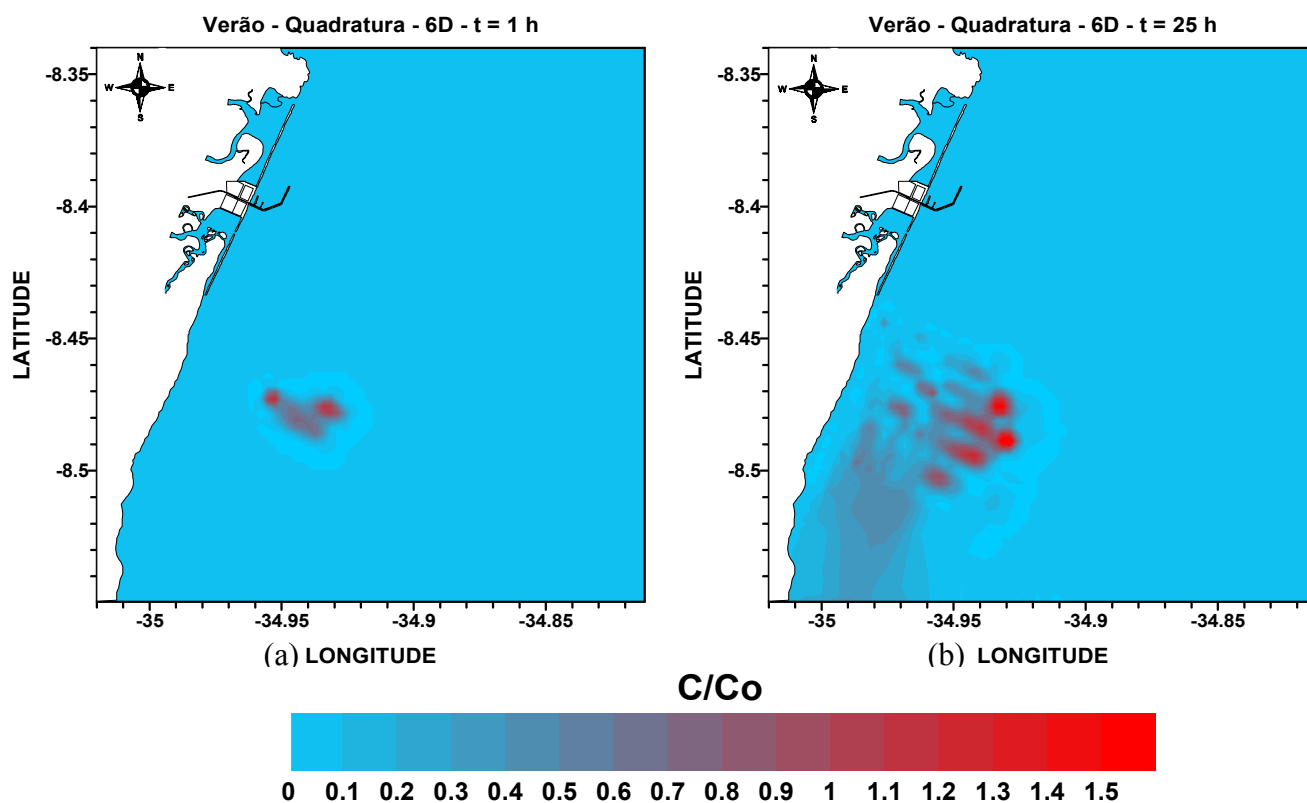


Figura B10. Plumas lançadas em : (a) 6D - 1 hora depois do lançamento e (b) 6D - no instante de chegada à costa.

B.2 – Plumas lançadas no verão sizígia

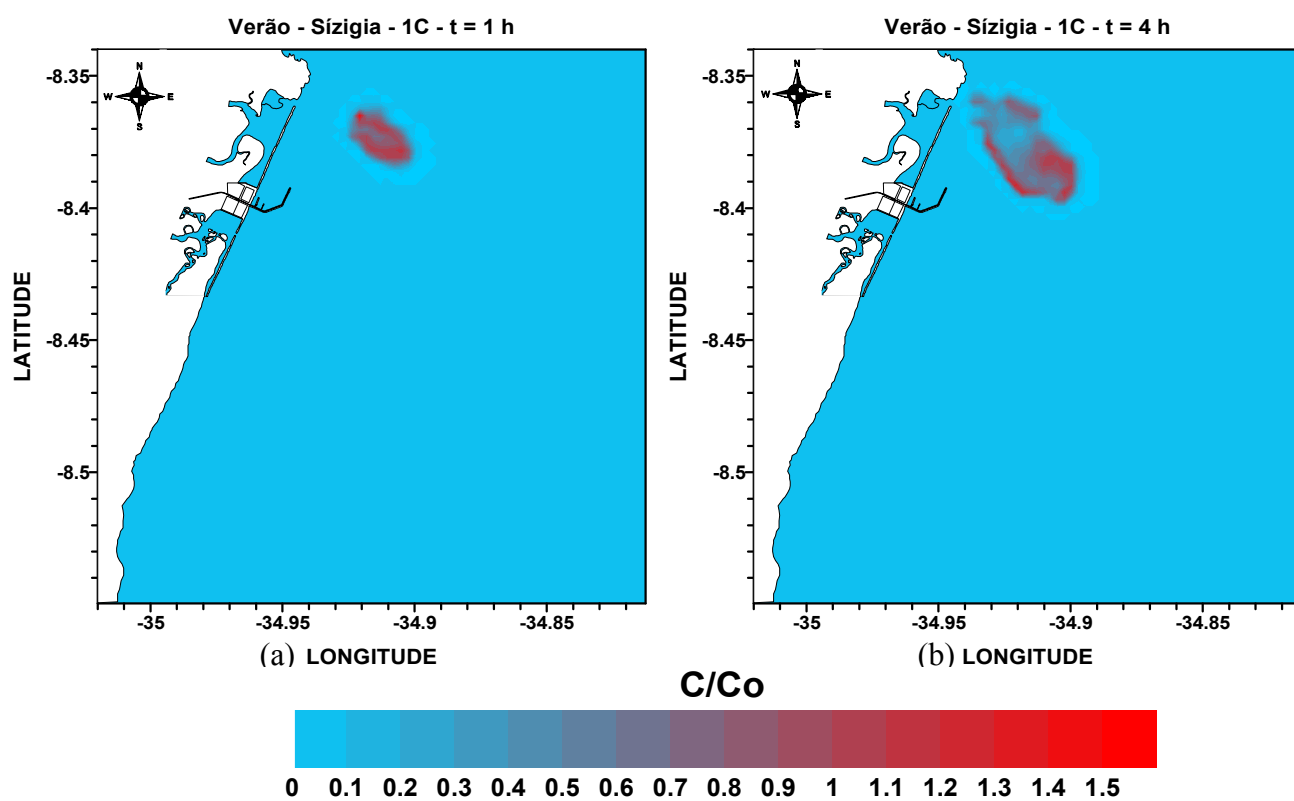


Figura B11. Plumas lançadas em : (a) 1C - 1 hora depois do lançamento e (b) 1C - no instante de chegada à costa.

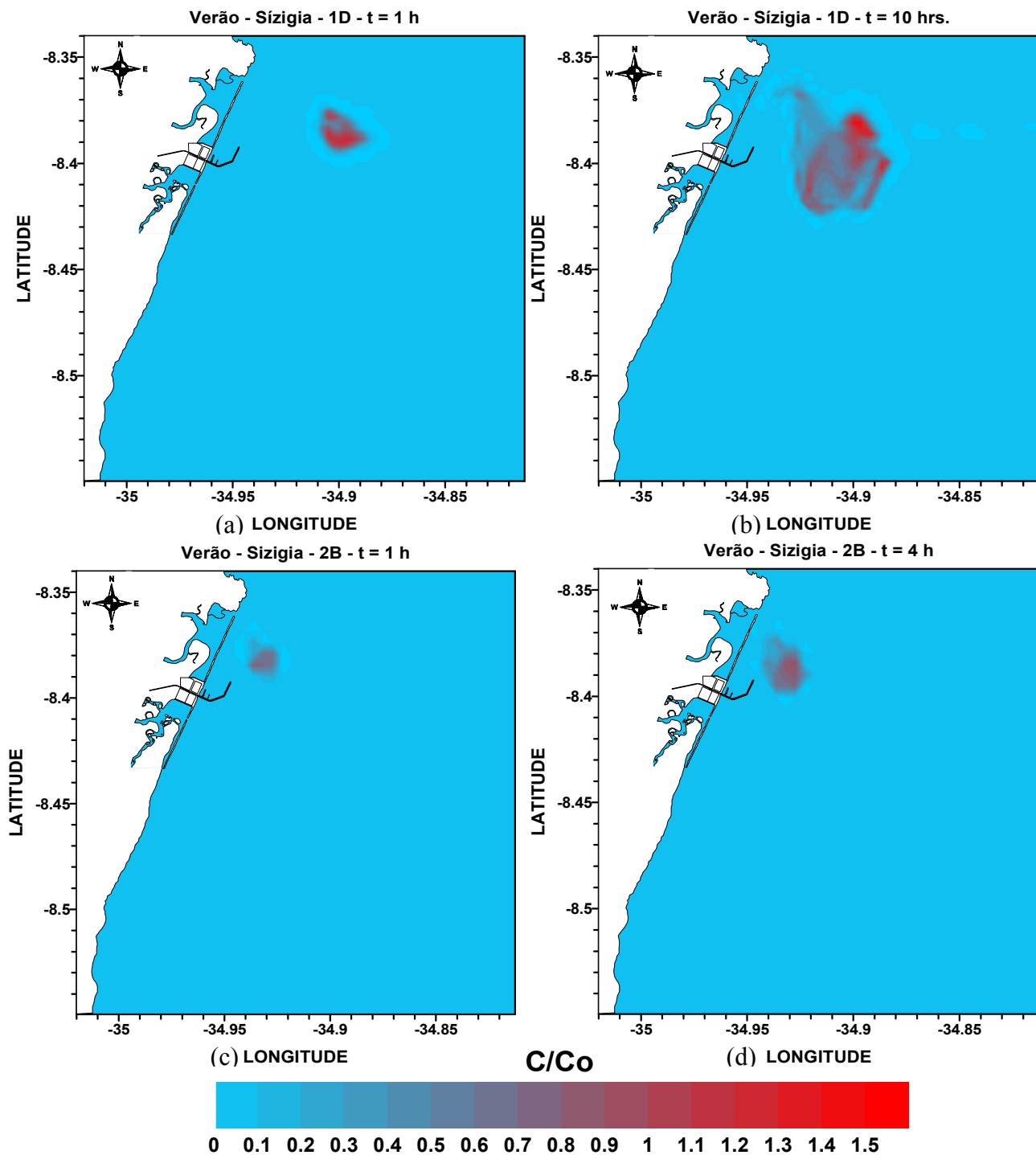


Figura B12. Plumas lançadas em : (a) 1D - 1 hora depois do lançamento e (b) 1D - no instante de chegada à costa. (c) 2B - 1 hora depois do lançamento e (d) 2B - no instante de chegada à costa.

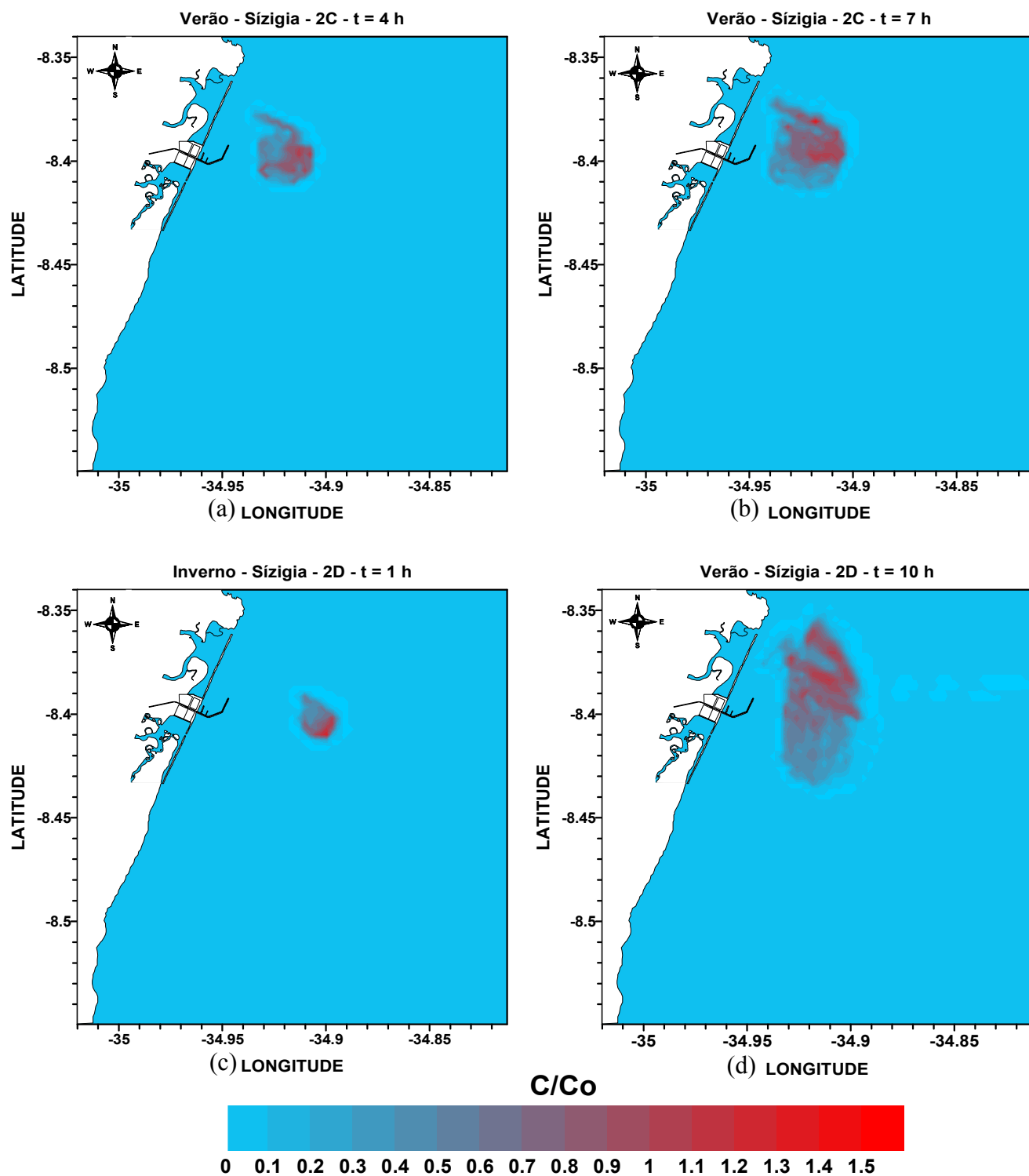


Figura B13. Plumas lançadas em : (a) 2C - 1 hora depois do lançamento e (b) 2C - no instante de chegada à costa. (c) 2D - 1 hora depois do lançamento e (d) 2D - no instante de chegada à costa.

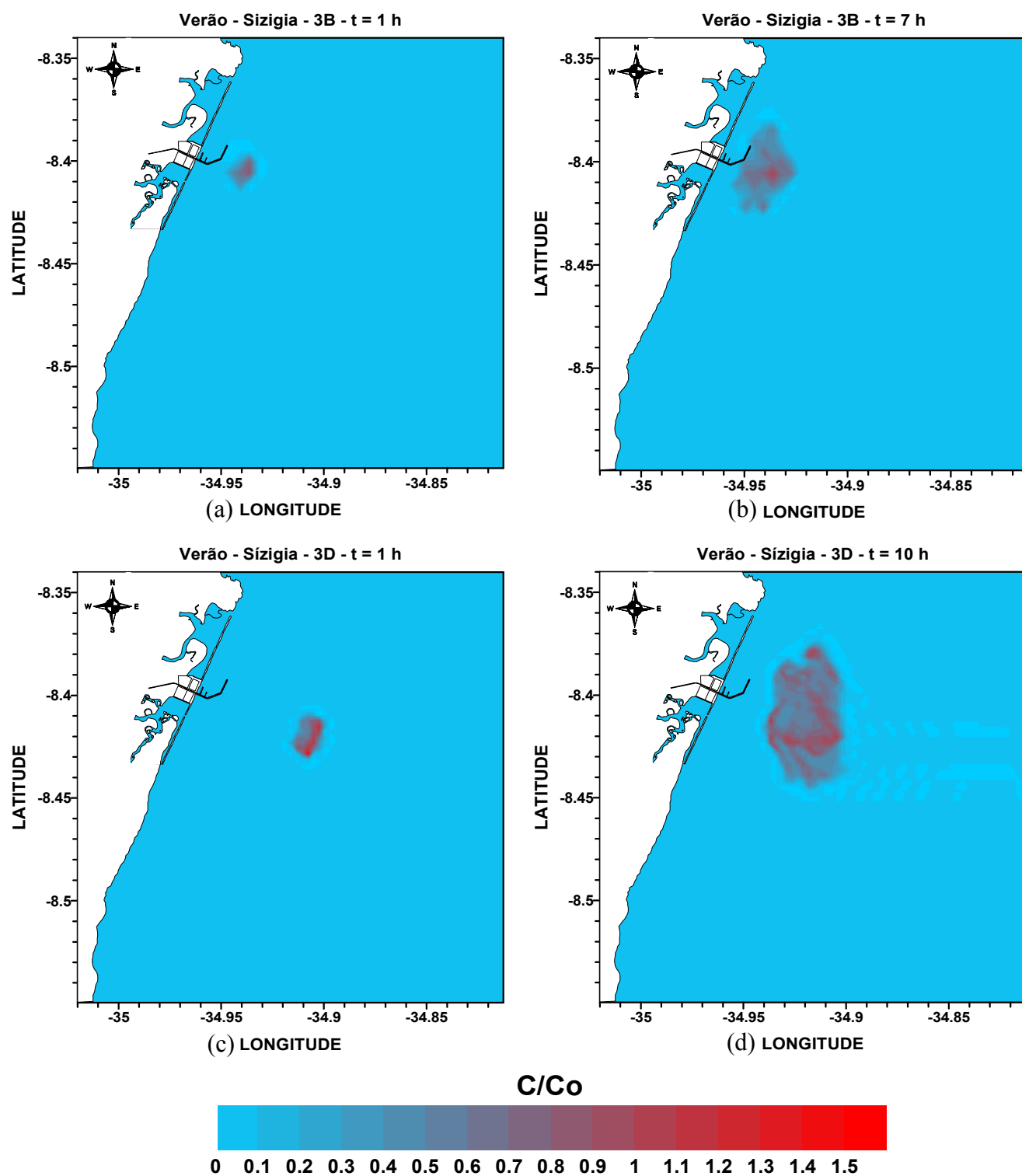


Figura B14. Plumas lançadas em : (a) 3B -1 hora depois do lançamento e (b) 3B - no instante de chegada à costa. (c) 3D - 1 hora depois do lançamento e (d) 3D - no instante de chegada à costa.

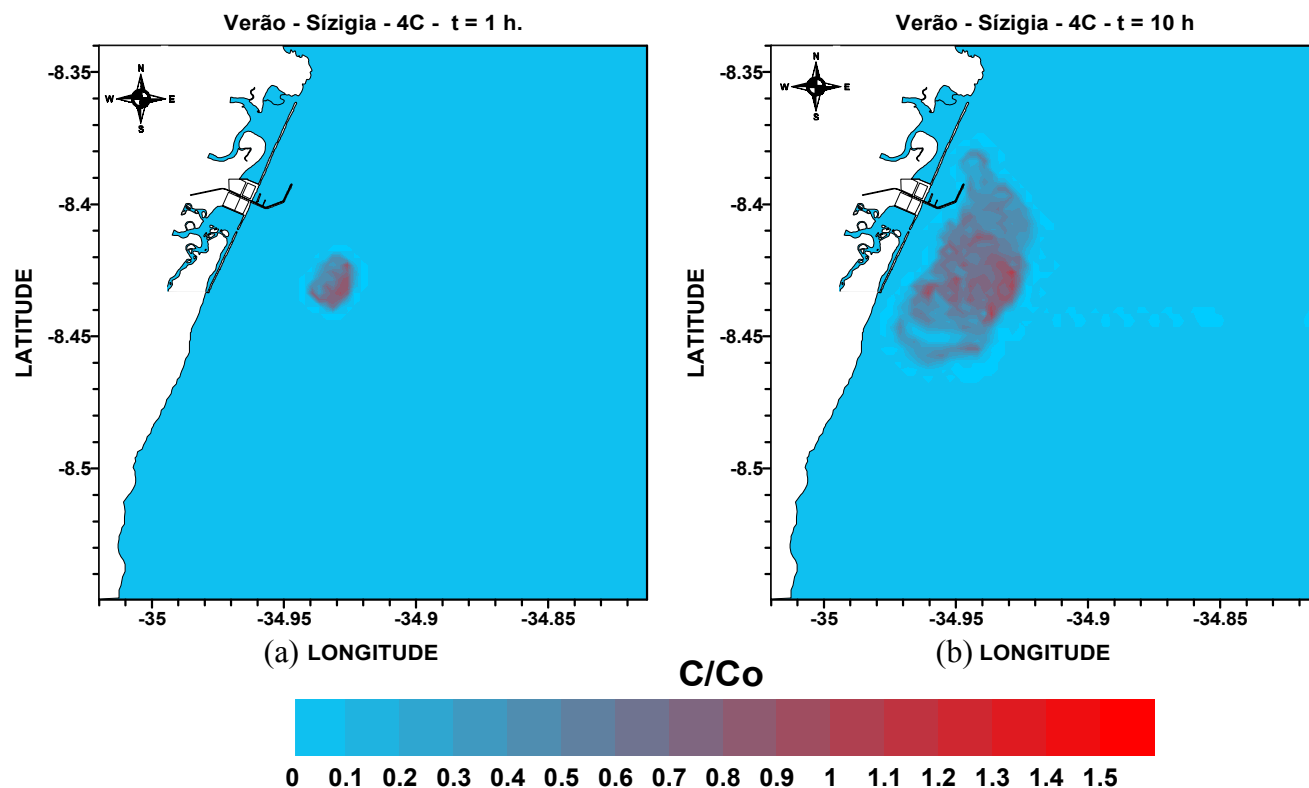


Figura B15. Plumas lançadas em : (a) 4C - 1 hora depois do lançamento e (b) 4C - no instante de chegada à costa.

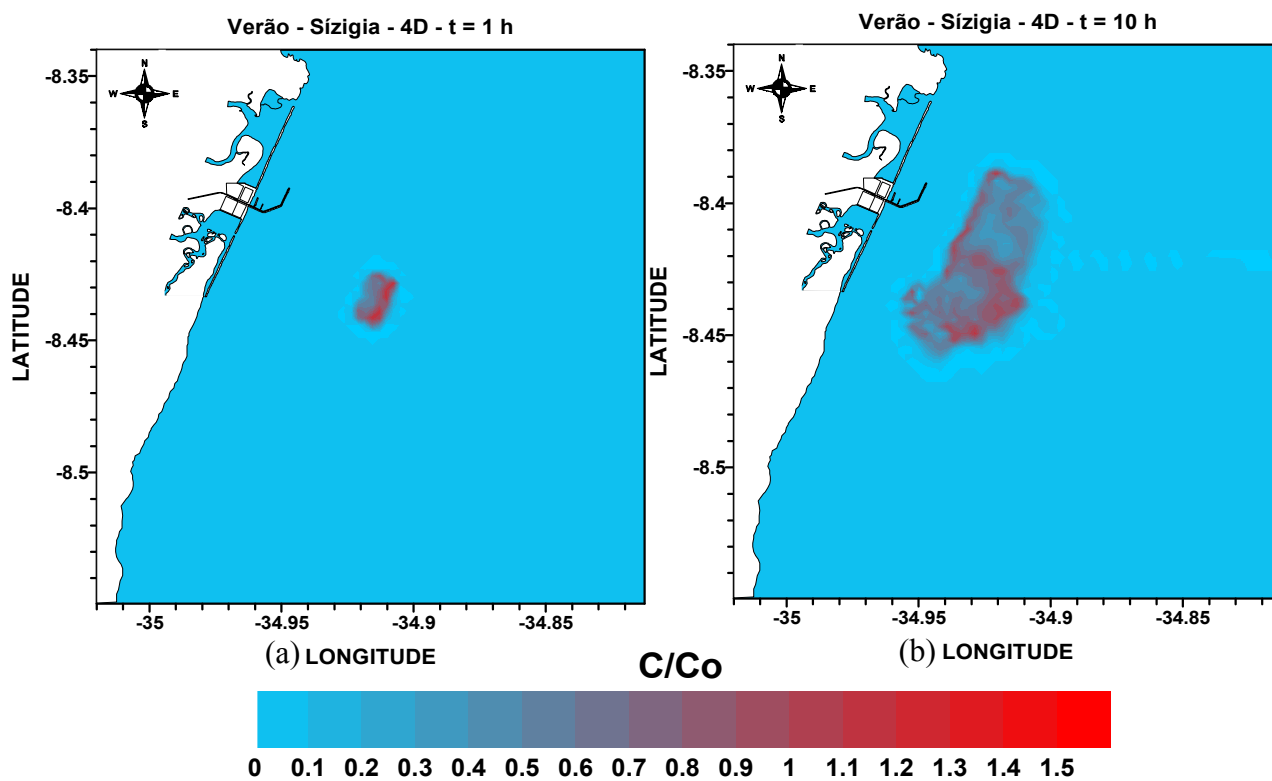


Figura B16. Plumas lançadas em : (a) 4D - 1 hora depois do lançamento e (b) 4D - no instante de chegada à costa.

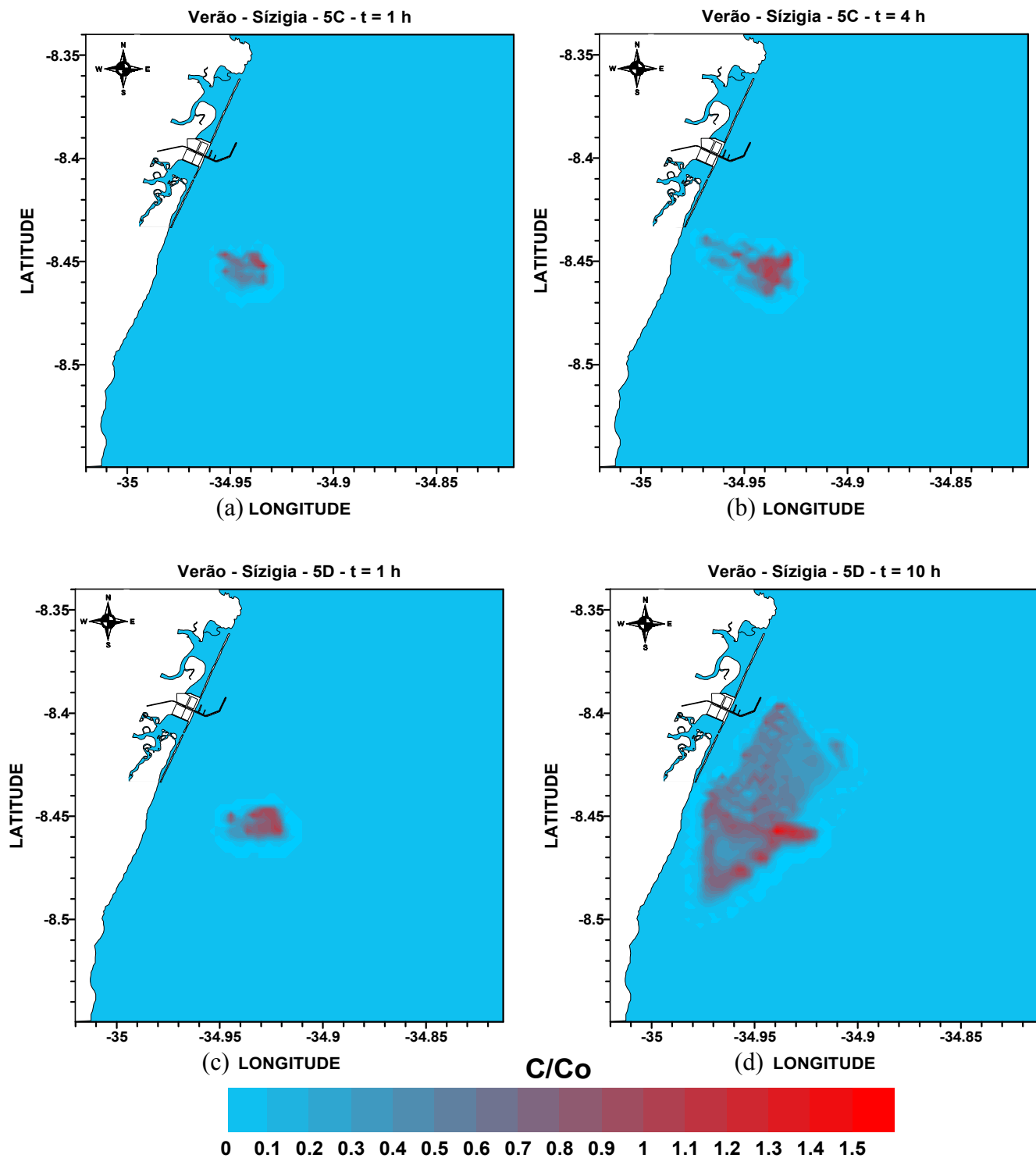


Figura B17. Plumas lançadas em : (a) 5C -1 hora depois do lançamento e (b) 5C - no instante de chegada à costa. (c) 5D - 1 hora depois do lançamento e (d) 5D - no instante de chegada à costa.

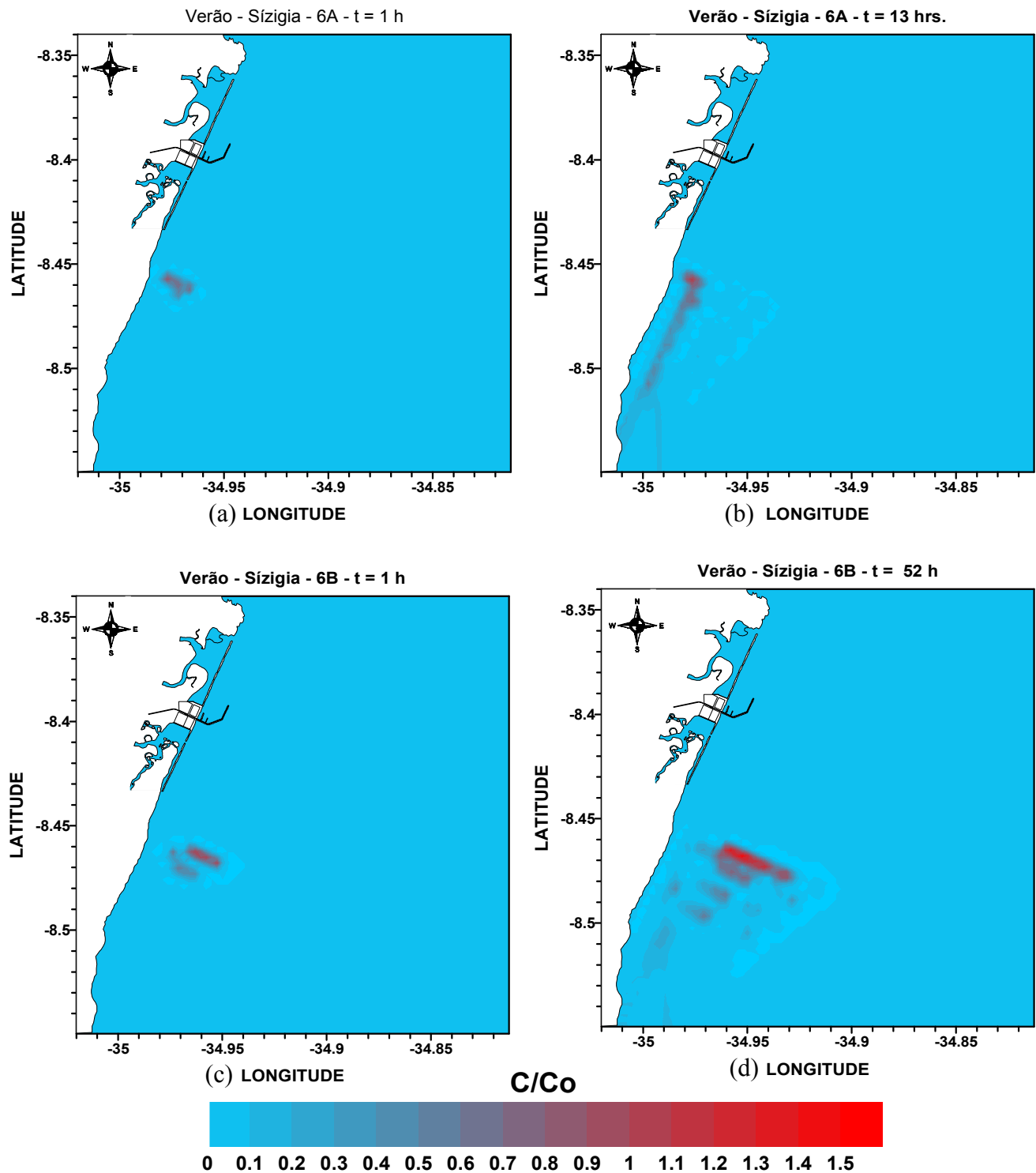


Figura B18. Plumas lançadas em : (a) 6A -1 hora depois do lançamento e (b) 6A - no instante de chegada à costa. (c) 6B - 1 hora depois do lançamento e (d) 6B - no instante de chegada à costa.

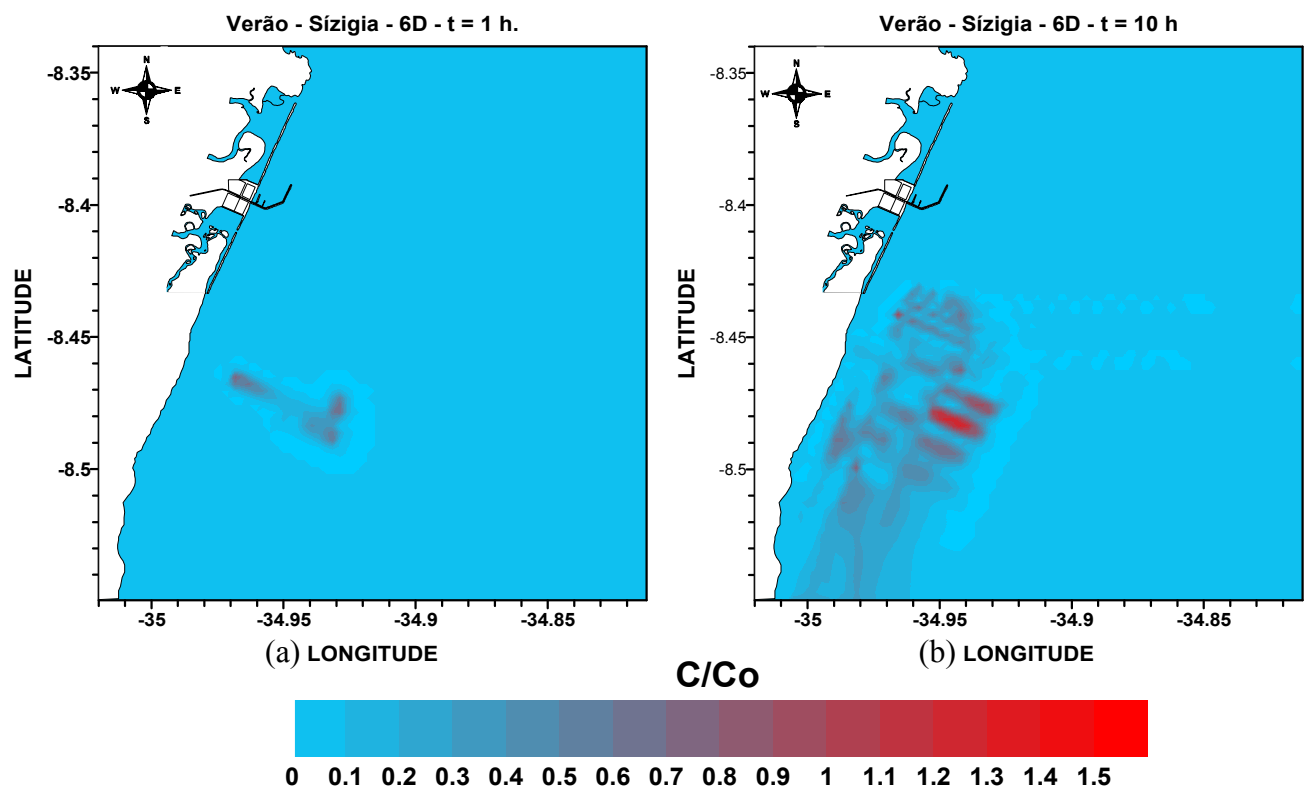


Figura B19. Plumas lançadas em : (a) 6C - 1 hora depois do lançamento e (b) 6D - 1 hora depois do lançamento e (d) 6D - no instante de chegada à costa.

B.3 – Plumas lançadas no inverno quadratura

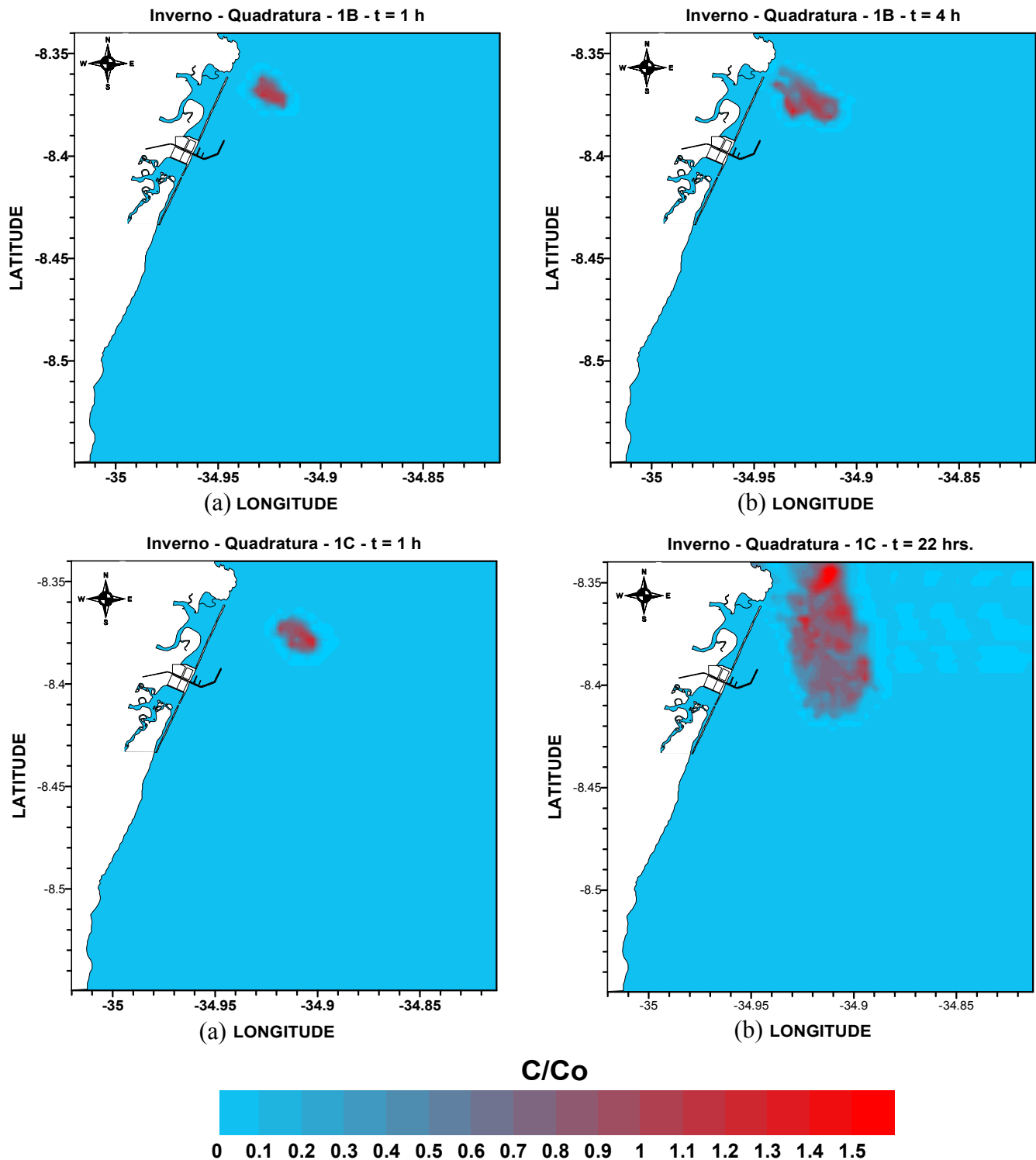


Figura B20. Plumas lançadas em : (a) 1B -1 hora depois do lançamento e (b) 1B - no instante de chegada à costa. (c) 1C - 1 hora depois do lançamento e (d) 1C - no instante de chegada à costa.

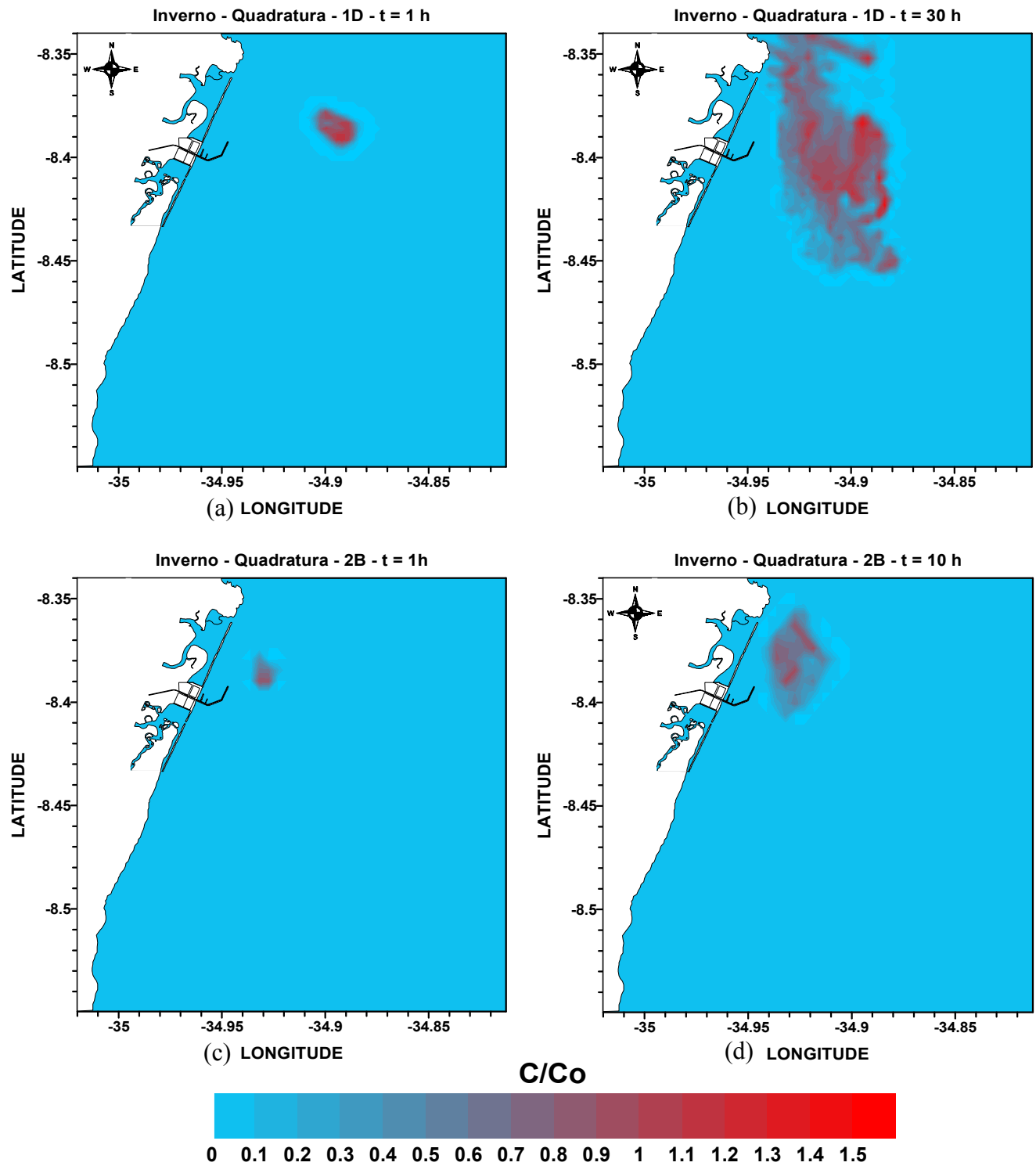


Figura B21. Plumas lançadas em : (a) 1D -1 hora depois do lançamento e (b) 1D - no instante de chegada à costa. (c) 2B - 1 hora depois do lançamento e (d) 2B - no instante de chegada à costa.

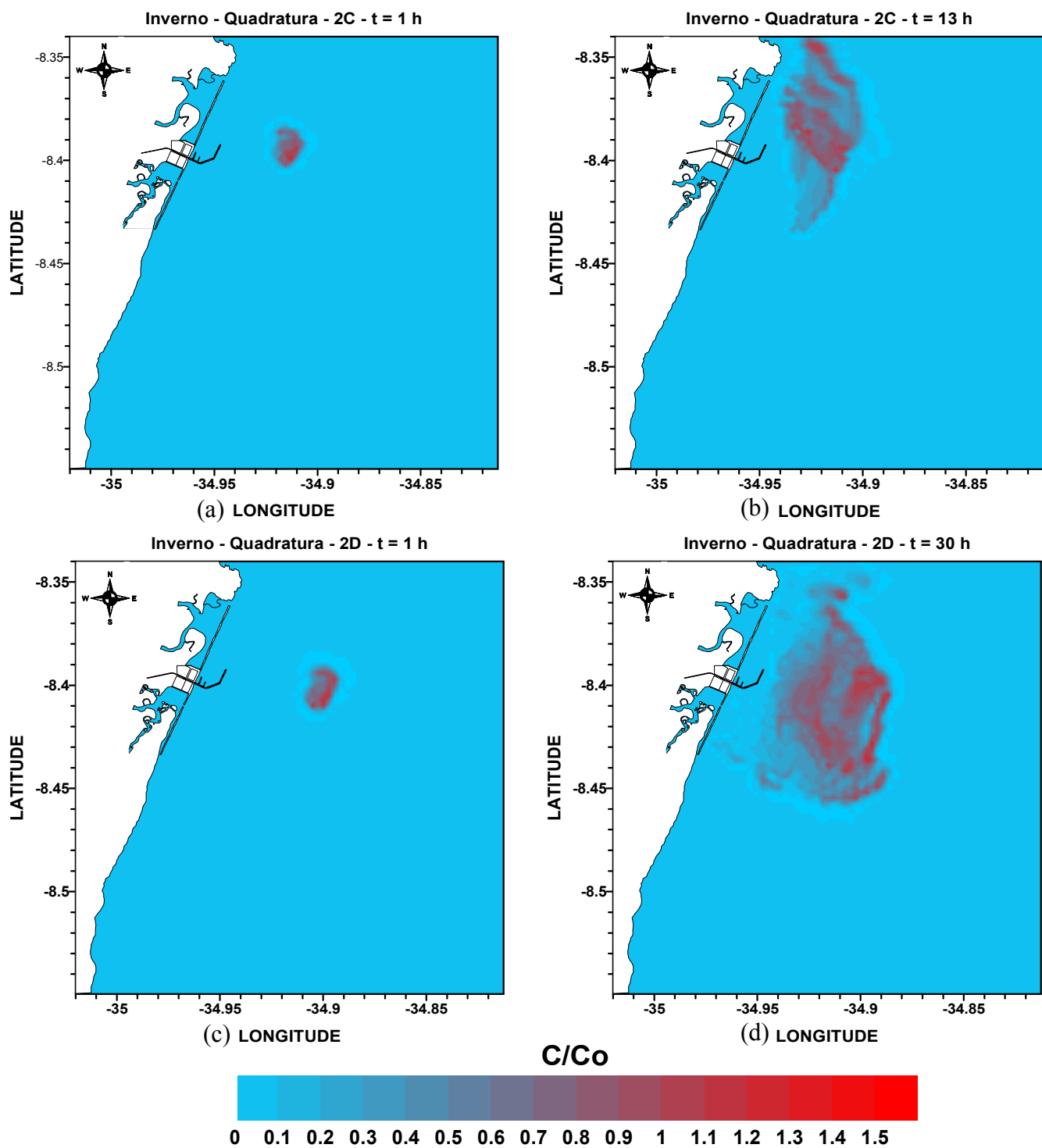


Figura B22. Plumas lançadas em : (a) 2C - 1 hora depois do lançamento e (b) 2C - no instante de chegada à costa. (c) 2D - 1 hora depois do lançamento e (d) 2D - no instante de chegada à costa.

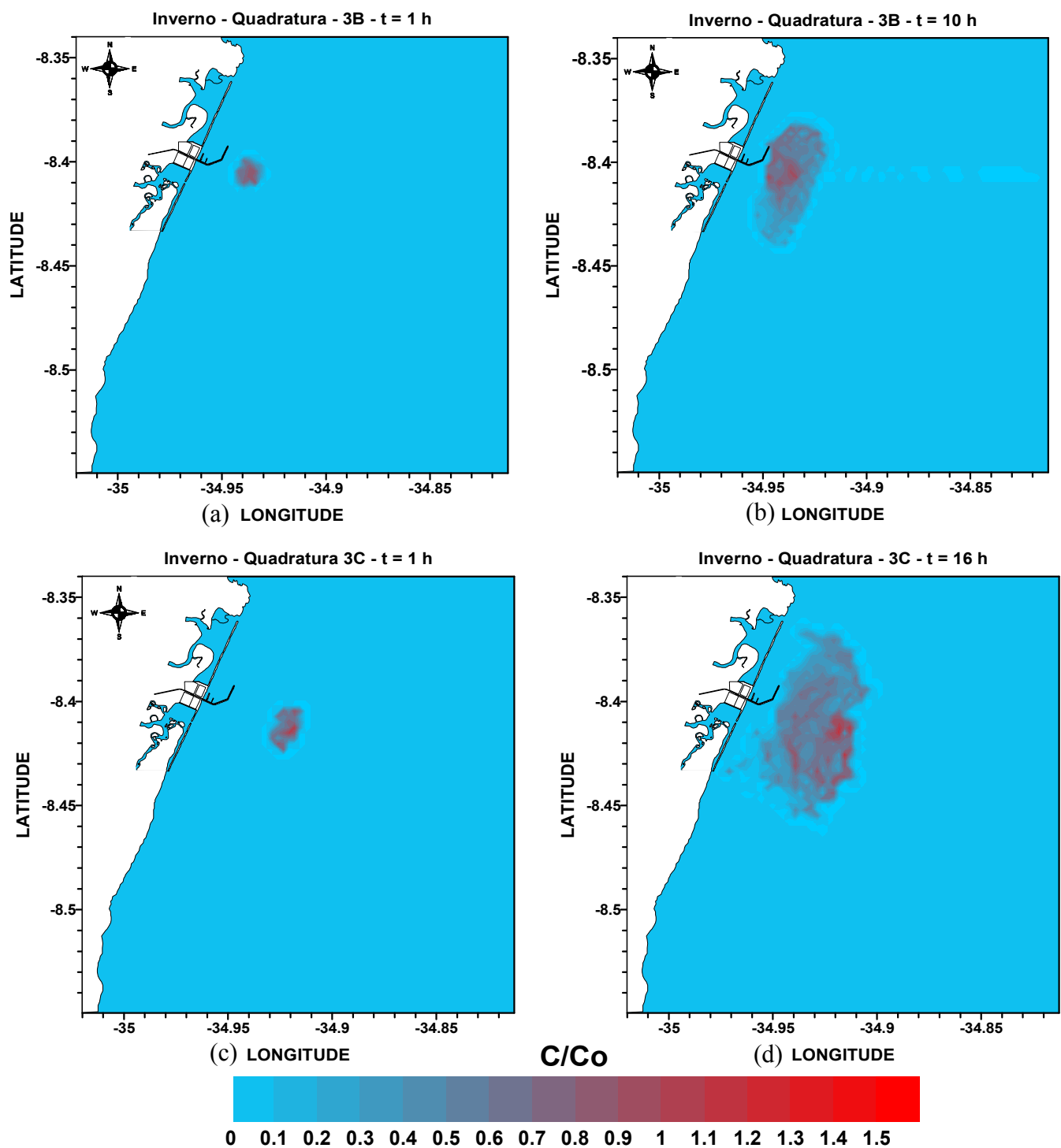


Figura B23. Plumas lançadas em : (a) 3B - 1 hora depois do lançamento e (b) 3B - no instante de chegada à costa. (c) 3C - 1 hora depois do lançamento e (d) 3C - no instante de chegada à costa.

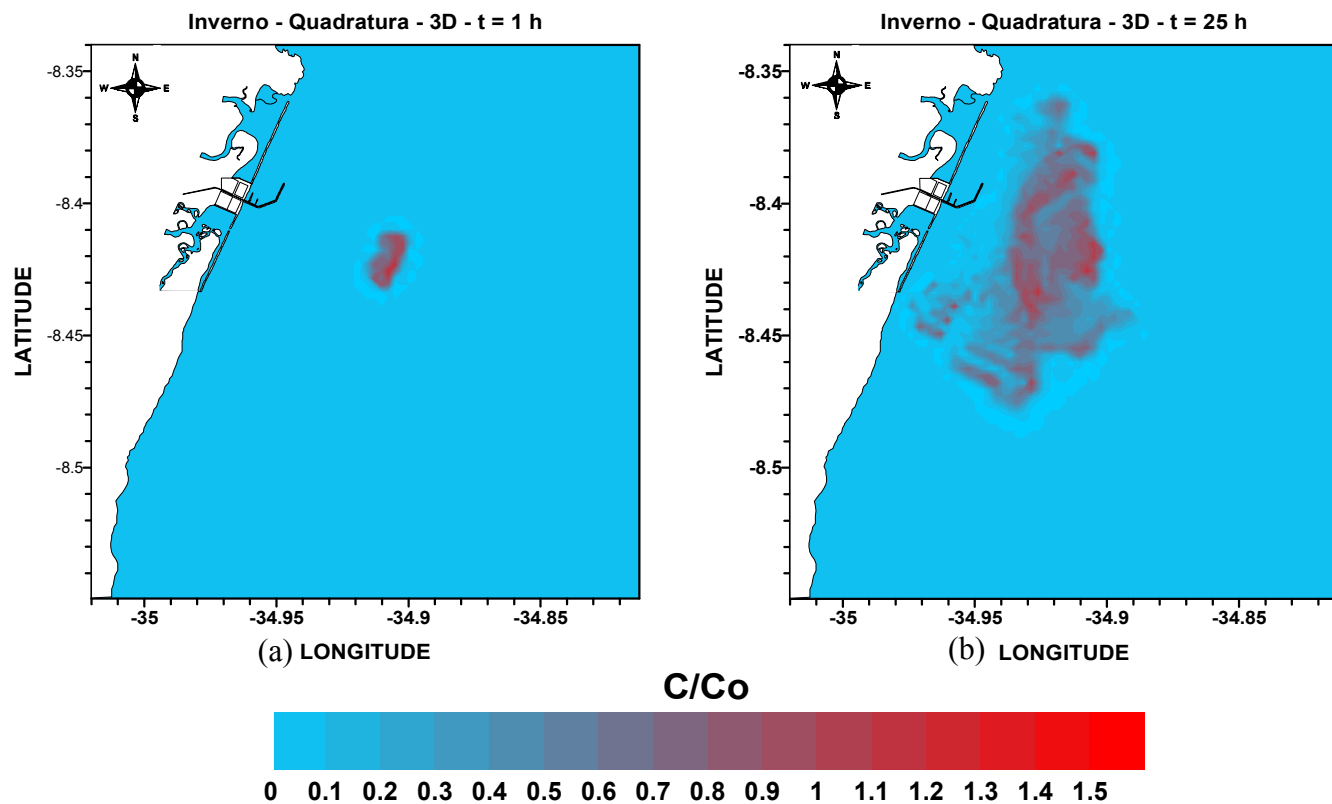


Figura B24. Plumas lançadas em : (a) 3D - 1 hora depois do lançamento e (b) 3D - no instante de chegada à costa.

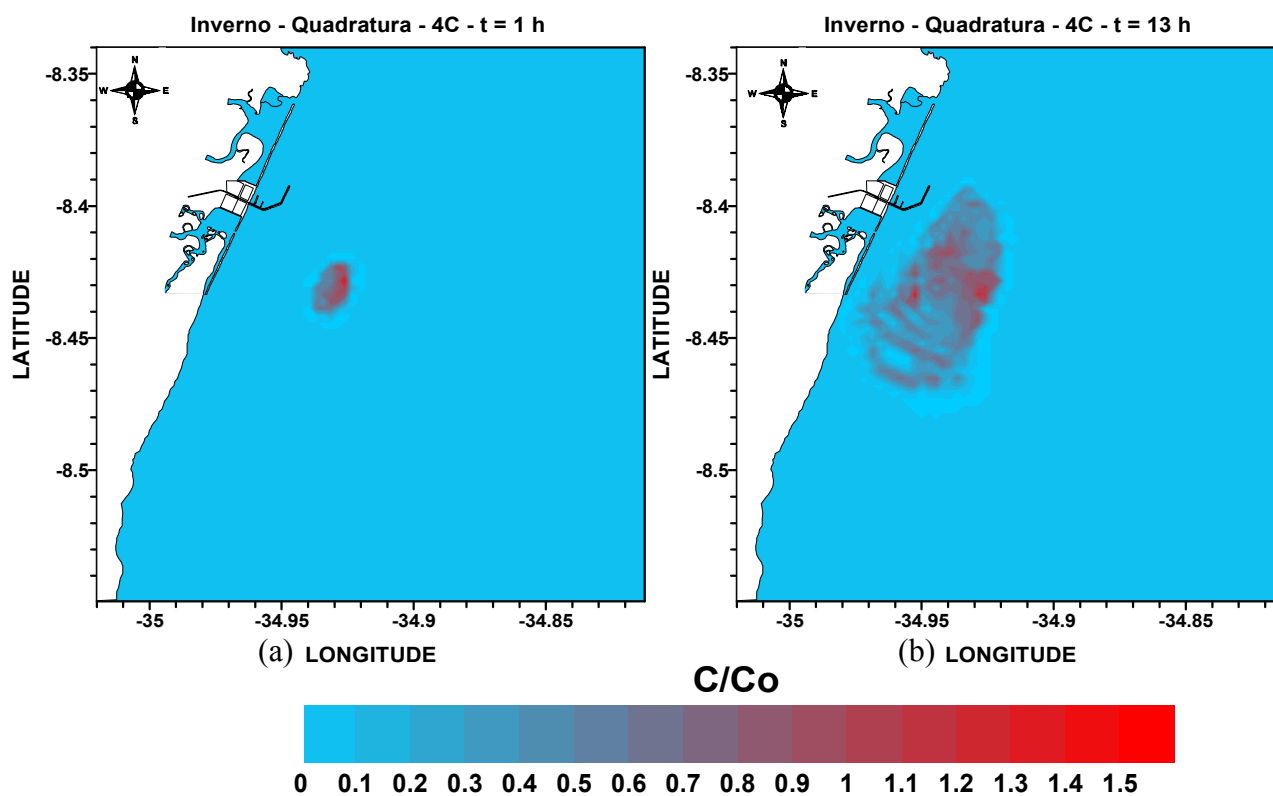


Figura B25. Plumas lançadas em : (a) 4C - 1 hora depois do lançamento e (B) 4C - no instante de chegada à costa.

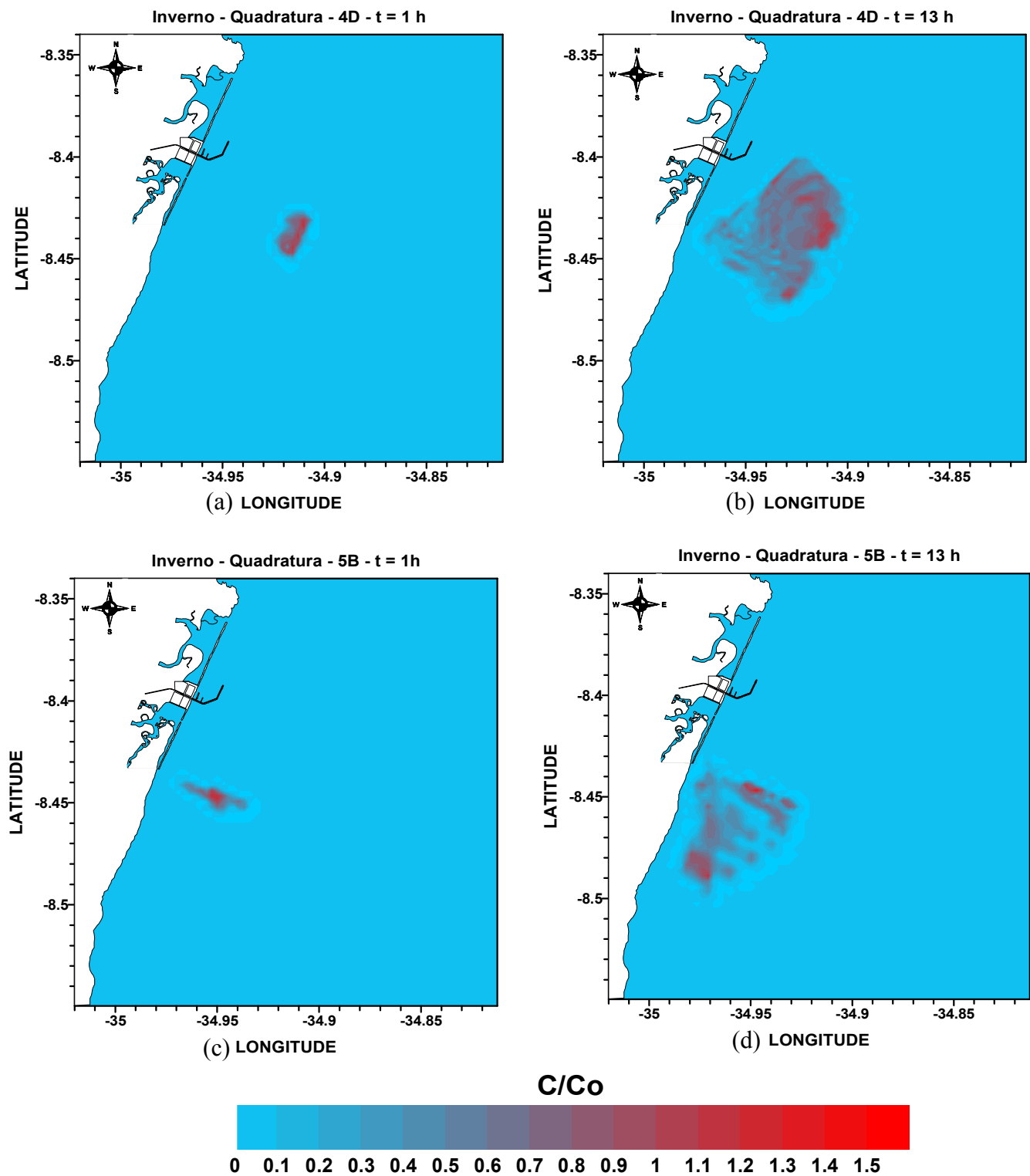


Figura B26. Plumas lançadas em : (a) 4D -1 hora depois do lançamento e (b) 4D - no instante de chegada à costa. (c) 5B - 1 hora depois do lançamento e (d) 5B - no instante de chegada à costa.

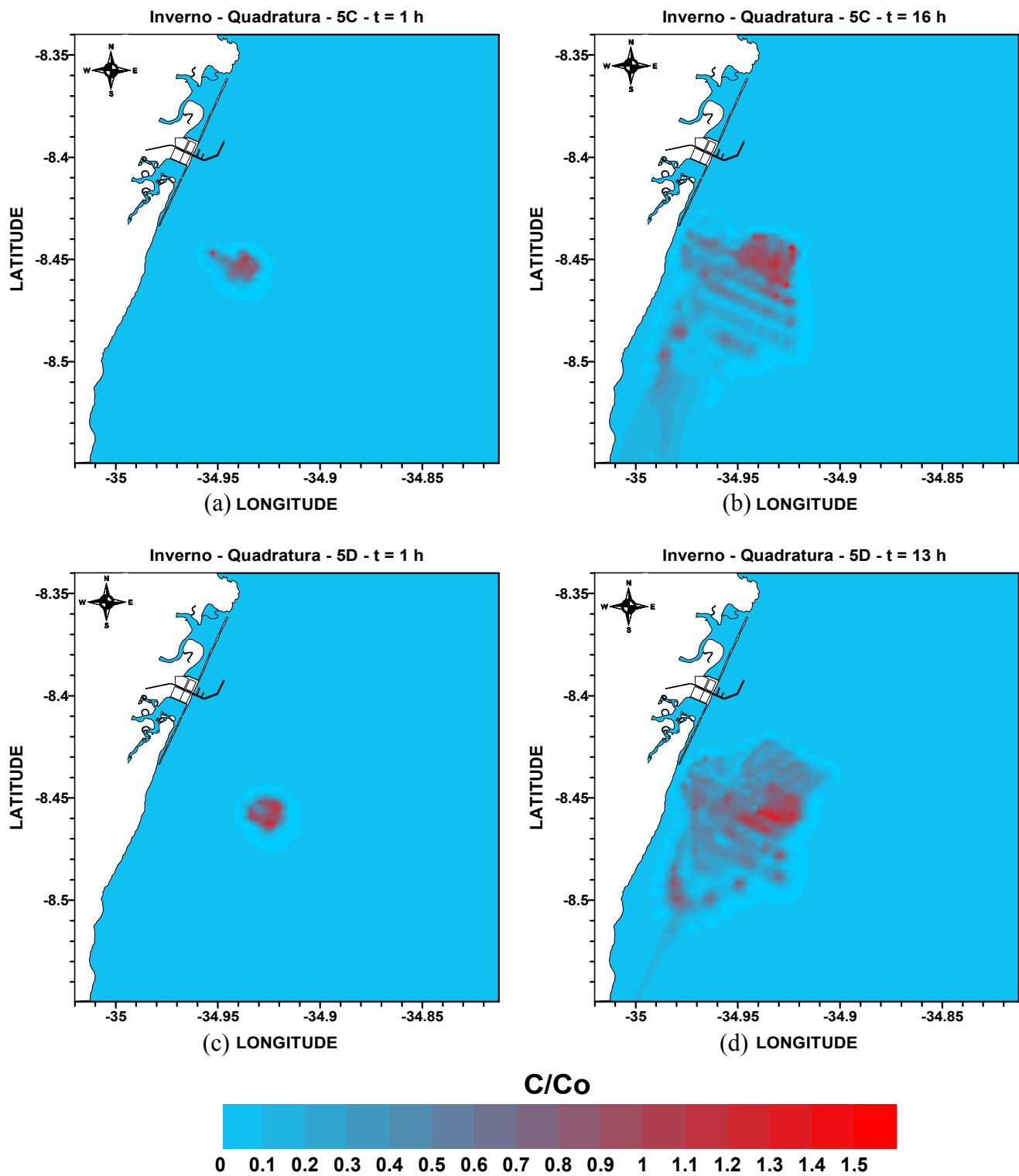


Figura B

27. Plumas lançadas em : (a) 5C -1 hora depois do lançamento e (b) 5C - no instante de chegada à costa. (c) 5D - 1 hora depois do lançamento e (d) 5D - no instante de chegada à costa.

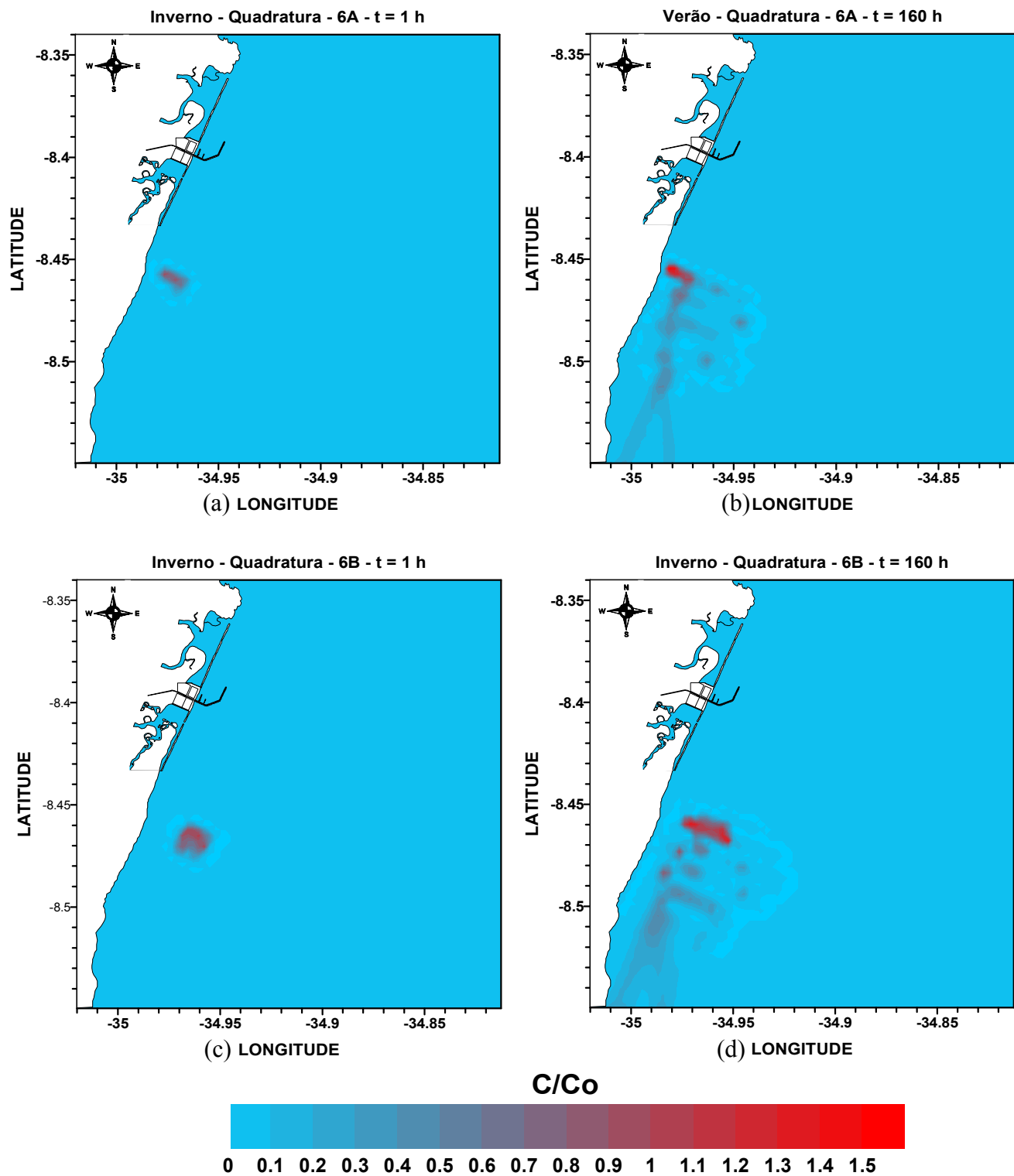


Figura B28. Plumas lançadas em : (a) 6A -1 hora depois do lançamento e (b) 6A - no instante de chegada à costa. (c) 6B - 1 hora depois do lançamento e (d) 6B - no instante de chegada à costa.

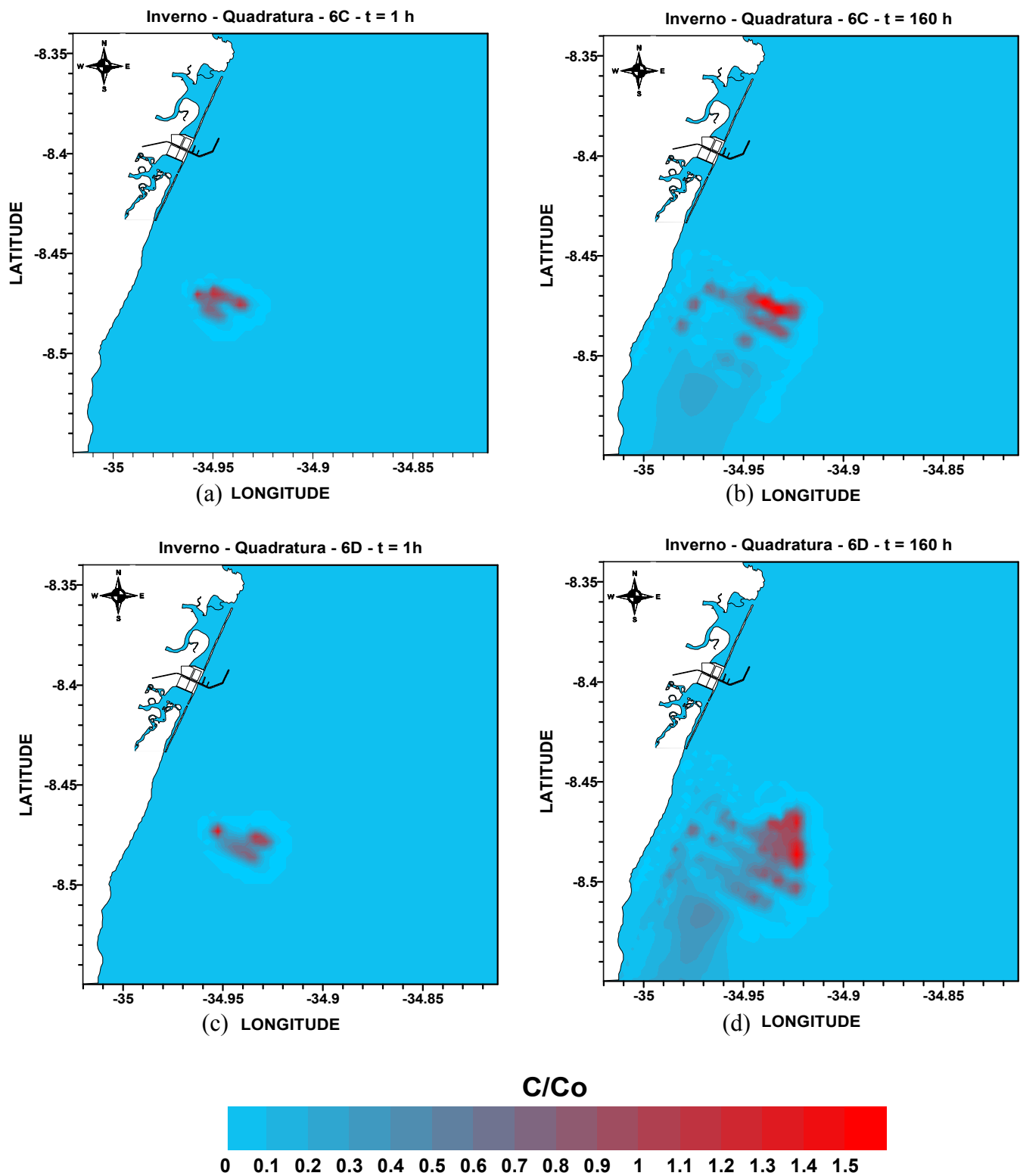


Figura B29. Plumas lançadas em : (a) 6C -1 hora depois do lançamento e (b) 6C - no instante de chegada à costa. (c) 6D - 1 hora depois do lançamento e (d) 6D - no instante de chegada à costa.

B.4 – Plumas lançadas no inverno sizígia

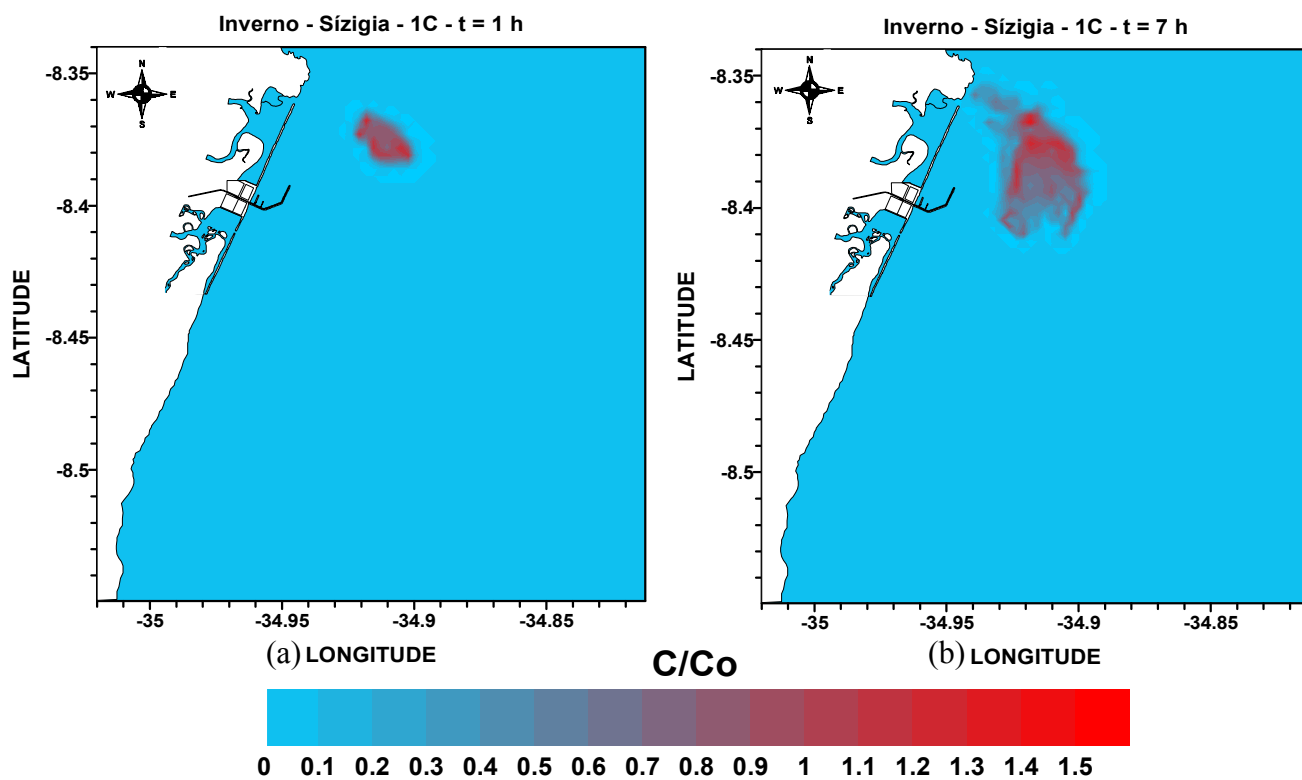


Figura B30. Plumas lançadas em : (a) 1C - 1 hora depois do lançamento e (b) 1C - no instante de chegada à costa.

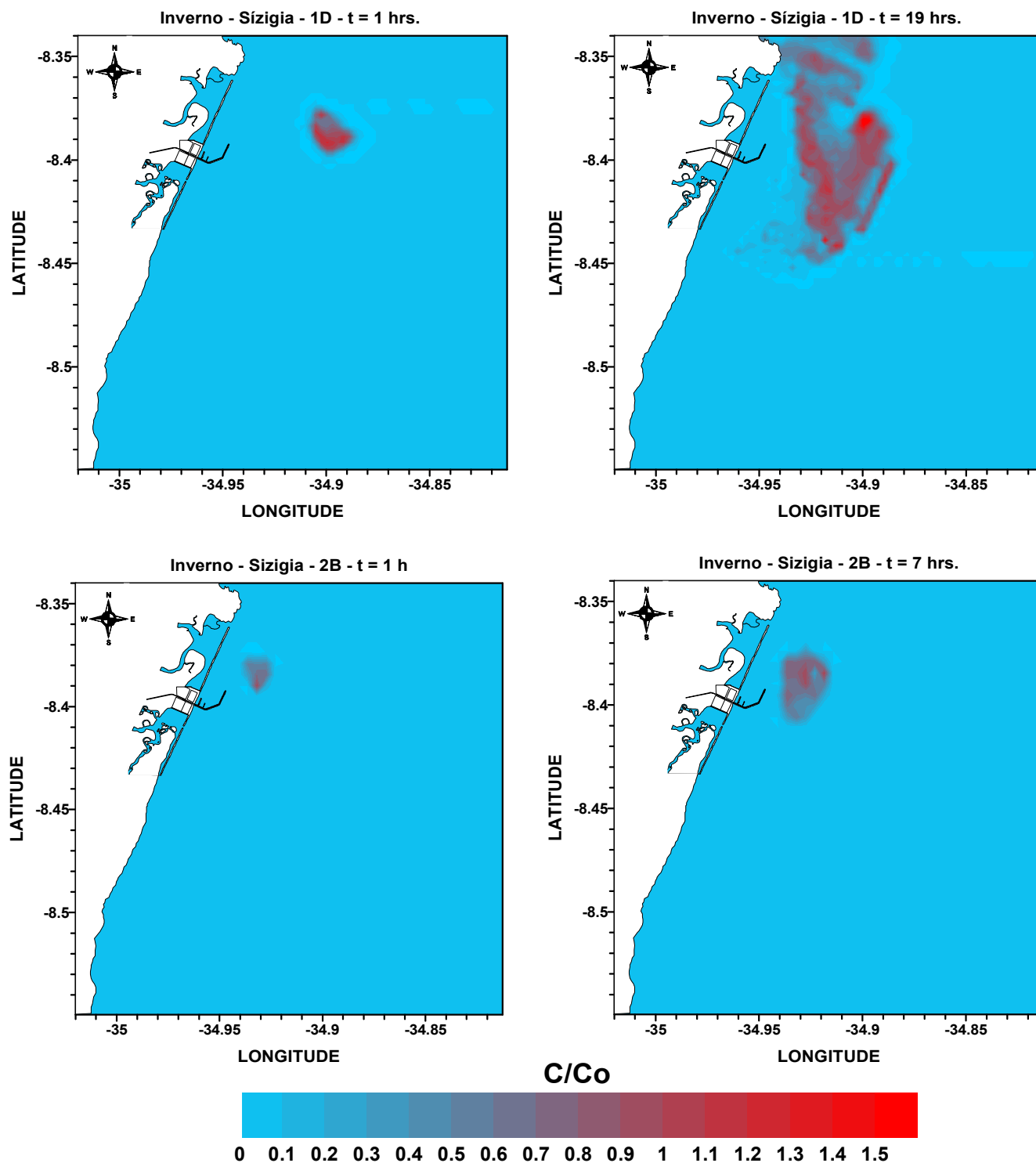


Figura B31. Plumas lançadas em : (a) 1D -1 hora depois do lançamento e (b) 1D - no instante de chegada à costa. (c) 2B - 1 hora depois do lançamento e (d) 2B - no instante de chegada à costa.

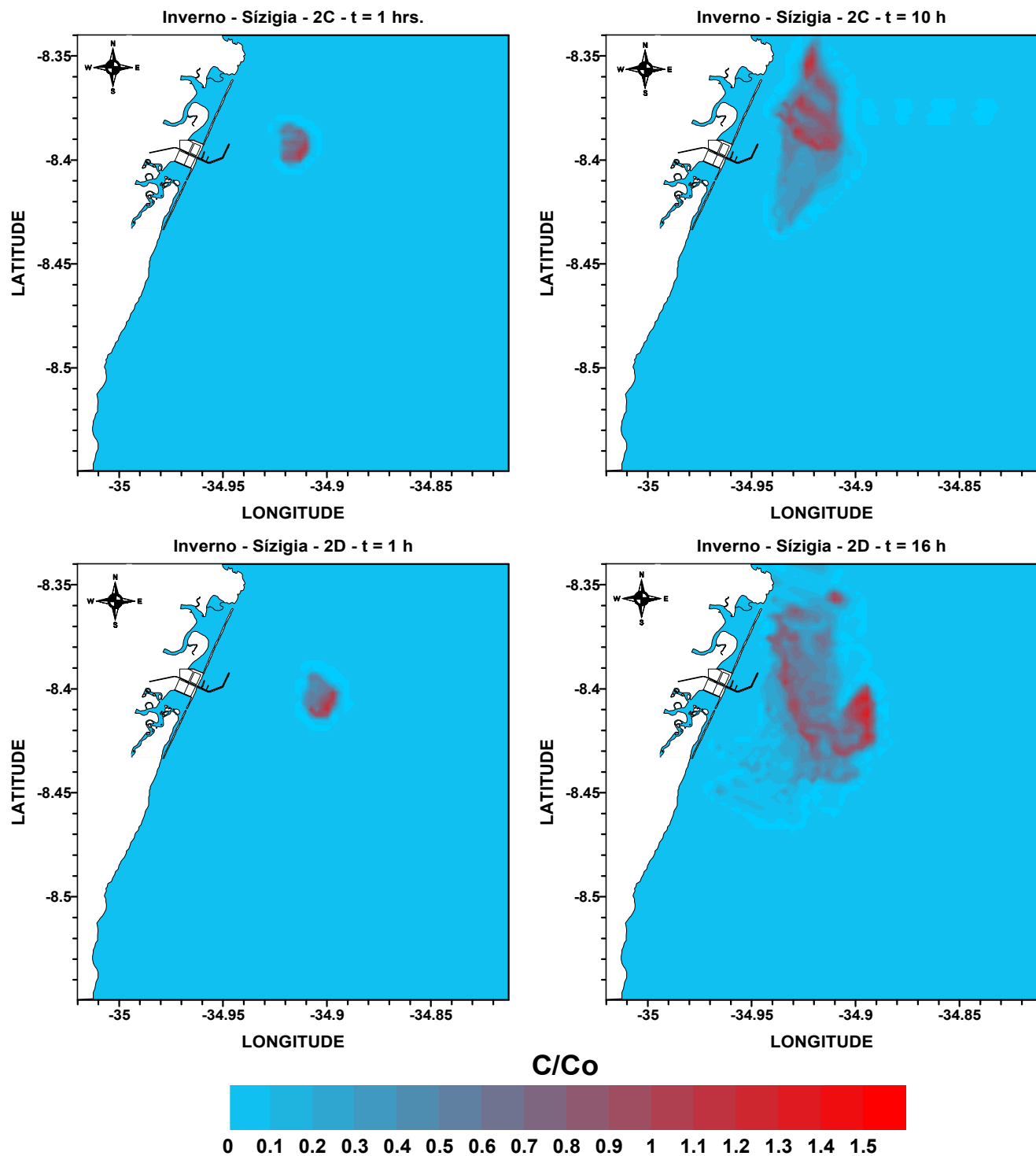


Figura B32. Plumas lançadas em : (a) 2C -1 hora depois do lançamento e (b) 2C - no instante de chegada à costa. (c) 2D - 1 hora depois do lançamento e (d) 2D - no instante de chegada à costa.

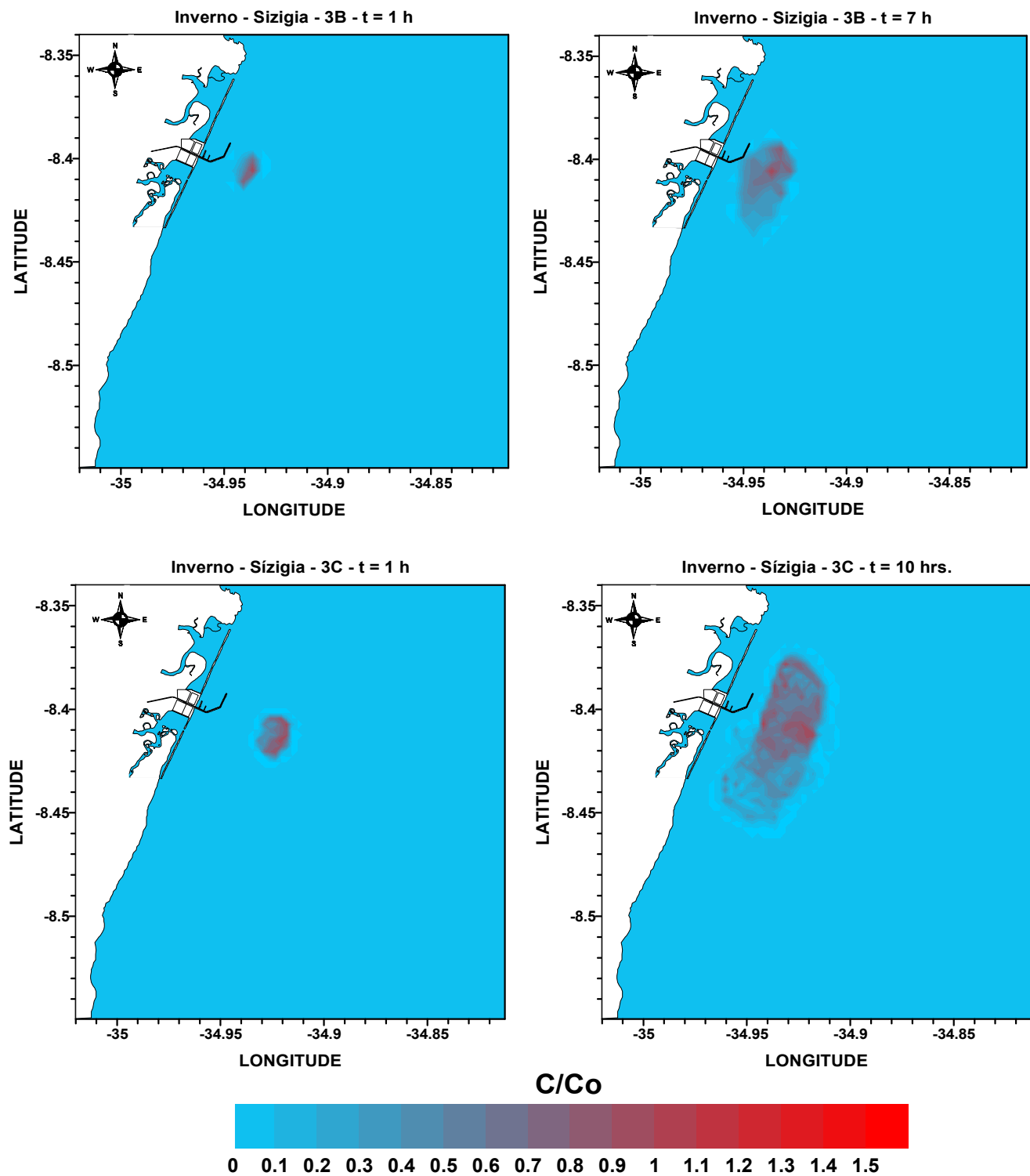


Figura B33. Plumas lançadas em : (a) 3B -1 hora depois do lançamento e (b) 3B - no instante de chegada à costa. (c) 3C - 1 hora depois do lançamento e (d) 3C - no instante de chegada à costa.

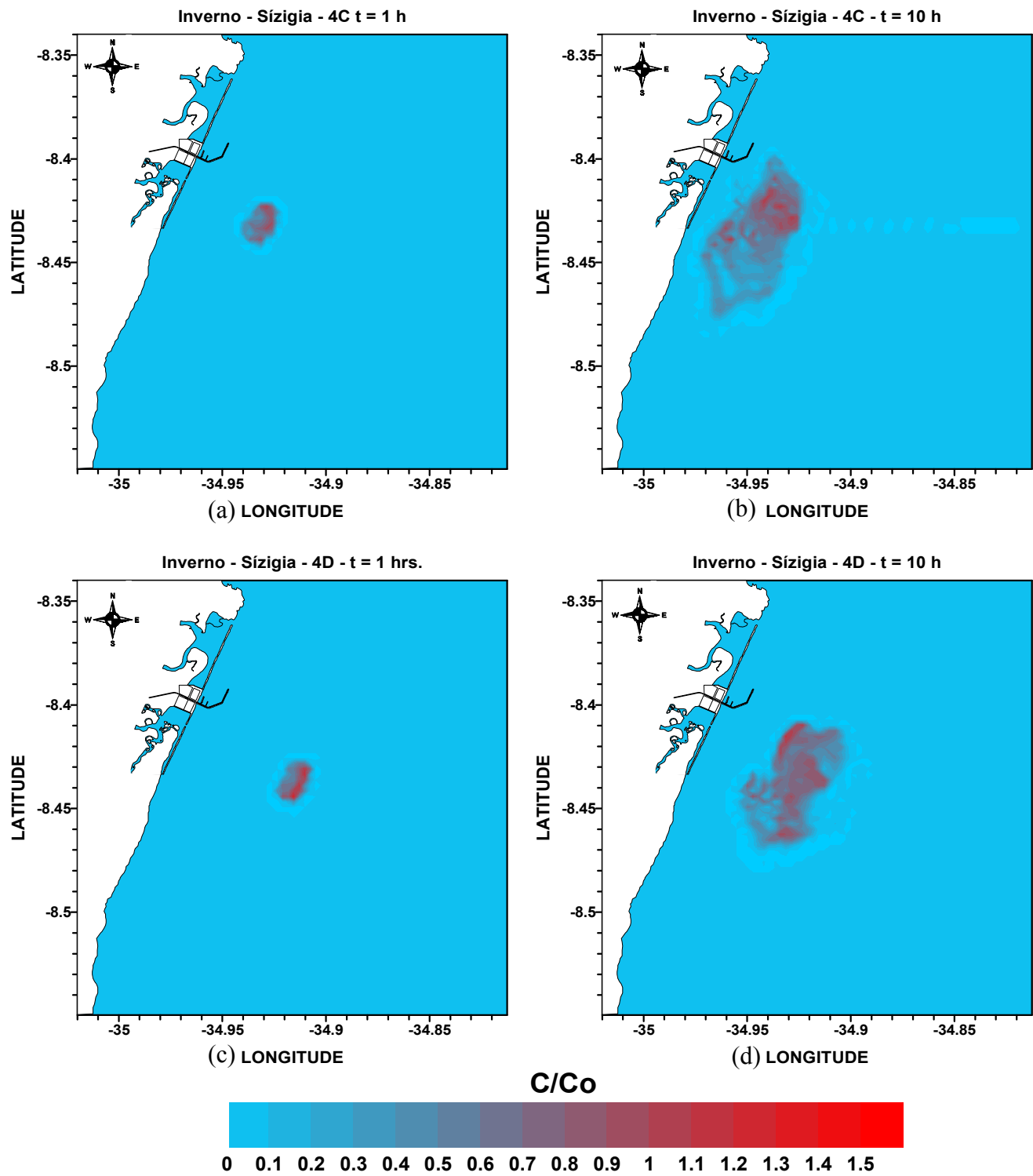


Figura B34. Plumas lançadas em : (a) 4C -1 hora depois do lançamento e (b) 4C - no instante de chegada à costa. (c) 4D - 1 hora depois do lançamento e (d) 4D - no instante de chegada à costa.

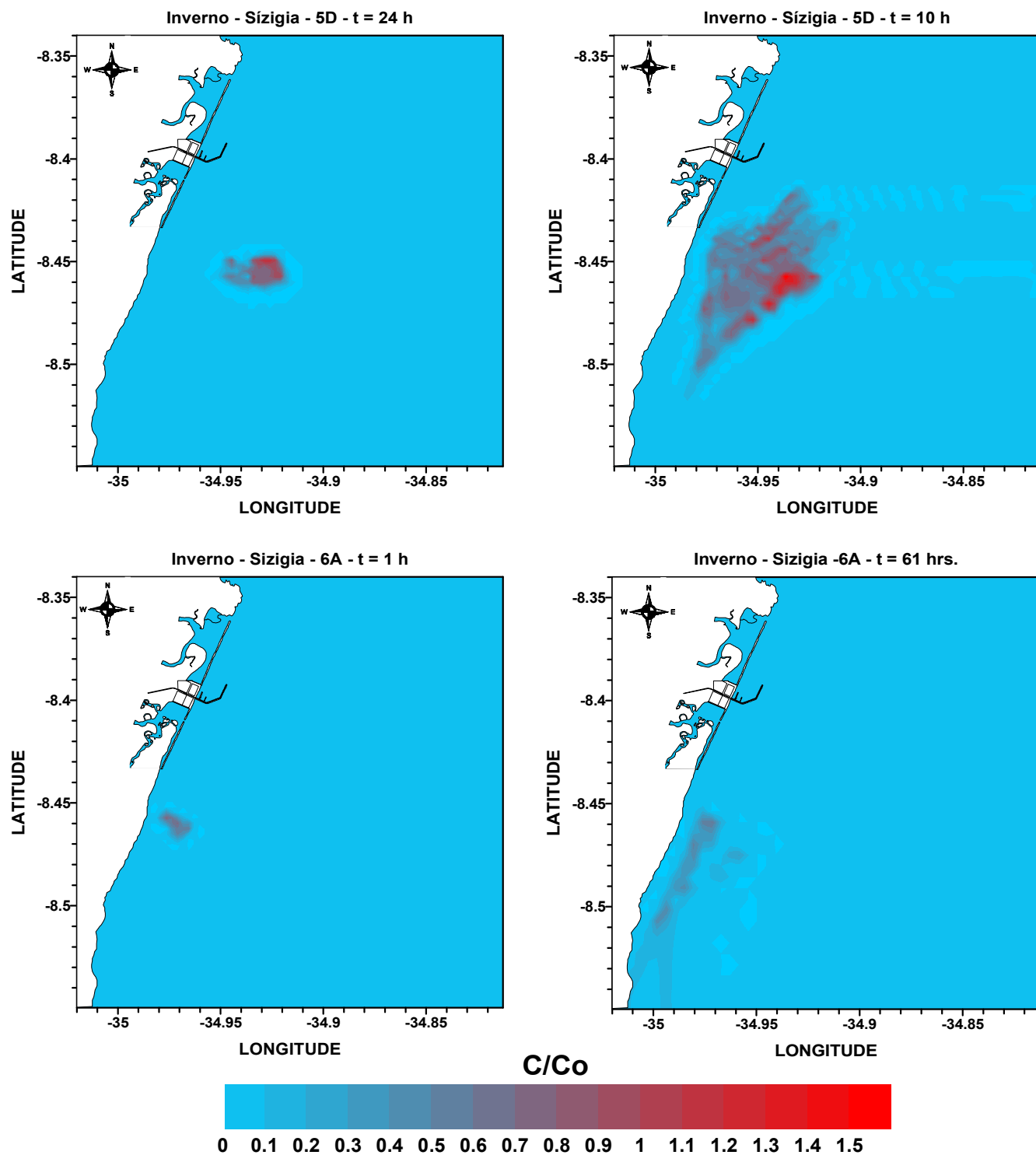


Figura B35. Plumas lançadas em : (a) 5D -1 hora depois do lançamento e (b) 5D - no instante de chegada à costa. (c) 6A - 1 hora depois do lançamento e (d) 6A - no instante de chegada à costa.

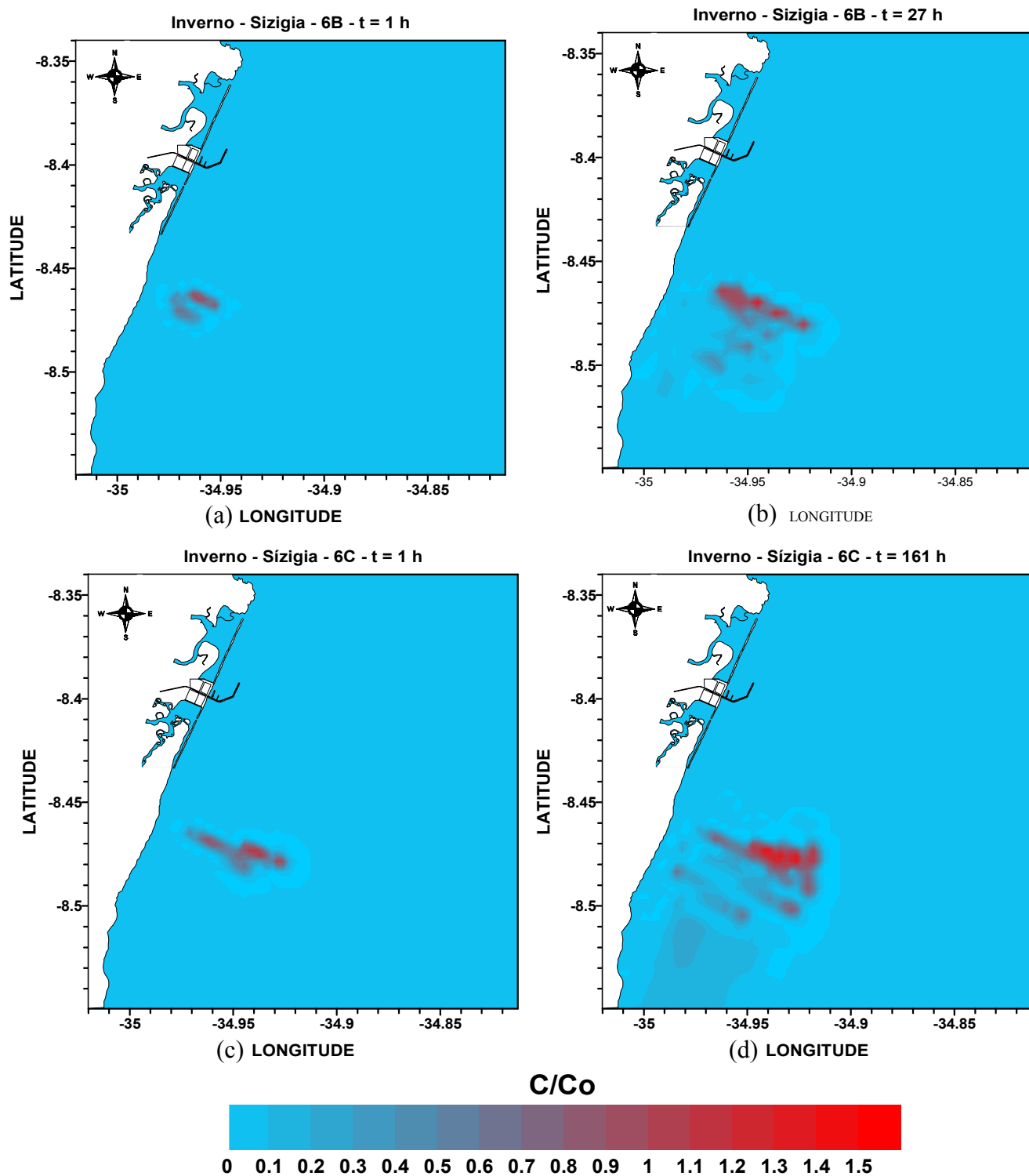


Figura B36. Plumas lançadas em : (a) 6B - 1 hora depois do lançamento e (b) 6B - no instante de chegada à costa. (c) 6C - 1 hora depois do lançamento e (d) 6C - no instante de chegada à costa.

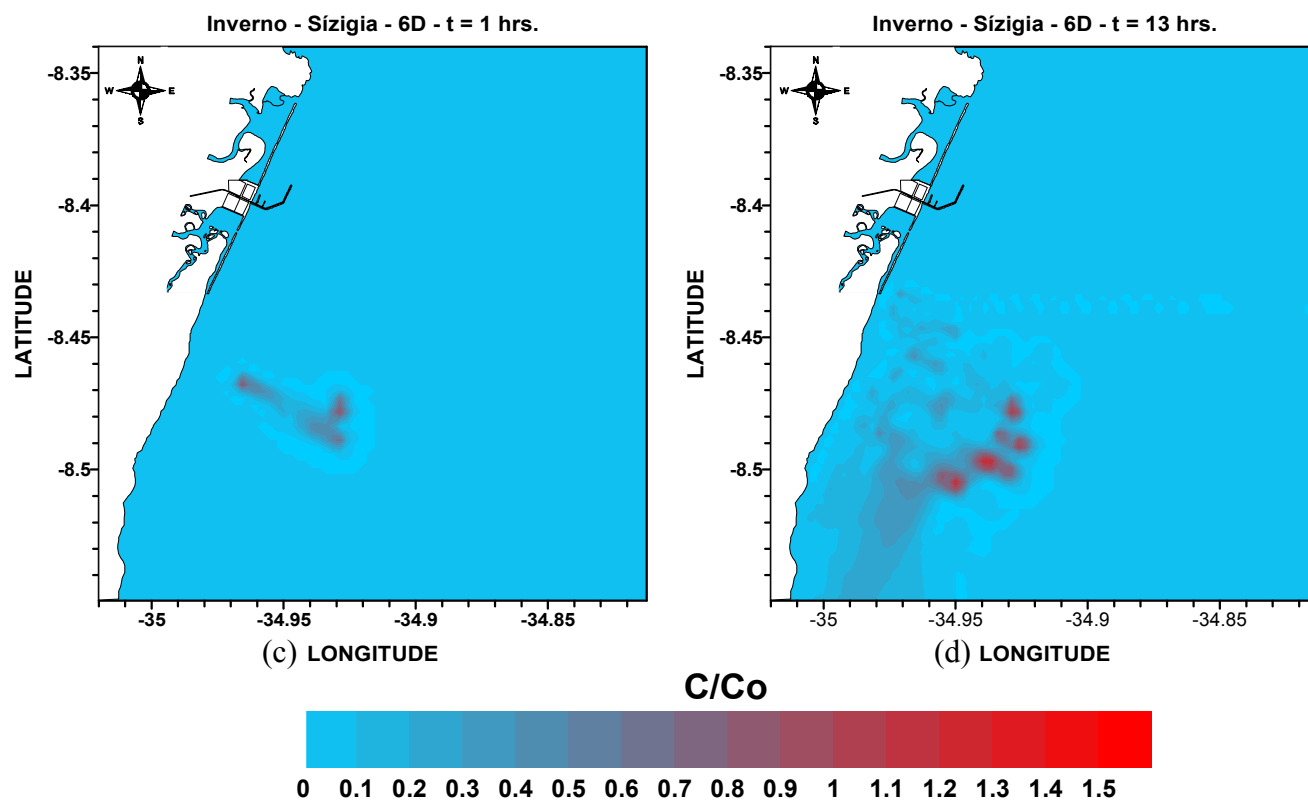
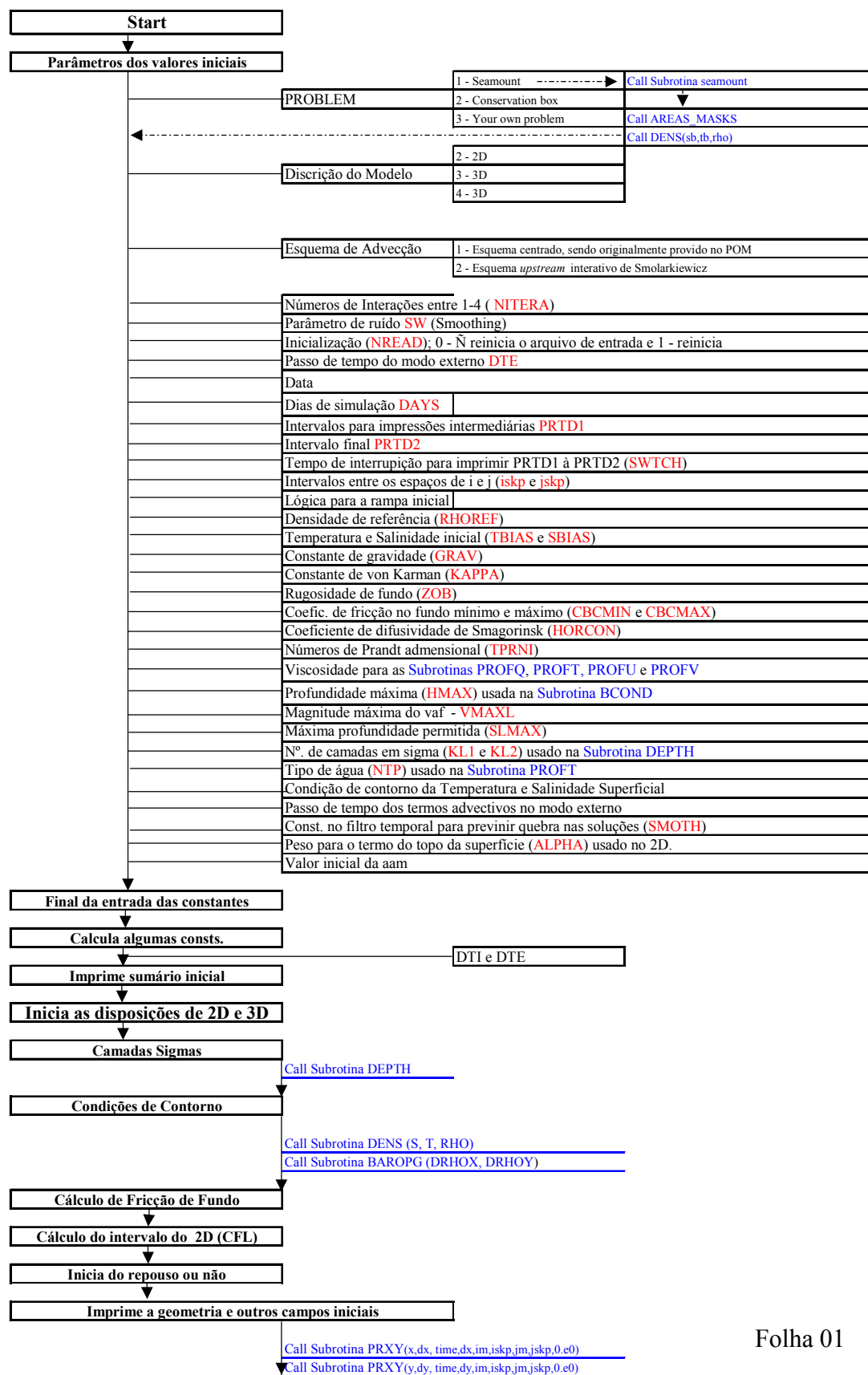
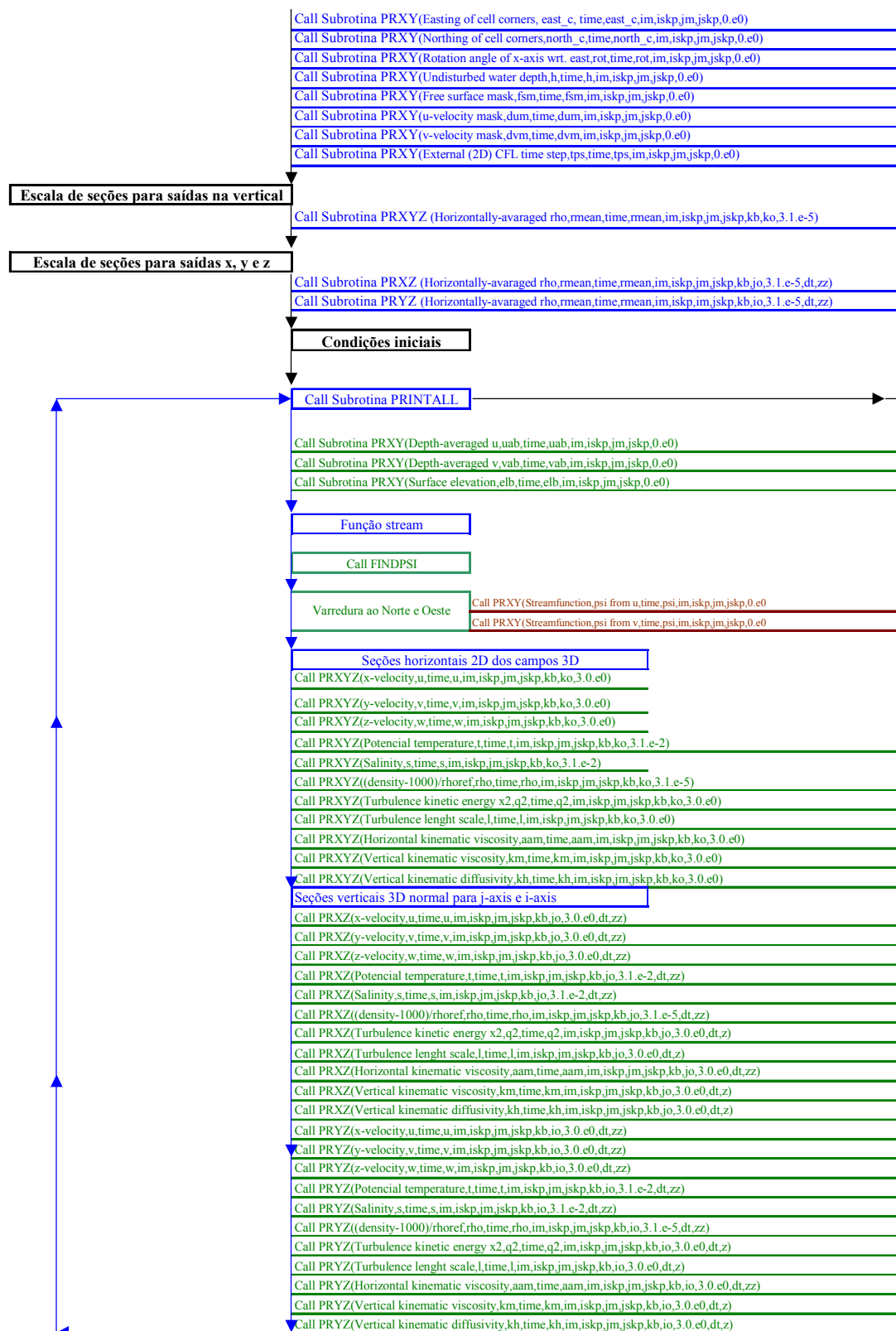


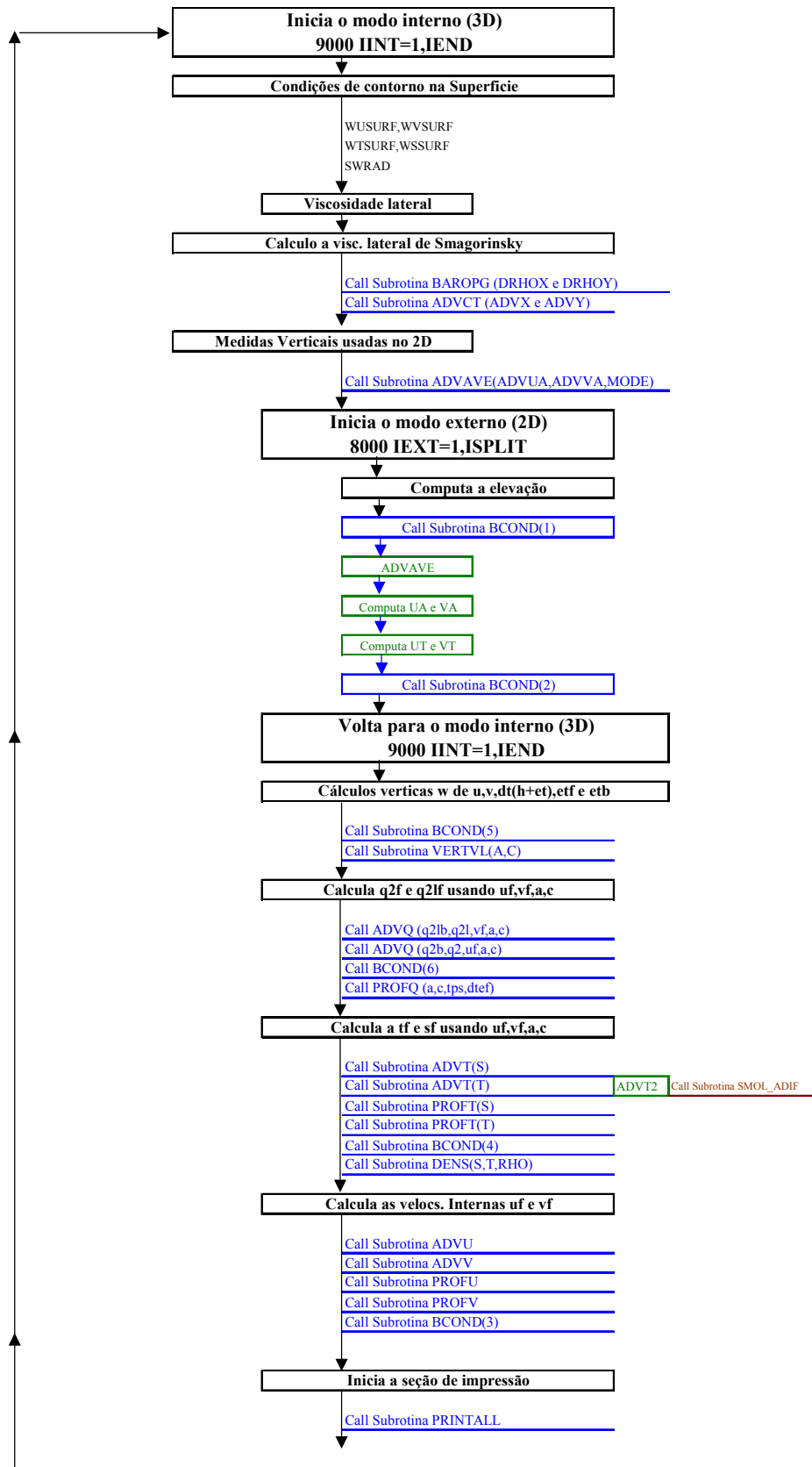
Figura B37. Plumas lançadas em : (a) 6D -1 hora depois do lançamento e (b) 6D - 1 hora depois do lançamento.

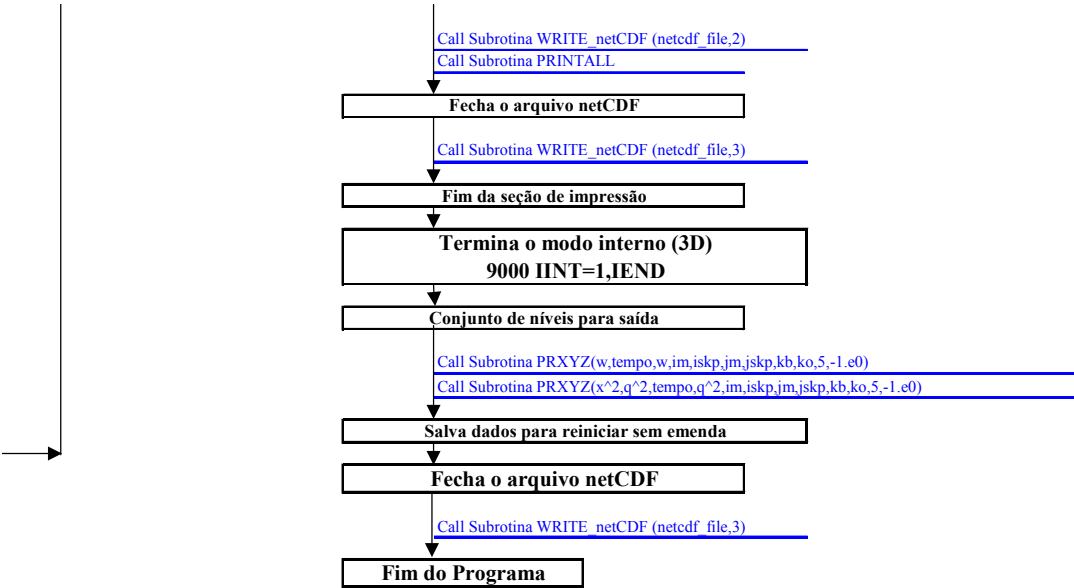
APÊNDICE 1

Esquematização do POM









Legenda	
	Sequência do Programa Principal
	Sequência dos Programas Secundários (Subrotinas)
	Sequência do Problema Seamount
ETAPAS DO PROGRAMA PRINCIPAL	
CONSTANTES	
1º ORDEM DE SUBROTINAS	
2º ORDEM DE SUBROTINAS	
3º ORDEM DE SUBROTINAS	

OBS: Para mais detalhes do programa ver Mellor, 1990